CLEBER EDUARDO LORENZI

IMPACTOS AMBIENTAIS E ENERGÉTICOS PROVOCADOS PELA SUBSTITUIÇÃO DE MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA POR CÉLULAS A COMBUSTÍVEL EM VEÍCULOS AUTOMOTORES

SÃO CAETANO DO SUL

2009

Livros Grátis

http://www.livrosgratis.com.br

Milhares de livros grátis para download.

CLEBER EDUARDO LORENZI

IMPACTOS AMBIENTAIS E ENERGÉTICOS PROVOCADOS PELA SUBSTITUIÇÃO DE MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA POR CÉLULAS A COMBUSTÍVEL EM VEÍCULOS AUTOMOTORES

Dissertação Apresentada à Escola de Engenharia Mauá do Centro Universitário do Instituto Mauá de Engenharia para a Obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos

Linha de Pesquisa: Impacto Ambiental de Processos Industriais

Orientador: Prof. Dr. Roberto A. Peixoto

SÃO CAETANO DO SUL

2009

AGRADECIMENTO

Gostaria de deixar meus profundos agradecimentos ao Prof. Dr. Roberto Peixoto, pelo apoio e confiança oferecidos desde a primeira reunião sobre o tema, e pelo complemento acadêmico recebido em aula;

à minha esposa, Cristiane, por ser minha grande companheira mesmo nos momentos mais críticos e por me acompanhar nos trabalhos de campo;

aos meus filhos, por terem aceito a minha ausência durante vários dias, mesmo não entendendo o porquê;

e ao meus colegas Decio Stippe e Cesar Ponso, por terem dedicado seus preciosos tempos, em viagens de cunho profissional à Alemanha, em pesquisas, conversas e testes em veículos protótipos com células a combustível, auxiliando a elaboração de uma massa crítica de dados técnicos para iniciar este trabalho.

Gostaria de agradecer também aos professores convidados para a banca:

Prof. Dr. Otavio de Mattos Silvares, que tudo me ensinou sobre Termodinâmica durante minha graduação na Escola Politécnica;

e Prof. Dr. José Roberto Moreira, pelo seu belo trabalho de divulgação e discussão científica.

RESUMO

Este trabalho analisa de que forma a introdução em grande escala de veículos movidos por células a combustível a hidrogênio, em um cenário de substituição do atual modelo baseado em combustíveis fósseis queimados em motores de combustão interna, podem impactar, positivamente ou não, no meio ambiente. Um dos resultados revela que a redução do dióxido de carbono nos escapamentos é balanceada pelas emissões durante a fase de geração de eletricidade para produção de hidrogênio. Com isso, a fonte de energia pela qual a eletricidade é gerada para alimentar a eletrólise da água, que é uma das formas de produção de hidrogênio, pode influenciar diretamente no balanço de emissões de dióxido de carbono na atmosfera, evidenciando a necessidade de buscas de fontes limpas e renováveis de energia. No estudo realizado, o hidrogênio mostrou ser uma excelente alternativa em países como o Brasil, que possui uma matriz energética limpa e uma abundância de recursos hídricos, podendo reduzir as emissões de dióxido de carbono geradas pelo uso de automóveis em 79%, porém inviável, do ponto de vista de mitigador do efeito estufa, em países com matriz energética fóssil, como os EUA, por exemplo, que poderia aumentar as emissões em 45%. Apesar de não emitir dióxido de carbono e outros poluentes durante a fase de uso dos veículos com células a combustível de hidrogênio, as emissões de CO_2 na fase de geração de energia elétrica para produção do hidrogênio através da eletrólise podem superar as emissões de um veículo convencional a gasolina ou diesel. Já o etanol pode ser considerado um combustível 'limpo', uma vez que absorve toda a sua emissão de CO_2 na fase de crescimento e respiração de novas plantações de cana-de-açúcar. Este, por sua vez, se utilizado para produção de hidrogênio via reforma em células a combustível, reduz as emissões de dióxido de carbono em 93%. Quando utilizado nos atuais motores de combustão interna, reduz as emissões em 76%. A vantagem das células neste caso é que seriam reduzidas as emissões de óxidos de nitrogênio. As células a hidrogênio emitem 6,9% a mais de vapores de água do que os motores de combustão interna a gasolina, porém em menor quantidade quando comparada aos veículos com motores convencionais a etanol, que emitem 30% a mais que a gasolina. Este trabalho concluiu que a dependência exclusiva de uma única fonte de energia é insustentável em um intervalo menor que um século, e que a melhor alternativa seria um equilíbrio entre as células a combustível de hidrogênio produzido por eletrólise em países com matriz energética limpa, células a combustível com reforma de etanol e até mesmo motores de combustão interna movidos a etanol.

ABSTRACT

This paper analyzes the introduction in great scale of vehicles moved by hydrogen fuel cells as a substitute of the current model based on burned fossil fuels in internal combustion engines, and its impacts, positives or negatives, in the environment. One of the results reveals that the reduction of the carbon dioxide in the exhaust is balanced by the emissions during the phase of electricity generation for hydrogen production. The source of energy for the electricity generation to feed the process of electrolysis of the water, that is one of few ways to obtains hydrogen, can influence directly the balance of carbon dioxide emissions in the atmosphere, evidencing the need of searches of cleaner and renewable sources of energy. In this study, the hydrogen appeared to be an excellent alternative in countries like Brazil, that has clean sources of energy and an abundance of hydrics resources, where it could reduce the carbon dioxide emissions generated by the use of automotive vehicles in 79%, however unviable, considering the greenhouse effect mitigation, in countries with source of energy based on fossil fuels, like the USA, for instance, that could increase the emissions in 45%. In spite of not emitting carbon dioxide and other pollutant when using the vehicles with hydrogen fuel cells, the emissions of CO_2 in the phase of electricity generation for production of the hydrogen through the electrolysis can overcome the emissions of a conventional vehicle burning gasoline or diesel. Already the ethanol can be considered a fuel 'clean', because it absorbs all its emission of CO_2 in the growth phase and breathing of new sugarcane plantations. If ethanol reforms in fuel cells is used for hydrogen production, it reduces the carbon dioxide emissions in 93%. When used in the current internal combustion engines, it reduces the emissions in 76%. The advantage of the fuel cells in this case is that they would reduce the emissions of nitrogen oxides. The hydrogen fuel cells emit 6.9% more water steam than combustion engine using gasoline, however in smaller amount when compared to the vehicles with ethanol engines, that emit 30% more CO_2 than the gasoline. This work concluded that the exclusive dependence of a single source of energy is unsustainable in a short period than one century, and that the best alternative would be a balance among the hydrogen fuel cells using electrolysis in countries with a clean source of energy, reform of ethanol in fuel cells and even internal combustion engines moved by ethanol.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIG. 4.1 – Princípio de funcionamento de uma célula a combustível 24
FIG. 4.2 – Comparação entre os limites de eficiência para os vários sistemas existentes ... 25
FIG. 4.3 – Volume de controle para uma célula a combustível hidrogênio-oxigênio..... 28
FIG. 4.4 – Relação carbono/hidrogênio para os combustíveis utilizados usualmente 39
FIG. 4.5 – Fontes de hidrogênio para a célula a combustível..... 41
FIG. 4.6 – Equipamento para reforma a vapor..... 42
FIG. 4.7 – Equipamento para eletrólise da água..... 44
FIG. 4.8 – Emissões globais de CO_2 por veículos, presumindo nenhuma melhoria na eficiência dos motores 52
FIG. 4.9 – Projeção de substituição da frota americana de veículos com motores de combustão interna pelos veículos elétricos..... 53
FIG. 4.10 – Mapa de fluxo de distribuição mundial de petróleo. 57
FIG. 4.11 – Curva de Hubbert para produção de petróleo nos EUA..... 59
FIG. 4.12 – Ciclo do Carbono para o combustível proveniente da biomassa 60
FIG. 4.13 – Evolução da produção de veículos no Brasil por tipos de combustível..... 63
FIG. 4.14 – Distribuição das plantações de cana-de-açúcar no Brasil 66
FIG. 4.15 – Comportamento da atmosfera terrestre mediante incidência da radiação solar. 74
FIG. 4.16 – Concentração atmosférica global de CO_2..... 75
FIG. 5.1 – Comparação da emissão total de CO_2 em função da distância percorrida por um veículo, durante o ciclo de vida dos combustíveis analisados, considerando o ciclo aberto para o carbono..... 93
FIG. 5.2 – Comparação da emissão total de CO_2 em função da distância percorrida por um veículo, durante o ciclo de vida dos combustíveis analisados, considerando o ciclo fechado para o carbono..... 94
FIG. 6.1 – Comparação da emissão total de vapor de água durante a fase de uso dos combustíveis analisados, considerando a previsão de crescimento da frota mundial. 102
FIG. 6.2 – Comparação da emissão total de CO_2 durante o ciclo de vida dos combustíveis analisados considerando a previsão de crescimento da frota mundial. 103
FIG. 6.3 – Comparação percentual da emissão total de CO_2 durante o ciclo de vida dos combustíveis analisados considerando a previsão de crescimento da frota mundial. 104
FIG. 6.4 – Mapa de fluxo de etanol como combustível para substituição dos combustíveis fósseis (previsão)..... 110

LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1: Veículos com células a combustível em desenvolvimento pelas montadoras. 55
TABELA 4.3: Previsão de aumento da produtividade da cana de açúcar 66
TABELA 4.4: Balanço de energia na fase de produção da cana de açúcar 68
TABELA 4.5: Balanço de energia na fase de produção de etanol a partir a cana de açúcar 69
TABELA 4.6: Balanço de energia do ciclo de vida do etanol a partir a cana de açúcar..... 69
TABELA 4.7: Consumo energético na fase de produção do etanol..... 69
TABELA 5.1: Propriedades dos Combustíveis Produzidos pela Petrobrás 77
TABELA 5.2: Consumo energético e emissões de gases de efeito estufa na fase de produção dos combustíveis. 78
TABELA 5.5: Emissão de CO_2 para a produção de eletricidade em alguns países..... 81
TABELA 5.6 - Emissão de CO_2 para a produção de eletricidade por regiões..... 82
TABELA 5.7: Cálculo das emissões de CO_2 para os países e regiões em análise..... 82
TABELA 5.8: Comparação das emissões de CO_2 e energia gasta para a produção dos combustíveis..... 85
TABELA 5.9: Parâmetros para veículos com motores de combustão interna a gasolina 86
TABELA 5.10: Objetivos para redução de emissões de dióxido de carbono na Europa..... 87
TABELA 5.11: Taxas de emissões de CO_2 por veículo de algumas marcas nos principais mercados consumidores..... 87
TABELA 5.12: Parâmetros para veículos com motores de combustão interna a álcool. 88
TABELA 5.13: Consumo de H_2 e emissão de H_2O em veículos protótipos movidos por células a combustível de hidrogênio 89
TABELA 5.14: Valores de referência para veículos protótipos movidos por células a combustível de hidrogênio 90
TABELA 5.15: Comparação entre os combustíveis analisados..... 90
TABELA 5.16: Comparação de emissões de CO_2 entre os combustíveis analisados 90
TABELA 5.17: Comparação entre as emissões de CO_2 por unidade de energia disponibilizada pelos combustíveis analisados. 91
TABELA 5.18: Comparação entre as emissões de CO_2 por unidade de distância dos combustíveis analisados..... 91
TABELA 5.19: Comparação entre as emissões de CO_2 por unidade de distância dos combustíveis analisados, considerando o ciclo fechado para o carbono..... 93
TABELA 5.20: Comparação global entre as emissões de CO_2 nas fases de produção e uso dos combustíveis, considerando o ciclo de carbono aberto e fechado..... 96
TABELA 5.21: Comparação entre as emissões de H_2O dos combustíveis analisados..... 96
TABELA 5.22: Previsão de demanda de gasolina e petróleo para este século. 97
TABELA 5.23: Previsão de demanda de etanol para o século XXI 98
TABELA 5.24: Previsão da demanda de água em função do consumo de água para eletrólise. 99
TABELA 5.25: Previsão de demanda de etanol para reforma, para o século XXI 99
TABELA 5.26: Previsão de demanda de gás natural para o século XXI 100
TABELA 6.1: Previsão da demanda de água em função do crescimento populacional e do consumo de água para eletrólise. 106
TABELA 6.2: Previsão da demanda de etanol em função do crescimento da frota mundial de veículos leves. 109
TABELA 6.3: Resumo dos quatro cenários previstos..... 112

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

e – carga do elétron

F – Constante de Faraday (96.500 C/e)

g – Função de Gibbs

g_f – Função de Gibbs de formação

GN – Gás natural

GNV – Gás natural veicular

h – Entalpia

h_f – Entalpia de formação

HC – Hidrocarbonetos

I – Corrente elétrica

MCI – Motor de combustão interna

n – número de elétrons

n_e – número de moles na entrada

n_s – número de moles na saída

No – Número de Avogadro (6,022136 . 10^{23} l/mol)

NOx – Óxidos de nitrogênio

Pe – Potência Elétrica

q – carga elétrica

Q – Calor

Q_{O_2} – Vazão volumétrica de oxigênio

Q_{H_2O} – Vazão volumétrica de água

Q_{H_2} – Vazão volumétrica de hidrogênio

Q_{AR} – Vazão volumétrica de ar atmosférico

S – Entropia

SOx – Óxidos de enxofre

T – Temperatura

To – Temperatura do meio

V - Tensão

Vc – Tensão da célula

W – Trabalho

We – Energia elétrica útil

Wrev – Trabalho reversível

η - Eficiência

GLOSSÁRIO

Anodo – Eletrodo ou pólo positivo de um circuito..

Catalisador – Substância que promove a catálise, alterando a velocidade de reação, e aparecendo inalterada quimicamente no fim da reação.

Catodo – Eletrodo ou pólo negativo de um circuito.

Eletrodo – Condutor usado para estabelecer contato elétrico com uma porção não metálica de um circuito.

Eletrolisador – Equipamento que, através da corrente elétrica, decompõe uma substância em íons.

Eletrólise – Separação dos íons de um corpo por meio de corrente elétrica.

Reforma – Utilização de energia térmica para separar elementos químicos, e envolve a reação das substâncias em superfícies catalíticas.

ÍNDICE

INTRODUÇÃO 13
2. OBJETIVOS 19
3. METODOLOGIA 20
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 22
4.1 Células a Combustível 22
4.1.1 Histórico 22
4.1.2 Fundamentos 22
4.1.3 As células a combustível, as baterias e os motores de combustão interna 25
4.1.4 Emissões das células a combustível 27
4.1.5 Análise termodinâmica de células a combustível 27
4.1.6 Modelagem matemática para as células a combustível 34
4.2 Hidrogênio 38
4.2.1 A Economia do Hidrogênio 40
4.2.2 Produção de Hidrogênio 41
4.2.3 Infraestrutura 46
4.2.4 Armazenamento 47
4.3 Veículos Automotores 49
4.3.1 Os veículos automotores e a poluição atmosférica 51
4.3.2 Volume de veículos em circulação no Brasil e no mundo 52
4.3.3 Evolução da frota de veículos a hidrogênio 53
4.3.4 Veículos movidos por células a combustível 54
4.4 Combustíveis Fósseis 56
4.4.1 Petróleo 56
4.4.2 A curva de Hubbert 58
4.4.3 Duração das reservas de petróleo no Brasil e a produção no mundo 59
4.5 Biocombustíveis 60
4.5.1 Etanol 62
4.5.2 Balanço energético para o etanol 66
4.5.3 Balanço de massa (CO_2) para o etanol 70
4.6 Efeito Estufa 72
4.6.1 O Efeito Estufa e as mudanças climáticas 72
4.6.2 Como ocorre o Efeito Estufa 73
5. ANÁLISE DAS EMISSÕES DE CO_2 77
5.1 Analisando a fase do 'poço ao tanque' 77
5.1.1 Emissão de CO_2 para a produção de gasolina e derivados do petróleo 77
5.1.2 Emissão de CO_2 para a produção de etanol 78
5.1.3 Emissão de CO_2 para a produção de hidrogênio por eletrólise da água 80
5.1.4 Emissão de CO_2 no processo de reforma de combustíveis 82
5.1.5 Comparações das emissões durante a fase de produção dos combustíveis 84
5.2 Analisando a fase 'do tanque às rodas' 85
5.2.1 Emissões de CO_2 e H_2O em veículos com motores de combustão interna a gasolina 85
5.2.2 Emissões de CO_2 e H_2O em veículos com motores de combustão interna a etanol ... 88
5.2.3 Consumo de H_2 e emissão de H_2O por veículos movidos por células a combustível de hidrogênio 88
5.2.4 Comparações das emissões durante a fase de 'uso' dos veículos 90
5.3 Analisando 'do Poço à Roda' 91
5.3.1 Emissões de Dióxido de Carbono 91
5.3.2 Emissões de Água 96
5.4 Analisando a demanda 97
5.4.1 Motores de Combustão Interna 97
5.4.2 Células de combustível 98
6. ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES 101
6.1 Impactos sobre o clima 101
6.2 Impactos sobre o abastecimento de água 104

6.3 Impactos sobre a geração e fornecimento de energia elétrica 106
6.4 Impactos sobre a evapotranspiração natural do planeta 107
6.5 Impactos na agricultura para cultivo da cana-de-açúcar.....108
6.6 Resumo dos cenários futuros previstos 111
7. CONCLUSÕES 113
8. BIBLIOGRAFIA 116
8.1 Referências Bibliográficas 116
8.2 Bibliografia Complementar 122
9. ANEXOS.....125
9.1 Tabelas 125

"Há na história raros momentos em que uma geração de seres humanos é agraciada com o Dom de remodelar suas relações com os semelhantes e com o mundo à sua volta. Este é um de tais momentos. Estamos sendo agraciados com a energia do Sol. O hidrogênio é uma nota promissória para o futuro da humanidade na Terra. Se esta promessa será desperdiçada em tentativas frustradas e oportunidades perdidas, ou se será usada sabiamente em prol de nossa espécie e das demais criaturas, é algo que só compete a nós decidir."
Jeremy Rifkin, 2002

"... A Terra está morrendo lentamente, e o inconcebível – o fim da própria vida – torna-se concebível. Nós, os próprios seres humanos, somos hoje uma ameaça ao nosso planeta..."
Rainha Beatriz da Holanda
Mensagem de Natal ao povo de seu país
Dezembro de 1988

"A Missão de nosso Projeto Mundial em Células de Combustível é nada menos do que nos tornar líderes na comercialização de veículos movidos por células de combustível."
Harry J. Pearce
Vice Presidente, General Motors

"We're altering the environment far faster than we can possibly predict the consequences. This is bound to lead to some surprises."
Dr. Stephen Schneider
National Center for Atmospheric Research

"Hydrogen has the potential to deliver genuinely clean energy and bring the fossil fuel age to a close. We need to make the right choices today so that we produce hydrogen in an environmentally-friendly way."
Stephen Tindale
Diretor do Greenpeace, Reino Unido

"I believe fuel cells will finally end the100 year reign of the internal combustion engine. Fuel cells run on hydrogen could be a predominant automotive power source in 25 years time."
Bill Ford
Chairman da Ford Motor Company

"Acredito que a água será um dia utilizada como combustível, que o hidrogênio e o oxigênio que a constituem, se usados separadamente ou juntos, irão fornecer uma fonte inexaurível de calor e luz..."
Julio Verne – A Ilha Misteriosa

INTRODUÇÃO

No ano de 1885, numa pequena cidade alemã, Karl Benz e Gottlieb Daimler obtiveram, pela primeira vez, sucesso na montagem de um motor de combustão interna em uma plataforma sobre rodas (PAGANINI *et al*, 200X). Nascia nesse momento o automóvel, atual fruto do desejo de independência e mobilidade, que veio a "encurtar" as distâncias entre as cidades, oferecendo conforto e *status* aos seus proprietários, e que potencializou o chamado "espírito de liberdade" ao homem da época. Uma máquina capaz de levá-lo em qualquer lugar, a qualquer momento.

Embora o motor para o automóvel fosse uma invenção alemã, foi a linha de montagem de produção em massa de Henry Ford que fomentou o início de uma nova era: a Era dos Combustíveis Fósseis. Ford viabilizou a comercialização e a difusão do mercado de automóveis para a maioria das classes sociais, e conseqüentemente fomentou o consumo desenfreado de combustíveis derivados do petróleo.

Os automóveis tornaram-se, então, a principal peça do capitalismo industrial durante todo o século XX, trazendo consigo o desenvolvimento de vários setores dependentes, entre eles o do aço, do alumínio, do cobre, do chumbo, do níquel, do zinco, da borracha e principalmente do petróleo.

Na verdade, os veículos automotores ainda hoje funcionam sob o mesmo conceito do final do século XIX. Seu funcionamento é baseado no consumo de combustíveis fósseis em motores de combustão interna, cuja eficiência do processo de conversão de energia do combustível para o movimento do veículo é limitada pelo ciclo termodinâmico de Carnot.

A massificação do automóvel como símbolo de *status* e como um substituto para as vulnerabilidades dos sistemas de transportes urbanos nas grandes cidades, está provocando o envenenamento da população e do próprio planeta. Os veículos automotores que queimam combustível em seus motores, sejam eles renováveis ou não, emitem gases resultantes do processo de combustão, que são muitas vezes nocivos ao homem e ao meio ambiente. Gás carbônico (CO_2), monóxido de carbono (CO), óxidos de enxofre (SOx), óxidos de nitrogênio (NOx), hidrocarbonetos (HC), e outros, são alguns exemplos dos produtos de combustão que saem de seus escapamentos.

Todavia, a dependência do atual modelo econômico baseado na Economia dos Combustíveis Fósseis, está levando a humanidade a uma crise ambiental sem

precedentes na história natural de nosso planeta: o aquecimento global provocado pelo efeito estufa.

Pela primeira vez desde a invenção do automóvel, um novo combustível apresenta-se capaz de aliar a utilização de veículos sem aumentar a poluição do ar e o efeito estufa. Este combustível é o hidrogênio (H_2), e, teoricamente, ele tem o potencial para mudar radicalmente o modo pelo qual a potência é gerada nesses veículos.

Nos últimos anos, no cenário político internacional, tem sido possível acompanhar o grande clamor da sociedade pela redução da dependência dos combustíveis fósseis e pelo desenvolvimento de tecnologias capazes de utilizarem os recursos renováveis como fontes geradoras de energia. Nesse contexto, novos produtos estão em fase de desenvolvimento visando a incorporação da tecnologia do hidrogênio, uma vez que sua utilização não é caracterizada pela emissão de gases poluentes.

E um dos primeiros setores industriais que despertaram grande interesse nesse novo paradigma técnico-ambiental foi o da indústria automobilística, buscando aliar a sustentabilidade de seus produtos a longo prazo, com a necessidade de melhoria da imagem de seus produtos, hoje responsabilizados pelo aquecimento global, e associando-o a aspectos ecológicos. Como exemplo, pode-se citar o caso dos veículos híbridos recentemente lançados nos EUA. Mesmo com um preço cerca de 30% maior do que o de um modelo similar com motor de combustão convencional, tem se tornado desejo de consumo dos americanos, por ser considerado um veículo “verde”, que consome menos combustível e emite menos poluentes que os demais modelos existentes no mercado.

É muito provável que a entrada de veículos movidos por células a combustível de hidrogênio irá promover, ou catalizar, a transição de uma era dominada pelos combustíveis fósseis para uma nova era de alta demanda energética, também conhecida como ‘Era do Hidrogênio’ (RIFKIN, 2003).

O hidrogênio é um combustível versátil, que pode ser usado tanto em motores a combustão interna adaptados ou em células a combustível. A emergência das células a combustível como uma tecnologia viável e mais eficiente que os motores convencionais, tem aumentado o potencial de transformação do hidrogênio no principal combustível do planeta. Além disso, ainda têm o potencial de eliminar as e-

missões de gases tóxicos, gases de efeito estufa e ainda reduzir a poluição sonora. A única emissão na saída do escapamento é vapor d'água.

No entanto, assim como a eletricidade, o hidrogênio necessita ser "produzido" e, como todo processo desenvolvido pelo homem, apresenta alguns tipos de impactos ambientais, que necessitam ser avaliados para a obtenção de uma visão holística do uso do hidrogênio como um vetor energético. Assim, a melhor ferramenta para a obtenção de uma visão sistêmica da cadeia do hidrogênio seria através da análise do ciclo de vida para o "hidrogênio combustível". A tecnologia atual permite a obtenção do gás hidrogênio de diversas formas diferentes. Ele pode ser obtido diretamente a partir dos próprios combustíveis fósseis (CxHy), da reforma de biocombustíveis, de processos biológicos ou através da eletrólise da água. A análise do ciclo de vida (ACV) é uma técnica caracterizada pelo levantamento do inventário energético e de emissões de poluentes para a avaliação dos aspectos ambientais, energéticos e impactos potenciais associados a um produto, compreendendo etapas que vão desde a retirada da natureza das matérias-primas elementares (berço) até a disposição final do produto (túmulo). No caso dos combustíveis, equivale a levantar o consumo energético e a emissão de poluentes desde a extração/produção das matérias-primas básicas, até o momento de liberação na atmosfera dos resíduos da combustão ou reação química ocorrida (FUKUROZAKI e SEO, 2004).

A avaliação dos resultados através da utilização da ACV permite responder a algumas perguntas que surgem durante análises da viabilidade de substituição dos vetores energéticos. Este trabalho busca contribuir para responder perguntas como: de onde virá todo esse hidrogênio? Será que não haverá alteração do ciclo da água? Se o vapor d'água é considerado um agente do efeito estufa, será que não continuará a promover o aquecimento global? Será que haverá um aumento da umidade relativa do ar nos grandes centros urbanos? Haverá disponibilidade energética para produzir todo o hidrogênio necessário para abastecer os novos veículos?

Este trabalho busca responder estas questões, porém sempre relacionando-as com o desenvolvimento da indústria automobilística. Se a humanidade reconhecer os problemas pelos quais o planeta está passando e estipular que as emissões de gases de efeito estufa sejam dramaticamente reduzidas dentro de 30 ou 50 anos, o hidrogênio e a eletricidade são as únicas opções, além dos biocombustíveis,

até então identificadas de “combustíveis” capazes de manter a indústria automobilística em funcionamento, mas somente se ambos forem produzidos a partir de fontes primárias renováveis e não-fósseis, como a energia solar, ou de algumas fontes de combustível fóssil, porém com “sequestro” do carbono liberado na atmosfera.

Com isso, este trabalho foi estruturado para a avaliação de quatro cenários possíveis e distintos para a indústria automobilística no futuro, sendo eles:

- cenário A – continuar empregando o motor de combustão interna convencional com queima de combustíveis fósseis, representado neste trabalho pela gasolina;

- cenário B – expandir e substituir a frota atual por veículos com motores de combustão interna convencional com queima de combustíveis renováveis, representado aqui pelo etanol;

- cenário C – desenvolver motores elétricos com células combustíveis a hidrogênio, sendo este produzido através da reforma de etanol ou gás natural;

- cenário D – desenvolver motores elétricos com células combustíveis a hidrogênio, sendo o hidrogênio obtido através da eletrólise da água.

Em nenhum momento este trabalho se preocupou com a variável ‘custo’ para a produção e distribuição do hidrogênio, sempre mantendo o foco na avaliação dos impactos ambientais, energéticos e sociais.

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

Em seguida, o hidrogênio é apresentado como um substituto dos combustíveis líquidos, porém aplicados em células a combustível, avaliando seu potencial energético, aspectos relacionados a segurança e ao seu processo de produção.

Os impactos provocados pelos veículos automotores são apresentados a seguir, caracterizando a poluição relacionada aos seus motores, além de uma avaliação das previsões de crescimento das frotas nacional e mundial.

Os combustíveis fósseis, a previsão de disponibilidade de petróleo, e seus impactos são apresentados na revisão bibliográfica, assim como os biocombustíveis.

Em seguida são descritos os principais fatores que contribuem para o efeito estufa e sua relação direta com o crescimento da frota de veículos automotores.

O capítulo 5 apresenta uma análise detalhada dos combustíveis e dos veículos automotores, porém sob a ótica do ciclo de vida dos combustíveis. É feita uma análise chamada 'do poço às rodas', considerando-se que, para uma avaliação precisa dos impactos provocados por cada combustível, devem ser consideradas todas as emissões de gases de efeito estufa, desde a fase de produção até o momento em que a energia química dos combustíveis é convertida em energia cinética para mover as rodas dos veículos.

Hipóteses adotadas

Algumas hipóteses simplificadoras para avaliação dos cenários futuros foram consideradas e são semelhantes a algumas apresentadas por Weiss *et al* (2000):

- não foram considerados neste trabalho os problemas decorrentes da transição tecnológica, pois admite-se que certos obstáculos já terão sido superados no decorrer deste século;
- a transição tecnológica deverá ocorrer de maneira contínua;
- a análise está limitada aos veículos de passageiros com dimensões e desempenhos semelhantes e somente em condições de uso;
- cada cenário contempla uma frota com 100% do uso da tecnologia abordada;
- todos os combustíveis apresentam uma queima ou reação ideal (estequiométrica) nos motores de combustão interna, nas células a combustível e nos reformadores;
- a gasolina pode ser representada por uma solução simples de octano, o álcool hidratado por uma solução simples de etanol, o gás natural por uma solução simples de metano e o hidrogênio apresenta pureza de 100%;
- este trabalho considerou um desempenho médio de 10 km/l para todos os veículos de passeio a gasolina, considerando ainda uma média entre uso urbano e em estrada. Adotando o valor de 10 km/l, isso representa um valor da ordem de 10 litros/100 km;

- este trabalho considerou, também, um desempenho médio de 7 km/l para todos os veículos de passeio movidos a etanol e de 10 km/m^3 para veículos movidos a gás natural;
- emissões referentes ao ciclo de vida completo dos veículos não serão detalhados neste trabalho;
- a produção de petróleo no mundo seguirá a tendência da curva de Hubbert apresentada por Rifkin (2003) e Hinrichs e Kleinbach (2003).

Os principais resultados obtidos por este estudo foram baseados na comparação entre as emissões dos veículos com a tecnologia atual e com a tecnologia emergente das células a combustível, e também a fase de produção de cada um dos combustíveis em questão.

Os resultados deste trabalho dependem diretamente da metodologia utilizada e das hipóteses assumidas. Todos os resultados quantitativos estão sujeitos a incertezas decorrentes da previsão dos cenários econômicos, políticos e ambientais projetados para o futuro. Além disso, essas incertezas tendem a ser acentuadas no caso do desenvolvimento de novas tecnologias.

2. OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho é mensurar e avaliar os impactos ambientais (emissões de CO_2, emissões de vapor d'água, demanda de água para produção de hidrogênio e aumento da taxa de evapotranspiração) e impactos energéticos (demanda de energia elétrica, capacidade de plantio e produção de etanol), decorrentes da mudança do vetor "combustível fóssil" para o vetor "hidrogênio" na alimentação dos veículos de passageiros, através de uma abordagem do ciclo de vida dos combustíveis: gasolina, etanol, gás natural e hidrogênio, sendo este último produzido através da eletrólise da água, da reforma do etanol ou do gás natural. Esta avaliação é realizada a partir de uma análise comparativa entre o impacto ambiental dos veículos movidos por células a combustível de hidrogênio e os movidos a gasolina e etanol em motores de combustão interna. Como objetivos secundários, o estudo busca avaliar qual a fonte primária de hidrogênio com menor impacto social e ambiental, e realizar uma avaliação dos impactos energéticos, verificando a necessidade energética para atender uma possível demanda até o ano 2100.

3. METODOLOGIA

O desenvolvimento deste trabalho foi realizado com base em uma ampla pesquisa exploratória, buscando esclarecer o problema e tornando-o explícito ou ajudando no levantamento de hipóteses.

A pesquisa exploratória, de caráter qualitativo, foi dividida em três ações descritas a seguir.

3.1. Ação investigativa, baseada na obtenção de dados primários e secundários.

Procedimento: revisão bibliográfica, entrevistas e visitas de campo.

Objetivos:

- Levantamento de dados e características técnicas e de uso dos veículos automotores atuais;
- Estudo do princípio de funcionamento de uma célula a combustível e dos seus processos eletroquímicos;
- Levantamento de dados e características técnicas e de uso dos veículos movidos a célula a combustível;
- Levantamento das principais emissões gasosas dos veículos atuais;
- Pesquisa das formas de geração de hidrogênio.

3.2. Ação analítica, fundamentada na análise e discussão dos dados obtidos.

Procedimento: análise comparativa dos impactos (positivos e negativos) e das consequências associadas ao uso de veículos movidos por células a combustível de hidrogênio.

Objetivos:

- Comparação entre as emissões dos modelos analisados;
- Comparação entre os consumos de energias na produção dos combustíveis;
- Comparação entre os consumos de energia em uso;
- Comparação entre a emissão dos veículos e os valores de evapotranspiração;
- Consumo de água para produção de hidrogênio.

3.3. Ação propositiva, com a apresentação das principais conclusões do estudo e recomendações.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Células a Combustível

4.1.1 Histórico

No ano de 1802, o inglês Sir Humphrey foi o primeiro a apresentar o conceito de uma célula a combustível. Na ocasião, construiu uma célula de zinco e oxigênio para gerar eletricidade, obtendo zincato de sódio como subproduto (POWELL *et al*, 2004).

A criação da primeira célula a combustível, com hidrogênio e oxigênio, se deu por volta de 1839, através de estudos realizados por Sir Willian Grove, que executou o processo inverso da eletrólise. Apesar do reconhecimento e interesse por parte dos pesquisadores da época, foram necessários quase um século para que as pesquisas no assunto fossem retomadas (POWELL *et al*, 2004).

Em 1932, Francis Bacon desenvolveu uma célula que utilizava eletrólito alcalino e eletrodos de níquel. Por volta dos anos 50, após pesquisas para obtenção de uma célula portátil, chegou-se à primeira célula que utilizava um eletrólito polimérico, graças ao trabalho de Thomas Grubb e Leonard Niedrach. A NASA apresentou grande interesse pelas células portáteis, e desenvolveu um dispositivo baseado nestas células para geração de energia elétrica para os instrumentos das naves espaciais Gemini, Apollo e para os ônibus espaciais (BLOMEN, MUGERWA, 1993).

4.1.2 Fundamentos

Uma célula a combustível é um sistema de conversão eletroquímico de energia, que transforma energia química diretamente em energia elétrica. Especificamente, as células combinam eletroquimicamente o oxigênio do ar com o hidrogênio (BLOMEN e MUGERWA, 1993).

A célula a combustível funciona com dois eletrodos de cargas opostas produzindo energia elétrica, água e calor, a partir de um oxidante e um combustível. O combustível utilizado é o hidrogênio e o oxidante é o oxigênio. Na verdade, o hidrogênio não é, neste caso, um combustível no sentido real da palavra. Um combustível é uma substância que reage com um agente oxidante numa reação de

oxidação, liberando energia neste processo. No caso das células a combustível, o hidrogênio não entra em combustão, mas reage eletroquimicamente com o oxigênio do ar. No entanto, costuma-se atribuir a palavra “combustível” ao hidrogênio em função da necessidade de ‘abastecimento’ da célula para o seu funcionamento, assim como a gasolina é abastecida no tanque de um automóvel.

A equação química básica aplicada a esta reação é:

$$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \longrightarrow H_2O + CALOR + ENERGIA\ ELÉTRICA$$

As células a combustível se diferenciam das baterias no que se refere ao armazenamento de energia. As células a combustível não armazenam energia e não consomem nenhum material durante a reação. Apenas o combustível é dissociado e transformado diretamente em energia elétrica, sem combustão.

O funcionamento da célula a combustível baseia-se na obtenção de uma corrente elétrica através de uma reação controlada entre o hidrogênio (combustível) e o oxigênio (oxidante). Basicamente, o hidrogênio é fornecido à célula através do lado do anodo, onde um catalisador, geralmente platina, ajuda a acelerar o processo de oxidação do gás hidrogênio. Nesse processo, os elétrons são separados de seus núcleos atômicos, formando íons de hidrogênio ou OH^-. Os cátions passam através da membrana polimérica de intercâmbio de prótons, e novamente com a ajuda de um catalisador recombina-se com o oxigênio e elétrons, produzindo água e calor. Os elétrons não conseguem passar pela membrana polimérica de intercâmbio de prótons, fluindo então do lado catódico para o lado anódico através de um circuito externo, gerando a energia elétrica (vide figura 4.1).

Uma célula a combustível pode usar hidrogênio proveniente de qualquer tipo de hidrocarboneto, como o gás natural, a gasolina, o metanol, o etanol, e outros. Neste caso, faz-se necessário a utilização de um reformador de combustível, que consegue “extrair” o hidrogênio das cadeias orgânicas dos combustíveis.

Por sua vez, o hidrogênio poderia ser obtido a partir da eletrólise da água, utilizando eletricidade obtida através de células fotovoltáicas, energia eólica, centrais elétricas, ondas do mar e uma infinidade de outras fontes alternativas. A energia obtida por esses meios e aplicada em eletrolizadores é capaz de produzir hidrogênio de alta pureza que, uma vez armazenado, poderá ser convertido em energia elétrica por meio das células a combustível de forma constante (ELECTROCELL, 2002).

A aplicação das tecnologias de célula a combustível está se ampliando a cada dia e podem ser divididas em 3 grupos principais: sistemas portáteis; sistemas estacionários de geração de energia; sistemas móveis e automotivos. Este trabalho está relacionado apenas aos sistemas automotivos.

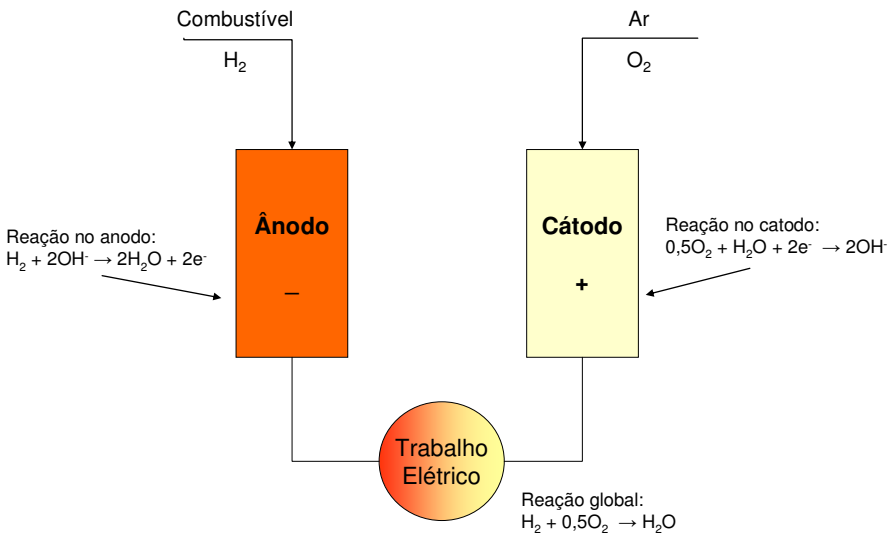

FIG. 4.1 – Princípio de funcionamento de uma célula a combustível
FONTE: Adaptado de Linardi et al (2000)

A atração dessa tecnologia é muito alta, mas importantes barreiras existentes para a aceitação técnica e comercial do veículo produzido, no caso da aplicação automotiva, devem ser ultrapassadas e melhores resultados a partir de novos desenvolvimentos devem ser apresentados. Para o desenvolvimento mais refinado desta tecnologia, alguns pontos devem ser abordados com maior ênfase: a potência específica (kW gerado por unidade de peso da célula), o tamanho e o peso do equipamento. Porém, o maior dos problemas enfrentados para os pesquisadores e para as empresas existentes no mercado atualmente se refere ao custo desejável por kW, ou seja, um custo equivalente ao dos combustíveis fósseis.

As vantagens existentes na célula a combustível começam a gerar interesses múltiplos por parte de muitas indústrias, institutos de pesquisa, institutos de ensino, órgãos governamentais, entre outros e aguarda-se uma grande evolução em todos os segmentos relacionados à célula a combustível no mundo para os próximos cinquenta anos.

4.1.3 As células a combustível, as baterias e os motores de combustão interna

O que as células a combustível, as baterias e os motores de combustão interna têm em comum são apenas suas propostas: todos são dispositivos que convertem energia de uma forma para uma outra. Atualmente, podemos afirmar que quase todos os veículos que circulam pelas ruas são movidos por motores de combustão interna. Estes motores são de baixa eficiência e trabalham a altas temperaturas, a partir da liberação de energia química pela queima de combustível com oxigênio do ar. No caso dos veículos atuais, energia química é convertida em energia térmica, para depois ser convertida em energia mecânica, resultando num processo de baixa eficiência, limitado pelo ciclo termodinâmico de Carnot.

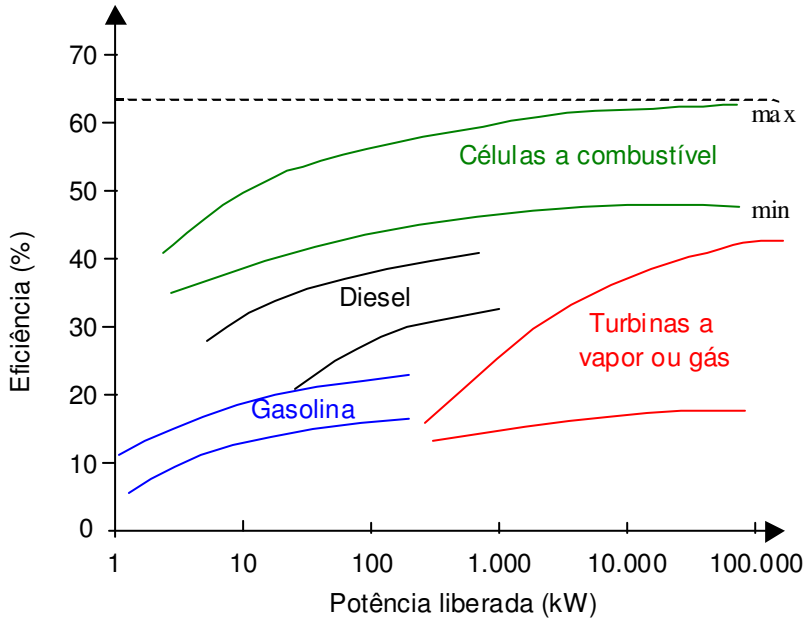

FIG. 4.2 – Comparação entre os limites de eficiência para os vários sistemas existentes
FONTE: Fuel Cell Technology (2001)

As células a combustível e as baterias são dispositivos eletroquímicos, e pela sua própria natureza, apresentam uma eficiência muito maior, pois energia química é convertida diretamente em energia elétrica (vide figura 4.2). Na figura 4.2 pode-se observar que para um valor de potência de cerca de 50 kW, o equivalente

a um motor a combustão de um veículo de pequeno porte, a eficiência das células a combustível pode variar entre cerca de 40 e 55%, dependendo do tipo de célula utilizada, enquanto que para sistemas a gasolina a eficiência fica entre 10 e 20%, e para os sistemas a diesel, entre 20 e 35%.

As células a combustível que usam hidrogênio não emitem poluentes durante seu funcionamento, e isso é um dos fatores de maior importância nas cidades. Mas ainda assim, apresentam algumas similaridades com os motores de combustão interna: há a necessidade de se abastecer um tanque de combustível e o oxigênio é fornecido pelo ar.

Um veículo elétrico é aquele cuja motorização é elétrica, e esta energia provém ou de baterias, ou de células a combustível. As baterias e as células a combustível são similares nos seus sistemas de conversão de energia e ambas quase não necessitam de manutenção, pois não apresentam partes móveis. No entanto, diferentemente das células a combustível, os reagentes da bateria são armazenados internamente, e, quando esgotados, as baterias obrigatoriamente necessitam de recarregamento ou devem ser substituídas.

Nos veículos movidos a células a combustível, o combustível é armazenado externamente num tanque e o oxigênio é obtido no ar da atmosfera. Enquanto houver combustível, a célula a combustível produzirá energia na forma de eletricidade e calor.

A escolha entre as duas propostas irá depender apenas do uso. Para aplicações em larga escala, as células a combustível apresentam inúmeras vantagens em relação às baterias, como tamanho reduzido, peso reduzido, rápido reabastecimento, e maior autonomia.

4.1.4 Emissões das células a combustível

A característica das células a combustível em não emitir poluentes ou apresentar emissão quase-zero (nos casos com reforma ou injeção direta) tem sido a grande motivação para encorajar os investimentos para seu desenvolvimento. As células a combustível com injeção direta de hidrogênio e ar são os únicos dispositivos desse tipo que podem ser qualificados como “emissão zero de poluentes”, pois emitem apenas água na forma de vapor.

Os veículos com reformadores de gasolina, metanol, e outros combustíveis ricos em hidrogênio, emitem vapor de água e CO_2, como principais subprodutos (ASHLEY, 2003). Esse assunto será discutido mais adiante.

4.1.5 Análise termodinâmica de células a combustível

A primeira lei da termodinâmica estabelece que a variação de energia de um sistema é igual à troca de calor (Q) e trabalho (W) através de sua fronteira. Essa lei, chamada de Lei da Conservação de Energia, é definida matematicamente pela seguinte equação:

$$dE = \partial Q + \partial W \qquad [\ 1\ ]$$

onde dE = variação de energia do sistema

δQ = calor

δW = trabalho.

Em um motor térmico, a eficiência máxima está limitada pelo rendimento térmico de Carnot, que é expresso através da seguinte relação:

$$\eta_{Carnot} = (T_H - T_L)/T_H \qquad [\ 2\ ]$$

onde T_H = temperatura absoluta do reservatório térmico a alta temperatura

T_L = temperatura absoluta do reservatório térmico a baixa temperatura.

Sabe-se que todo processo de transformação de energia gera uma certa “degradação” de suas propriedades, e que a função inversa do sistema não gera uma igualdade. A segunda lei da termodinâmica estabelece o sentido em que os processos reais ocorrem, e origina uma nova propriedade termodinâmica, a entropia, além dos conceitos de processos reversíveis e irreversíveis.

A Segunda Lei da Termodinâmica para um processo reversível e infinitesimal dentro de um sistema pode ser apresentada como:

$$dS = \left(\frac{\partial Q}{T}\right)_{rev} \qquad [\,3\,]$$

A Primeira e a Segunda Leis da Termodinâmica para um processo reversível podem ser representadas pela equação:

$$dE = T \cdot dS + \partial W_{rev} \qquad [\,4\,]$$

onde dE = variação de energia do sistema

dS = variação de entropia do sistema

δW_{rev} = trabalho reversível

T = temperatura do meio.

O funcionamento de uma célula a combustível foi considerado, na análise a seguir, como sendo realizado com escoamento em regime permanente através de um volume de controle, e as variações de energia potencial e cinética foram consideradas desprezíveis.

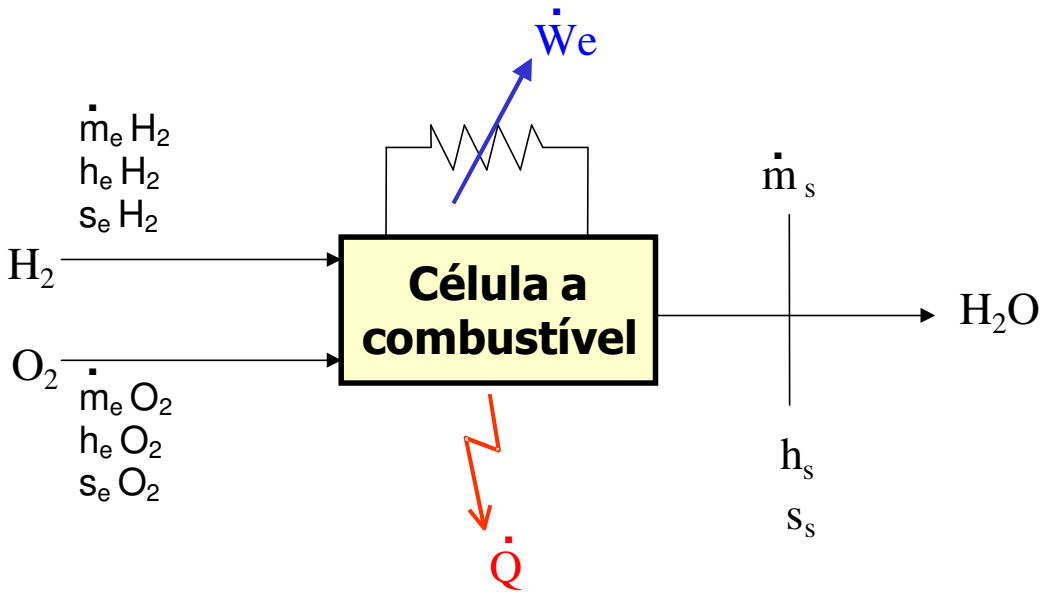

FIG. 4.3 – Volume de controle para uma célula a combustível hidrogênio-oxigênio

Os parâmetros e propriedades de entrada e saída estão apresentados na figura 4.3.

Em condições ideais, a energia consumida na produção de um combustível é a mesma energia liberada quando este é 'queimado'. No entanto, pela Segunda Lei da Termodinâmica, em um processo real, a energia recuperada é sempre menor do que a empregada para criar o combustível, conforme descrito acima.

A máxima ‘quantidade’ de energia presente nos combustíveis é igual à entalpia de formação, e o trabalho máximo possível é obtido por meio de um processo ideal reversível.

A exergia (Ψ), ou disponibilidade, representa a máxima energia disponível para se produzir trabalho utilizando-se uma máquina térmica ideal, até entrar em equilíbrio com o meio a uma temperatura To. A variação da exergia representa o máximo trabalho possível de ser utilizado em um processo que começa e termina na mesma temperatura de referência T_0, e, desprezando as variações cinéticas e potencial, pode ser descrito por:

$$\psi = (h - Ts) - (h_o - T_o s_o) \qquad [5]$$

onde:

$h - h_o$: variação de entalpia no sistema

T_o: temperatura de referência

$s - s_o$: variação de entropia no sistema.

Considerando-se o funcionamento de uma célula a combustível em regime permanente, o trabalho reversível, na ausência de variações de energia potencial e cinética, e onde Q=0, é:

$$\dot{W}\ rev = \sum \dot{m}_e (h_e - T_o \cdot s_e) - \sum \dot{m}_s (h_s - T_o \cdot s_s) \qquad [6]$$

Na ocorrência de reações químicas e usando o conceito de entalpia de formação, a equação [6] pode ser reescrita como:

$$\dot{W}rev = \sum_R n_e \left[\overline{h_f^o} + \Delta\bar{h} - T_0 \bar{s}\right]_e - \sum_P n_s \left[\overline{h_f^o} + \Delta\bar{h} - T_0 \bar{s}\right]_s \qquad [7]$$

A energia livre de Gibbs (G) pode ser definida como a energia disponível para o trabalho externo (no caso o trabalho realizado para a movimentação dos elétrons no circuito externo), desconsiderando qualquer trabalho realizado por mudanças em volume e pressão. Assim, a função de Gibbs é representada por:

$$g = h - T.s \qquad [8]$$

Dessa forma, a exergia está diretamente relacionada à variação da função de Gibbs, pois:

$$g - g_0 = (h - Ts) - (h_o - T_o s_o) = \psi \qquad [\ 9\ ]$$

Considerando uma reação química completa ocorrendo à pressão e temperatura do meio (0,1 MPa e 25°C), o máximo trabalho possível seria efetuado se essa reação ocorresse reversivelmente, e se seus produtos estivessem na pressão e temperatura de equilíbrio com o meio.

Esse máximo trabalho reversível pode ser então calculado pela relação:

$$Wrev = \sum_R n_e \bar{g}_e - \sum_P n_s \bar{g}_s \qquad [\ 10\ ]$$

Como o estado final é de equilíbrio com o meio, pode-se considerar esta quantidade de trabalho como sendo a disponibilidade do combustível avaliado.

Algumas reações podem se dar de forma quase reversível quando ocorrem em células eletrolíticas como as células a combustível. O trabalho envolvido é a energia elétrica fornecida ou liberada.

Para o projeto de células a combustível, o início das atividades se inicia com a determinação da variação da energia livre de Gibbs entre os reagentes e os produtos (figura 4.3), que resulta na energia fornecida:

$$\Delta G = \Delta G_{PRODUTOS} - \Delta G_{REAGENTES} \qquad [\ 11\ ]$$

A reação química do processo é:

$$2H^+ + O^{-2} \rightarrow H_2O$$

Relacionando a reação química anterior com a variação de energia livre de Gibbs, tem-se que:

$$\Delta G = \Delta G_{H_2O} - \Delta G_{H_2^+} - \Delta G_{O_2^-} \qquad [\ 12\ ]$$

Conforme comentado anteriormente, a fim de se obter o equacionamento teórico da tensão da célula, foi adotada a hipótese da não existência de perdas no sistema, constituindo assim um mecanismo reversível.

Baseando-se nesta hipótese, a variação da energia livre de Gibbs, que é o trabalho reversível máximo, seria totalmente convertida em trabalho elétrico (We), que pode ser definido como:

$$We = E \cdot n_e \cdot No \cdot e \qquad [\ 13\ ]$$

onde: E = potencial elétrico

N_o = número de Avogrado

n_e = número de moles de elétrons fluindo através de um circuito externo

e = carga do elétron

Assim, para uma determinada reação, o potencial elétrico máximo reversível (E) de uma célula a combustível, a uma dada temperatura, pode ser determinado pela igualdade entre as equações [10] e [13], o que resulta em:

$$E = \frac{-\Delta G}{n_e \cdot No \cdot e} \qquad [\ 14\ ]$$

onde No = 6,022 x 10^{26} elet/kmol

e = 1,602 x 10^{-22} kJ/elet V

Portanto, a tensão é basicamente uma função da energia livre de Gibbs. Uma vez que a carga elétrica permanece constante, a diferença de potencial E é uma função apenas da variável temperatura, pois ela afeta diretamente a função de Gibbs.

4.1.5.1 Potencial Elétrico

As reações eletroquímicas diferem das reações de combustão, pois o processo eletroquímico, no caso das células a combustível, envolve uma transferência de elétrons através de um circuito externo. Uma parte considerável da energia da reação é obtida na forma de energia elétrica, sendo o restante convertido em calor.

Considere a seguinte reação no anodo:

$$2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^-$$

No catodo tem-se:

$$4H^+ + 4e^- + O_2 \rightarrow 2H_2O$$

A reação global é, portanto:

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$$

Desde que cada molécula de hidrogênio libera dois elétrons, 4 mols de elétrons escoam através do circuito externo. Admitindo que cada componente esteja na pressão e temperatura do meio (0,1 MPa e 25°C), nestas condições o valor de $\overline{g}^{0}_{f\,H2O}$ nas tabelas termo-

dinâmicas é de – 237.146 kJ/kg kmol, enquanto $\overline{g}^{0}_{f\,H2}$ e $\overline{g}^{0}_{f\,O2}$ são nulos, pois estão nas condições de referência. Sendo assim, de acordo com as propriedades termodinâmicas tabeladas, tem-se que:

$$\Delta G = \Delta G_{PRODUTOS} - \Delta G_{REAGENTES} =$$

$$= n_{H2O}\,\overline{g}^{0}_{f\,H2O} - n_{H2}\,\overline{g}^{0}_{f\,H2} - n_{O2}\,\overline{g}^{0}_{f\,O2} =$$

$$= 2 \cdot (-237146\ ) - 2 \cdot (0) - 1 \cdot (0) =$$

$$= -474292\ kJ$$

Portanto, da equação [14]:

$$E = \frac{-(-474292)}{4 \cdot 6{,}022 \cdot 10^{26} \cdot 1{,}602 \cdot 10^{-22}} = 1{,}229 \quad Volts$$

Conclui-se que a máxima tensão possível para uma célula a combustível unitária é da ordem de 1,23 V.

4.1.5.2 Eficiência

No caso da eficiência energética do sistema, pode-se afirmar que ela está diretamente ligada com o conceito da irreversibilidade do processo. Caso o processo fosse reversível, ou seja, se a energia obtida no processo fosse suficiente para se retornar ao estágio inicial, então a eficiência do sistema poderia ser considerada 100%.

No caso da célula a combustível, a eficiência pode ser entendida como a relação entre a energia elétrica produzida, e a energia química fornecida ao sistema (igual à variação da energia livre de Gibbs).

Levando-se em conta que toda reação química envolve troca de energia térmica, é interessante a avaliação da eficiência através da relação entre a energia elétrica produzida e a quantidade de energia térmica em trânsito. No caso, a máxima energia elétrica produzida pode ser traduzida como a variação da energia livre de Gibbs.

A quantidade de energia térmica em trânsito é conhecida através da termodinâmica como mudança na entalpia de formação. A mudança na entalpia de formação é representada por Δh_f, e tem caráter negativo quando a energia é fornecida.

A mudança na entalpia de formação pode ser entendida como a energia térmica fornecida/resultante na queima do combustível.

Utilizando este conceito, é possível distinguir duas condições distintas, para a análise da mudança na entalpia de formação: o produto da reação encontra-se em estados diferentes da matéria, obtendo assim diferentes valores de Δh_f.

No caso da reação de composição de H_2O, o produto encontra-se no estado líquido, cujo valor é classificado como poder calorífico superior e no estado gasoso, sendo o poder calorífico inferior. A diferença entre os dois valores é entendida como a entalpia molar de vaporização, ou calor latente.

Assim, Larminie e Dicks (2000) apresentam a máxima eficiência teórica do processo corresponde à eficiência termodinâmica, relacionada pela seguinte equação:

$$\eta_{TERMODINÂMICA} = \frac{\Delta gf}{\Delta hf} x100 \qquad [\ 15\ ]$$

Onde: $\eta_{\text{Termodinâmica}}$ – eficiência

Δg_f – variação na energia livre de Gibbs (kJ/kmol)

Δh_f – variação da entalpia de formação (kJ/kmol)

Nesta condição, supondo novamente que a temperatura e pressão de saída sejam iguais à do meio (0,1 MPa e 25°C), pode-se determinar qual será o máximo rendimento para o sistema, usando-se os dados de entalpia de formação e da função de Gibbs de formação encontradas nas tabelas termodinâmicas.

Se considerado que o produto da reação seja água no estado líquido, nas condições acima mencionadas, o rendimento máximo será dado por:

$$\eta_{TERMODINÂMICA} = \frac{\Delta gf}{\Delta hf} x100 = \frac{-237146}{-285838} x100 = 83\%$$

Caso a água resultante saia na forma de vapor:

$$\eta_{TERMODINÂMICA} = \frac{\Delta gf}{\Delta hf} x100 = \frac{-228583}{-241827} x100 = 94{,}5\%$$

Além disso, a eficiência total da célula também pode ser determinada pela relação entre a tensão em questão e a máxima tensão, obtida pela equação [15]:

$$\eta_{CELULA} = \frac{V_C}{E} \qquad [\ 16\ ]$$

Onde: $\eta_{CÉLULA}$ – eficiência geral da célula

V_c – tensão de fornecimento

E – máximo potencial teórico = 1,23 V

As células a combustível podem operar com eficiências próximas aos valores teóricos, mas na prática isso compromete o caráter prático de uso, pois estão também relacionadas com a densidade de potência.

Densidade de potência é a relação entre potência disponível e a área ativa da célula. O incremento da densidade de potência implica numa maior resistência elétrica dentro da célula e nas interfaces dos materiais, reduzindo, assim, a eficiência da célula.

4.1.6 Modelagem matemática para as células a combustível

Para modelar matematicamente o funcionamento de uma célula a combustível foi seguido o roteiro apresentado por Larminie e Dicks (2000). O objetivo posterior é poder comparar os valores calculados com os determinados empiricamente, de modo a permitir avaliar se há divergências muito grandes entre eles, e, caso haja, avaliar quão longa é essa distância entre o modelo teórico e os dados experimentais obtidos com os protótipos em desenvolvimento.

Conforme visto anteriormente, a reação estequiométrica básica que define o funcionamento de uma célula a combustível é dada por:

$$2\,H_2 + O_2 \rightarrow 2\,H_2O$$

Dois moles de gás hidrogênio devem ser fornecidos para cada mol de oxigênio que participa da reação. Essa reação deve produzir 4 F (Faradays) de carga, desde que dois elétrons sejam transferidos para cada mol de hidrogênio. Vale lembrar que como o oxigênio é geralmente fornecido através do ar, ele deve ser alimentado numa taxa maior que a estequiométrica, de modo a garantir que todo hidrogênio encontre uma molécula de oxigênio quando transpor o polímero, assim como o excesso de ar utilizado em motores de combustão interna.

Uma maneira melhor de se descrever essa reação é através da potência elétrica (P_e), e da voltagem média de cada célula (V_c). A potência elétrica é quase sempre conhecida, além de ser a mais importante variável de um sistema de células a combustível.

4.1.6.1 Consumo de Oxigênio e Ar

Segundo Larminie e Dicks (2000), a equação para determinar a vazão de oxigênio pela célula a combustível, deve considerar a operação básica que descreve que para cada molécula de O_2 há 4 elétrons em trânsito:

Carga = 4 *F* x quantidade de Oxigênio

Dividindo pelo tempo, e reordenando a equação, tem-se a vazão molar:

$$\dot{n}_{O2} = \frac{I}{4F} \quad \text{[moles/segundo]} \qquad [\ 17\ ]$$

Até aqui falou-se apenas de uma célula unitária. Para um *stack* de *n* células tem-se que:

$$\dot{n}_{O2} = \frac{I \cdot n}{4F} \quad \text{[moles/segundo]} \qquad [\ 18\ ]$$

Passando a vazão de oxigênio para kg/s e trabalhando com a fórmula em termos de potência no lugar da corrente elétrica, tem-se que:

$$\text{Potência } P_e = V_c \ .\ I \ .\ n \qquad [\ 19\ ]$$

$$I = \frac{P_e}{V_c n} \qquad [\ 20\ ]$$

Então,

$$\dot{n}_{O2} = \frac{P_e}{4V_c F} \quad \text{[moles/segundo]} \qquad [\ 21\ ]$$

$$\dot{m}_{O2} = \frac{32 \cdot 10^{-3} P_e}{4V_c F} \quad \text{[kg/segundo]} \qquad [\ 22\ ]$$

Para F = 96.500 C/mol, tem-se:

$$\dot{m}_{O2} = \frac{8{,}29 \cdot 10^{-8} P_e}{V_c} \quad \text{[kg/segundo]} \qquad [\ 23\ ]$$

onde: $\dot{m}_{O2}$ = Vazão mássica de oxigênio (kg / s)

I = Corrente elétrica parcial (A)

F = Constante de Faraday (C / mol)

A equação [23] relaciona o consumo de oxigênio em qualquer célula a combustível, a partir de uma potência a ser calculada. Se a tensão Vc não for conhecida, ela pode ser determinada através do cálculo da eficiência.

No entanto, sabe-se que o oxigênio usado é, geralmente, proveniente do ar atmosférico. Portanto, é necessário adaptar tal equação para se determinar a vazão de ar no sistema. Como a atmosfera é composta por quase 21% de oxigênio e a massa molar do ar é de $28{,}97.10^{-3}$ kg/mol (WYLEN & SONNTAG, 1993), a equação [23] adaptada para o ar torna-se:

$$\dot{m}_{AR} = \frac{28{,}97 \cdot 10^{-3} P_e}{0{,}21 \cdot 4 \cdot V_c \cdot F} \quad \text{[kg/segundo]} \qquad [\ 24\ ]$$

$$\dot{m}_{AR} = \frac{3{,}57 \cdot 10^{-7} P_e}{V_c} \quad \text{[kg/segundo]} \qquad [\ 25\ ]$$

onde: $\dot{m}_{ar}$ = Vazão de ar (kg / s)

4.1.6.2 Consumo de Hidrogênio

A taxa de consumo de hidrogênio é determinada de uma maneira análoga à do oxigênio, exceto pelo fato de que há apenas 2 elétrons por molécula do gás.

Assim,

$$\dot{n}_{H2} = \frac{I \cdot n}{2F} \quad \text{[moles/segundo]} \qquad [\ 26\ ]$$

e

$$\dot{n}_{H2} = \frac{P_e}{2V_c F} \quad \text{[moles/segundo]} \qquad [\ 27\ ]$$

A massa molar do hidrogênio é $2\ .\ 10^{-3}$ kg/mol. Tem-se então:

$$\dot{m}_{H2} = \frac{2 \cdot 10^{-3} P_e}{2V_c F} \quad \text{[kg/segundo]} \qquad [\ 28\ ]$$

Portanto,

$$\dot{m}_{H2} = \frac{1 \cdot 10^{-8} P_e}{V_c} \quad \text{[kg/segundo]} \qquad [\ 29\ ]$$

onde: $\dot{m}_{H2}$ = Vazão de hidrogênio (kg / s)

4.1.6.3 Produção de Água

Numa célula a combustível alimentada por hidrogênio, água é produzida numa taxa de um mol para cada 2 elétrons fornecidos. Analogamente ao hidrogênio e ao oxigênio, tem-se que:

$$R_{H2O} = P_e \ / \ 2\ V_c\ F \quad \text{[moles/segundo]} \qquad [\ 30\ ]$$

A massa molar da água é 18 . 10^{-3} kg/mol. Tem-se então:

$$R_{H2O} = 9{,}34\ .\ 10^{-8}\ .\ P_e\ /\ V_c \quad \text{[kg/segundo]} \qquad [\ 31\ ]$$

Exemplo: se uma célula á combustível de 1 kW opera durante uma hora, a uma tensão de 0,7 volts, tem-se a geração de 0,48 kg/h de H_2O.

Como a densidade da água é de 1 g/cm³, isso corresponde a quase 0,5 litro de água. Portanto, 1kWh de eletricidade gerada por uma célula a combustível produz cerca de 0,5 litro de água.

4.2 Hidrogênio

O hidrogênio é o mais simples e o mais abundante elemento do universo, compondo 75% de sua massa, e 90% de suas moléculas. Empregá-lo efetivamente como fonte de energia daria à humanidade uma reserva energética virtualmente ilimitada. Ele possui a maior quantidade de energia por unidade de massa que qualquer outro combustível conhecido, 125 MJ/kg (PEAVEY, 2001). Além disso, quando convertida à fase líquida, este combustível ocupa o equivalente a 1/700 do volume ocupado na fase gasosa. Aliás, essa é uma das razões pela qual o hidrogênio é utilizado como combustível em foguetes e sondas espaciais, que necessitam de combustível com baixo peso e com grande capacidade de armazenamento de energia. Em termos de comparação, 1 kg de hidrogênio equivale a 2,1 kg de gás natural veicular e a 2,8 kg de gasolina (ELECTROCELL, 2005).

O hidrogênio está presente em todos os lugares da Terra, e se apresenta na água, nos combustíveis fósseis e em todos os seres vivos. No estado natural e nas condições normais de pressão e temperatura, o hidrogênio é um gás incolor, inodoro e insípido. O hidrogênio molecular H_2 é encontrado na forma de dois átomos compartilhando seus elétrons através de uma ligação covalente, onde cada átomo é composto por um próton e um elétron. O hidrogênio é normalmente encontrado combinado com outros elementos, como o oxigênio na água, o carbono no metano, e na maioria dos compostos orgânicos. Como é quimicamente muito ativo, raramente permanece sozinho.

Na Terra é extremamente raro encontrá-lo na sua forma molecular. Todo o hidrogênio molecular aqui existente durante a formação do planeta, que não se combinou com outros elementos químicos, acabou por escapar da atmosfera da Terra. Devido ao seu baixo peso atômico, qualquer incremento de energia cinética de sua molécula era suficiente para fazê-lo escapar da atração gravitacional do planeta, provocando o fenômeno conhecido como “evaporação atmosférica”. Aliás, é por esse mesmo motivo que os quatro planetas interiores de nosso sistema solar – Mercúrio, Vênus, Terra e Marte - são rochosos, diferentemente dos outros quatro mais distantes – Júpiter, Saturno, Urano e Netuno – que são predominantemente gigantes gasosos. Após ter-se iniciado as reações de fusão nuclear no interior do Sol, a pressão provocada pelo vento solar foi suficiente para arrastar todo o hidrogênio das vizinhanças de nossa estrela, o que acabou por ajudar na formação dos planetas exteriores.

Outro fator de grande importância atribuída ao hidrogênio, é que ele completa a escala da chamada descarbonização da energia. Em outras palavras, a evolução tecnológica utiliza combustíveis com cada vez menos quantidades de carbono em relação aos átomos

de hidrogênio. Por exemplo, a madeira, que em grande parte da história foi o principal combustível energético da humanidade, tem a maior de todas as proporções de átomos de carbono para átomos de hidrogênio, cerca de 10 para 1 (RIFKIN, 2003). O petróleo tem um carbono para cada dois hidrogênios, enquanto que o gás natural apresenta um para quatro. Isso significa que cada fonte sucessiva de energia emite menos CO_2 que sua predecessora (vide figura 4.4).

A emergência do hidrogênio como fonte primária de energia para o futuro assinala para o fim do longo reinado da energia dos hidrocarbonetos sobre a história humana. O hidrogênio é também a fonte de energia do Sol, e é tido cada vez mais como a grande esperança para o avanço da humanidade na Terra.

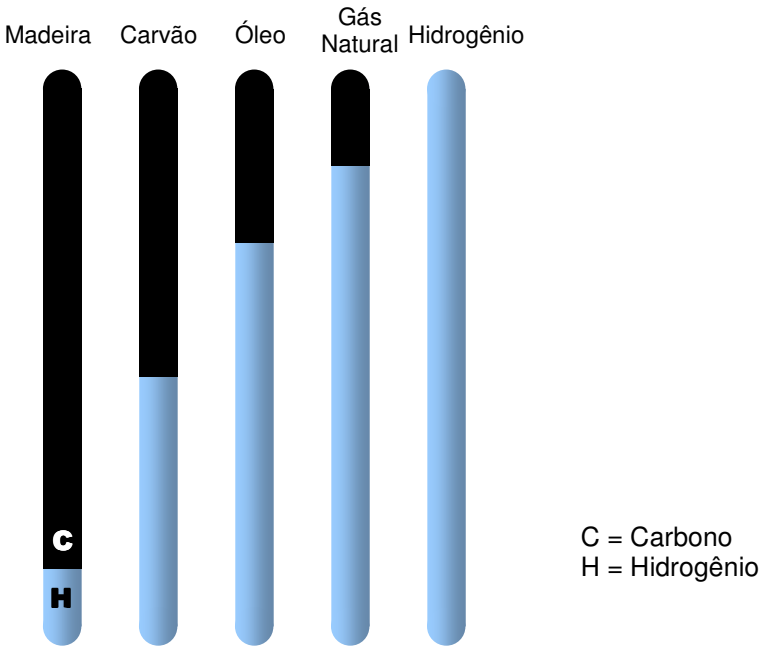

FIG. 4.4 – Relação carbono/hidrogênio para os combustíveis utilizados usualmente
FONTE: Thomas (2001)

Hoje, cerca de 400 bilhões de m^3 de H_2 são produzidos anualmente no mundo, o equivalente a cerca de 10% da produção global de petróleo de 1999. Porém, a maior parte desse hidrogênio é usada como matéria-prima química, e não como combustível. Na verdade, apesar de seu emprego como combustível ter sido exaustivamente estudado no século 19 e início do século 20, seu emprego foi descartado após a 2ª Guerra Mundial. Somente após a crise do petróleo de 1973 é que voltou a se cogitar em sua utilização como fonte primária de energia (RIFKIN, 2003).

O interesse pelo hidrogênio começou a aumentar outra vez nos anos 90, após a publicação de estudos e relatórios alarmantes sobre o aumento das emissões de CO_2 na atmosfera, devido à queima de combustíveis fósseis, e que o mesmo estava elevando a temperatura do planeta e gerando uma ameaça potencialmente grave para a biosfera terrestre. Um número cada vez maior de cientistas começou a levantar a possibilidade de se fazer uma transição dos combustíveis fósseis para o hidrogênio, como forma de tentar conter o aquecimento global.

Rifkin (2003) defende a idéia de que o hidrogênio poderá acabar com a dependência do petróleo, reduzindo a emissão de CO_2 e minimizando a aquecimento global, além de reduzir o potencial de guerras políticas e religiosas. O hidrogênio poderá vir a se tornar o primeiro sistema completamente democrático da história da humanidade.

Além de reduzir as emissões de CO_2, o hidrogênio usado em células a combustível será capaz de redefinir a forma com a qual a civilização moderna está acostumada a converter energia. O uso de dispositivos eletroquímicos é capaz de evitar as formações de outros poluentes decorrentes da queima de combustíveis fósseis em processos de combustão. Segundo Middleton *et al* (2003), cerca de 64.000 mortes prematuras poderiam ser evitadas entre os anos de 2000 e 2020 em apenas quatro cidades como Nova Iorque, Cidade do México, Santiago e São Paulo, somente com a introdução de tecnologias que diminuam a emissão de gases de efeito estufa, gases precursores do ozônio e de material particulado, provenientes dos processos de combustão.

4.2.1 A Economia do Hidrogênio

Segundo a Shell (2004) e Panik (2001), o principal recurso energético para o futuro é o hidrogênio, e atualmente ele se encontra sob um intenso foco internacional, tanto em nível governamental quanto em industrial. As principais companhias de petróleo do mundo acreditam que o hidrogênio poderá ser produzido a baixo custo a partir de hidrocarbonetos ou da água, e terá o potencial de aumentar demasiadamente a sua disponibilidade. Por esse motivo, a Shell tem se posicionado como uma das maiores pesquisadoras em tecnologias que envolvam o hidrogênio como combustível, de modo a se tornar a pioneira na transição da economia baseada em combustíveis fósseis para a economia do hidrogênio.

A economia do hidrogênio está diretamente ligada às células a combustível, e essa tal economia vislumbra a geração de energia elétrica de maneira descentralizada e acessível a todos. Isso abre um caminho para um mundo onde todos são capazes de gerar potência não apenas para um veículo, mas também para iluminação de suas casas, aquecimento,

refrigeração, computadores e muitos outros. As células a combustível movidas a hidrogênio trabalharão de maneira silenciosa, limpa e sem vibrações, enquanto fornece energia. Em um futuro próximo, espera-se um aumento das aplicações em pequena escala como telefones celulares e *notebooks*.

4.2.2 Produção de Hidrogênio

Para abastecer as células a combustível com hidrogênio, é necessário produzi-lo primeiro, uma vez que o mesmo não se encontra naturalmente disponível na forma de gás no ambiente terrestre. O hidrogênio ligado em compostos orgânicos e na água constitui 70% da superfície terrestre. A quebra destas ligações na água nos permite produzir hidrogênio e então utilizá-lo como combustível. Existem muitos processos que podem ser utilizados para quebrar estas ligações (vide fig. 4.5), e alguns deles estão comentados a seguir. Além da água, as outras fontes primárias mais estudadas para a produção do hidrogênio são: o gás natural ou metano; o metanol; o biogás; a gasolina; a amônia e o etanol.

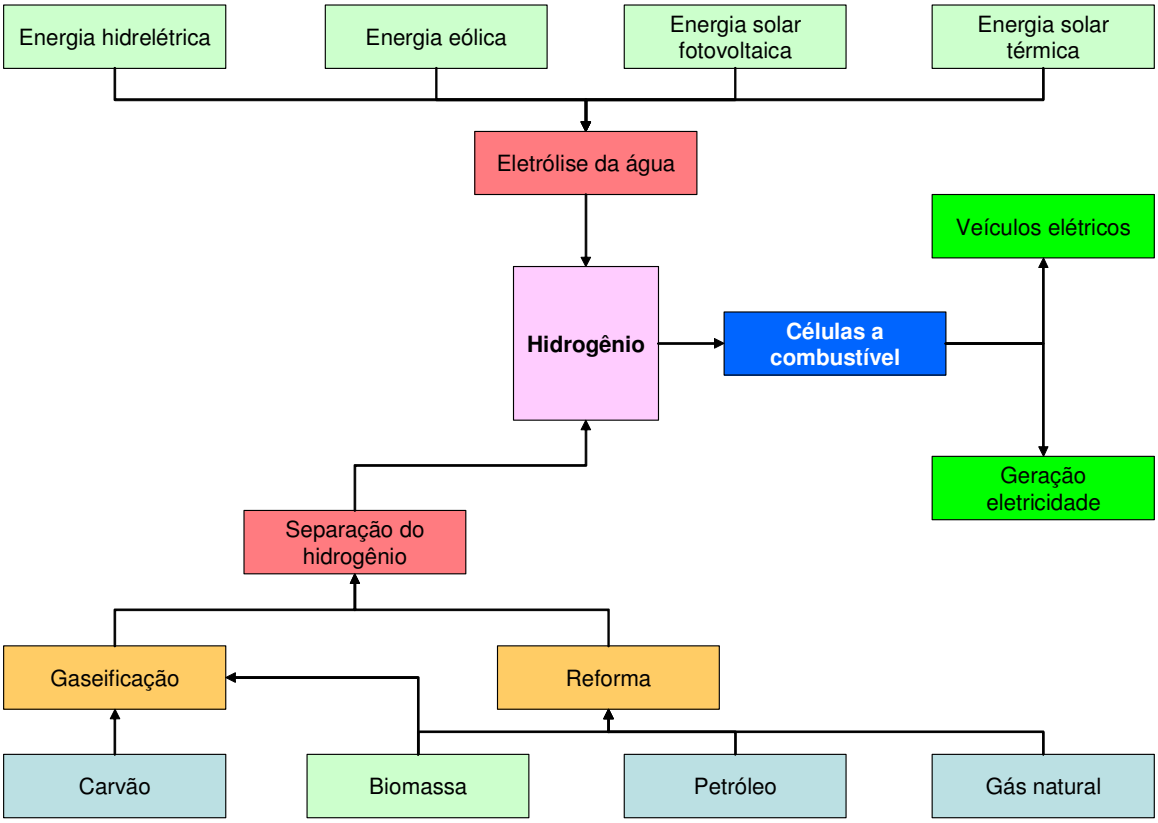

FIG. 4.5 – Fontes de hidrogênio para a célula a combustível
FONTE: Adaptado de Silva (2003)

Os principais processos que podem ser utilizados para quebrar estes compostos são:

a) Reforma de Vapor

A maior parte do hidrogênio utilizado no mundo em escala industrial é produzido pelo processo chamado de reforma de vapor, ou como um subproduto do refino de petróleo e produção de compostos químicos. A reforma de vapor utiliza energia térmica para separar o hidrogênio do carbono no metano ou metanol, e envolve a reação destes combustíveis com vapor em superfícies catalíticas.

O primeiro passo da reação decompõe o combustível em água e monóxido de carbono, conforme a reação abaixo:

$$x\ H_nC_m + y\ H_2O \rightarrow w\ H_2 + z\ CO$$

Então, numa reação posterior transforma o monóxido de carbono e a água em dióxido de carbono e hidrogênio.

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$$

Estas reações necessitam de temperaturas da ordem de 200 °C ou mais. Este processo é muito aplicado para as fontes primárias como o gás natural, o metanol, o etanol, gasolina, a amônia e o biogás.

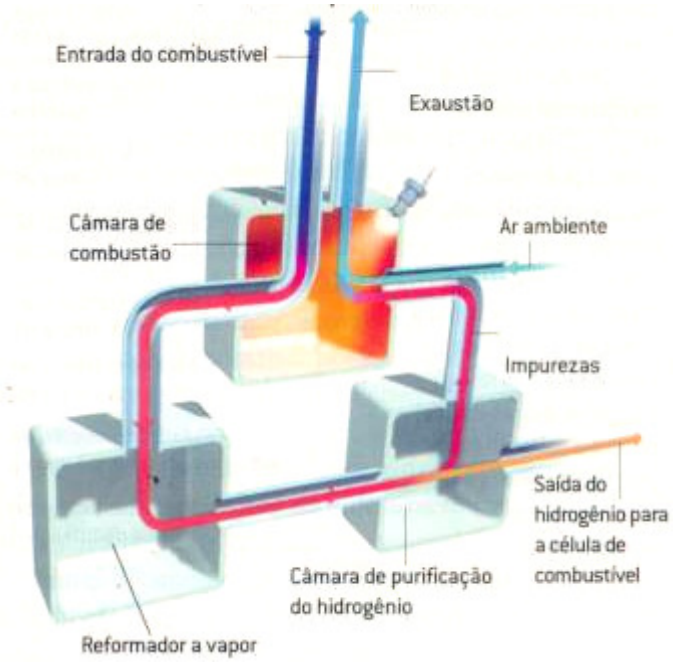

FIG. 4.6 – Equipamento para reforma a vapor
FONTE: SCIENTIFIC AMERICAN (2002)

Segundo a Electrocell (2002), alguns reformadores compactos de etanol são capazes de produzir 1,958 m^3 de H_2 a partir de 1 m^3 de álcool. Considerando que 1,958 m^3 de H_2, a uma densidade de 0,09 kg/m^3, contém cerca de 22 MJ de energia disponível, que o poder calorífico do etanol é de 26,3 MJ/kg, e sua densidade é de 789 kg/m^3, tem-se que a eficiência energética para o processo de reforma do etanol é de 83%. Já para o gás natural, esse valor chega a 3,5 m^3 de H_2 para cada m^3 de gás natural. Considerando 3,5 m^3 de hidrogênio contém cerca de 39,4 MJ de energia disponível, e que o poder calorífico do gás natural é de 55,1 MJ/ m^3, tem-se que a eficiência energética para o processo de reforma do gás natural é de 71,5%.

Panik (2001) afirma que o Brasil é o líder mundial no uso do etanol como combustível e tem uma ampla infraestrutura disponível, com cerca de 25.000 postos de combustível. Além disso, no Brasil há inúmeros centros de pesquisas trabalhando no desenvolvimento de reformadores de etanol, destacam-se o Laboratório de Hidrogênio da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), o grupo de Eletroquímica de São Carlos (USP) e a ELECTROCELL, que é uma empresa privada incubada nas dependências do Instituto de Pesquisas Energéticas (IPEN), em São Paulo. O destaque desta proposta se deve ao fato de que o etanol, além de possuir uma infraestrutura consolidada no Brasil, é um combustível renovável, cujo impacto no ciclo do carbono durante seu ciclo de vida, acaba sendo mínimo. Em outras palavras, o carbono liberado pelo processo de reforma do etanol será extraído da atmosfera quando novas plantações de cana-de-açúcar forem cultivadas, levando o balanço de carbono da cadeia total do combustível a um valor quase nulo.

Em outros países, a pesquisa maior está relacionada ao uso do metano e do metanol derivado do petróleo. Todavia, ambos são combustíveis de origens não-renováveis, o que não parece interessante em termos de sustentabilidade tecnológica, mas que pode, contudo, viabilizar a fase de transição dos motores de combustão interna para as células a combustível, devido à infraestrutura para distribuição e abastecimento destes combustíveis.

b) Eletrólise

Através do processo de eletrólise pode-se separar os elementos químicos constituintes da molécula de água, passando por ela uma corrente elétrica. A adição de um eletrólito como um sal aumenta a condutividade da água e melhora a eficiência do processo. A carga elétrica quebra a ligação química entre os átomos de hidrogênio e oxigênio, separando os componentes atômicos em íons. Estes íons são formados nos dois pólos do sistema: anodo (positivo) e o catodo (negativo). O hidrogênio se concentra no catodo e o oxigênio no anodo (vide figura 4.7). A tensão mínima necessária para a execução do processo é 1,24 V, consi-

derando a utilização de água pura a 25 °C e 1 atm de pressão (PEAVEY, 2001). Este processo é apenas para a produção de hidrogênio a partir da água.

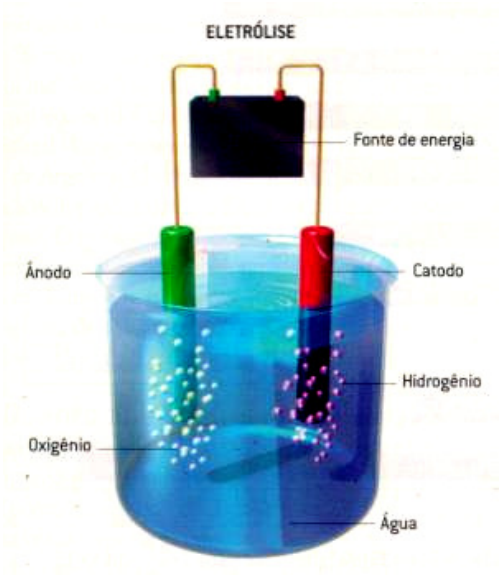

FIG. 4.7 – Equipamento para eletrólise da água
FONTE: SCIENTIFIC AMERICAN (2002)

A menor quantidade de energia necessária para eletrolisar um mol de água é 65,3 Wh (235 kJ), e a produção completa de um metro cúbico de hidrogênio, nas condições normais de pressão e temperatura, requer 4,8 kWh (17,28 MJ), considerando também o consumo dos equipamentos complementares da instalação (PEAVEY, 2001). Considerando a base mássica e uma densidade de 0,089 kg/m³ H_2, a produção de um quilograma requer energia equivalente a 193,5 MJ/kg H_2. Garcia (1999) apresenta que a potência teórica requerida para a produção de hidrogênio é de 4,54 kW por Nm³, onde devem ser somados os consumos dos componentes periféricos do eletrolisador, tais como os compressores.

A taxa de hidrogênio produzido está relacionada à densidade de corrente, ou seja, pelo valor da corrente que atravessa o sistema dividido pela área total dos eletrodos. Em geral, sistemas que operam em alta tensão são menores em tamanho. Segundo o *Fuel Cell Technology* (2001), os equipamentos para eletrólise existentes no mercado são confiáveis, possuem uma eficiência energética entre 65 e 80%, e operam com densidade de corrente da ordem de 2000 A/m^2.

c) Eletrólise de Vapor

É uma variação do processo convencional de eletrólise, onde uma parte da energia necessária para decompor a água é adicionada na forma de calor ao invés de eletricidade, tornando o processo mais eficiente que a eletrólise convencional. A 2500 °C a água

se decompõe em hidrogênio e oxigênio. Este calor pode ser fornecido por um dispositivo de concentração de energia solar. O problema neste processo é impedir a recombinação do hidrogênio e do oxigênio sob as altas temperaturas utilizadas no processo. Este processo é muito aplicado para as fontes primárias como o gás natural, o metanol, o etanol e o biogás.

d) Reforma por oxidação parcial

Outra fonte de hidrogênio utiliza a reforma por oxidação de outros combustíveis. É um dos poucos processos cuja tecnologia permite que seja embarcado nos veículos automotores. O processo de reforma consiste na 'retirada' dos átomos de hidrogênio das cadeias orgânicas de outros combustíveis líquidos, como o metanol, o etanol, a gasolina e outros. O combustível líquido é vaporizado, para reagir, em seguida, em um reator de oxidação parcial, que limita o volume de ar, de forma que são produzidos, primeiramente, hidrogênio, dióxido e monóxido de carbono. Essa mistura passa posteriormente por um outro reator, chamado 'Shift', para reduzir o teor de CO na composição resultante. Este sistema opera a temperaturas entre 1.150 °C e 1.315 °C e atinge cerca de 50% de eficiência. Novamente, o dióxido de carbono é a principal saída (MIDDLETON, 2003).

Quando é mencionado o petróleo como fonte de obtenção de hidrogênio, deve-se atentar para as características físicas e de combustão do combustível, mas é também de extrema importância o entendimento da composição química do mesmo. Na maioria das vezes é a composição química que determina o tipo de processamento a ser utilizado para a obtenção do hidrogênio. As células a combustível exigem um elevado grau de pureza para seu perfeito funcionamento, e isso é muitas vezes difícil de ser atingido apenas utilizando um reformador de combustível. As impurezas contidas no hidrogênio afetam diretamente o desempenho das células, e podem diminuir a vida útil dos componentes. A parcela prejudicial aos sistemas das células de combustíveis devem ser eliminadas, para que não haja a contaminação, deterioração e destruição de vários componentes importantes na célula a combustível (LARMINIE e DICKS, 2000).

O gás natural é rico em hidrogênio e poderia ser desdobrado ou convertido em metanol, o qual seria então enviado para outras usinas com a finalidade de proceder à extração final do hidrogênio. A gasolina, proveniente do processamento do petróleo, também está sendo cogitada para se tornar uma das fontes de geração do hidrogênio, devido à possibilidade de se aproveitar a infraestrutura do sistema de abastecimento atual. A vantagem em relação à situação atual seria a menor emissão de poluentes por não depender diretamente de um processo de combustão.

O metanol e o etanol são outros combustíveis obtidos de fontes orgânicas de amplo interesse, devido aos avançados estudos já efetuados, pois além de poder ser armazenado na forma líquida, pode ser reformados liberando hidrogênio diretamente no interior da própria célula.

A busca pelas fontes primárias renováveis para produção de hidrogênio deve ser estimulada e colocada como objetivo, pois segundo Middleton *et al* (2003), em média, cada 25 kg de hidrogênio utilizada para geração de energia reduz a necessidade de um barril de petróleo.

No entanto, segundo Ashley (2003), os reformadores instalados nos próprios veículos acrescentarão mais peso ao chassi, além de aumentar a complexidade técnica para as montadoras. Além disso, devido ao atual nível tecnológico dos reformadores, o hidrogênio produzido pelo processo de reforma não é tão puro quanto o desejável pelas células a combustível, o que pode comprometer o desempenho e a vida útil das membranas.

4.2.3 Infraestrutura

Para suprir a futura frota de veículos a hidrogênio, as plantas de produção deste combustível deverão estar amplamente disseminadas, e postos de abastecimento amplamente disponíveis. Essa produção pode ser descentralizada, ou seja, os próprios postos de combustível poderão produzir hidrogênio através de reformadores de gás natural ou etanol. Outras opções apresentadas por Weiss *et al* (2000) estão sendo avaliadas, todas relacionadas com a eletrólise da água ou com a reforma de gás natural. Produção centralizada, descentralizada, distribuição por dutos ou por caminhões tanque, enfim todas as alternativas estão sendo avaliadas para viabilizar a economia do hidrogênio. Segundo Weiss (2000) e a Shell Hydrogen Royal Dutch (2004), dentro dos próximos 20 anos as plantas reformadoras de gás natural deverão ser a principal fonte de hidrogênio como combustível. Os atuais produtores de gases especiais, geralmente empresas multinacionais, afirmam que conseguem ampliar a produção de hidrogênio e vendê-lo a um baixo custo. No entanto, quando discute-se o grau de pureza necessário para não prejudicar o funcionamento das células a combustível, os preços dobram ou triplicam.

Em cerca de 50 anos, ainda segundo Weiss *et al* (2000), a geração de hidrogênio deverá ser descentralizada, utilizando principalmente equipamentos de eletrólise, onde cada pessoa poderá produzir seu combustível a partir da água, e utilizando fontes renováveis de energia para manter seu eletrolisador funcionando.

Todavia, nesta fase de transição, pode-se citar os casos da Toyota e Honda, que mantém postos de H_2 na Califórnia, produzindo hidrogênio localmente através da eletrólise da água, alimentada por células fotovoltáicas (ELECTROCELL, 2005).

No projeto experimental de utilização de ônibus movidos por células a combustível de hidrogênio, promovido pela Organização das Nações Unidas (ONU), que conta com a participação do Brasil, o hidrogênio será produzido de maneira diferente em cada país, a fim de se estudar o desempenho dos processos de abastecimento para cada tecnologia. No caso brasileiro, todo o hidrogênio será produzido através da eletrólise da água, utilizando-se energia elétrica da rede fora dos horários de ponta. A estratégia proposta é que o sistema produza hidrogênio suficiente durante o dia, fora dos horários de ponta, para que os veículos possam ser reabastecidos durante a noite. A previsão é de que a carga de hidrogênio abastecida seja suficiente para a circulação de cada ônibus durante todo o horário útil de trabalho.

4.2.4 Armazenamento

O grande revés do hidrogênio no momento está relacionado ao armazenamento. A baixa densidade do gás, a pequena dimensão de sua molécula e a sua alta volatilidade representa uma série de desafios para os engenheiros. Os sistemas mais tradicionais de armazenamento do hidrogênio empregam cilindros de alta pressão para seu acondicionamento. Todavia, devido às dimensões de sua molécula, a grande maioria dos cilindros existentes nos mercados são permeáveis ao gás. Em outras palavras, a molécula de hidrogênio é capaz de atravessar os metais através dos espaços de suas cadeias cristalinas. Outro ponto de difícil contenção está relacionado às junções das tubulações, que também não são muito eficazes na garantia da estanqueidade do sistema. Estes problemas foram extensivamente estudados por Bossel e Eliasson (2002), que apresentam resultados sobre armazenamento e transporte de hidrogênio por meios convencionais de distribuição de combustíveis.

Outro fator complicador é a sua baixa densidade volumétrica. Para se gerar a mesma quantidade de energia que um combustível fóssil comum, necessita-se de um volume muito maior de espaço para o armazenamento de hidrogênio equivalente. Se forem utilizados os automóveis como exemplo, pode-se citar que enquanto um tanque de combustível normal armazena cerca de 0,05 m^3, o equivalente para hidrogênio pode requerer cerca de cinco vezes mais, e ainda fornece apenas a metade da autonomia. Além disso, acaba por ocupar o precioso espaço disponível para os ocupantes ou suas bagagens.

Os cilindros de hidrogênio mais utilizados nestes casos são capazes de armazenar entre 2 e 3 kg do gás comprimido, a cerca de 200 bar. A tecnologia atual está disponibilizando cilindros para armazenamento de até 350 bar, mas a tendência mundial é de se buscar o valor de 750 bar.

Algumas empresas estudam o armazenamento de hidrogênio liquefeito. Contudo, a grande quantidade de energia gasta para a liquefação do gás e os enormes sistemas de isolamento térmico para manter o produto a baixas temperaturas acabam aumentando consideravelmente o custo e aumentando o tamanho dos sistemas de acondicionamento do hidrogênio.

Uma outra alternativa em desenvolvimento seria o armazenamento das moléculas de hidrogênio nos espaços intersticiais da estrutura cristalina de alguns compostos metálicos, também conhecidos como hidretos metálicos. Neste conceito, o hidrogênio fica preso na estrutura molecular do metal e é liberado para consumo através do aquecimento do conjunto. No caso das células a combustível, o próprio calor gerado pelo funcionamento dos eletrólitos seria capaz de aquecer um dispositivo contendo hidreto metálico, promovendo a liberação do hidrogênio para consumo na própria célula.

Dentre as alternativas acima expostas, a que se encontra em ampla difusão no mercado é a do hidrogênio comprimido, devido aos baixos custos e tamanhos reduzidos dos sistemas.

4.3 Veículos Automotores

Segundo a Eletrocell (2005), na transição de uma economia baseada no petróleo para uma economia sustentada pelo hidrogênio, o setor automobilístico é um meio propício à difusão de inovações devido ao fascínio que o transporte individual exerce sobre as pessoas e às técnicas mercadológicas empregadas pelas montadoras e pelas revendedoras de veículos. É, pois, previsível que a entrada do sistema célula a combustível com motor elétrico se difunda rapidamente para toda a frota de automóveis, haja ou não motivação ambiental ou econômica.

No que tange o transporte coletivo, a motivação ambiental é clara e o sistema célula com motor elétrico já está se difundindo a nível internacional, considerando inclusive sistemas com reformador embarcado. No Brasil encontra-se em andamento um projeto da Empresa Municipal de Transportes Urbanos (EMTU), de São Paulo, em acordo com a Organização das Nações Unidas (ONU). A EMTU espera operar, experimentalmente, uma frota de ônibus elétricos acionados a células a combustível alimentadas por hidrogênio comprimido embarcado em 2009. O hidrogênio, neste caso, será gerado através de eletrólise feita em instalação centralizada (garagem dos ônibus) e que aproveita a energia elétrica de baixo custo disponível nos horários fora de ponta (SCHETTINO e RIBEIRO, 2009).

Em 1950 existiam cerca de 50 milhões de veículos no mundo. Hoje, esse número está por volta de 700 milhões e estima-se que supere os 800 milhões em 2010. Há perspectivas de que esse valor chegue a 2 bilhões em 2050, e espera-se que a grande maioria seja composta de veículos movidos por células a combustível.

A rápida urbanização significa que as pessoas estão vivendo e trabalhando mais nas cidades, e estas estão se modificando para atender às necessidades do automóvel, e não mais às necessidades do homem. Esse é um dos grandes motivos da grande degradação urbana vivenciada atualmente. As cidades estão crescendo desordenadamente, dificultando o planejamento de um transporte coletivo eficiente, e, em contrapartida, aumentando a necessidade de viagens urbanas com automóveis.

Essa demanda crescente de utilização urbana tem implicações para o meio ambiente, para a ocupação, para a saúde e para a eficiência econômica. A promessa de poder e liberdade dos automóveis pode ser contrariada pela irritação dos congestionamentos. Consequentemente, a resposta direta a esse tipo de estímulo tem sido a ampliação e construção de mais ruas e avenidas, de modo a acomodar todo esse crescente número de veículos, retroalimentando o esparramamento urbano.

Citando Dias (2003), “é curioso que os planejadores de transporte tenham reconhecido que a construção de mais vias não resolve necessariamente os problemas de trânsito (é como comprar calças mais largas para resolver o problema da obesidade), mas continuam suprimindo áreas verdes para dar lugar a mais e mais vias.”

Conforto, velocidade e independência são algumas vantagens indiscutíveis dos automóveis. No entanto, os custos indiretos desse tipo de dependência estão se tornando aparentes: manutenção e construção de vias, congestionamentos que minam a produtividade econômica, altos níveis de consumo de energia com seus respectivos impactos ambientais e econômicos, aumento da poluição atmosférica, acidentes e desigualdades sociais que aumentam quando os menos favorecidos encontram os seus serviços de transporte público cada vez mais deficientes (DIAS, 2003).

Ao final da década de 1980, dentre as sete maiores indústrias americanas, cinco produziam automóveis, ou combustíveis para eles. Nos EUA, os automóveis e suas montadoras são responsáveis por queimar cerca de oito milhões de barris de petróleo por dia (quase 1.700 litros anuais por pessoa); por torná-los cada vez mais dependentes do petróleo estrangeiro ao custo de US$60 bilhões ao ano; por torná-los dependentes de uma região instável e geralmente hostil, armada, em parte, com o próprio pagamento americano do petróleo, obrigando-os a empreender grandes expedições militares e manter-se em permanente estado de alerta; emitir 25% dos gases de efeito estufa, ameaçando o clima mundial; criar 3,5 milhões de toneladas de lixo e resíduos por ano (RIFKIN, 2003).

O licenciamento global de veículos cresce duas vezes mais rápido do que a população. Cerca de 15% da população do mundo possuem 76% dos veículos motorizados, sendo que boa parte dos 85% restantes gostariam de ter o seu também. As projeções sugerem que as viagens globais (pessoa por quilômetro por ano) mais que duplicarão entre 1990 e 2020, e dobrará novamente em 2050 (HAWKEN, 1999).

Diante desta perspectiva e depois de mais de um século de engenharia, torna-se constrangedor para os especialistas a ineficiência dos veículos em circulação nas ruas. Pelo menos 80% da energia do combustível que ele consome se perde, principalmente no calor e na exaustão dos gases do motor, de modo que, atualmente, somente 20% são utilizados para a tração nas rodas. Segundo Hawken (1999), 95% da força resultante servem para colocar o carro em movimento, sendo que apenas 5% deslocam o motorista. Isso quer dizer que apenas 1% da energia do combustível é usado para satisfazer a necessidade de locomoção do homem moderno.

4.3.1 Os veículos automotores e a poluição atmosférica

Os veículos automotores são, considerando todos os bens produzidos pelo homem, os que mais geram poluição atmosférica, e dentre todos os gases emitidos pelos veículos, destacam-se o dióxido de carbono (CO_2), o óxido nitroso (N_2O), o metano (CH_4) e os precursores do ozônio troposférico, hidrocarbonetos (HC), óxidos de enxofre (SOx) e óxidos de nitrogênio (NOx). Os veículos automotores são também a principal fonte de monóxido de carbono (CO), que tem papel importante nas formações e concentrações de poluentes secundários como o metano e o ozônio troposférico.

Segundo Bigio (2001), as emissões veiculares somam mais de 70% da poluição do ar urbano em grandes cidades, provocando um aumento do índice de mortalidade prematura, mortalidade por doenças respiratórias, perda de produtividade dos cidadãos e trabalhadores, aumento dos custos do seguro-saúde e perda significativa da qualidade de vida urbana. Todos estes aspectos negativos provocam perdas monetárias significativas, na casa dos bilhões de dólares anuais. A magnitude da poluição do ar pode desencorajar investimentos econômicos em cidades extremamente poluídas, causando perdas econômicas adicionais a longo prazo à sociedade como um todo.

O dióxido de carbono é atualmente o gás de efeito estufa de maior importância. Ao todo, o setor de transporte consome anualmente cerca de $58{,}025.10^{18}$ J de energia, com variações consideráveis dependendo da região do mundo. Os EUA são o maior consumidor de energia do planeta, usando mais de 35% da energia de transporte do mundo. O transporte consome quase um terço (1/3) do total de energia consumida no mundo; mas isso depende em grande parte da região (LEGGET, 1992).

Devido a esse alto consumo de energia, os veículos automotores emitem aproximadamente 25% da emissão total de CO_2; nos EUA, o transporte é responsável por quase 30% do total das emissões de CO_2. O setor de transporte dos EUA emite quase tanto CO_2 quanto o Leste europeu, Ásia, China, África, América Latina e o Oriente Médio juntos (LEGGET, 1992).

Segundo Goldemberg (2001), cerca da metade da produção mundial de petróleo é consumida por veículos. O aumento anual da frota é de aproximadamente 10 milhões de automóveis e 5 milhões de caminhões e ônibus em todo o mundo.

Além do crescimento da frota mundial, há também uma tendência de se dirigir mais, ou seja, as distâncias percorridas pelos veículos estão aumentando rapidamente. Segundo Goldemberg (2001), no início da década de 1990, a distância total percorrida pelos veículos da frota dos EUA era de aproximadamente 3,38 trilhões de km/ano. Em 2008 este número está em torno de 10 trilhões de km/ano.

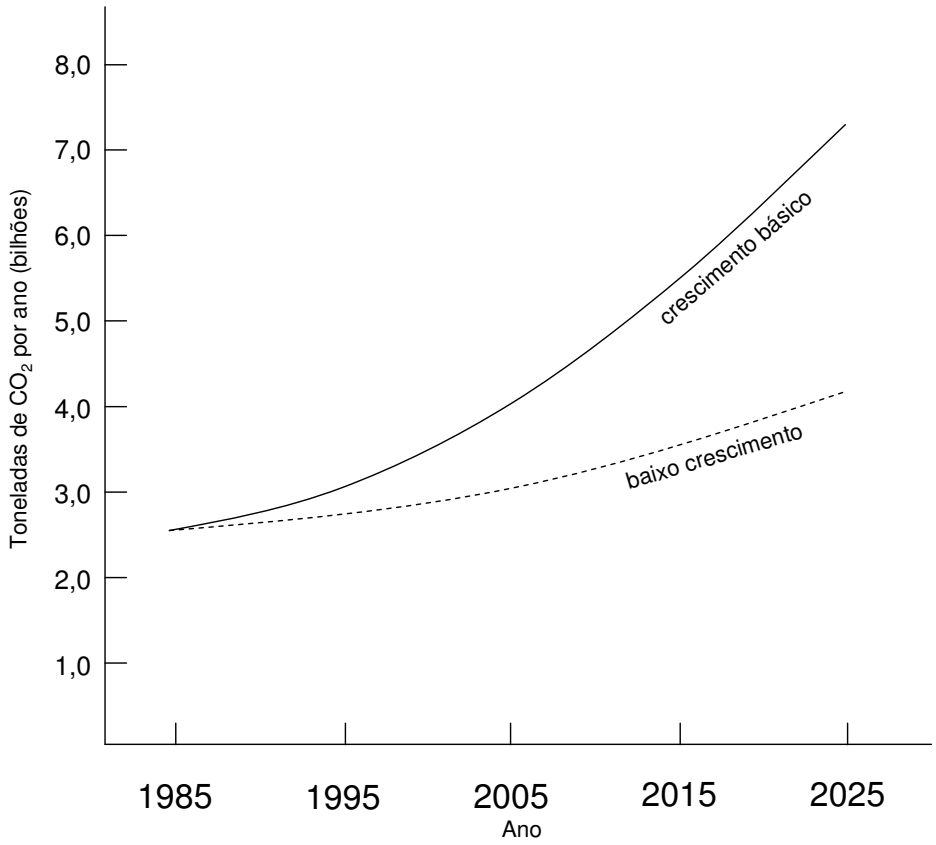

FIG. 4.8 – Emissões globais de CO_2 por veículos, presumindo nenhuma melhoria na eficiência dos motores
FONTE: Adaptado de Goldemberg (2001)

4.3.2 Volume de veículos em circulação no Brasil e no mundo

O volume total de veículos leves em circulação no país segundo a Associação Nacional das Empresas Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA), é de 19,2 milhões de unidades. Esse número é uma estimativa efetuada pela ANFAVEA até dezembro de 2007.

Nesta distribuição, dentre o total de veículos de passeio, cerca de 80% são veículos movidos a gasolina, e 20% a álcool. Atualmente, as montadoras nacionais produzem todos os seus modelos com motores flexíveis (funcionam com álcool, gasolina ou a mistura dos dois) para o mercado doméstico.

Já a frota mundial, ainda segundo a ANFAVEA (2007), está na casa dos 700 milhões de unidades.

4.3.3 Evolução da frota de veículos a hidrogênio

Segundo o estudo conduzido por Weiss *et al* (2000), os novos veículos movidos por células a combustível teriam uma grande vantagem sobre os futuros motores de combustão interna, quando analisadas as emissões de CO_2 durante todo o ciclo de vida do produto (das matérias-primas à destinação final pós-uso), a eficiência energética e os custos gerais.

Prost e Sullivan (2001) apresentam valores bastante agressivos para a substituição da frota veicular. Segundo a figura 4.9, as vendas nos EUA dos veículos com motores de combustão interna devem atingir o valor mínimo por volta de 2030. Nesse ano, os veículos com células a hidrogênio serão quase a totalidade da produção americana. A hipótese adotada neste trabalho é semelhante à de Prost e Sullivan (2001): em 2050 quase todos os veículos serão movidos por células a combustível.

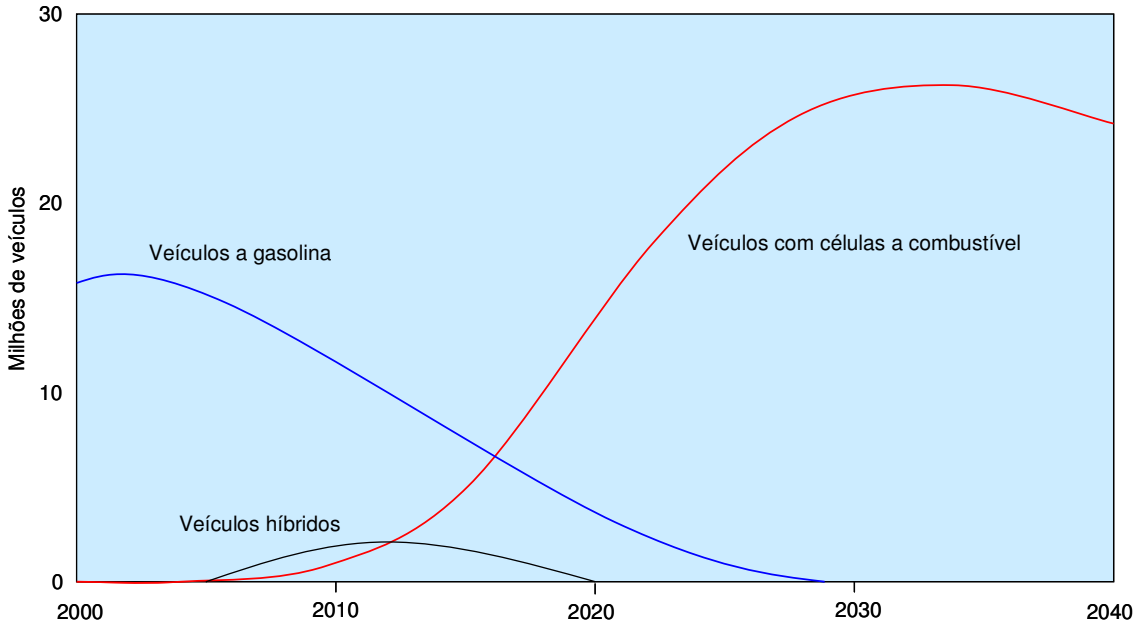

FIG. 4.9 – Projeção de substituição da frota americana de veículos com motores de combustão interna pelos veículos elétricos
FONTE: Adaptado de Frost e Sullivan (2001)

O Japão espera ter no ano de 2030, 20% dos veículos em circulação movidos por células a combustível de hidrogênio. Os japoneses esperam ter 50.000 veículos em circulação nas ruas já em 2010. Além dos veículos, a meta também inclui a instalação de 8.500 postos de hidrogênio até 2030 (CELULA A COMBUSTÍVEL, 2004).

Além do Japão, a americana General Motors espera produzir cerca de um milhão de veículos com células a combustível até 2020.

De acordo com as previsões da Comunidade Européia, estima-se que em meados de 2015 os veículos com células a combustível estarão competitivos no mercado mundial. Em 2027, cerca de 25% da frota deverá ser movida por células a hidrogênio, atingindo a totalidade (100%) em 2050, de acordo com material de referência da Universidade de Buenos Aires (2004).

No entanto, Ashley (2003) afirma que as próximas duas décadas serão dominadas por veículos híbridos, e estes serão mais comuns do que os veículos com células a combustível. Sua afirmação é uma previsão das consequências da reorganização da estrutura de concessão de créditos para veículos não poluentes na Califórnia (EUA). A California Air Resources Board (CARB) passou a classificar os veículos híbridos como sendo similar aos veículos totalmente elétricos com baterias e os movidos por células a combustível.

4.3.4 Veículos movidos por células a combustível

Cada uma das maiores montadoras de automóveis no mundo anunciou planos de lançar veículos alimentados por células a combustível. Em 1997, a Daimler-Benz iniciou um esforço em conjunto com a Ballard Power Systems, uma empresa canadense líder no desenvolvimento de células a combustível, para criar motores com células a combustível de hidrogênio. A Ford uniu-se posteriormente a este grupo, elevando os investimento para a casa dos bilhões de dólares. A Toyota e a GM esperam ter um de seus modelos a hidrogênio circulando pelas ruas até 2010. A Nissan, a Honda, a Mitsubishi e a VW também estão planejando seus modelos, mas ainda não confirmaram uma data para introdução do produto no mercado. Os dados dos principais produtos em desenvolvimento estão na tabela 4.1, e foram utilizados para o desenvolvimento deste trabalho.

Segundo Ashley (2003), um veículo movido por células a combustível é muito similar a um carro elétrico com baterias. Em geral, os computadores de bordo, controladores, sensores e conversores de sinais analógicos e digitais são os mesmos dos veículos convencionais com motores de combustão interna, embora os algoritmos sejam diferentes. Os controladores de potência, chamados na indústria de *powertrain control*, são também muito similares aos utilizados nos veículos elétricos, e são divididos em controle de geração de torque para o sistema motriz e o controle de geração de potência para a célula a combustível. O sistema de tração continua a seguir a evolução dos motores elétricos.

TABELA 4.1: Veículos com células a combustível em desenvolvimento pelas montadoras

Marca	Modelo	Capacidade do tanque (kg de H_2)	Autonomia (km)	Consumo (km/kg)
Honda	FCX V4	3,75	300	80,0
Ford	Focus FCV	4,0	290	72,5
GM	HydroGen 3 (Zafira)	3,1	270	87,1
VW	Tiguan HyMotion	3,2	230	71,9
Daimler-Chrysler	Necar 4	1,8	200	111,1
Daimler-Chrysler	Classe A	1,8	145	80,6
GM	Hy-wire	2,0	129	64,5

4.4 Combustíveis Fósseis

As células a combustível abrirão caminho para a era do hidrogênio, porém a humanidade irá precisar do petróleo ainda por mais tempo.

Segundo Hinrichs e Kleinbach (2003), cerca de 70% do uso total de energia é proveniente de fontes constituídas por combustíveis fósseis, como o carvão, o petróleo e o gás natural. O petróleo é o mais extensamente utilizado e processado, e que gera o maior grau de dependência e vulnerabilidade econômica. Essa dependência do petróleo, especificamente no setor de transportes, coloca muitos países na iminência de um desastre econômico de grandes proporções, caso haja alguma interrupção no fornecimento do óleo.

Devido à enorme necessidade energética mundial, o petróleo vem sendo extensamente explorado ao longo dos anos, o que o coloca como o principal candidato, dentre os combustíveis fósseis, a exaurir suas reservas em curto prazo.

O aumento dos setores de transportes foi o principal fator que contribuiu para o aumento do consumo de petróleo. Ainda segundo o autor, o consumo de gasolina nos EUA cresceu 15% nos últimos 10 anos e a eficiência dos automóveis aumentou 12%.

Nos últimos 50 anos, a demanda mundial por energia triplicou, sendo que a maioria da demanda ocorreu nos países industrializados, e 90% dessa demanda foi satisfeita por combustíveis fósseis.

4.4.1 Petróleo

O primeiro poço de petróleo para fins comerciais foi escavado nos EUA em 1859, no entanto, somente após a invenção do motor de combustão interna é que se começou a extração em grande escala (HINRICHS e KLEINBACH, 2003).

Todavia, a popularização do petróleo só ocorreu mesmo após o ano de 1920, com as linhas de produção de automóveis de Henry Ford. Na década de 1950, o petróleo correspondia a menos de 30% do uso de energia mundial.

O aumento do consumo de petróleo foi estimulado principalmente pelos baixos preços do produto na metade do século passado. Foi nessa época que surgiu um grande cartel, formado pelos países produtores de petróleo, com a intenção de controlar os preços do produto. Esse cartel se denominou Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP) em 1960, e sua expansão começou a ganhar dimensões quando começou a influenciar em mudanças políticas internacionais, e, principalmente, pela crescente demanda mundial de petróleo e consequente dependência global.

No início da década de 1970, esses países começaram a estabelecer seus próprios preços, tirando o controle do mercado e das indústrias. O poder da OPEP foi realmente demonstrado no ano de 1973, quando seus países membros reduziram a produção de petróleo, em retaliação ao início do conflito entre árabes e israelenses. Essa redução e posterior interrupção de fornecimento de petróleo fizeram com que o preço do produto triplicasse no mercado mundial. Desde a ocasião, nunca mais o preço do barril de petróleo atingiu valores semelhantes ao que tinha antes do embargo.

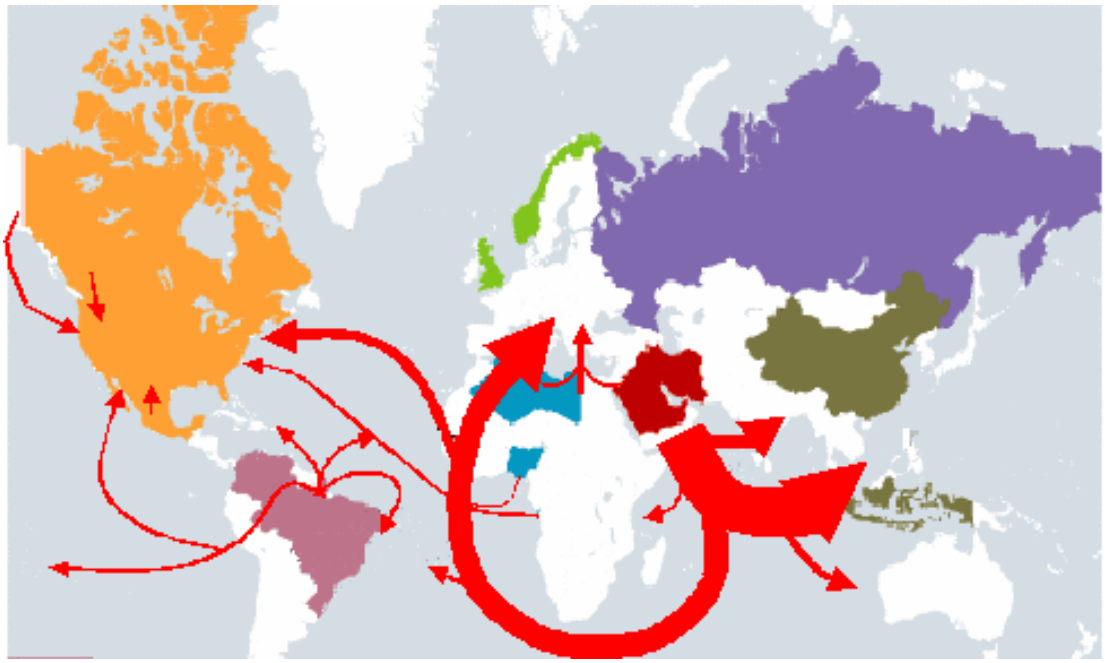

FIG. 4.10 – Mapa de fluxo de distribuição mundial de petróleo.
FONTE: adaptado de Coelho (2005)

A revolução iraniana de 1978 novamente provocou uma redução na produção mundial de petróleo, provocando novos aumentos do barril. A invasão do Kuwait em 1990 pelo Iraque também provocou uma disparada nos preços, que vinham numa forte tendência de queda.

Como pode ser observado, as crises e os picos de preços do barril de petróleo seguem um ciclo de quase 10 anos. Após o incidente do Kuwait, em 1990, onze anos depois houve a invasão americana no Afeganistão, que abriu uma rota de passagem para escoar o petróleo russo, e em 2003 a invasão no Iraque, também pelos americanos, que tomaram controle de todas as refinarias do país.

A resposta a toda essa instabilidade econômica e social foi o desenvolvimento de

equipamentos mais eficientes no consumo de energia, a adoção de padrões de consumo mais eficientes entre as populações e o desenvolvimento de fontes alternativas de energia. Dentre estas destacam-se o álcool e o hidrogênio.

4.4.2 A curva de Hubbert

Por definição, reservas são as partes de um recurso que podem ser economicamente recuperadas com a tecnologia atual. O valor de uma reserva não é fixo, pois o desenvolvimento da tecnologia de extração e de detecção de novas áreas de prospecção podem alterar esse valor constantemente.

Como os combustíveis fósseis são fontes não-renováveis de energia, espera-se que a produção, após um longo crescimento exponencial, atinja um ponto de produção máxima, e daí em diante passe a decrescer a uma taxa também elevada. Quem primeiro estudou esse comportamento para as reservas de combustíveis fósseis foi o geólogo M. K. Hubbert. Segundo Hinrichs e Kleinbach (2003), à medida que um depósito de alta qualidade se exaure, a produção atinge um pico, e então declina, eventualmente chegando a zero na exaustão completa do recurso. A curva de produção apresenta uma forma semelhante à de um sino, motivo pela qual foi apelidada de “a curva do sino de Hubbert”. Como o recurso começa a ser esgotado, a descoberta e a produção tornam-se mais difíceis e os preços acabam se elevando. Nesse momento, outros recursos começam a tomar o lugar do combustível original.

Acredita-se que a curva de Hubbert para as reservas mundiais de petróleo já tenha atingido o seu pico, ou, no pior caso, irá atingi-lo até meados de 2010 (vide figura 4.11). Isso significa que, a partir de então, os custos para exploração de petróleo tornar-se-ão cada vez maiores, e a disponibilidade de petróleo será cada vez menor, acarretando um aumento direto no preço do barril de petróleo.

Esse cenário mostra uma indisponibilidade energética por combustíveis fósseis por volta de 2050, e está ativando a busca mundial por novos sistemas de energia, onde um dos principais vetores é o hidrogênio.

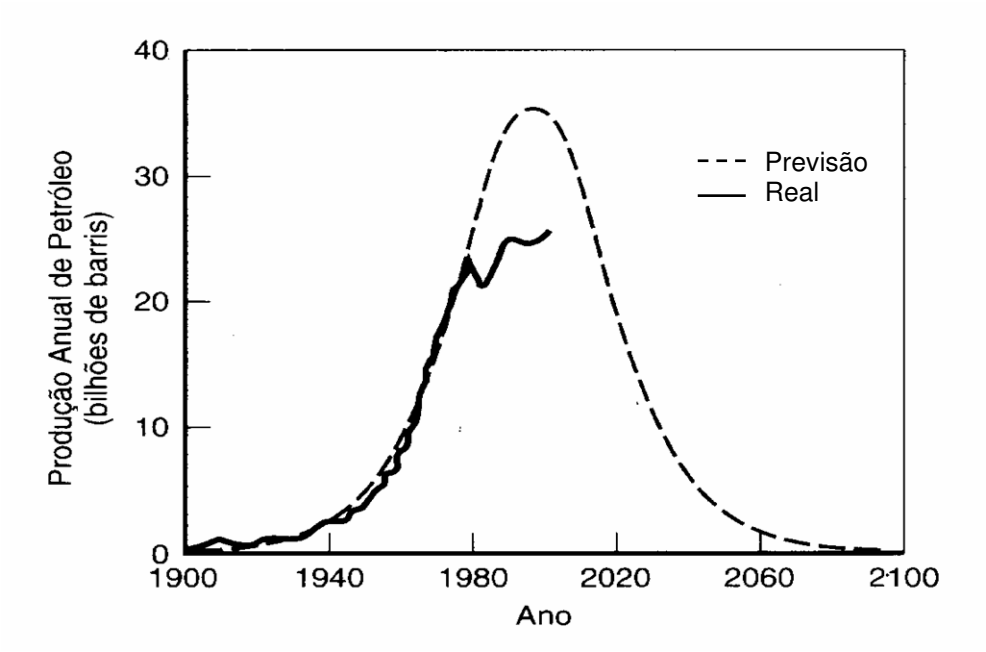

FIG. 4.11 – Curva de Hubbert para produção de petróleo nos EUA
FONTE: Hinrichs e Kleinbach (2003)

4.4.3 Duração das reservas de petróleo no Brasil e a produção no mundo

As reservas totais de petróleo brasileiras são de cerca de 20 bilhões de barris, e as plataformas de extração retiram do interior da crosta terrestre aproximadamente 1,7 milhão de barris por dia (ANP, 2009). Portanto, na situação atual, as reservas brasileiras irão se esgotar em cerca de 30 anos. E as do restante do mundo não terão uma sobrevida muito maior que a brasileira. Tal conclusão é semelhante à de Goldemberg (1998), que afirma que as reservas brasileiras não durarão mais do que 20 anos.

A produção mundial de petróleo, de acordo com o Energy Watch Group (2008) é de 81 bilhões de barris por ano, e as reservas conhecidas estão na casa dos 854 bilhões de barris.

4.5 Biocombustíveis

A crescente preocupação com os impactos no clima causados pelas emissões de CO_2 oriundos da queima desenfreada de combustíveis fósseis elevou o etanol a um patamar de destaque diante das fontes alternativas e renováveis de energia. O etanol é classificado como um biocombustível, uma vez que sua fonte principal é a biomassa.

A biomassa é proveniente de matérias encontradas em abundância no Brasil, como plantas e seus derivados, sendo considerada também uma forma renovável de energia, portanto não tende ao esgotamento. A biomassa compreende todos os organismos biológicos que podem ser aproveitados como fonte de energia. Esta fonte é formada pela combinação do CO_2 da atmosfera com a água no processo de fotossíntese, que resulta na formação dos hidratos de carbono e apresenta energia solar armazenada nas ligações químicas dos componentes estruturais da biomassa (TOLMASQUIM, 2004). Quando a matéria é queimada, há o rompimento das ligações e conseqüente liberação de energia, CO_2 e água. Temos, portanto, um ciclo fechado do carbono, onde o elemento químico antes presente na atmosfera como CO_2, transforma-se em matéria orgânica através da fotossíntese, e volta à atmosfera ao combinar-se novamente com o oxigênio (resultado da combustão).

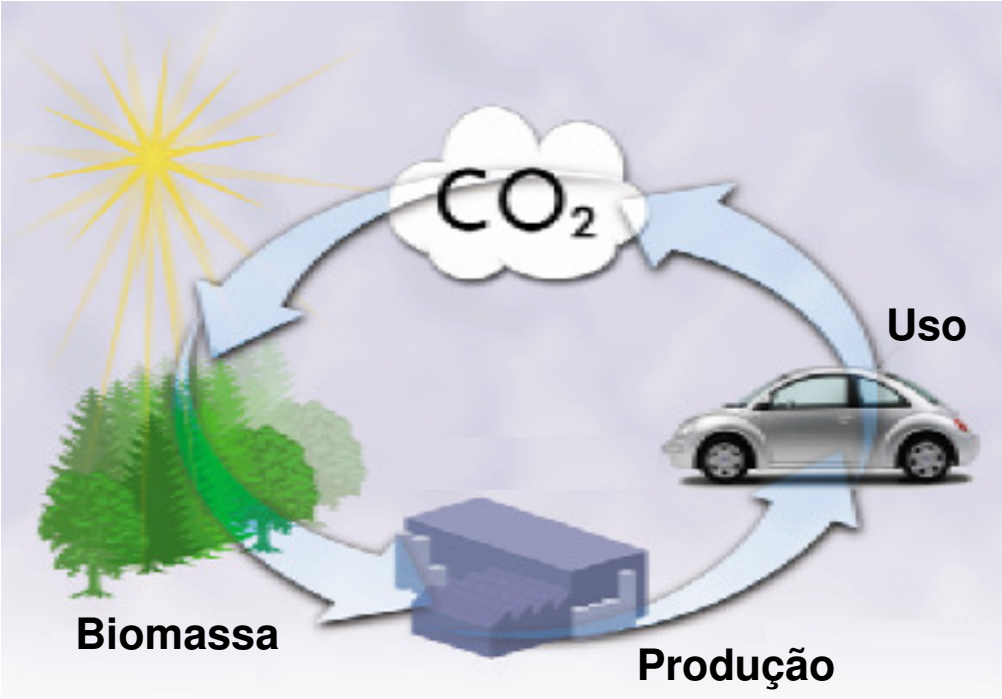

FIG. 4.12 – Ciclo do Carbono para o combustível proveniente da biomassa
FONTE: Adaptado de Volkswagen (2002)

Os empreendimentos para utilização de biomassa em larga escala também apresentam impactos ambientais preocupantes. Como resultado direto da necessidade de aumentar

a produtividade e aumentar o uso do solo, promove-se a destruição de faunas e floras, algumas vezes com extinção de espécies, contaminação do solo e mananciais de água quando defensivos agrícolas são manejados de maneira inadequada.

Dentre os biocombustíveis, o etanol ocupa uma posição de destaque principalmente no Brasil, onde os programas de incentivo do uso do etanol como combustível automotivo foram sustentados pelo Governo desde a década de 1970.

O biodiesel tornou-se a grande figura para complementar o cenário de transição para uma tecnologia de uso de biocombustíveis. O Brasil, assim como no caso do etanol, ocupa uma posição de destaque no mercado global de fornecimento deste combustível. No final de 2006, a União Européia (UE) anunciou a opção por utilizar o biodiesel, enquanto os americanos optaram pelo etanol. A UE definiu o objetivo de chegar a 2030 com cerca de 25% de sua frota consumindo biodiesel, e ainda apresentou uma meta de redução de 20% nas suas emissões de gases de efeito estufa, contando com a ajuda dos biocombustíveis.

No entanto, uma questão importante pode impactar negativamente no desejo do Brasil de ser o maior produtor de biocombustíveis do mundo. Aliando uma forma de protecionismo e de preocupação ambiental, a Alemanha tomou a posição de impor restrições à importação de biocombustíveis de países que não comprovem cumprir suas responsabilidades com o meio ambiente e com o uso de mão-de-obra escrava ou infantil.

Outro fator importante a ser considerado é a competição que haverá entre as plantações de biomassa para produção de combustíveis com as áreas de cultivo para alimentação humana. Os EUA já sentem esse problema. Devido a demanda de grãos, principalmente milho, para ampliação da produção de etanol, os preços dos alimentos já estão subindo nos supermercados.

No Brasil, a soja está surgindo como a grande tendência de virar o grão do biodiesel, contrariando o programa inicial do governo federal de extrair o biocombustível das plantações de mamona, que daria emprego e renda para os sertanistas do semi-árido do país. A colheita de mamona em 2006 já foi 70% inferior à do ano de 2005. Este cenário é preocupante, pois gera a dúvida se a soja vai ou não disputar espaço com as florestas e com o cerrado, como tem ocorrido nos últimos anos. A Embrapa (2006) estima que serão necessários 100 bilhões de litros de biodiesel nos próximos 30 anos, e para isso, precisa de cerca de 40 milhões de hectares. A alternativa seria aproveitar os cerca de 50 milhões de hectares de áreas degradadas de pastagens espalhadas pelo país. A questão aqui é o investimento necessário para a expansão da produção. Para se recuperar 20 milhões de hectares pouco

produtivos são necessários cerca de R$ 40 bilhões. Portanto, para os produtores de grãos, pode parecer mais barato derrubar florestas do que recuperar áreas improdutivas.

4.5.1 Etanol

No Brasil, a história do etanol como combustível para automóveis começou com a crise do petróleo de 1973, quando o país importava mais de 80% do óleo consumido. A iniciativa do governo federal foi a de fomentar a expansão da agroindústria da cana de açúcar, com o objetivo de substituir o consumo interno de gasolina pelo etanol, através de um programa institucional chamado de Pró-Álcool. O Pró-Álcool possibilitou a criação de milhares de empregos na região rural, chegando a corresponder a 40% da força de trabalho rural. Segundo Panik (2001), essa necessidade de mão-de-obra é cerca de 152 vezes maior que a do petróleo, para se produzir a mesma quantidade de energia.

Com o segundo choque do petróleo em 1979 e o sucesso da utilização do etanol misturado à gasolina, substituindo alguns aditivos a base de chumbo, o governo iniciou novos investimentos, dessa vez em acordo com a indústria automobilística, que tinha o objetivo de desenvolver veículos preparados para funcionar exclusivamente com o chamado álcool hidratado. Os veículos a álcool rapidamente tomaram as ruas das cidades brasileiras, graças a incentivos fiscais para aquisição de um veículo novo, ao preço controlado nas bombas de combustível e aos subsídios concedidos para as destilarias expandirem o parque industrial de biomassa. Por volta de 1985, o Brasil possuía uma frota de veículos a álcool superior à de gasolina, e as montadoras se ocupavam de fabricar quase que exclusivamente os modelos a álcool. As vendas destes veículos chegaram a ser de 90% do total de veículos novos colocados no mercado.

Após o grande sucesso do Pró-Álcool e da tecnologia nacional no desenvolvimento de veículos especiais, veio o choque do álcool. Na verdade, em meados da década de 80 houve o chamado contrachoque do petróleo, com seu preço despencando no mercado mundial. Como o preço da álcool hidratado estava atrelado ao da gasolina, com a queda do preço do petróleo, o etanol combustível teve seu preço recuado na mesma proporção. Aliado a isso, seguiu o encerramento dos subsídios pagos às usinas em expansão, resultando na redução drástica dos investimentos e da rentabilidade no setor.

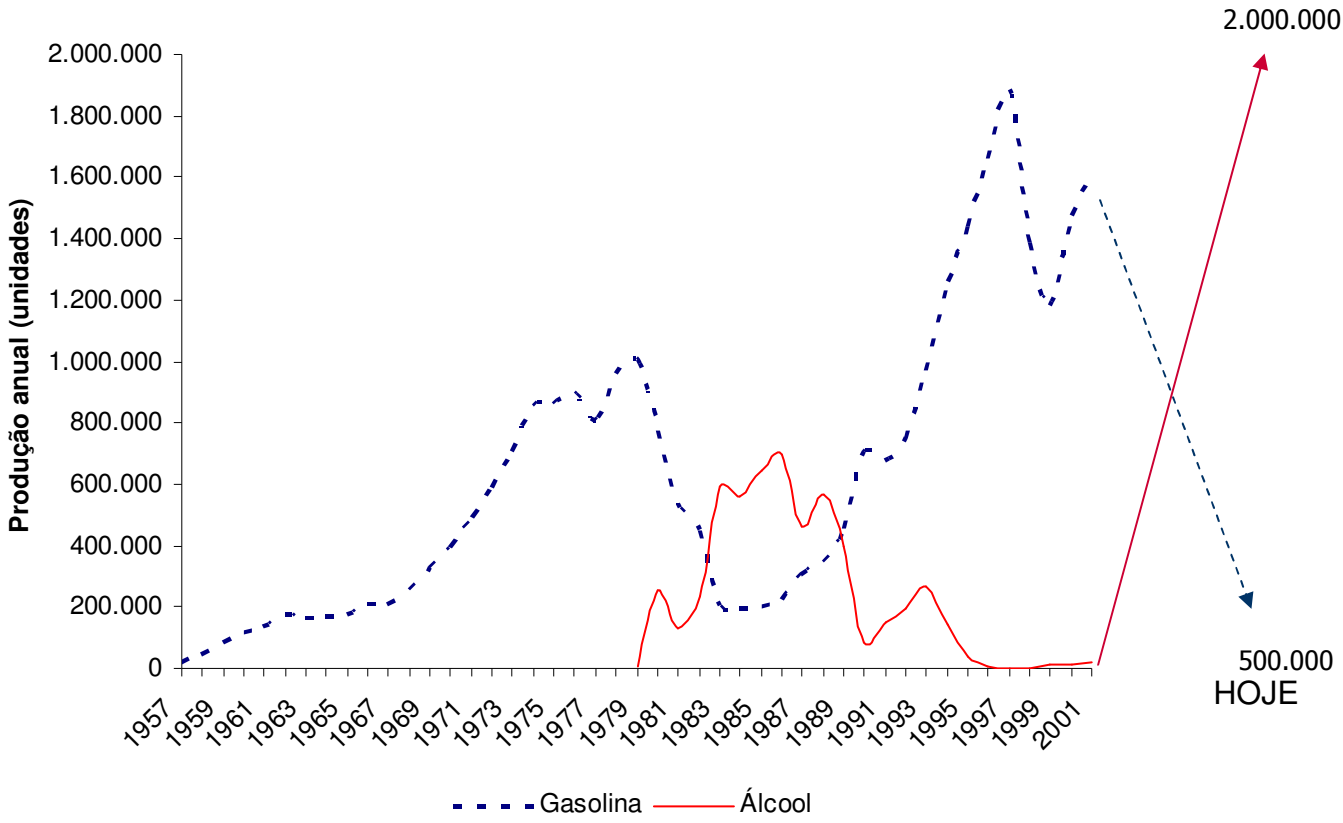

FIG. 4.13 – Evolução da produção de veículos no Brasil por tipos de combustível

Como resultado, as usinas reduziram drasticamente a produção de etanol, o que levou a uma crise de abastecimento por todo o país, comprometendo a credibilidade no programa. Durante os anos da década de 1990, a produção de veículos a álcool era inferior a 5% (figura 4.13).

O mercado dos veículos a álcool voltou a crescer recentemente com os aumentos sucessivos e históricos do barril de petróleo e a redução do preço do álcool hidratado. Mas o grande sucesso recente deve ser atribuído aos chamados veículos bicombustíveis, ou flex, que podem funcionar tanto com gasolina quanto com álcool, ou com a mistura deles em qualquer proporção. Em 2003, a Volkswagen do Brasil apresentou o primeiro veículo comercial bicombustível, abrindo a porta para uma nova expansão do mercado sucro-alcooleiro.

Segundo o CENBIO (2005), no Brasil já foram produzidos mais de 7 milhões de veículos com motorização específica para utilização de etanol, e, com a chegada dos motores flexíveis (bicombustível), espera-se que este número volte a crescer.

Fatos recentes mostram que um novo salto pode ser dado na agroindústria. Com os compromissos firmados pelos países desenvolvidos que aderiram ao Protocolo de Kyoto, de

reduzir as emissões de gases de efeito estufa, com a nova crise no Oriente Médio e a escalada do petróleo em 2006, o etanol passou a figurar como um ponto importante dentro do cenário mundial. O Brasil aparece como o grande produtor, exportador e detentor da melhor tecnologia de veículos a etanol, além de possuir uma produção etanol a partir da cana de açúcar com os maiores índices de produtividade do mundo.

A tecnologia presente na produção da cana, aliada a grande extensão territorial e disponibilidade de recursos hídricos, coloca o Brasil como o principal ator no mercado mundial, produzindo cerca de 45% da cana mundial. Com isso, o etanol produzido a partir da cana no Brasil chega a custar a metade do etanol produzido com milho nos EUA.

Segundo a Datagro (2009), em 2009 a oferta de álcool deverá ficar em torno de 24,75 bilhões de litros, ou seja, um aumento de 28% em relação ao valor mencionado no Balanço Energético Nacional 2007 (MME, 2008), cujo volume de álcool combustível produzido no Brasil anualmente era da ordem de 17,8 bilhões de litros, e cerca de 6 bilhões de litros eram adicionados à gasolina, e o restante vendido como álcool hidratado.

É difícil determinar o quanto da área de cultura da cana-de-açúcar é especificamente destinada à produção do etanol, pois como o açúcar é considerado uma "*commodity*", seu preço é cotado em dólar no mercado internacional, e, quando a situação está favorável, a grande maioria da plantação é destinada para a produção do açúcar, incrementando assim, o volume de exportação do país. Todavia, quando o mercado internacional está desfavorável, os grandes usineiros produzem muito combustível e começam a pressionar o governo federal para que incentive o consumo do combustível pela indústria automotiva.

Muitos autores apresentam diversos números diferentes quando o assunto é definir a área de cultivo de cana no Brasil e sua produtividade. Alguns dados mais antigos, como os extraídos de Bermann (2002), afirmam que em 2001 eram cultivados cerca de 13 milhões de hectares (130.000 km^2) de cana-de-açúcar em todo o mundo, onde cerca de 4,8 milhões de hectares (48.000 km^2) estavam no Brasil, portanto 37% da produção mundial. Carvalho (1997) afirmava que cerca de 2,7 milhões de hectares (27.000 km^2) eram destinados à produção do etanol em 1996. Guardabassi (2005) estimava em 4,5 milhões de hectares para plantação da cana. Magalhães (2003) afirmava que eram destinados à produção de álcool cerca de 1,6 milhão de hectares da área de plantio da cana-de-açúcar, em todo o Brasil, representando cerca de 2,6% da área agricultável do solo brasileiro. Macedo (2005) apresentou que, dos 850 milhões de hectares, o Brasil usa 0,6% (5,1 milhões de ha) da área para cultivo da cana, onde metade dela é específica para produção de etanol. As áreas consideradas adequadas para o plantio da cana correspondem a 12% da área do país. Atualmente,

após a grande explosão do veículos 'flex' e a crise do petróleo, este número saltou para 7 milhões de hectares (DATAGRO, 2009).

Segundo Magalhães (2003) a produtividade das plantações de cana-de-açúcar no Brasil no início do século XXI chegava a 75 toneladas por hectare e, de acordo com Rossell (2005), consumia-se cerca de 3 m^3 de água para cada tonelada de cana-de-açúcar colhida. Em função disso, é possível avaliar o impacto das plantações de cana no consumo de recursos hídricos. As plantações do Estado de São Paulo apresentam melhores eficiências que os demais estados brasileiros, chegando a utilizar cerca de 1,83 m^3 de água para cada tonelada de cana-de-açúcar colhida (MACEDO, 2005). Um resumo de todas estas informações, mostrando a evolução dos números em relação ao tempo, encontra-se disponível na tabela 4.2.

TABELA 4.2: Resumo das informações disponíveis sobre a produção de etanol a partir da cana de açúcar no Brasil

	Área de produção de cana no Brasil		Consumo de água	Produtividade		
Autor	Total (10^6 ha)	excl. etanol (10^6 ha)	(m^3/TC)	(TC/ha)	(l/ha)	(l/TC)
Carvalho (1997)	2,7	-	-	-	-	-
Bermann (2002)	4,8	-	-	-	-	-
MCT (2002)	-	-	-	-	5.100	-
Magalhães (2003)	-	1,6	-	75	6.000	-
Guardabassi (2005)	4,5	-	-	-	-	-
Macedo (2005)	5,1	2,5	1,83	-	-	-
Rossel (2005)	-	-	3,00	-	-	-
Oliveira (2005)	-	-	-	80	-	80
DATAGRO (2009)	7,0	-	-	-	-	-

A produtividade industrial da cana saltou de 5.100 litros de etanol por hectare plantado em 2002 (Ministério da Ciência e Tecnologia, 2002), para 7.000 l/ha atuais. E, segundo Macedo (2005), este valor deve dobrar, em relação a 2002, até o ano 2025 (vide tabela 4.3).

TABELA 4.3: Previsão de aumento da produtividade da cana de açúcar

		2005	2015	2025
Produtividade da cana de açúcar	t / ha	70,0	82	96,0
	litros / ha	6.000	8.200	10.400
Eficiência industrial	%	83,5	90	90,0

FONTE: Adaptado de Macedo (2005)

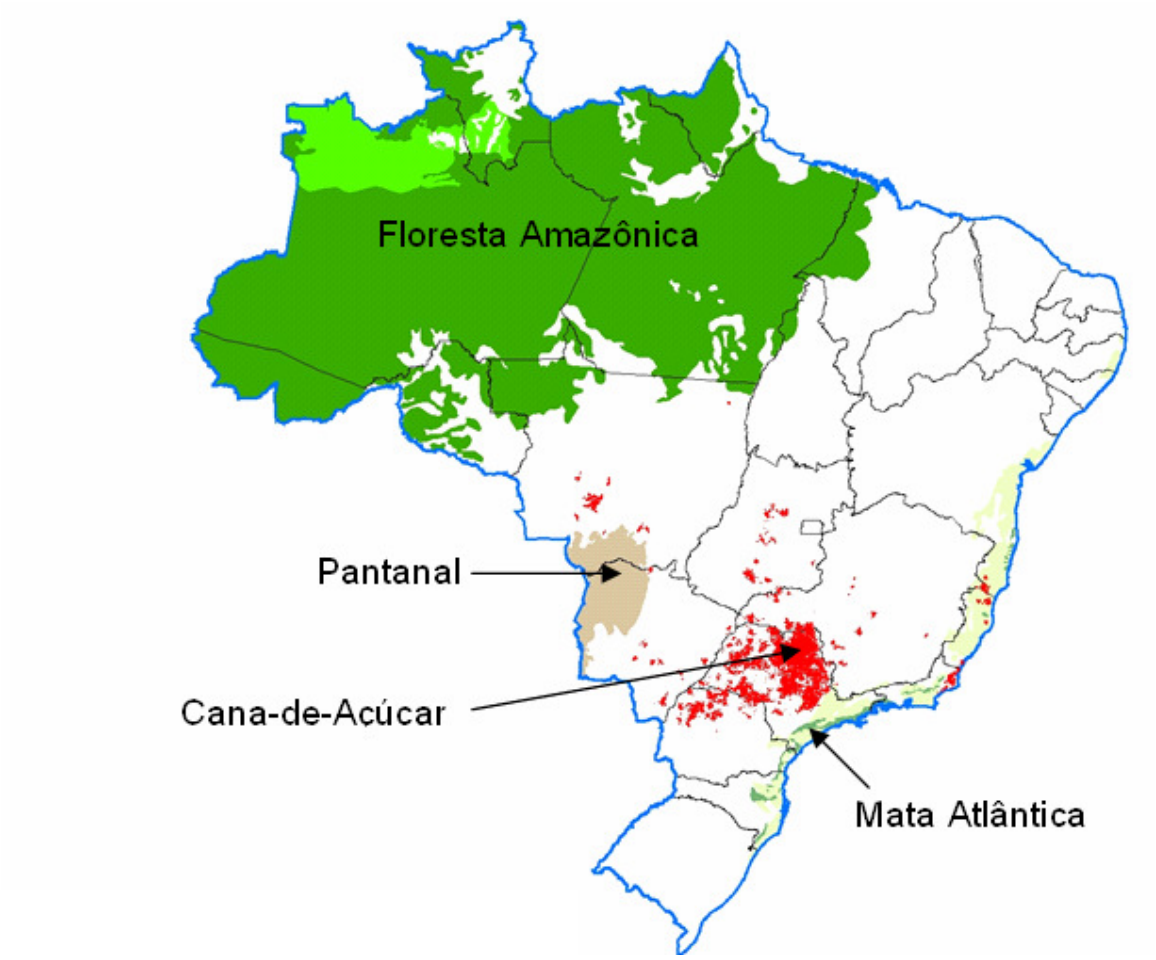

FIG. 4.14 – Distribuição das plantações de cana-de-açúcar no Brasil
FONTE*:* MACEDO (2005)

4.5.2 Balanço energético para o etanol

O balanço energético para biocombustíveis como o etanol estabelece e relação entre o total de energia contida no combustível final e o total de energia investida em todo o processo de produção, incluindo o processo agrícola e o industrial.

Durante a fase de pré-produção, que compreende a colheita e o transporte da biomassa até as usinas de álcool, Shapouri *et al* (1995) estima que devam ser consumidos cerca de 0,35 MJ por litro de etanol produzido a partir do milho. Portanto, na fase de pré-produção tem-se a relação de 0,017 MJ de energia consumida na colheita e no transporte por cada MJ de energia disponibilizada em um litro de etanol, considerando que o poder calorífico de etanol é de 26,3 MJ/kg e que sua densidade é de 789 kg/m^3, conforme dados da Petrobrás (2000).

Shapouri *et al* (1995) apresenta que numa usina de conversão de etanol derivado do milho gasta-se em média 10,0 MJ em energia térmica para os processos de destilação e outros 2,0 MJ em energia elétrica para outras atividades para se produzir apenas um litro de etanol. Assim, considerando o poder calorífico de 26,3 MJ/kg e a densidade de 0,789 kg/l, tem-se a relação de 0,58 MJ de energia consumida para cada MJ de energia disponibilizada no tanque de combustível, durante a fase de produção.

Uma grande parte da energia térmica necessária pelas usinas é gerada a partir da queima do bagaço da cana, que emite, por sua vez, uma grande parcela de CO_2 na atmosfera. No entanto, essa parcela equivalente de dióxido de carbono é reabsorvida na próxima plantação da cana. Sendo assim, partindo do pior caso, onde a energia térmica seja gerada por combustível fóssil, a emissão de CO_2 na produção está na ordem de 3,3 gC/MJ de etanol disponibilizado nos tanques (WEISS *et al*, 2000).

Urquiaga (2005) apresenta que somente nos últimos anos a produção de etanol a partir do milho tem apresentado um balanço energético positivo, ou seja, mais energia é obtida no combustível produzido do que a gasta na sua fabricação. Pimentel (2001 apud URQUIAGA, 2005) calculou que são necessários 1,65 GJ de energia fóssil para se produzir 1 GJ de energia na forma de etanol do milho, nos EUA, embora Shapouri (2002 apud URQUIAGA, 2005) tenha apresentado novos dados onde 0,81 GJ de energia fóssil são necessários para a produção de 1 GJ de energia na forma de etanol derivado do milho.

Urquiaga (2005) apresentou que, no caso brasileiro, o balanço energético é de 0,124 GJ de energia de origem fóssil para cada 1 GJ de energia na forma de etanol derivado da cana-de-açúcar. Ele considerou os gastos energéticos com máquinas agrícolas e transporte à usina, produção de fertilizantes e pesticidas, equipamentos, além dos insumos para as usinas.

Segundo Furtado e Scandiffio (2006), o bagaço da cana contém cerca de 45% da energia disponível na cana, porém o rendimento energético de sua utilização como fornecedor de energia térmica é baixo. Mesmo assim, além de gerar energia suficiente para o pro-

cesso de produção de etanol, as usinas de álcool podem vender às concessionárias de distribuição de energia elétrica cerca de 40 kWh de energia elétrica excedente para cada tonelada de cana colhida. Ainda, segundo os mesmo autores, estudos do balanço energético do etanol produzido a partir da cana de açúcar estimam que a energia produzida na forma de álcool e de bagaço corresponde a 9,2 vezes o montante consumido diretamente nas chamadas etapas agrícola (colheita e transporte) e industrial (usina). Já o álcool produzido do milho apresenta um desempenho muito inferior, na ordem de 1,2 vezes.

O resumo do balanço energético para a produção de etanol a partir da cana de açúcar encontra-se nas tabela 4.4 a 4.7. O balanço energético apresenta-se extremamente favorável, uma vez que a energia obtida através da queima de etanol é entre 8,5 e 10,5 vezes maior que a energia gasta em todo o ciclo de vida do produto.

TABELA 4.4: Balanço de energia na fase de produção da cana de açúcar

	Consumo de energia	
Produção de cana	Cenário 1* (MJ/TC)	Cenário 2** (MJ/TC)
Operações agrícolas	38	38
Transporte	43	37
Fertilizantes	67	63
Insumos agrícolas	19	19
Equipamento	29	29
Mudas	6	6
TOTAL	**196,0**	**186,4**

FONTE: Adaptado de Macedo (2005)

* cenário 1: média usando tecnologia atual
** cenário 2: usando a melhor tecnologia

TABELA 4.5: Balanço de energia na fase de produção de etanol a partir a cana de açúcar

	Consumo de energia	
Produção de etanol	Cenário 1 (MJ/TC)	Cenário 2 (MJ/TC)
Insumos químicos, lubrificantes	6	6
Instalações	12	9
Equipamentos	31	24
TOTAL	**49,4**	**39,8**

FONTE: Adaptado de Macedo (2005)

TABELA 4.6: Balanço de energia do ciclo de vida do etanol a partir a cana de açúcar

Fluxos externos de energia	Cenário 1 (MJ/TC)		Cenário 2 (MJ/TC)	
	Input	**Output**	**Input**	**Output**
Agricultura	196,0	-	186,4	-
Indústria	49,4	-	39,8	-
Etanol produzido	-	1.922	-	2.052
Bagaço excedente	-	168,7	-	316,5
TOTAL	***245,4***	***2.091***	***226,2***	***2.368***
Balanço (output/input)	8,5		10,5	

FONTE: Adaptado de Macedo (2005)

TABELA 4.7: Consumo energético na fase de produção do etanol.

	Etanol (milho)		**Etanol (cana de açúcar)**	
Energia na Produção	MJ / MJ de etanol	Eficiência Energética	MJ / MJ de etanol	Eficiência Energética
Colheita	0,017	98,3%	0,060	94,0%
Conversão	0,580	42,0%		
Distribuição	0,010	99,0%	0,010	99,0%
TOTAL	***0,607***	***40,9%***	***0,070***	***93,1%***

4.5.3 Balanço de massa (CO_2) para o etanol

O balanço de carbono em um processo de produção de etanol compreende, segundo Macedo (2005), a liberação de CO_2 durante as queimadas da cana, a oxidação de resíduos não queimados no campo, a liberação de CO_2 durante a fermentação da sacarose, a liberação de CO_2 pela combustão do bagaço e a absorção do CO_2 atmosférico pelo processo de fotossíntese da cana. O balanço desses fluxos é positivo, ou seja, mais CO_2 é retirado da atmosfera pelo processo de fotossíntese do que é liberado durante a fase de plantio e colheita da cana e produção do etanol.

Segundo Macedo (2005), quando consideradas também as emissões de CO_2 provenientes dos motores de combustão interna, o balanço de carbono se anula. No entanto, outros fluxos indiretos associados à produção de insumos agrícolas e industriais, e ao uso de combustíveis fósseis na lavoura e na indústria devem ser considerados, entre eles a liberação de CO_2 no uso de combustíveis fósseis nos transportes e tratores, liberação de CO_2 no uso de combustíveis fósseis na produção de insumos agrícolas (mudas, herbicidas, fertilizantes, etc.), liberação de CO_2 no uso de combustíveis fósseis na produção e manutenção dos equipamentos agrícolas, liberação de CO_2 no uso de combustíveis fósseis na produção de insumos industriais (ácido sulfúrico, biocida, lubrificantes, etc.) e liberação de CO_2 no uso de combustíveis fósseis na fabricação de equipamentos, construção de prédios e manutenção industrial. Estes fluxos contribuem para o aumento do nível de CO_2 na atmosfera.

A cana-de-açúcar é responsável pela absorção de 1/5 do carbono liberado na atmosfera pela queima de combustíveis fósseis no Brasil, o que corresponde à redução de 39 milhões de toneladas de CO_2 ao ano. Até mesmo a poluição e os resíduos gerados nas plantas de produção de álcool estão sendo reduzidos, uma vez que o bagaço da cana é queimado como combustível e outros subprodutos são utlizados como fertilizantes naturais. A ampla disseminação da queima do bagaço de cana tornou cerca de 95% das plantas de processo do Estado de São Paulo auto-suficientes em energia, e muitas delas ainda vendem o excedente de energia para as distribuidoras locais (MACEDO, 2005).

Macedo (2005) expõe que as emissões de CO_2 proveniente de combustíveis fósseis no ciclo de vida do etanol estão em torno de 17,7 a 19,2 kg CO_2 por tonelada de cana. Outras emissões de gases de efeito estufa como metano e óxido nitroso provenientes da queima da palha também foram avaliadas, e seu valor no ciclo de vida está por volta de 15,3 kg CO_2 eq. por tonelada de cana.

Oliveira et al (2005) demonstra que o balanço de CO_2 para o etanol da cana de açúcar é de 39 kg por tonelada de cana (vide tabela 4.8). Emissões de CO_2 do processo de

produção oriundos das queimadas da cana e da decomposição orgânica do vinhoto (quando aplicado como fertilizante), não foram contabilizadas, pois são reabsorvidas pela cana durante a plantação da próxima safra.

TABELA 4.8: Emissões de CO_2 equivalente a partir da produção do etanol da cana de açúcar no Brasil

Processo	kg / ha	kg / TC*
Agricultura	2269	28,4
Emissões equivalentes (CH_4 e N_2O)**	626	7,8
Distribuição	227	2,8
TOTAL	***3122***	***39,0***

*considerando uma produtividade de 80 toneladas de cana por hectare.
** emissões equivalentes a decomposição orgânica e ao processo de fabricação do fertilizante.

Para o etanol do milho, Oliveira et al (2005) considera uma maior utilização de combustíveis fósseis durante a fase de produção, que podem ser observados na tabela 4.9.

A maior vantagem do etanol a partir da cana de açúcar, segundo Furtado e Scandiffio (2006), é que seu processo não requer a queima de combustíveis fósseis para sua produção, como no caso do milho, além de muitas etapas de processamento não serem necessárias. O balanço de emissões de carbono no processo de produção de etanol a partir da cana é neutro, quando não são consideradas as emissões externas ao processo de plantio e produção.

TABELA 4.9: Emissões de CO_2 a partir da produção do etanol do milho nos EUA

Processo	kg / ha
Agricultura	1237
Fixação CO_2 no solo	-660
Transporte de milho	154
Conversão etanol	2721
Distribuição	108
TOTAL	***3560***

4.6 Efeito Estufa

Os veículos movidos por células a combustível a hidrogênio emitem vapor de água de seus escapamentos, enquanto os modelos atuais liberam um coquetel de gases tóxicos e o dióxido de carbono. Este último é o mais famoso dos gases de efeito estufa, tanto que o seu potencial de gerar aquecimento global é tomado como um padrão de referência para avaliar o potencial de outros gases.

Num cenário futuro, considerando apenas a fronteira do veículo, as emissões de dióxido de carbono de veículos automotores tenderão a diminuir, reduzindo o impacto dos automóveis diretamente ligados ao efeito estufa. Segundo Middleton *et al* (2003), a utilização de hidrogênio proveniente de fontes renováveis, pode reduzir a emissão de gases de efeito estufa.

Todavia, o vapor de água também é um agente de efeito estufa, e foi um dos maiores responsáveis pela regulação do clima da Terra. Dentro do cenário futuro, existe a necessidade de avaliação do balanço de aquecimento global proporcionado pela redução do dióxido de carbono e pelo aumento da concentração de vapor de água na atmosfera.

4.6.1 O Efeito Estufa e as mudanças climáticas

O aquecimento global e o efeito estufa ocupam, hoje, um lugar de destaque entre as ameaças ambientais que mais colocam em risco a integridade do planeta. Desde a década de 1980 até os dias atuais, evidências científicas cada vez mais fortes indicam que as atividades humanas, decorrentes do atual modelo de desenvolvimento, são os principais fatores para o agravamento do problema.

A imensa e crescente quantidade de gases de efeito estufa que estão se acumulando na atmosfera terrestre, em grande parte são resultados da destruição de florestas e de ecossistemas naturais, que, normalmente, agem como gigantescos sumidouros e reservatórios naturais de absorção de CO_2. Afirma-se que o desmatamento na Amazônia é responsável por um volume de emissões duas vezes maior que o produzido pela queima de combustíveis fósseis no Brasil. Em outras palavras, as florestas estão deixando de exercer a sua função de sumidouro de CO_2, para tornarem-se fonte de emissão deste gás. Mas, sem sombra de dúvida, o modelo de desenvolvimento e de consumo energético é o elemento propulsor do efeito estufa, pois está baseado no modelo de uso intensivo de recursos fósseis e não renováveis.

Qualquer tentativa de modificação no modelo atual de consumo energético baseado em fontes fósseis e profundamente dependentes de sistemas de transportes acaba sendo dificultada por suas enormes implicações econômicas. Todavia, as evidências científicas a respeito dos vínculos do efeito estufa com as mudanças climáticas, a consequente necessidade de redução das emissões de CO_2 e, ainda, as crescentes demandas da sociedade por qualidade ambiental e por sustentabilidade, fazem com que o problema comece a ser enfrentado.

O modelo de economia baseado no consumo desenfreado de combustíveis fósseis provoca a quebra do chamado Ciclo do Carbono. Bilhões de toneladas de carbono que foram retirados da atmosfera milhões de anos atrás por seres vivos, e que foram depositados nas profundezas da crosta terrestre, estão sendo jogados de volta para a atmosfera, sem que a biosfera tenha tempo suficiente para tentar assimilar esse desequilíbrio. Portanto, o trabalho de milhões de anos da natureza está sendo destruído em apenas um século.

4.6.2 Como ocorre o Efeito Estufa

A Terra deve irradiar para o espaço a mesma proporção de energia que recebe do Sol, mantendo estáveis as condições climáticas como: temperatura, regimes de chuvas, nível do mar e as estações do ano. A energia solar chega na forma de radiação de ondas curtas. Parte dessa radiação é refletida pela superfície terrestre e pela atmosfera de volta ao espaço. Contudo, a maior parte dela passa diretamente pela atmosfera para aquecer a superfície do planeta, e é retransmitida de volta para o espaço, porém na forma de radiação infravermelha de ondas longas (vide figura 4.15).

O efeito estufa é causado por gases na atmosfera, principalmente vapor d'água, dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4), que são capazes de bloquear as radiações de ondas longas, não deixando a energia escapar para fora do planeta. Devido à capacidade destes gases funcionarem de maneira semelhante a uma estufa, a temperatura próxima à superfície da Terra é cerca de 30°C superior a que seria sem este efeito, chamado de estufa natural.

Como conseqüência do aumento na concentração destes gases devido às atividades humanas, cientistas esperam que o efeito estufa se intensifique, com conseqüente aumento nas temperaturas. Também para o efeito estufa, a troposfera e a estratosfera são as camadas mais importantes da atmosfera, onde a maioria das reações químicas toma parte.

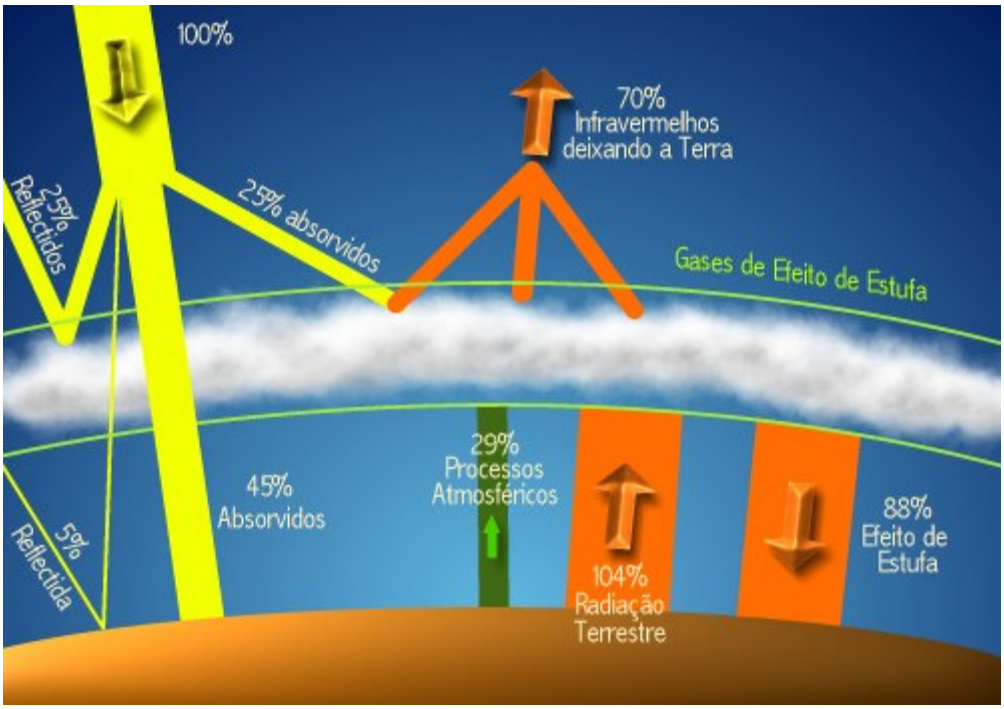

FIG. 4.15 – Comportamento da atmosfera terrestre mediante incidência da radiação solar.
FONTE*:* Bortholin e Guedes (2003)

Desde o início da Revolução Industrial, a queima de combustíveis fósseis e o aumento da necessidade energética devido a uma população mundial cada vez maior e com uso mais intensivo de energia, tem provocado a emissão antropogênica desses gases estufa na atmosfera. O dióxido de carbono constitui uma pequena fração da composição atmosférica, mas é a maior poluição produzida pela sociedade industrial moderna.

Segundo o 4º. Relatório do IPCC, a concentração de dióxido de carbono na atmosfera cresceu das 280 ppm aos atuais 379 ppm em 2005 (vide fig. 4.16), e a concentração de metano dobrou, também como consequência de ações antropogênicas (PACHAURI, 2007).

Como prova de que o efeito estufa já está acontecendo, o Painel Intergovernamental para Mudanças Climáticas da Organização das Nações Unidas (International Panel of Climate Change - IPCC) afirma que a temperatura média da Terra aumentou 0,6 ℃ desde a metade do século XIX, quando as medições começaram a ser realizadas.

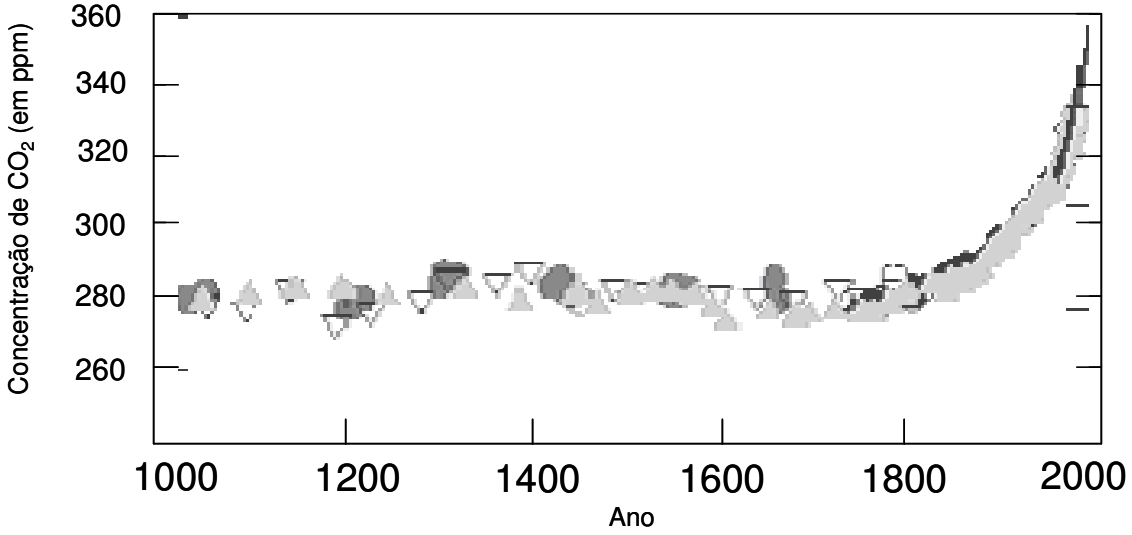

FIG. 4.16 – Concentração atmosférica global de CO_2
FONTE: Albritton (2001)

Segundo Pachauri (2007), a concentração de dióxido de carbono na atmosfera pode atingir os 600 ppm em volume até o final do século XXI, ou seja, mais que o dobro do nível mantido por 10.000 anos, desde a última era glacial. Baseado neste cenário, o IPCC concluiu que o aumento dos gases de efeito estufa deve causar um aumento da temperatura média global da ordem de 1 a 6,4 °C, até o final do século XXI.

Em 1997, as emissões de CO_2 atingiram um valor maior que 6 bilhões de toneladas, segundo Thomas (2001), ou seja, mais que uma tonelada para cada ser humano do planeta. O ano de 1998 bateu recordes de temperatura, seguido por 2001 e 2002. Ninguém sabe ao certo o que estes aumentos de temperatura provocarão sobre o meio ambiente: mudanças em precipitações, aumento dos níveis do mares e variações extremas no clima são algumas hipóteses. De acordo com o 4º. Relatório do IPCC, atualmente são emitidos 7 bilhões do toneladas de carbono.

Enquanto a ligação entre mudança climática e emissões de carbono permanece em discussão, com alguns países afirmando que esta relação não existe e que o aumento da temperatura global é parte de um novo ciclo natural, a única certeza que se tem é que as decisões tomadas nestes próximos 10 anos irão afetar diretamente as gerações vindouras. Dados o atual nível de incertezas em algumas hipóteses, a complexidade dos mecanismos de nosso meio ambiente, e o potencial de surgimento de eventos não previstos, é mais plausível que a humanidade tome ações mais prudentes, do que tentar lutar para manter o cenário atual. Como os lapsos de tempo entre causa e efeito e entre efeito e remediação

são muito longos, o homem está sendo desafiado a empregar amplamente seus conhecimentos e tecnologias para promover um futuro mais seguro e sem riscos.

Ao se estudar a Terra é necessário, segundo Lovelock (1991), que se tenha uma visão planetária. O que importa é a saúde do planeta como se ele fosse um planeta vivo, uma vez que a saúde da Terra está muitíssimo ameaçada pelas grandes mudanças nos ecossistemas naturais. O autor afirma que a vida é o agente regulatório do clima do planeta; sem ela a Terra seria mais uma rocha gigante girando em torno de uma estrela comum, em uma galáxia comum, em um canto qualquer do Universo. Portanto, a vida merece e deve ser preservada.

5. ANÁLISE DAS EMISSÕES DE CO_2

Conforme mencionado no início deste trabalho, para uma avaliação integrada dos impactos em discussão, torna-se necessário uma abordagem conhecida como '*well to wheels'*, ou do poço às rodas. Para execução dessa análise, a ferramenta mais adequada é a Análise de Ciclo de Vida (ACV) para os combustíveis em estudo. Com o objetivo de analisar a sustentabilidade a longo prazo das matrizes energéticas e a redução dos impactos ambientais provocados por estas, a visão sistêmica das emissões de gases causadores de efeito estufa deve incorporar um estudo que aborde desde o momento de extração/produção ('*well*') dos combustíveis em pauta, até a fase de uso dos mesmos nos automóveis (*'wheels')*, a fim de evitar uma conclusão prematura, pontual e equivocada. Os dados relacionados aos combustíveis analisados são provenientes da tabela 5.1.

TABELA 5.1: Propriedades dos Combustíveis Produzidos pela Petrobrás

Combustível	Unidade comercial	Densidade (kg/m³)	Poder Calorífico Inf. (MJ/kg)
Etanol	M³	789	26,3
Diesel	M³	830	42,1
Gasolina C	M³	720	37,6
GNV	10^3 m³	0,74	55,1

FONTE: Petrobrás (2000)

5.1 Analisando a fase do 'poço ao tanque'

5.1.1 Emissão de CO_2 para a produção de gasolina e derivados do petróleo

Weiss *et al* (2000) apresenta uma análise sobre estudos que abordam a eficiência energética para a produção de gasolina e de diesel. Considerando o suprimento de gás natural, energia elétrica e outras fontes de energia na produção, transporte, refino e distribuição dos combustíveis, todos eles chegaram a uma eficiência em torno de 80 a 90% (a eficiência é expressa em MJ consumidos por MJ de energia disponível no combustível a bordo do veículo). Estes valores estão descritos na tabela 5.2.

Dada a relação de que para cada 12 g de carbono é possível obter-se 44 g de dióxido de carbono, foi possível converter a massa do carbono apresentado na tabela 5.2 em massa de dióxido de carbono. Assim, para a produção e distribuição da gasolina, há emissões de 18 g CO_2/MJ de gasolina disponibilizada nos tanques; para o diesel são 12,1 g CO_2/MJ de diesel; para o metanol 21,6 g CO_2/MJ e 15,4 g CO_2/MJ para o GNV. Dos combustíveis aqui apresentados, somente a gasolina, e o gás natural foram considerados.

TABELA 5.2: Consumo energético e emissões de gases de efeito estufa na fase de produção dos combustíveis.

Energia gasta na produção	Gasolina		Diesel		Metanol		GNV	
	MJ / MJ de gasolina	Eficiência Energética	MJ / MJ de diesel	Eficiência Energética	MJ / MJ de metanol	Eficiência Energética	MJ / MJ de GNV	Eficiência Energética
Extração óleo cru	0,042	96,5%	0,040	96,5%	-	-	-	-
Refino	0,157	86,6%	0,089	91,9%	-	-	-	-
Conversão	-	-	-	-	0,470	68%	0,180	94,4%
Distribuição	0,012	98,8%	0,010	99,0%	0,027 – 0,120	89 – 97%		
Total	***0,211***	***82,6%***	***0,139***	***87,8%***	***0,5 – 0,59***	***63 – 67%***	***0,180***	***94,4%***
Emissões gases efeito estufa	***4,9*** gCeq/MJ		***3,3*** gCeq/MJ		***5,9*** gCeq/MJ		***4,2*** gCeq/MJ	
	18,0 gCO_2/MJ		***12,1*** gCO_2/MJ		***21,6*** gCO_2/MJ		***15,4*** gCO_2/MJ	

FONTE: adaptado de Weiss *et al* (2000)
Obs.: 1. O etanol não aparece nesta tabela, pois não era proveniente de combustível fóssil.
2. Metanol produzido através de reforma a vapor do gás natural.
3. GNV distribuído à pressão de 200 atm .

5.1.2 Emissão de CO_2 para a produção de etanol

No caso do etanol, a fase de produção compreende a extração da cana-de-açúcar, a destilação do caldo para produção do álcool e a distribuição do combustível.

Apesar do etanol da cana ser muito mais eficiente em utilização de energia, a massa de dióxido de carbono emitida para a atmosfera é muito parecida.

Oliveira et al (2005) demonstra que o balanço de CO_2 para o etanol da cana de açúcar é de 39 kg por tonelada de cana, enquanto Macedo (2005) definiu o valor de 19,2 kg CO_2/tonelada de cana, em todo o ciclo de vida do etanol. Este trabalho considerou o primeiro valor, por ser um cenário mais crítico. Assim, considerando a produtividade do processo, a emissão total é de 459 g CO_2 /m^3, ou 0,022 kg CO_2 / MJ de etanol (vide tabela 5.3). As emissões de CO_2 do processo de produção oriundos das queimadas da cana e da decomposição orgânica do vinhoto (quando aplicado como fertilizante) não foram contabilizadas, pois são reabsorvidas pela cana durante a plantação da próxima safra.

TABELA 5.3: Cálculo das emissões de CO_2 a partir da produção do etanol da cana de açúcar no Brasil em função do volume de etanol e da energia.

	Emissões de CO_2		
Processo	kg / ha	kg / m^3	kg / MJ
Agricultura	2269	0,334	0,016
Emissões equivalentes * (CH_4 e N_2O)	626	0,092	0,004
Distribuição	227	0,033	0,002
TOTAL	***3122***	***0,459***	***0,022***

* emissões equivalentes a decomposição orgânica e ao processo de fabricação do fertilizante.

Para o etanol do milho, Oliveira et al (2005) considera uma maior utilização de combustíveis fósseis durante a fase de produção, que podem ser observados na tabela 5.4.

TABELA 5.4: Cálculo das emissões de CO_2 a partir da produção do etanol do milho nos EUA em função do volume de etanol e da energia.

	Emissões de CO_2		
Processo	kg / ha	kg / m^3	kg / MJ
Agricultura	1237	0,377	0,018
Fixação CO_2 no solo	-660	-0,201	-0,010
Transporte de milho	154	0,047	0,002
Conversão etanol	2721	0,830	0,040
Distribuição	108	0,033	0,002
TOTAL	***3560***	***1,085***	***0,052***

Conforme explicado anteriormente, o melhor resultado em relação às emissões de CO_2 do etanol da cana de açúcar em relação ao etanol do milho, é que o processo queima menos combustíveis fósseis para sua produção, pois utiliza a própria matéria orgânica, como o bagaço, para a fabricação de fertilizantes naturais e para a geração de energia.

5.1.3 Emissão de CO_2 para a produção de hidrogênio por eletrólise da água

Para o cálculo da emissão de CO_2 na produção de hidrogênio através da eletrólise da água é preciso, inicialmente, determinar a demanda de energia elétrica necessária para este processo.

5.1.3.1 Demanda de energia elétrica para produção de H_2 através da eletrólise da água

Segundo Peavey (2001), a energia necessária para quebrar a molécula de água em hidrogênio e oxigênio é de 285,84 MJ/kmol de H_2 a 25°C e 1 atm. Com o peso molecular do gás hidrogênio (H_2) de 2 kg/kmol, tem-se que a energia gasta na eletrólise deve ser de no mínimo 11,86 MJ para cada metro cúbico produzido, ou 142,89 MJ/kg.

Peavey (2001) afirma que os equipamentos para eletrólise convencionais operam entre 75 e 80°C, com densidade de corrente da ordem de 2.000 A/m², e tensão entre 1,9 e 2 Volts. Nestas condições, a energia necessária para se produzir 1 m³ de H_2 é de 17,28 MJ (4,8 kWh), ou 193,5 MJ/kg de H_2, considerando-se o consumo da bomba, de outros componentes pertinentes ao equipamento e as perdas.

A eficiência energética para o processo de eletrólise é obtida através da relação de energia elétrica gasta para quebrar as moléculas de água e a energia disponível no hidrogênio obtido. Teoricamente, segundo Peavey (2001), cerca de 142,89 MJ são necessários para se quebrar as ligações das moléculas de água e se produzir um quilograma de hidrogênio, enquanto este, como combustível, é capaz de fornecer cerca de 125 MJ/kg. Sendo assim:

η = 142,89 / 125 = 1,143 .

No balanço total, que é a principal característica da Análise de Ciclo de Vida, onde considera-se o consumo das bombas e outros componentes do equipamento de eletrólise, a energia gasta é de 193,5 MJ/kg de H_2. Assim:

η = 193,5 / 125 = 1,548 .

Portanto, considerando a fase de compressão para armazenamento, gasta-se mais energia para de produzir o hidrogênio por eletrólise do que ele é capaz de fornecer como um combustível. Este valor foi usado na análise do ciclo de vida do hidrogênio apresentada adiante.

5.1.3.2 Emissão de CO_2 por meio do consumo de eletricidade

As emissões de dióxido de carbono pela produção de energia elétrica apresentam enormes variações quando comparadas entre países ou regiões. Por exemplo, o Brasil possui uma matriz fortemente baseada na geração hidráulica de energia elétrica, enquanto que os EUA possuem uma matriz baseada na queima de combustíveis fósseis (óleo, gás e carvão). Já a França apresenta baixos índices de emissões de gases de efeito estufa, pois sua matriz é fortemente sustentada pela energia nuclear.

Segundo Metz *et al* (2005), a matriz energética brasileira é consideravelmente limpa, emitindo indiretamente cerca de 0,024 kg CO_2/ MJ (0,087 kg CO_2/ kWh) de energia consumida (vide tabela 5.5 e 5.6), enquanto a média mundial está em torno de 0,131 kg CO_2/MJ (0,475 kg CO_2/kWh) .

De acordo com o *Challenge Bibendum 2005*, a média européia de emissão de CO_2 para produção de eletricidade é de 462 g CO_2/kWh, o que resultaria num padrão de 200 g CO_2/MJ para o hidrogênio produzido na Europa a partir da eletrólise.

TABELA 5.5: Emissão de CO_2 para a produção de eletricidade em alguns países.

País	**kg CO_2(eq) / kWh gerado**	**kg CO_2(eq) / MJ gerado**	**País**	**kg CO_2(eq) / kWh gerado**	**kg CO_2(eq) / MJ gerado**
África do Sul	0,941	0,261	Holanda	0,487	0,137
Alemanha	0,512	0,142	Índia	1,003	0,279
Arábia Saudita	0,545	0,151	Indonésia	0,715	0,199
Argentina	0,319	0,089	Irlanda	0,722	0,201
Austrália	0,885	0,246	Itália	0,527	0,146
Áustria	0,187	0,052	Japão	0,389	0,108
Bélgica	0,310	0,086	Malásia	0,465	0,129
Brasil	0,087	0,024	México	0,689	0,191
Canadá	0,225	0,063	Nova Zelândia	0,167	0,046
China	1,049	0,291	Noruega	0,003	0,001
Dinamarca	0,385	0,107	Paquistão	0,524	0,146
Espanha	0,455	0,126	Portugal	0,508	0,141
EUA	0,610	0,169	Reino Unido	0,507	0,141
Filipinas	0,534	0,148	Rússia	0,347	0,096
Finlândia	0,222	0,062	Singapura	0,816	0,227
França	0,078	0,022	Suécia	0,041	0,011
Grécia	0,876	0,243	Suiça	0,007	0,002

FONTE: Metz *et al* (2005)

TABELA 5.6 - Emissão de CO_2 para a produção de eletricidade por regiões

País	kg CO_2(eq) / kWh gerado	kg CO_2(eq) / MJ gerado
África	0,705	0,196
América Latina	0,189	0,053
América do Norte	0,567	0,158
Ásia	0,772	0,214
Europa (OECD)	0,391	0,109
Europa (não-OECD)	0,584	0,162
Ex-URSS	0,367	0,102
Oriente Médio	0,672	0,187
Pacífico	0,465	0,129
União Européia	0,362	0,101

FONTE: Metz *et al* (2005)

Para se produzir um quilograma de hidrogênio a partir da eletrólise da água são necessários 193,5 MJ, e, no Brasil, a emissão de CO_2 na geração de energia é 0,024 kg para cada megajoule, gerando 4,644 kg CO_2 / kg H_2. Assim, contando que o poder calorífico do hidrogênio é de 125 MJ/kg, são emitidos cerca de 0,037 kg de CO_2 para cada megajoule de energia disponibilizado na forma de hidrogênio nos tanques. Os demais resultados estão apresentados na tabela 5.7.

TABELA 5.7: Cálculo das emissões de CO_2 para os países e regiões em análise

País	kg CO_2(eq) / MJ gerado	kg CO_2 / MJ disponível no combustível
Brasil	0,024	0,037
EUA	0,169	0,262
Europa	0,135	0,210
Mundo (média)	0,132	0,204

5.1.4 Emissão de CO_2 no processo de reforma de combustíveis

Os combustíveis mais estudados para o processo de reforma *onboard* são a gasolina, o etanol e o gás natural. Este trabalho não considerou a reforma da gasolina em função do seu atual grau de desenvolvimento e da incerteza de disponibilidade futura deste combustível.

A produção de hidrogênio pelo processo de reforma já foi descrito no capítulo 4, e, conforme apresentado, consiste em uma sequência de reações químicas que buscam extrair o hidrogênio das cadeias orgânicas, e, para isso, acabam por consumir água e emitir CO_2 ,

contendo o carbono inicialmente presente nas moléculas do combustível. Neste modelo não está sendo considerada a cadeia completa do reformador, uma vez que este possui emissões provenientes de seu processo de produção e na produção de alguns insumos, que não foram contabilizados neste trabalho.

5.1.4.1 Reforma do gás natural

O gás natural é basicamente uma composição homogênea de metano (CH_4), e sua reação estequiométrica em um reformador está descrita a seguir:

$$1\ CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3\ H_2$$

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$$

$$CH_4 + 2\ H_2O \rightarrow CO_2 + 4\ H_2$$

A massa molecular do gás natural é 16 kg/kmol. Analogamente ao caso anterior, para cada 16 kg de gás natural reformado gera-se 44 kg de CO_2 e 8 kg de H_2. Assim, para cada 44 kg de CO_2 emitidos são produzidos 8 kg de H_2. Considerando, portanto, o poder calorífico do hidrogênio de 125 MJ/kg, tem-se que são emitidos cerca de 44 g de CO_2 para cada MJ de energia disponibilizada na forma de H_2, ou 2,75 kg de CO_2 para cada quilograma de metano ou 49,9 g de CO_2/MJ de GN. Para cada quilograma de H_2, consome-se cerca de 4,5 kg de água no processo de reforma a vapor.

As emissões totais no processo de reforma do gás natural englobam as emissões da produção e distribuição do gás, adicionadas às emissões provenientes do processo de reforma.

Assim, tomando as emissões de CO_2 por kg de GN na produção e distribuição do gás natural, que é de 0,8485 kg, mais as emissões do processo de reforma, que é de 2,7500 kg de CO_2/kg de GN, tem-se o total de 3,599 kg de CO_2/kg de GN. Como 1 kg de GN produz 0,5 kg de hidrogênio, tem-se que são emitidos 7,198 kg de CO_2/kg de H_2. Considerando que cada quilograma de hidrogênio contém 125 MJ, chega-se ao valor final de 0,0578 kg de CO_2/MJ disponível no tanque de H_2.

5.1.4.2 Reforma a vapor do etanol

Para os processos de reforma a vapor do etanol, a reação estequiométrica é dada por:

$$1\ C_2H_5OH + H_2O \rightarrow 2\ CO + 4\ H_2$$

$$2\ CO + 2\ H_2O \rightarrow 2\ CO_2 + 2\ H_2$$

$$1\ C_2H_5OH + 3\ H_2O \rightarrow 2\ CO_2 + 6\ H_2$$

A massa molecular do etanol é 46 kg/kmol. Portanto, para cada 46 kg de etanol reformado gera-se 88 kg de CO_2 e 12 kg de H_2, fechando o balanço de massa. Portanto, a relação de geração de dióxido de carbono para cada unidade de energia disponibilizada é obtida dividindo-se a emissão encontrada pelo conteúdo energético do hidrogênio produzido. Sendo assim, para cada 88 kg de CO_2 emitidos são produzidos 12 kg de H_2, cujo conteúdo energético é de 125 MJ/kg. Portanto, são emitidos cerca de 58,6 g de CO_2 para cada MJ de energia disponibilizada na forma de H_2. Para cada quilograma de H_2, consome-se cerca de 4,5 kg de água no processo de reforma a vapor.

Considerando as massas molares de cada componente tem-se que para cada 12 kg de hidrogênio produzido são emitidos 88 kg de CO_2 e consumidos 46 kg de etanol. Assim, são gerados 1,913 kg de CO_2 para cada quilograma de etanol consumido, ou 0,073 kg de CO_2/MJ de etanol.

As emissões de CO_2 para cada MJ disponível na produção e distribuição do etanol oriundo da cana são de 22 g, ou 459 g de CO_2/m^3 de etanol. Assim, tomando as emissões de CO_2 por kg de etanol da cana na produção e distribuição, que é de 0,5786 kg, mais as emissões do processo de reforma, que é de 1,913 kg de CO_2/kg de etanol, tem-se o total de 2,4916 kg de CO_2/kg de etanol. Como 1 kg de etanol produz 0,26 kg de hidrogênio, tem-se que são emitidos 9,551 kg de CO_2/kg de H_2. Considerando que cada quilograma de hidrogênio contém 125 MJ, chega-se ao valor final de 0,0764 kg de CO_2/MJ disponível no tanque de H_2.

Pode-se notar que há um consumo de água no processo de reforma do etanol, e considerando a reação estequiométrica da reforma e de oxidação do hidrogênio no interior das células a combustível, tem-se que o consumo de água é exatamente a metade do volume emitido na forma de vapor durante a fase de uso.

5.1.5 Comparações das emissões durante a fase de produção dos combustíveis

Dos combustíveis até aqui analisados, a produção e distribuição de etanol emite a menor quantidade de dióxido de carbono, enquanto que a própria produção de hidrogênio através da eletrólise, porém em países com uma matriz energética 'fóssil', são os maiores impactantes do ponto de vista das emissões de dióxido de carbono por unidade de energia disponibilizada para os motores (vide tabela 5.8).

Torna-se claro, também, que a produção de hidrogênio por eletrólise é capaz de consumir mais energia no seu processo de 'fabricação' do que é capaz de disponibilizar para o consumo nos veículos diretamente. E é este fator que acaba sendo um ponto de grande controvérsia entre os defensores dos combustíveis fósseis e dos defensores da economia do hidrogênio. Além disso, o etanol da cana de açúcar em motores de combustão interna, que é uma tecnologia existente, conhecida e consolidada, apresentou o menor índice de emissões de CO_2 por unidade de energia disponibilizada.

TABELA 5.8: Comparação das emissões de CO_2 e energia gasta para a produção dos combustíveis

Combustível	Emissões CO_2 (g/MJ)	Energia Gasta (MJ/MJ)
Gasolina	18,0	0,211
Etanol (milho)	52,0	0,607
Etanol (cana de açúcar)	22,0	0,070
GNV	15,4	0,180
Hidrogênio (eletrólise – Brasil)	37,4	1,548
Hidrogênio (eletrólise – Europa)	210,0	1,548
Hidrogênio (eletrólise – EUA)	262,3	1,548
Hidrogênio (eletrólise – média mundial)	204,1	1,548
Hidrogênio (reforma metano)	57,8	-
Hidrogênio (reforma etanol)	76,4	-

Todavia, torna-se necessário avaliar o sistema globalmente, ou seja, também durante a fase de uso dos veículos, uma vez que a eficiência dos motores são consideravelmente diferentes em todos os casos.

5.2 Analisando a fase 'do tanque às rodas'

5.2.1 Emissões de CO_2 e H_2O em veículos com motores de combustão interna a gasolina

Segundo a Volkswagen (2003), os motores de 1,0 litro a gasolina, que são a grande maioria do mercado brasileiro, apresentam um desempenho de cerca de 13 km/l na cidade. Já os motores 1,6 e 1,8 litros apresentam um valor de 11 km/l. No entanto, o crescimento dos veículos denominados "utilitário-esportivo", derrubou esses valores para cerca de 7 km/l.

Este trabalho considerou um desempenho médio de 10 km/l para todos os veículos de passeio, considerando ainda uma média entre uso urbano e em estrada. Adotando o valor de 10 km/l, isso representa um valor da ordem de 10 litros/100 km. Esse mesmo valor foi adotado por Dias (2001) e é citado por Moreira (2003).

A gasolina vendida nos postos de combustível é uma mistura de vários tipos diferentes de produtos, com uma leve predominância de octano. Este trabalho utilizou o octano (***C_8H_{18}***) e suas propriedades químicas e termodinâmicas para representar a gasolina queimada nos motores de combustão interna. Como hipótese, adotou-se o consumo de gasolina pura para efeitos de cálculo.

A reação estequiométrica de combustão do octano é dada por:

$$1\ C_8H_{18} + 12{,}5\ O_2 \rightarrow 8\ CO_2 + 9\ H_2O$$

O peso molecular do octano é 114 kg/kmol, do O_2 32 kg/kmol, do CO_2 44 kg/kmol e da água 18 kg/kmol. Portanto, para cada 114 kg de gasolina gera-se 352 kg de CO_2 e 162 kg de H_2O, fechando o balanço de massa em uma reação ideal.

Com base na reação estequiométrica, peso molecular, desempenho médio de 10 km/l segundo dados dos fabricantes de veículos, e propriedades dos combustíveis apresentados na tabela acima, é possível estimar alguns parâmetros importantes que servirão como referência para comparações com o sistema atual (vide tabela 5.9).

TABELA 5.9: Parâmetros para veículos com motores de combustão interna a gasolina

Desempenho médio por veículo:	~14,0 km/kg de gasolina,
Consumo médio:	0,072 kg de gasolina / km
Consumo energético:	2,7 MJ/km
Emissão de CO_2:	0,222 kg/km ou 82,2 g/MJ
Emissão de vapor de água	0,102 kg/km ou 37,8 g/MJ

Segundo material de referência do *College of the Desert* (2001), em testes reais realizados pela DaimlerChrysler, o valor medido de emissão de CO_2 foi de 0,248 kg/km, sendo que proporcionalmente, o volume de água produzido deve ser de 0,114 kg/km. Esses valores podem variar em função das características intrínsecas de cada tipo de motor. Berlowitz e Darnell (2000) apresentaram o índice de emissão 0,220 kg de CO_2/km para veículos médios movidos a gasolina.

TABELA 5.10: Objetivos para redução de emissões de dióxido de carbono na Europa.

ANO	***1995***	***2008***	***2012***
Emissões de CO_2 (g / km)	187	140	120

FONTE: Weiss *et al* (2000)

Segundo Weiss *et al* (2000), veículos de passageiros produzidos na Europa têm como objetivo reduzir as emissões de 187 g/km de CO2 (valor de 1995), para 140 g/km em 2008 e 120 g/km em 2012 (vide tabela 5.9). Esses valores demonstram que o desempenho dos veículos europeus é muito maior que os das demais regiões do mundo, conforme apresentado na tabela 5.11.

TABELA 5.11: Taxas de emissões de CO_2 por veículo de algumas marcas nos principais mercados consumidores

Marca	Emissões (gCO_2/km)		
	EUA	UE	Japão
BMW	251	214	-
DaimlerChrysler	282	234	230
Ford	295	196	212
GM	293	181	143
Honda	214	174	174
Nissan	242	159	185
PSA	-	166	-
Renault	242	149	185
Toyota	245	180	200
VW	220	179	-

FONTE: WRI (2003)

De acordo com a Volkswagen (2002), para veículos a gasolina, a emissão média entre estrada e cidade é de 0,192 kg CO_2 / km, onde o valor é de 0,269 kg/km na cidade e 0,146 kg/km na estrada. Para veículos a gás natural, esses valores caem para 0,224 kg/km na cidade e 0,118 kg/km na estrada.

Porém, os veículos rodam, na maior parte de sua vida útil, dentro dos centros urbanos, e por isso as montadoras consideram a proporção de 60% de rodagem na cidade e 40% em estrada, o que resulta num valor de 0,219 kg/km.

Sendo assim, este trabalho empregará o valor sugerido por Berlowitz e Darnell (2000), de 0,220 kg de CO_2/km (0,0815 kg de CO_2/ MJ) e 0,100 kg de H_2O/km, que é um valor intermediário entre os maiores mercados de veículos do mundo.

5.2.2 Emissões de CO_2 e H_2O em veículos com motores de combustão interna a etanol

Segundo a Volkswagen (2003), os motores a álcool apresentam um desempenho de cerca de 7 a 9 km/l na cidade. Este trabalho considerou um desempenho médio de 7 km/l.

A reação estequiométrica de combustão do etanol é dada por:

$$1\ C_2H_5OH + 3\ O_2 \rightarrow 2\ CO_2 + 3\ H_2O$$

O peso molecular do etanol é 46 kg/kmol. Portanto, para cada 46 kg de etanol queimado gera-se 88 kg de CO_2 e 54 kg de H_2O, fechando o balanço de massa.

Com base na reação estequiométrica, peso molecular, desempenho médio de 7 km/l segundo dados dos fabricantes de veículos, e propriedades dos combustíveis apresentados na tabela 5.1, foi possível estimar alguns parâmetros importantes, que são apresentados na tabela 5.12. Vale ressaltar que, conforme exposto anteriormente, as emissões de CO_2 relativas a fase de uso dos veículos movidos a etanol contribuem para neutralizar o ciclo do carbono, portanto, o valor de 216 g de CO_2 / km será desconsiderado, e o valor de emissão de CO_2 na fase de uso será considerado nulo.

TABELA 5.12: Parâmetros para veículos com motores de combustão interna a álcool.

Desempenho médio por veículo:	~8,9 km/kg de etanol,
Consumo médio:	0,113 kg de etanol / km
Consumo energético:	3,0 MJ/km
Emissão de CO_2:	0,216 kg/km ou 72 g/MJ
Emissão de vapor de água	0,133 kg/km.

5.2.3 Consumo de H_2 e emissão de H_2O por veículos movidos por células a combustível de hidrogênio

De acordo com Ashley (2005), um dos maiores desafios entre os fabricantes de veículos com células a combustível é colocar hidrogênio suficiente a bordo, para garantir a autonomia de rodagem que os consumidores exigem. Segundo o mesmo autor, os atuais pro-

tótipos armazenam apenas entre 2,5 a 3,5 kg de hidrogênio, o que garante uma pequena autonomia de deslocamento, ou uma frequente visita aos postos de abastecimento.

O consumo de hidrogênio e a emissão de vapor d'água foram calculados utilizando-se os dados apresentados por algumas montadoras, e através da modelagem apresentada por Larminie e Dicks (2000). Os valores obtidos estão detalhados na tabela 5.13.

TABELA 5.13: Consumo de H_2 e emissão de H_2O em veículos protótipos movidos por células a combustível de hidrogênio

VEÍCULO	DESEMPENHO		
MARCA / MODELO	Autonomia (km / kg H_2)	Consumo H_2 (kg / km)	Emissão H_2O (kg / km)
DAIMLERCHRYSLER / NECAR 4	111,1	0,0090	0,0810
DAIMLERCHRYSLER / CLASSE A	80,6	0,0124	0,1117
FORD / FOCUS FCV	72,5	0,0138	0,1241
GM OPEL / ZAFIRA HYDROGEN 3	87,1	0,0115	0,1033
GM OPEL / HY-WIRE	64,5	0,0155	0,1395
HONDA / FCX V4	80,0	0,0125	0,1125
VW / TIGUAN HYMOTION	71,9	0,0139	0,1252
MÉDIA	**81,1**	**0,0127**	**0,1139**

A reação estequiométrica nas células a combustível é dada por:

$$1\ H_2 + 0{,}5\ O_2 \rightarrow 1\ H_2O$$

Através do balanço de massa da reação, em função da massa molecular de cada elemento, tem-se que para cada quilograma de hidrogênio, são necessários 8 quilogramas de oxigênio, gerando 9 quilogramas de água. Na tabela anterior essas condições foram satisfeitas, com suas respectivas aproximações.

Este trabalho considerou, portanto, os valores da tabela seguinte como referência para veículos movidos por células a combustível de hidrogênio.

TABELA 5.14: Valores de referência para veículos protótipos movidos por células a combustível de hidrogênio

Desempenho	81,1 km/kg H_2
Consumo de hidrogênio	0,012 kg H_2 / km
Emissão de vapor d'água	0,109 kg / km
Consumo energético	1,5 MJ / km

5.2.4 Comparações das emissões durante a fase de 'uso' dos veículos

Durante a fase de 'uso' propriamente dita, as células a combustível de hidrogênio são indiscutivelmente a opção mais limpa e a que consome menos energia para se percorrer uma distância qualquer, quando comparada com os veículos com motores de combustão interna movidos a etanol ou a gasolina (vide comparações nas tabelas 5.15 e 5.16).

TABELA 5.15: Comparação entre os combustíveis analisados

	Gasolina (Octano – C_8H_{18})	Gás natural (Metano – CH_4)	Álcool (Etanol – C_2H_5OH)	Hidrogênio (H_2)
Desempenho (km/kg)	13,9	13,5	8,9	81,1
Consumo comb. (kg/km)	0,072	0,074	0,113	0,012
Consumo energia (MJ/km)	2,7	4,1	3,0	1,5

TABELA 5.16: Comparação de emissões de CO_2 entre os combustíveis analisados

Combustível	Emissões CO_2		Emissões H_2O	
	(g/km)	%	(g/km)	%
Gasolina	222	-	102	-
Gás Natural	204	-8,1	166	62,7
Etanol	216	-2,7	133	30,4
Hidrogênio	-	-100	109	6,9

Nota-se aqui que a gasolina é a maior geradora de CO_2 dentre a oferta de combustíveis fósseis. Na fase de uso, o gás natural é capaz de diminuir em 8,1% as emissões de CO_2, enquanto que o etanol reduz em apenas 2,7%. No entanto, observa-se que a emissão de H_2O chega a ser 62,7% maior para o gás natural e 30,4% maior para o uso do etanol. As células a hidrogênio, como era de se esperar, reduzem em 100% a emissão de CO_2 durante

o uso e aumenta em apenas 6,9% a emissão de vapor d'água, quando comparado com a gasolina.

5.3 Analisando 'do Poço à Roda'

5.3.1 Emissões de Dióxido de Carbono

A análise do ciclo de vida dos combustíveis selecionados está resumida na tabela 5.17, onde são comparadas as emissões de gases de efeito estufa (neste caso o CO_2) por unidade de energia disponibilizada pelo combustível. Vale lembrar que está sendo considerado, para efeitos de cálculo, a matriz hidrelétrica brasileira e a média mundial de emissões de gás carbônico para geração de energia, e para fornecimento de energia elétrica para a eletrólise e geração descentralizada de hidrogênio. Outra consideração é que as reformas do etanol e do gás natural são realizadas em processos *offboard*, ou seja, fora do veículo.

A tabela 5.18 apresenta essa mesma comparação, porém considerando a distância percorrida por unidade de massa de dióxido de carbono liberada na atmosfera. Esta análise também se torna mais importante pois considera, implicitamente, as eficiências dos sistemas de conversão de energia. Esta mesma tabela considera as emissões totais, não levando em conta a parcela de gás carbônico reabsorvida no processo de fotossíntese da cana ou do milho.

TABELA 5.17: Comparação entre as emissões de CO_2 por unidade de energia disponibilizada pelos combustíveis analisados.

FASE	Emissões por unidade de energia disponível	*Combustível*									
		Gasolina	GNV	Etanol		*Hidrogênio*					
						Eletrólise				*Reforma*	
				Milho	Cana	Brasil	EUA	Europa	Mundo	GN	Etanol
PRODUÇÃO	Emissões CO_2 (g / MJ)	18,0	15,4	52,0	22,0	37,4	262,3	210,0	204,1	57,6	76,4
USO	Emissões CO_2 (g / MJ)	82,2	49,8	72,0	72,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

TABELA 5.18: Comparação entre as emissões de CO_2 por unidade de distância dos combustíveis analisados.

FASE	Emissões	*Combustível*

	por unidade de distância percorrida	Gasolina	GNV	Etanol		*Hidrogênio*					
						Eletrólise				*Reforma*	
				Milho	Cana	Brasil	EUA	Europa	Mundo	GN	Etanol
PRODUÇÃO	Emissões CO_2 (g / km)	48,6	63,1	156,0	66,0	56,1	393,5	315,0	306,2	86,4	114,6
USO	Emissões CO_2 (g / km)	222,0	204,0	216,0	216,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
TOTAL		***270,6***	***267,1***	***372,0***	***282,0***	***56,1***	***393,5***	***315,0***	***306,2***	***86,4***	***114,6***

A primeira conclusão extraída das tabelas 5.17 e 5.18, é que, apesar de não emitir CO_2 na fase de uso, as células a hidrogênio (no caso do hidrogênio produzido por eletrólise com energia elétrica proveniente de uma matriz fóssil), podem emitir mais gases de efeito estufa no ciclo de vida do combustível do que os próprios combustíveis fósseis. No entanto, quando usadas fontes limpas de geração de energia elétrica, ela se mostra a alternativa de menor emissão de dióxido de carbono, como é o caso da eletrólise sendo realizada no Brasil.

A melhor alternativa para combustível fóssil é a reforma do gás natural, que apresentou valor menor do que a reforma do próprio etanol.

A segunda conclusão é de que as emissões do etanol são maiores que a da gasolina. No entanto, vale ressaltar que esta é uma conclusão inicial e equivocada, uma vez que o ciclo do etanol não termina com a emissão do dióxido de carbono do escapamento. Na verdade, é neste ponto que ele começa. Sendo um combustível renovável, de origem na biomassa da cana de açúcar, pode-se afirmar que todo carbono emitido para a atmosfera será novamente reabsorvido, através do processo respiratório dos vegetais, na próxima safra da cana posteriormente plantada. Portanto, neste caso deve-se interpretar suas emissões de CO_2 durante a fase de uso como nulas, o que leva o etanol a um nível de impacto para o aquecimento global extremamente baixo.

Sendo assim, dos países analisados somente alguns poucos seriam capazes de produzir hidrogênio através da eletrólise da água sem aumentar a emissão de gases de efeito estufa na atmosfera, como Áustria, Brasil, Canadá, Finlândia, França, Nova Zelândia, Noruega, Suécia e Suiça. Todavia, dentre eles, somente o Brasil, Finlândia, Nova Zelândia e Noruega é que seriam capazes de ofertar uma matriz limpa e renovável, uma vez que os demais são altamente dependentes da energia nuclear.

Se for considerado o ciclo fechado do carbono para o etanol, cujas emissões para a atmosfera serão reabsorvidas na próxima safra de plantio da cana de açúcar ou do milho, o cenário se altera para o descrito na figura 5.2 e na tabela 5.19.

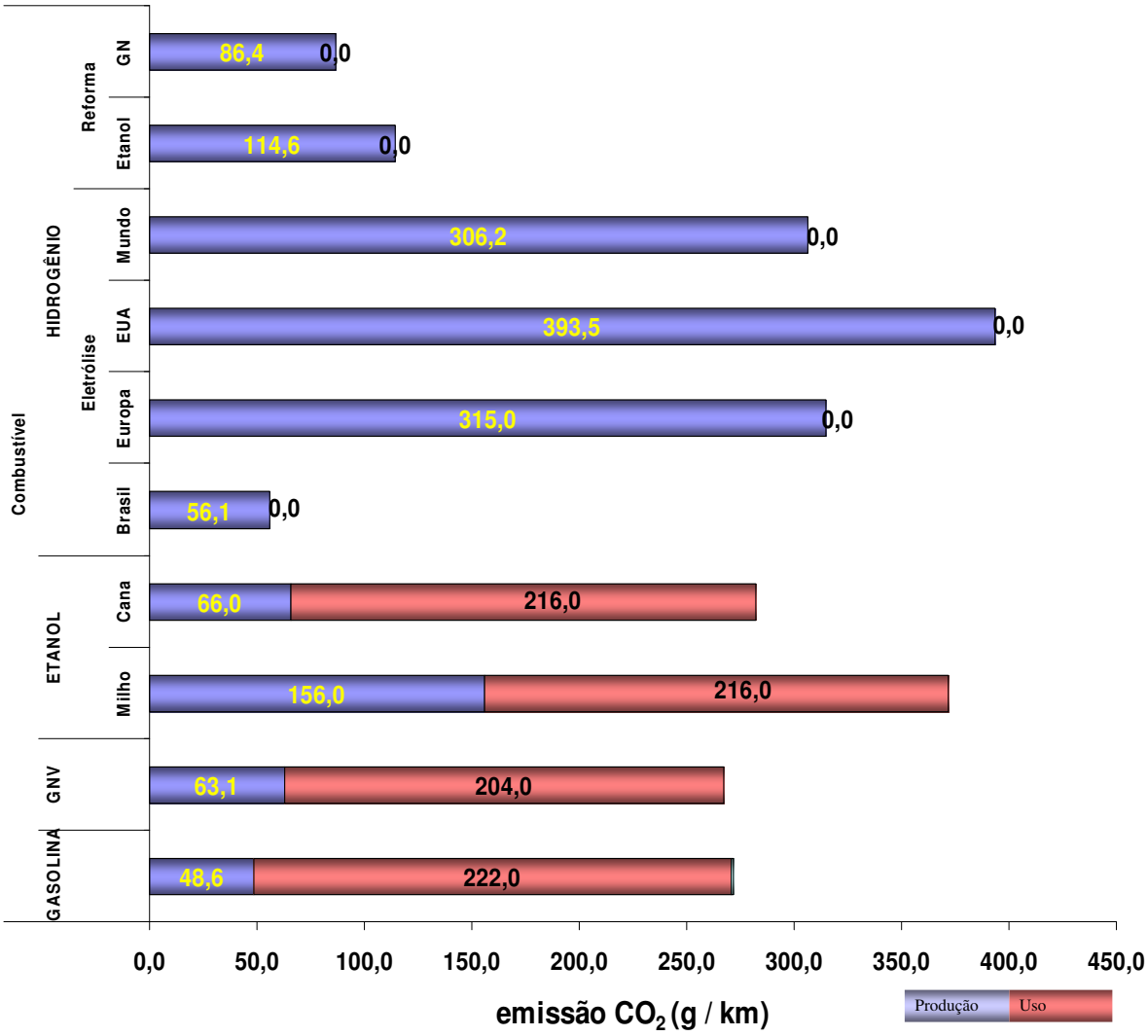

FIG. 5.1 – Comparação da emissão total de CO_2 em função da distância percorrida por um veículo, durante o ciclo de vida dos combustíveis analisados, considerando o ciclo aberto para o carbono.

.

TABELA 5.19: Comparação entre as emissões de CO_2 por unidade de distância dos combustíveis analisados, considerando o ciclo fechado para o carbono.

FASE	Emissões por unidade de distância percorrida	*Combustível*				
		Gasolina	GNV	Etanol	*Hidrogênio*	
					Eletrólise	*Reforma*

				Milho	Cana	Brasil	EUA	Europa	Mundo	GN	Etanol
PRODUÇÃO	Emissões CO_2 (g / km)	48,6	63,1	156,0	66,0	56,1	393,5	315,0	306,2	86,4	17,8
USO	Emissões CO_2 (g / km)	222,0	204,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
TOTAL		***270,6***	***267,1***	***156,0***	***66,0***	***56,1***	***393,5***	***315,0***	***306,2***	***86,4***	***17,8***

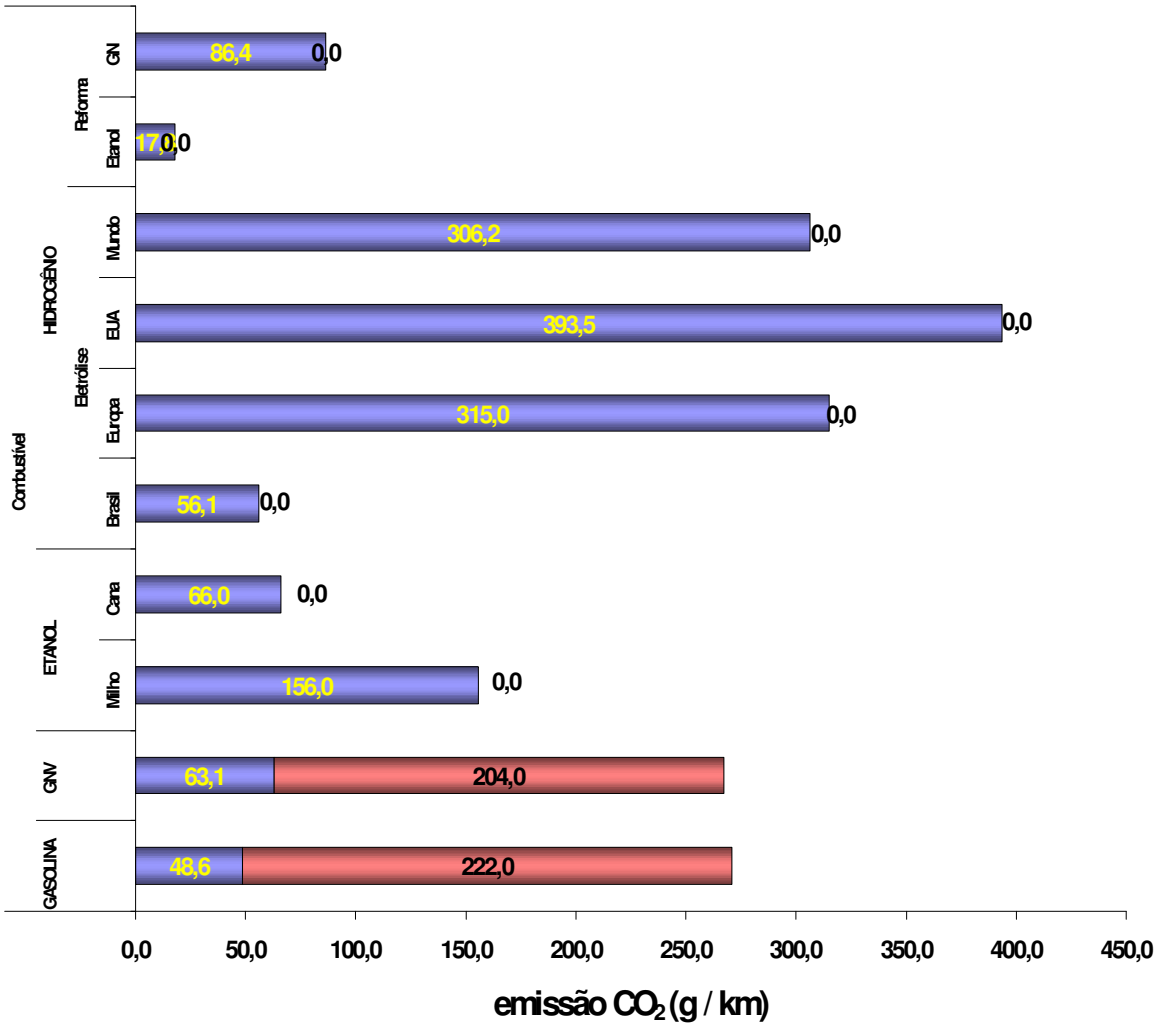

FIG. 5.2 – Comparação da emissão total de CO_2 em função da distância percorrida por um veículo, durante o ciclo de vida dos combustíveis analisados, considerando o ciclo fechado para o carbono.

Nesta condição, observa-se que a vantagem da utilização do hidrogênio em células a combustível é muito pequena (17,6%) em relação ao uso do etanol da cana em motores de combustão interna. Porém, quando avaliado o uso do etanol em reformadores, e conside-

rando o maior rendimento do processo eletroquímico de uma célula a combustível em relação a um motor de combustão interna, tem-se uma enorme vantagem para o uso da nova tecnologia, com redução das emissões sistêmicas de dióxido de carbono na ordem de 68%.

Vale ressaltar aqui a importância das hipóteses iniciais para a interpretação de parte dos resultados. Uma das primeiras hipóteses era de que o hidrogênio seria produzido através da eletrólise da água. A outra estava relacionada à produção descentralizada do hidrogênio, ou seja, o gás sendo produzido no seu ponto de consumo. Isso leva à conclusão de que não haverá transporte de hidrogênio até os postos de abastecimento. Caso isso não ocorra, deve-se somar a parcela de emissão para distribuição do hidrogênio em larga escala às emissões provenientes da produção do gás. Para o gás natural, conforme demonstrado anteriormente, a emissão de CO_2 relacionada à distribuição é da ordem de 0,8485 kg CO_2 / kg de gás natural, e cada quilograma de gás natural produz 0,5 kg de hidrogênio, e este, por sua vez, é consumido a uma taxa de 0,012 kg por quilômetro rodado nos veículos com células a combustível. Assim, a emissão comparativa para distribuição de hidrogênio seria no mínimo igual a 0,0203 kg de CO_2 por quilômetro, elevando o total de emissões de CO_2 no ciclo de vida (fechado) do hidrogênio de 0,0561 para 0,0765 kg de CO_2 por quilômetro, ultrapassando o valor de 0,0660 kg de CO_2 por quilômetro do etanol. Fica então evidente a superação das emissões de CO_2 em relação ao etanol, como agente redutor do efeito estufa, sobre o hidrogênio, uma vez que este deverá ser transportado pelas vias comuns de distribuição de combustível, ou através de dutos de distribuição do gás (pouco provável a médio prazo).

A diferença entre os valores em g/km relacionados à fase de produção do etanol entre os modelos de uso em motor de combustão interna e reformadores, está condicionada à eficiência energética dos dois sistemas. Como apresentado anteriormente, as células a combustível possuem uma eficiência maior na conversão de energia e distribuição às rodas do que os tradicionais motores de combustão interna.

TABELA 5.20: Comparação global entre as emissões de CO_2 nas fases de produção e uso dos combustíveis, considerando o ciclo de carbono aberto e fechado.

Combustível	Emissões de CO_2 na fase de Produção (kg CO_2 / km)	Emissões de CO_2 na fase de Uso (kg CO_2 / km)	***Total de Emissões de CO_2 no ciclo de vida (kg CO_2 / km)***	
			Ciclo aberto	Ciclo fechado
Gasolina	0,0486	0,222	***0,2706***	***0,2706***
Gás natural	0,0631	0,204	***0,2671***	***0,2671***
Etanol Cana	0,0660	0,216	***0,2820***	***0,0660***
Etanol Milho	0,1560	0,216	***0,3720***	***0,1560***
Hidrogênio (eletrólise – Brasil)	0,0561	-	***0,0561***	***0,0561***
Hidrogênio (eletrólise – Europa)	0,3150	-	***0,3150***	***0,3150***
Hidrogênio (eletrólise – EUA)	0,3935	-	***0,3935***	***0,3935***
Hidrogênio (eletrólise – média mundial)	0,3062	-	***0,3062***	***0,3062***
Hidrogênio (reforma do metano)	0,0864	-	***0,0864***	***0,0864***
Hidrogênio (reforma do etanol)	0,1146	-	***0,1146***	***0,0178***

5.3.2 Emissões de Água

Através da mesma metodologia aplicada ao cálculo das emissões de dióxido de carbono, pode-se determinar a massa de água emitida pelos escapamentos dos veículos em análise. Os resultados estão apresentados na tabela 5.21.

TABELA 5.21: Comparação entre as emissões de H_2O dos combustíveis analisados.

Emissões H_2O	Gasolina	Gás Natural	Etanol	Hidrogênio
(g / km)	102	166	132	109
%	base	62,7	29,4	6,9

Através dos resultados apresentados, pode-se concluir que a emissão de vapor de água pelos escapamentos dos veículos movidos por células a combustível de hidrogênio será realmente superior à emissão dos veículos movidos a gasolina em motores de combustão interna em 6,9%. No entanto, essa emissão é menor dos que os atuais níveis apresentados para os veículos movidos a álcool (29,4%) e movidos a GNV (62,7%). Sendo assim, esse

acréscimo deixa de ser um fator importante de agravamento e de impedimento para aplicação desta nova tecnologia.

5.4 Analisando a demanda

5.4.1 Motores de Combustão Interna

5.4.1.1 Demanda de petróleo para abastecimento de veículos movidos a gasolina

Segundo Sá (2000), um barril de petróleo é capaz de produzir cerca de 30% de gasolina, 30% de óleo diesel e 30% de óleos lubrificantes. Sendo assim, como cada barril tem um volume de 159 litros, um barril de petróleo pode gerar cerca de 50 litros de gasolina, aproximadamente. Considerando o consumo médio de 10 km/l para os motores de combustão interna e uma rodagem anual de 15.000 km, e uma produção mundial diária de 80 milhões de barris de petróleo, tem-se que já em 2020, caso não haja um aumento considerável na produção de petróleo, a demanda poderá ser superior que a oferta atual de petróleo (ver tabela 5.22).

TABELA 5.22: Previsão de demanda de gasolina e petróleo para este século.

Ano	2000	2010	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
Frota mundial (bilhões)	0,650	0,800	1,100	1,400	1,700	2,000	2,300	2,600	2,900	3,200	3,500
Demanda por gasolina (trilhões de litros)	0,975	1,20	1,65	2,10	2,55	3,00	3,45	3,90	4,35	4,80	5,25
Volume de barris de petróleo (bilhões barris/ano)	18	23	31	40	48	57	65	74	82	91	99
Participação na produção mundial atual (%)	62	77	105	134	163	191	220	249	278	306	335

5.4.1.2 Demanda de etanol para abastecimento de veículos movidos por motores de combustão interna

O consumo médio adotado para um carro a álcool, conforme comentado anteriormente é de 7 km/l. Para efeito de cálculo, este trabalho adotou o valor médio de 30 bilhões de litros por ano para atender à demanda de toda a frota, caso ela seja convertida para motores a álcool ou bicombustíveis. Extrapolando este valor para a frota mundial atual, seria o equivalente a consumir anualmente 1.600 bilhões de litros de etanol (de acordo com a hipótese de 15.000 km/ano.veículo) para o ano de 2005.

Hoje são cultivados no mundo cerca de 22 milhões de hectares de cana de açúcar, segundo Datagro (2009). Admitindo a hipótese de que toda a plantação de cana fosse destinada a produção de etanol, a área de plantio disponível atualmente seria capaz de produzir cerca de 154 bilhões de litros por ano, considerando uma única safra anual. Assim, na atual condição, seria possível propor apenas o adicionamento de etanol à gasolina em uma proporção aproximada de 11%, auxiliando na redução da emissão de poluentes, mas não solucionando o problema do efeito estufa.

TABELA 5.23: Previsão de demanda de etanol para o século XXI

Ano	2000	2010	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
Frota mundial* (bilhões)	0,650	0,800	1,100	1,400	1,700	2,000	2,300	2,600	2,900	3,200	3,500
Demanda por etanol (trilhões de litros)	1,39	1,71	2,36	3,00	3,64	4,29	4,93	5,57	6,21	6,86	7,50

* considerando que 100% da frota seja convertida para o uso de etanol.

5.4.2 Células de combustível

5.4.2.1 Demanda de água para o processo de eletrólise

Com um desempenho de 81,1 km para cada quilograma de hidrogênio e admitindo uma rodagem média anual de cerca de 15.000 km, chega-se ao valor da necessidade de 184,96 kg de hidrogênio anualmente por veículo. Supondo que todo hidrogênio disponível nos tanques das células a combustível seja transformado efetivamente em água, cada veículo necessitaria de um volume de cerca de 1.665 litros de água anualmente para abastecimento de cada veículo individualmente.

Conforme apresentado anteriormente, a menor eficiência para um processo de eletrólise é de aproximadamente 65%, portanto, na pior condição, para se produzir os 184,96 kg de hidrogênio serão necessários 2.562 litros de água na fase inicial do ciclo de produção do hidrogênio.

Para uma frota mundial de 700 milhões de veículos leves, e com uma distância percorrida anualmente de 15.000 km em média, isso representaria o equivalente a 1,793 bilhões de metros cúbicos anuais para abastecimento de veículos leves através da produção de hidrogênio. A tabela 5.24 apresenta a evolução da demanda de água para a frota de veículos a hidrogênio

TABELA 5.24: Previsão da demanda de água em função do consumo de água para eletrólise.

Ano	2000	2010	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
Frota mundial[1] (bilhões)	0,650	0,800	1,100	1,400	1,700	2,000	2,300	2,600	2,900	3,200	3,500
Consumo água para eletrólise (bilhões m^3)	1,573	1,920	2,662	3,388	4,114	4,840	5,566	6,292	7,018	7,744	8,47

Nota.: 1. Previsão de crescimento constante da frota mundial e da população.

5.4.2.2 Demanda de etanol para reforma

Segundo a DaimlerChrysler (2003), o protótipo Necar com célula a combustível e um reformador para metanol, apresenta uma autonomia de 450 km. Ou seja, o veículo percorre 450 km com 60 litros de metanol. Isso dá um desempenho da ordem de 7,5 km/litro de metanol. Como esse valor é muito próximo do desempenho de um motor de combustão interna movido a etanol, neste trabalho foi considerado o valor de 7 km/litro.

Portanto, a demanda nacional de etanol para toda a frota de veículos nacionais, movidos por células a hidrogênio com reformadores de etanol, seria equivalente a 30 bilhões de litros anuais. Extrapolando este valor para a frota mundial atual, seria o equivalente a consumir anualmente 1.600 bilhões de litros de etanol (de acordo com a hipótese de 15.000 km/ano.veículo).

Considerando que a eficiência do processo de reforma é de 85%, conforme descrito no capítulo 4, tem-se a demanda necessária de etanol para ser reformado nas células a combustível (tabela 5.25).

TABELA 5.25: Previsão de demanda de etanol para reforma, para o século XXI

Ano	2000	2010	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
Frota mundial* (bilhões)	0,650	0,800	1,100	1,400	1,700	2,000	2,300	2,600	2,900	3,200	3,500
Demanda por etanol (trilhões de litros)	1,64	2,02	2,77	3,53	4,29	5,04	5,80	6,56	7,31	8,07	8,82

* considerando que 100% da frota seja convertida para o uso de etanol.

5.4.2.3 Demanda de gás natural para reforma

De acordo com as premissas de que um veículo movido a gás natural possui um desempenho de 10 quilômetros por m^3 de gás, pode-se estimar a demanda mundial de gás na-

tural para toda a frota de veículos leves, movidos por células a hidrogênio com reformadores. Esse valor seria equivalente a 980 bilhões de m^3 anuais.

Considerando que a eficiência do processo de reforma é de 85%, conforme descrito no capítulo 4, tem-se a demanda necessária de gás natural para ser reformado nas células a combustível (tabela 5.26).

TABELA 5.26: Previsão de demanda de gás natural para o século XXI

Ano	2000	2010	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
Frota mundial (bilhões)	0,650	0,800	1,100	1,400	1,700	2,000	2,300	2,600	2,900	3,200	3,500
Consumo estimado GN em reformadores (trilhões de m^3)*	0,98	1,20	1,65	2,10	2,55	3,00	3,45	3,90	4,35	4,8	5,25
Consumo mundial estimado de GN (trilhões m^3)**	2,40	3,10	4,00	5,28	7,60	10,95	15,77	22,70	32,69	47,08	67,79
Produção mundial atual (trilhões de m^3)***	2,50	2,5	2,5	2,50	2,5	2,5	2,5	Fim das reservas conhecidas			
% da produção mundial de GN atual	96%	124%	160%	211%	304%	438%	631%	-	-	-	-

* considerando que 100% da frota seja convertida para o uso de gás natural.
** Fonte: EIA (2005)
*** Fonte: ANEEL (2005)

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base nos dados e cálculos apresentados até este momento torna-se possível discutir sobre os principais e mais polêmicos aspectos da economia do hidrogênio. Os pontos abordados neste capítulo são os impactos sobre clima que essa nova transição de vetor energético poderia criar; o impacto sobre a evapotranspiração natural do planeta Terra; os possíveis impactos em se criar um sistema de abastecimento dependente de um recurso escasso como a água, principalmente em uma grande metrópole como São Paulo e os impactos sobre a agricultura para uma transição com utilização de etanol.

6.1 Impactos sobre o clima

Segundo Lovins (2005), o vapor d'água apresenta um potencial de efeito estufa de cerca de 70% do potencial do dióxido de carbono, cujo valor serve de referência para comparações com outros compostos químicos. Além disso, os efeitos climáticos provocados pela variação da concentração de vapor d'água na atmosfera são ainda desconhecidos, e negligenciá-lo, como foi o caso do próprio CO_2 no passado, pode custar caro à humanidade.

Um veículo usando hidrogênio, e não hidrocarbonetos, certamente deverá emitir mais vapor d'água de seus escapamentos, uma vez que toda a energia deverá ser extraída da relação hidrogênio-oxigênio, e que acaba por produzir água naturalmente. Já os hidrocarbonetos podem extrair a energia através da combustão, que produz água e CO_2.

Este trabalho confirmou esta previsão, com uma emissão de vapor d'água cerca de 6,9% maior que os veículos movidos a gasolina em motores de combustão interna. Todavia, esse valor ainda é menor (-18%) que a emissão de água para os veículos movidos a etanol.

No caso do mercado brasileiro, onde ocorre o crescimento da demanda por combustíveis renováveis e por veículos bicombustíveis, qualquer tipo de impacto provocado pelo excedente de vapor d'água das células a combustível deve ser interpretado com um aspecto ambiental cujo impacto será positivo, pois estará reduzindo a emissão de vapor d'água em 18% quando comparado com os veículos movidos a etanol, conforme discutido anteriormente.

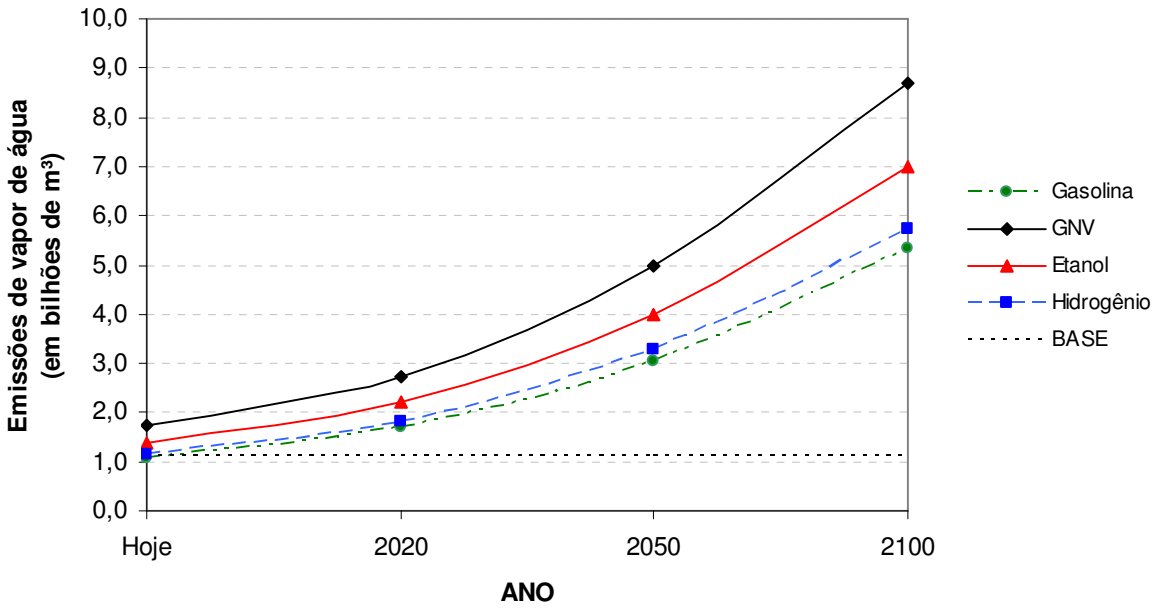

FIG. 6.1 – Comparação da emissão total de vapor de água durante a fase de uso dos combustíveis analisados, considerando a previsão de crescimento da frota mundial.

No caso do dióxido de carbono, é evidente o ganho na redução de emissões de gases de efeito estufa para alguns casos de uso das células a hidrogênio. A eletrólise no Brasil e o processo de reforma de etanol são as melhores alternativas para redução destes índices, representando uma redução de 79% e 93% respectivamente (ano base 2000). Se considerada a eletrólise em uma matriz energética limpa, como a brasileira, pode-se atingir o ano de 2090 com a mesma emissão de dióxido de carbono atual, porém com uma frota cinco vezes maior. Os demais processos de eletrólise, com uma matriz energética de origem fóssil, em nada irá ajudar a mitigar a emissão dos gases estufa. Já a reforma do etanol permitiria chegar a 2100 com uma emissão de 35% maior em relação aos valores atuais (fig. 6.2 e 6.3).

No entanto, pode-se notar que o etanol da cana, sendo queimado em motores de combustão interna, também apresenta um elevado potencial de redução de emissões totais de dióxido de carbono, podendo atender ao crescimento da frota mundial, e igualando as emissões dos motores a gasolina somente em 2070, isso tudo sem a necessidade de desenvolvimento de novas tecnologias ou de criação de nova infraestrutura de abastecimento.

Portanto, a análise completa do ciclo de vida para os combustíveis se apresenta como uma ferramenta muito importante, à medida que apresenta a real emissão de gases em todas as fases do ciclo de um produto, evitando tomadas equivocadas de decisões.

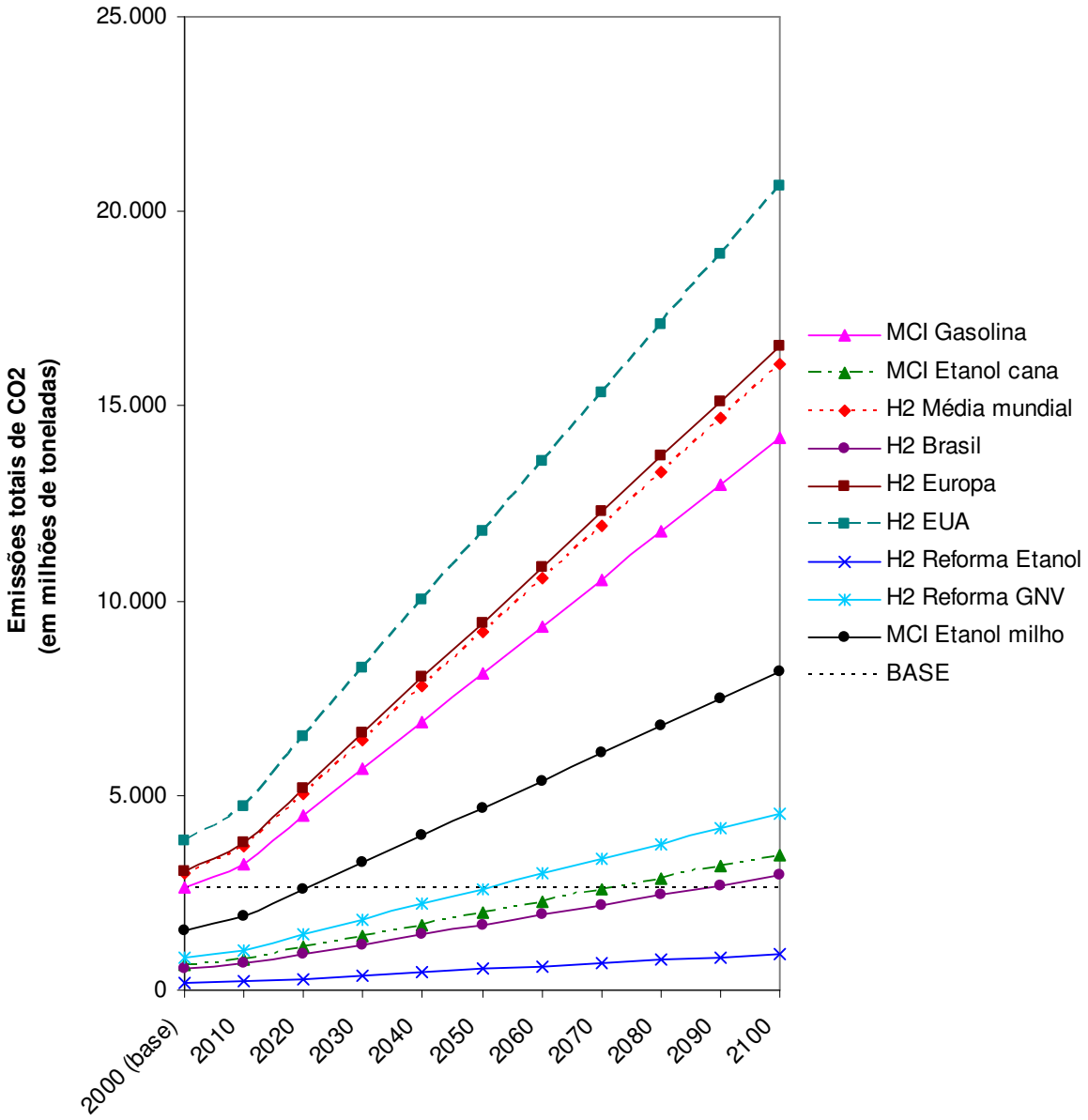

FIG. 6.2 – Comparação da emissão total de CO_2 durante o ciclo de vida dos combustíveis analisados considerando a previsão de crescimento da frota mundial.

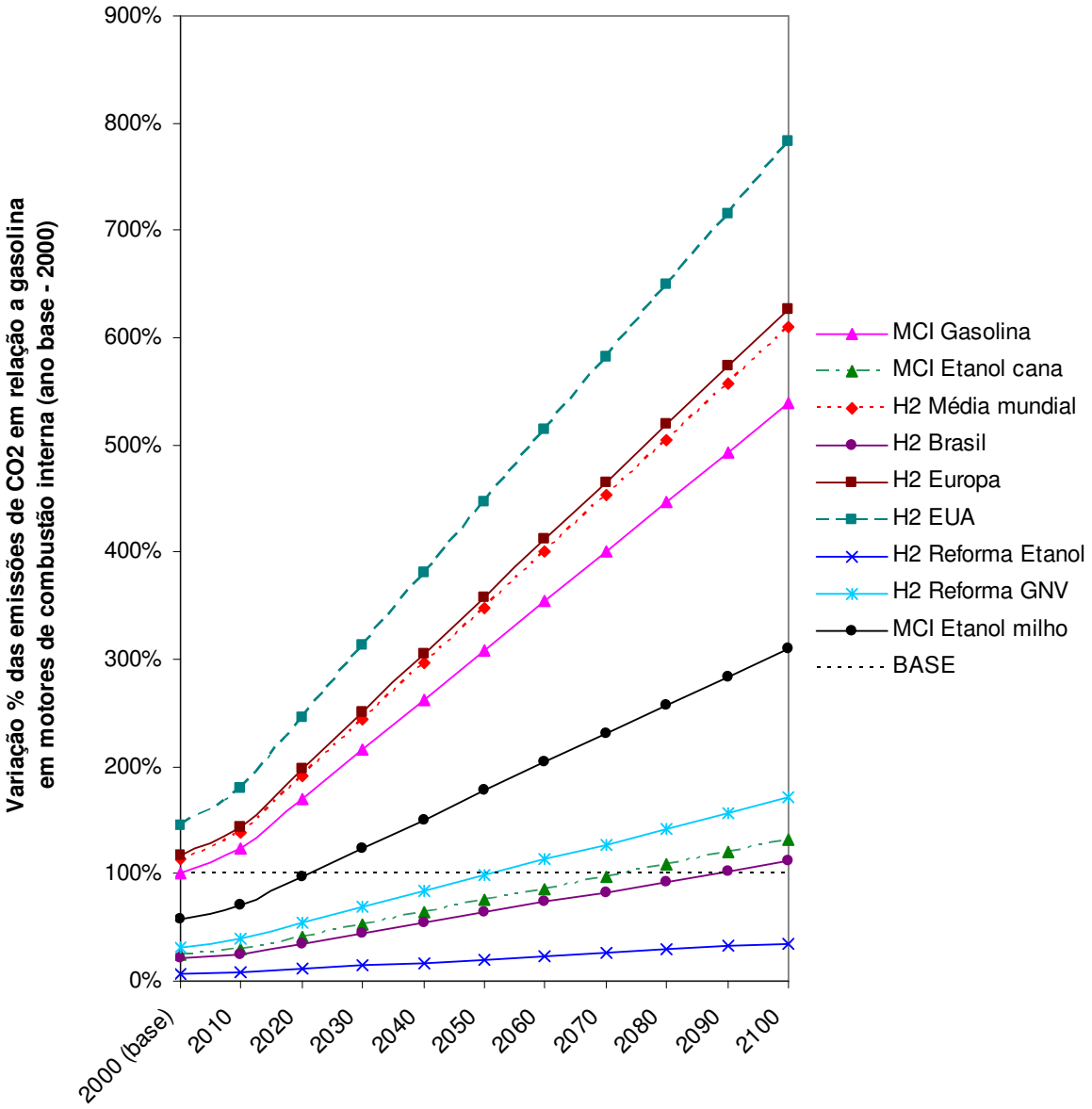

FIG. 6.3 – Comparação percentual da emissão total de CO_2 durante o ciclo de vida dos combustíveis analisados considerando a previsão de crescimento da frota mundial.

6.2 Impactos sobre o abastecimento de água

A visão preferida para a economia do hidrogênio é um reflexo de uma das premissas deste trabalho: produzir hidrogênio a partir da eletrólise da água.

Cerca de 75% da superfície da Terra é coberta por água, mas a civilização vive um sério problema de escassez de água limpa. Muitas regiões da Europa, África, Ásia, Austrália e no próprio continente sulamericano enfrentam algum tipo de problema relacionado ao assunto.

Se a proposta é utilizar água como combustível, a primeira pergunta que surge é se isso não irá piorar o crítico cenário de escassez no suprimento de água.

Para uma frota mundial de 700 milhões de veículos leves, e com uma distância percorrida anualmente de 15.000 km em média, isso representaria o equivalente a 1,7 bilhões de m^3 por ano, ou 4,6 milhões de metros cúbicos diariamente para abastecimento de veículos leves através da produção de hidrogênio.

Esse volume determinado para fornecimento de água diariamente no mundo pode não parecer muito expressivo, no entanto, para as grandes concentrações urbanas e para as metrópoles esse valor pode ser bastante significativo, uma vez que as mesmas já convivem com problemas de disponibilidade de água.

A região metropolitana de São Paulo é uma dessas grandes concentrações urbanas que sofre com problemas de abastecimento e poluição dos recursos hídricos. Pela região circulam diariamente cerca de 6 milhões de veículos. Se toda essa frota fosse movida por veículos a células de combustível de hidrogênio, isso levaria a uma necessidade diária de aproximadamente 39,8 mil metros cúbicos.

Segundo a Sabesp (2002), o consumo diário, per capita, de água no estado de São Paulo é de 120 litros. Sendo assim, o volume de água usado para abastecer a frota veicular seria o suficiente para atender a demanda de cerca de 330 mil pessoas na região metropolitana.

Enquanto o valor de consumo diário de água em São Paulo é extremamente elevado, pois são consideradas as perdas e o consumo para outros fins que não são de necessidade básica, a ONU recomenda o consumo mínimo de 50 litros diários per capita para atendimento das necessidades básicas da população. Com base neste valor, em São Paulo seria o equivalente ao consumo de 796 mil pessoas, ou o proporcional à população de uma cidade como Santo André, no ABC paulista.

A demanda mundial de água para produção de hidrogênio, 4,6 milhões de metros cúbicos por dia, é capaz de elevar em cerca de 1,4% a demanda de água pela população atual da Terra, considerando o consumo mínimo recomendado pela ONU.

TABELA 6.1: Previsão da demanda de água em função do crescimento populacional e do consumo de água para eletrólise.

Ano	2000	2010	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
População[1] (bilhões)	6,00	6,66	7,32	7,98	8,64	9,30	9,96	10,62	11,28	11,94	12,60
Frota mundial[1,] (bilhões)	0,650	0,800	1,100	1,400	1,700	2,000	2,300	2,600	2,900	3,200	3,500
Demanda[2] água pela população (bilhões m^3)	109,5	121,5	133,6	145,6	157,7	169,7	181,8	193,8	205,9	217,9	230,0
Consumo água para eletrólise (bilhões m^3)	1,573	1,920	2,662	3,388	4,114	4,840	5,566	6,292	7,018	7,744	8,47
TOTAL	***111,1***	***123,4***	***136,3***	***149,0***	***162,5***	***174,5***	***187,4***	***200,1***	***212,9***	***225,6***	***238,5***
Aumento da demanda (base 2000)	-	11%	22%	34%	45%	57%	69%	80%	92%	103%	115%

Nota.: 1. Previsão de crescimento constante da frota mundial e da população.
2. Demanda de água baseada na recomendação da ONU de 50 litros per capita por dia.

O cenário apresentado na tabela anterior mostra que, devido ao crescimento populacional e à hipótese de uso da água para eletrólise da frota mundial, em 2070 o consumo de água será o dobro do consumo atual.

Pode-se observar que antes da virada do século, a demanda de água será duas vezes maior que a demanda atual. Se, segundo a ONU, 54% das reservas disponíveis de água doce são utilizadas atualmente, provavelmente haverá problemas futuros para o abastecimento dos veículos caso a tecnologia não sofra grandes inovações no decorrer deste século.

6.3 Impactos sobre a geração e fornecimento de energia elétrica

São necessários cerca de 193,5 MJ para cada quilograma produzido de hidrogênio. A produção de hidrogênio para abastecer a frota brasileira atual, de 19,2 milhões de veículos, consumiria anualmente cerca de $649{,}4.10^9$ MJ (180.393.600 MWh) de energia elétrica. Considerando que em 2002, segundo o Balanço Energético Nacional, foram produzidos por volta de 284.944.000 MWh de energia elétrica, o consumo de energia elétrica para a eletrólise da água consumiria cerca de 63% da oferta de energia no Brasil no estado atual. Ao país seria recomendado aumentar o nível de ocupação das usinas hidrelétricas, utilizando todo o potencial gerador de suas turbinas, mesmo fora dos horários de maior consumo de energia elétrica.

Portanto, observa-se aqui a necessidade de uma política de produção adicional de energia elétrica desvinculada do consumo industrial e residencial, e, o mais importante, de origem renovável a fim de evitar o crescimento das emissões de gases de efeito estufa.

Para a frota mundial atual seria o equivalente a 6.107 TWh/ano em consumo de energia elétrica para realização da eletrólise. De acordo com Moreira (2002), no mundo todo foram inundados cerca de 40 milhões de ha de terra para encher os reservatórios de usinas hidrelétricas, com capacidade de geração de 2.500 TWh/ano de energia elétrica. Assim, pode-se extrapolar que caso houvesse a inundação de outros 40 milhões de ha, no mínimo, no mundo, toda essa energia gerada não seria suficiente para produzir hidrogênio para atendimento da demanda dos automóveis. Todavia, 6.107 TWh/ano representam apenas 38% de toda a energia gasta atualmente pelo setor de transportes com combustíveis fósseis, conforme dados apresentados por Legget (1992).

6.4 Impactos sobre a evapotranspiração natural do planeta

Para se determinar o impacto da emissão de vapor de água para a atmosfera pode-se buscar a relação entre o valor das emissões de vapor dos escapamentos dos veículos e a umidade atmosférica da Terra.

Se todos os 700 milhões de veículos leves do mundo (ANFAVEA, 2005) fossem convertidos para funcionarem com células a combustível, e percorressem cerca de 15.000 km por ano, e ainda emitissem o valor médio calculado de 0,109 kg de vapor d'água por quilômetro rodado, para veículos movidos a hidrogênio, a emissão anual de vapor d'água na atmosfera proveniente dos automóveis seria de 1,14 bilhão de toneladas.

Segundo Rebouças (1999) e Lovins (2005), a quantidade média de vapor d'água na atmosfera terrestre é de 13.000 km^3, ou 13 trilhões de toneladas métricas. Sendo assim, considerando o pior caso, onde todo o vapor emitido seja "novo" (não faz parte do ciclo da água), fique preso na atmosfera e não caia na forma de chuva, contribuindo, assim, para o aumento da umidade do ar, tem-se que o aumento do estoque de água na atmosfera será anualmente de 0,0088%.

Portanto, neste caso específico, a umidade absoluta do ar seria elevada em cerca de 9 milésimos de um porcento, ou 88 ppm. Estes valores, apesar de pequenos, merecem um estudo mais aprofundado e um modelo matemático para simulações de mudanças climáticas, pois a ordem de crescimento da quantidade de vapor d'água na atmosfera pode superar o crescimento da quantidade de CO_2. Todavia, deve-se considerar que o vapor de água

emitido pelos veículos com motores a hidrogênio interage com o próprio ciclo da água e voltam à superfície terrestre na forma de chuva, não ficando aprisionado na atmosfera.

Caracterizar a relevância desse aumento abre portas para inúmeros outros trabalhos, porém vale lembrar que a concentração de dióxido de carbono na atmosfera vem crescendo 0,5% ao ano desde o início da década de 1990, segundo Lovins (2005).

Para verificar se haverá impacto provocado ao planeta pelo aumento da concentração de vapor d'água na atmosfera decorrente das emissões dos veículos movidos a hidrogênio, deve-se verificar, também, a proporção que essa nova taxa de emissão representa na taxa natural de evaporação e transpiração das terras emersas de nosso planeta. A evapotranspiração consiste na soma de todas as taxas de evaporação da superfície terrestre (lagos, rios, oceanos, etc) e das taxas de transpiração dos animais e plantas da Terra.

Segundo Rebouças (1999), o valor de evaporação das terras emersas do planeta é da ordem de 72.000 km^3/ano. Considerando novamente as premissas anteriores (frota de 700 milhões de automóveis, toda movida a hidrogênio, 15.000 km por ano por veículo), a emissão antropogênica de vapor d'água seria da ordem de 0,0016%.

Portanto, para cada litro de água evaporada naturalmente, tem-se uma parcela entre 1 e 2 centésimos de uma gota d'água proveniente das células a combustível.

6.5 Impactos na agricultura para cultivo da cana-de-açúcar

Atualmente são cultivados 7 milhões de hectares de cana de açúcar no Brasil, e 22 milhões de hectares no mundo. A produtividade atingiu o valor de 7.000 litros de álcool combustível para cada hectare. Portanto, são produzidos cerca de 7.000 l/ha ou 700 m^3/km^2. Se toda a frota brasileira de veículos de passeio for convertida para motores a álcool, ou considerando o crescimento vertiginoso da demanda por veículos bicombustíveis, haverá a necessidade de ampliação da área de cultivo da cana-de-açúcar (vide tabela 6.3). Comparando os valores atuais, o Brasil, para atender sua frota, usaria toda a sua área de plantio da cana (7 milhões de hectares) para produção de etanol. Porém, isso ainda representaria apenas 1,1% da área destinada à agricultura no território nacional.

Os dados mostram que em 2030 será necessário uma área equivalente a metade da área do estado de São Paulo para atender à demanda da frota brasileira por etanol, ou 125 milhões de hectares. Porém, Moreira (2002) chegou a assumir que em 2020 cerca de 143 milhões de hectares estarão disponíveis para a plantação de cana-de-açúcar em países como Brasil, China, EUA e Índia. Segundo o mesmo autor, a cana necessita de um clima

tropical com uma pequena quantidade de chuva, e com isso, pode prever uma disponibilidade de até 400 milhões de hectares somente nos EUA e na China.

TABELA 6.2: Previsão da demanda de etanol em função do crescimento da frota mundial de veículos leves.

Ano		2000	2010	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
Frota mundial (bilhões)		0,650	0,800	1,100	1,400	1,700	2,000	2,300	2,600	2,900	3,200	3,500
Demanda etanol (bilhões m^3)		1,393	1,714	2,357	3,000	3,643	4,286	4,929	5,571	6,214	6,857	7,500
Área necessária para plantio de cana	(em milhões km^2)	2,321	2,857	2,875	2,885	3,503	4,121	4,739	5,357	5,975	6,593	7,212
	(em milhões ha)	232,1	285,7	287,5	288,5	350,3	412,1	473,9	535,7	597,5	659,3	721,2
	% área agricultável brasileira	50%	61%	61%	62%	75%	88%	101%	115%	128%	141%	154%
	% território brasileiro	27,3%	33,6%	33,8%	33,9%	41,2%	48,5%	55,8%	63,0%	70,3%	77,6%	84,8%

A tabela 6.2 apresenta um cenário onde 100% da frota mundial de veículos leves possuem motor de combustão interna a etanol. Nela observa-se que se o Brasil se tornar o grande produtor/exportador de etanol, haverá uma grande disputa pela ocupação do solo entre as culturas de biocombustíveis e de alimentos. Supondo o Brasil sendo o único exportador mundial de combustível, neste cenário o ano de 2060 representaria a linha de corte da produção, representando que toda a área agricultável do país seria tomada pela produção de cana de açúcar. Se for seguida a previsão de Moreira (2002), que assumiu que em 2020 cerca de 143 milhões de hectares estarão disponíveis para a plantação de cana de açúcar em países como Brasil, China, EUA e Índia, o cenário previsto mostra que apenas 50% da frota mundial poderá ser movida por motores a etanol.

É difícil estimar quais seriam os verdadeiros impactos para o país causados pelo crescimento da demanda de etanol. Poderia conjecturar-se sobre a redução das áreas de pastagens para a plantação da cana-de-açúcar, ou sobre a redução do volume de plantações de grãos, ou de plantações de subsistência, à favor da ocupação das áreas de plantio para a plantação de cana, assim como aconteceu no Brasil na época do Pró-Álcool. Segundo Bermann (2002), no período entre 1977 e 1989, a área cultivada pela cana de açúcar

aumentou cerca de 619,6 mil ha, em detrimento das culturas do café, feijão, amendoim, arroz e mandioca. Segundo o mesmo, 30% desta substituição envolveu áreas de pastagens.

Certamente, caso esse cenário se concretize, os valores de território para plantação de cana seriam muito maiores, pois o Brasil passaria a ser um grande exportador de combustível renovável.

Se o Brasil optar por ser um grande produtor e exportador mundial de etanol, seu limite de produção chegará a meados da década de 2060, quando a plantação de cana de açúcar tomará o lugar de toda a área agricultável do país (tabela 6.3). Portanto, caso nosso país tenha interesse em ser o novo pólo de produção de combustível, isso irá custar a substituição de toda a nossa agricultura e a utilização de áreas de pastagens para o plantio da cana, e ainda forçará a fronteira agrícola para dentro dos limites da floresta amazônica.

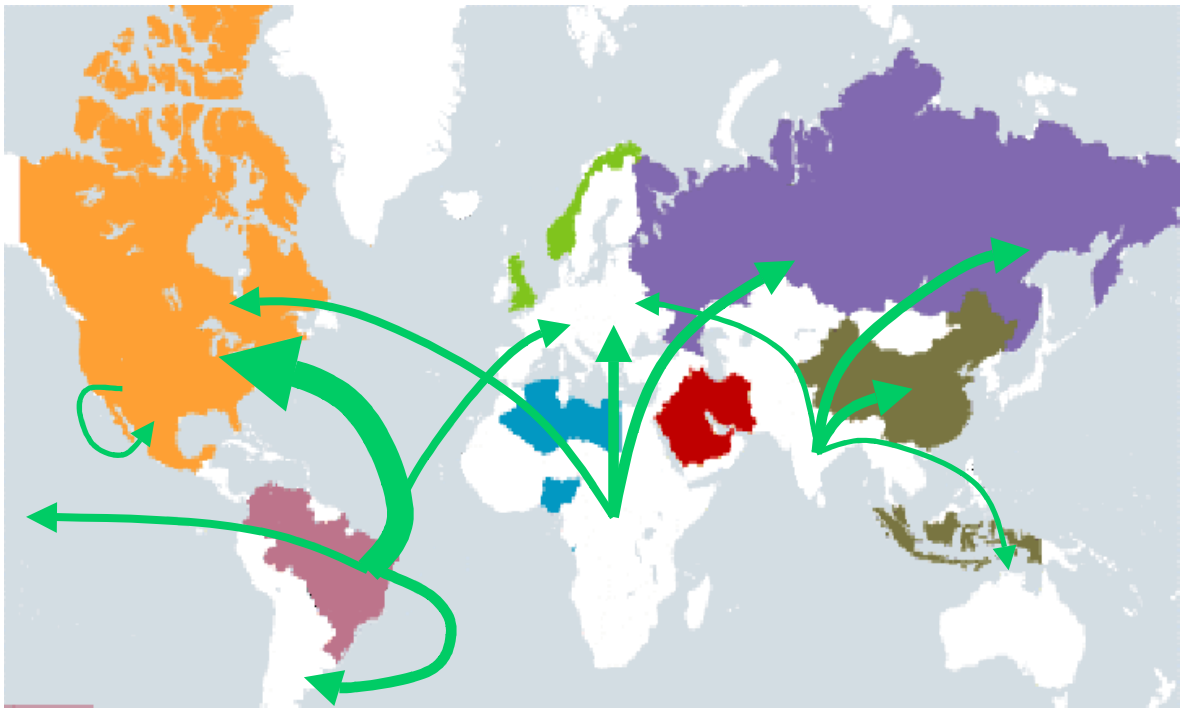

FIG. 6.4 – Mapa de fluxo de etanol como combustível para substituição dos combustíveis fósseis (previsão)

Os impactos ambientais seriam imediatos, como o aumento do desmatamento para abrir novas frentes de plantio da cana e de procura de pasto para a pecuária, o aumento de material particulado na atmosfera em períodos de colheita, o esgotamento do solo em função da monocultura, e outros. Os impactos econômicos seriam maiores e atingiriam uma grande parcela da população, pois haveria a necessidade de importar alimentos básicos,

ocasionando diretamente o aumento de preços dos produtos à população, além de aumentar a concentração de renda nas mãos de poucos e grandes produtores agrícolas e usineiros. Segundo Shapouri *et al* (1995), o aumento da produção de etanol induzirá a um aumento da demanda pelos vegetais progenitores de álcool, e elevará o preço médio destes no mercado.

Outro ponto importante a ser levantado é a caracterização geográfica das áreas de plantio. Essa área estaria limitada pela região dos trópicos, pois é a que apresenta o clima ideal para o desenvolvimento da cana (figura 6.4). Sendo assim, novamente o mundo se veria dependente de alguns países específicos para o fornecimento de combustível, visto que as faixas de terras ideais encontram-se na América do Sul, África e um pequeno pedaço da Ásia.

6.6 Resumo dos cenários futuros previstos

De acordo com os resultados apresentados até o momento, foram estruturados quatro cenários possíveis e distintos para a indústria automobilística no futuro, sendo eles:

- cenário A – continuar empregando o motor de combustão interna convencional com queima de combustíveis fósseis, representado neste trabalho pela gasolina;

- cenário B – expandir e substituir a frota atual por veículos com motores de combustão interna convencional com queima de combustíveis renováveis, representado aqui pelo etanol;

- cenário C – desenvolver motores elétricos com células combustíveis a hidrogênio, sendo este produzido através da reforma de etanol ou gás natural;

- cenário D – desenvolver motores elétricos com células combustíveis a hidrogênio, sendo o hidrogênio obtido através da eletrólise da água.

Os principais resultados e fatores mais relevantes estão descritos na tabela 6.3.

TABELA 6.3: Resumo dos quatro cenários previstos

CENÁRIOS						
Tecnologia	**MCI**		**CÉLULAS A COMBUSTÍVEL A H_2**			
Cenário	**A**	**B**	**C**		**D**	
Obtenção	**REFINO**	**DESTILAÇÃO**	**REFORMA**		**ELETRÓLISE**	
Combustível	**Gasolina**	**Etanol**	**Etanol**	**Gás Natural**	**Brasil**	**Mundo**
Resumo	Em 2100, o consumo de gasolina saltará dos atuais 975 bilhões de litros para 5,25 trilhões (quase cinco vezes mais)	Em 2100, as plantações de cana de açúcar poderão rivalizar espaço com a agricultura de alimentos de primeira necessidade		Em 2100, o consumo de gás natural somente para os veículos saltará para mais de 5 trilhões m^3, mas as reservas conhecidas não durarão até lá.	Em 2100 haverá uma grande demanda por água para eletrólise, rivalizando com uma população de quase 12 bilhões de habitantes.	
Demandas	Produção de petróleo deverá aumentar cerca de 340 %	A produção de etanol deverá suprir um mercado de 7,5 bilhões de m^3 ao ano		A produção de GNV deverá aumentar para mais de 5 trilhões de m^3 ao ano, pressionando pelo aumento de preços tanto pela demanda quanto pela escassez.	O fornecimento de energia elétrica atual é da ordem de 300 TWh, e deverá saltar para 1.200 TWh em 2100, o que tornaria possível ao Brasil atender apenas 6% da demanda mundial, caso toda geração fosse deslocada para a produção de combustível.	O fornecimento de energia elétrica deverá ser da ordem de 35.000 TWh, que é cerca de 30 vezes a capacidade das termelétricas nos países da OCDE.
Emissões de CO_2	A emissão proveniente dos veículos será 6 vezes maiores que a atual (14 trilhões de toneladas)	Chegará ao valor de 3,4 trilhões de toneladas ao ano em 2100, que é cerca de 131% maior em relação aos valores atuais	Chegará ao valor de 0,9 trilhões de toneladas ao ano em 2100, que é cerca de 65% inferior aos valores atuais	Atingirá o valor aproximado de 4,5 trilhões de toneladas por ano (ou 172% do atual nível de emissões)	Neutralizará os benefícios em 2085, quando passa a emitir, indiretamente, mais de 2,5 trilhões de toneladas.	O valor de 16 trilhões de toneladas anuais (5,3 vezes o valor atual)
Impactos ambientais	Em 2100, a emissão de CO_2 dos veículos automotores será o principal agente causador do efeito estufa e também o responsável pelo aumento dos casos de doença respiratória.	Em 2100, a emissão de CO_2 dos veículos automotores será 1,3 vezes maior do que a atual, porém 75% menor que a da gasolina. Colocará em risco as florestas, que disputarão espaço com a agricultura da cana ou milho, e também provocará o empobrecimento do solo devido à monocultura.	Em 2100, a emissão de CO_2 dos veículos automotores será 93% menor do que a da gasolina. Porém, colocará em risco as florestas, que disputarão espaço com a agricultura da cana ou milho, e também provocará o empobrecimento do solo devido à monocultura.	Reduzirá o aumento da taxa de emissões de CO2, mas não eliminará a causa, devendo superar o valor atual de emissões por volta de 2060.	A necessidade de energia elétrica limpa obrigará o desenvolvimento de novas tecnologias para utilização de fontes renováveis de energia (solar, eólica, hidrelétrica, etc.). Caso a opção seja a geração hidráulica, haverá o risco da necessidade de inundações de grandes áreas, causando outros impactos ambientais e sociais.	

7. CONCLUSÕES

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

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

Já a eletrólise, sendo realizada em países cujas matrizes energéticas sejam dependentes de combustíveis fósseis, não contribuirá para a redução das emissões de gases de efeito estufa, e em alguns casos, como nos EUA e no resto do mundo, podem até piorar o quadro atual. As emissões de dióxido de carbono aumentariam 45% para veículos com células a combustível de hidrogênio nos EUA, e, através de uma média mundial, aumentariam as emissões globais de CO_2 em 13%.

A emissão antrópica em grande volume de vapor d'água na atmosfera mostrou pouca variação em relação aos valores atuais. Cabe avaliar se o aumento da emissão de vapor d'água, agindo como um gás estufa, irá neutralizar os benefícios das propostas aqui avaliadas.

Devido ao crescimento populacional e da frota de veículos automotores haverá, também, a possibilidade de ocorrer um choque relacionado ao abastecimento de água em grandes centros urbanos, caso a água seja a fonte primária de hidrogênio. População e automóveis competirão pela água disponibilizada pela rede de abastecimento. No entanto, quando avaliado o planeta como um todo e a demanda global, o consumo de água para eletrólise representa apenas entre 2 e 3% da demanda mundial ideal para subsistência.

Este trabalho concluiu, também, que a emissão de vapor d'água pelas células a combustível é cerca de 6,9% maior do que a dos veículos a gasolina, mas não se caracteriza como um fator impeditivo para a viabilização desta nova tecnologia, uma vez que seu valor é inferior ao dos motores de combustão interna movidos a etanol, que emitem 30% a

mais. Todavia, se a preocupação estiver relacionada com essas emissões, algumas medidas deverão ser tomadas também com relação ao etanol.

O etanol produzido através da biomassa apresenta-se como a melhor alternativa a curto prazo para redução das emissões de dióxido de carbono na atmosfera, uma vez que as plantações de cana-de-açúcar trabalham como um sumidouro de carbono. A reforma "*offboard*" de etanol e a combustão direta em motores térmicos convencionais apresentaram, em ambos os casos, desempenhos melhores que o da queima de gasolina.

A reforma do etanol mostrou-se a melhor alternativa dentre todas as propostas avalidas, sendo capaz de reduzir em 93% as emissões de dióxido de carbono em relação à gasolina, uma vez que agregou a vantagem do ciclo do carbono ser fechado em um processo de utilização de biocombustíveis, ao fato de a eficiência na conversão de energia em um processo eletroquímico ser muito maior do que em sistemas térmicos de combustão.

Todavia, esta alternativa poderá se mostrar insustentável a longo prazo, quando uma demanda em larga escala pelo etanol estiver estabelecida. Problemas já existentes relacionados à ocupação de áreas para agricultura e pecuária serão intensificados, o que poderá levar a novos conflitos agrários e políticos. A elevação dos preços dos vegetais capazes de produzir o etanol provocará a expansão da fronteira agrícola, o que acarretará em novas pressões sobre áreas de preservação e de conservação ambientais, assim como vem ocorrendo com a soja nos dias de hoje, avançando impiedosamente sobre a floresta amazônica. A busca pelo etanol poderá provocar, como efeito colateral, o desabastecimento de produtos alimentícios primários, como frutas e legumes, decorrente da busca por plantações de maior lucratividade, fazendo com que os agricultores deixem de plantar alimentos básicos, para plantar cana-de-açúcar ou milho.

Na verdade, quando se trata da utilização de recursos ambientais para atendimento de uma demanda em crescimento exponencial, nenhum sistema natural, operando como fonte única de suprimento de energia ou matéria-prima, é capaz de garantir a sustentabilidade operacional a longo prazo. Aliás, a insustentabilidade está diretamente ligada ao crescimento também exponencial da população, e grande parte dos problemas destacados neste trabalho, decorrentes da substituição dos poluentes motores de combustão interna a gasolina por células a combustível de hidrogênio, estão relacionados à elevada demanda diante do cenário mundial futuro e de um planeta extremamente populoso e virtuosamente sedento pelo consumo.

Novas tecnologias estão despontando no mercado, e muitas delas podem afetar diretamente os cenários descritos neste trabalho. Por isso, como recomendação para trabalhos

futuros, uma análise contendo os novos veículos com motores híbridos e com motores turbodiesel de pequena cilindrada poderia enriquecer o quadro comparativo aqui apresentado. Outro ponto relevante seria uma análise do impacto provocado pelo aumento da emissão de vapor de água, uma vez que este também é um agente causador do efeito estufa, em decorrência do aumento da frota de veículos automotores para este século.

8. BIBLIOGRAFIA

8.1 Referências Bibliográficas

ALVIM, C.F. **Coeficientes da matriz de emissões,** Relatório da 3ª. meta do projeto de fornecimento de instrumentos de avaliação de emissões de gases de efeito estufa acopladas a uma matriz energética, 2000. Disponível em: < http://www.mct.gov.br >. Acesso em: mai. 2004.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA –. **Atlas de Energia Elétrica**, 2º edição, 2005. Disponível em < http://www.aneel.gov.br > Acesso em 26 mar. 2006.

ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Reservas nacionais de petróleo e gás natural – 31/12/2008**. Disponível em < http://www.anp.gov.br/doc/petroleo/reservas_20081231.pdf > Acesso em 04 mar. 2009.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES, **Balanço 2004 – ANFAVEA**. Disponível em: < http://www.anfavea.com.br >. Acesso em: dez. 2005.

ASHLEY, S. **Fuel Cells Start to Look Real**. Disponível em: <http://www.sae.org/automag/features/fuelcells/veh1.htm> Acesso em 24 mai. 2003.

ASHLEY, S. **Na Estrada dos carros a hidrogênio**. Scientific American, edição 35, Abril, 2005.

BERLOWITZ, P.J., DARNELL, C.P., **Fuel Choices for Fuel Cell Powered Vehicles**, Society of Automotive Engineers, 2000.

BERMANN, C. **Energia no Brasil: para quê? Para quem?** São Paulo: Livraria da Física Editora, 2002.

BIGIO, A.G. **Clean Air Initiative in Latin American Cities – Progress Report 2001**, World Bank, Washington DC, 2001.

BLOMEN, L. J. M. J; MUGERWA, M. **Fuel cell systems.** Publicado em 1993.
Disponível em: <http://books.google.com/books?id=o0my.reswyic&hi-pt-br>. Acesso em: maio 2008.

BOSSEL, U.; ELIASSON, B. **The Future of the Hydrogen Economy: Bright or Bleak?**
Publicado em 28 dez. 2002.
Disponível em: <http://www.evworld.com>. Acesso em: jan. 2003.

BURNS, L.D; MCCORMICK, J.B; BORRONI-BIRD, C.E; **Vehicle of Change – Hydrogen fuel-cell cars could be the catalyst for a cleaner tomorrow**; Scientific American, Outubro, 2002.

CAR Companies and Climate Change: Measuring the Carbon Intensity of Sales and Profits. World Resources Institute, 2003. Disponível em: < http://www.anfavea.com.br >. Acesso em: junho / 2005.

CARVALHO, L.C.C. **Biomassa da Cana-de Açúcar**. Notas de aula apresentada no CENBIO, São Paulo: Instituto de Eletrotécnica e Energia, USP, 1997.

CENBIO. **Cana de Açúcar no Brasil**. Cenbio-USP, São Paulo. Disponível em: < http://www.infoener.iee.usp.br/cenbio/biomassa.htm >. Acesso em: junho / 2005.

COELHO, S.T. **Biofuels – Advantages and Trade Barriers**, material apresentado na United Nations Conference on Trade and Development; Genebra, 2005; Disponível em: <http://www.cenbio.org.br> Acesso em 10/06/05.

COMMENTS on the Results of the Challenge Bibendum 2002, Seminário Internacional de Mobilidade Sustentável, 2002. Disponível em: < http://www.challengebibendum.com/challenge/front/affich.jsp?codeRubrique=28&lang=EN>. Acesso em: junho / 2005.

DATAGRO. DATAGRO Sugar News. Disponível em: < http://www.datagro.com.br>. Acesso em: março / 2009

DIAS, R. **Americanos andam cada vez mais de carro**. Folha de São Paulo, São Paulo, 11 mai. 2003. Dinheiro. Caderno B.

EIA – Energy Information Administration. **International Energy Outllok 2005**, Washington, DC, 2005.

ERICKSON, J. **Nosso Planeta Está Morrendo**, Rio de Janeiro: Ed. Makron Books, 1992.

*Estudo sobre as possibilidades e impactos da produção de grandes quantidades de etanol visando à substituição parcial de gasolina no mundo**. Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético. Universidade Estadual de Campinas, Dezembro de 2005.***

EL H2 como Combustible – Razones y Dificultades. Apresentação em Powerpoint da Faculdade de Engenharia de Buenos Aires, realizada na Unicamp. Out. 2004. Disponível em: < http://www.unicamp.br >. Acesso em: junho / 2005.

Fuel Cell Technology, College of the Desert, 2001

FUKUROZAKI, S. H.; SEO, E. S. M. **Metodologia da análise do ciclo de vida: importância na inserção da tecnologia de célula a combustível tipo PEMFC**. Disponível em: < http://paginas.agr.unicamp.br/energia/agre2004/fscommand/pdf/wicar/12-%20Sandra%20Fukurozaki.pdf >. Acesso em: Abril / 2008.

FURTADO, A.T., SCANDIFFIO, M.I.G., **Álcool no Brasil – uma longa história**, Revista Scientific American Brasil, n.53, ano 5, Edição especial, Duetto Editorial, Outubro de 2006.

GARCIA, J.L.A. **Produção de Hidrogênio Eletrolítico Utilizando Energia Secundária e seu Uso como Vetor Energético**. Companhia Energética de Minas Gerais- CEMIG. 1999. Disponível em: http//xviiisnptee.com.br/acervo_tecnico/memoria/xv/grupoii/gpt20.pdf. Acesso em janeiro/2005.

GOLDEMBERG, J. **Energia e Desenvolvimento**. Revista Estudos Avançados do Instituto Estadual de Estudos Avançados e Universidade de São Paulo. V 12, n 33, p. 7-15. São Paulo, 1998.

_____. **Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2001.

GOLDEMBERG, J.; COELHO, S.T. **Why Alchool Fuel? The Brazilian Experience**. Material apresentado no CTI Industry Joint Seminar on Technology Diffusion of Energy Efficiency in Asian Countries, Beijing, 2005.

GUARDABASSI, P.M. **Panorama do Setor Sucroalcooleiro**, material da disciplina Biomassa como Fonte de Energia – Conversão e utilização do Programa Interunidades de Pós-graduação em Energia - USP, 2005; Disponível em: <http://www.cenbio.org.br> Acesso em 10/06/05.

HINRICHS, R. A.; KLEINBACH, M. **Energia e Meio Ambiente**. São Paulo: Editora Thomson Learning, 2003.

INVENTORY of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2000, US Environmental Protection Agency, Washington, EUA, 2002.

IPEN. **Programa de células a combustível**. Disponível em <http://ipen.br/cel/>. Acesso em: Julho de 2006.

KOBE, G. **GM's Radical Ride**, Automotive Industries. Fevereiro, 2002.

LARMINIE, J.;, DICKS, A. **Fuel Cells Systems Explained**. Chichester: John Wiley & Sons Inc., 2002

LEGGET, J. **Aquecimento Global: o Relatório do Greenpeace**. Editora da Fundação Getúlio Vargas. Rio de Janeiro. 1992.

LINARDI, M., WENDT, H., GÖTZ, M. **Tecnologia de células a combustível**. Revista Química Nova, Vol.23, no. 4. São Paulo. 2000.

LOVELOCK, J. **As Eras de Gaia**, Ed. Campus, Rio de Janeiro, 1991.

LOVINS, A.B. **Twenty Hydrogen Myths**, Artigo publicado pelo Rocky Mountain Institute, 2003. Disponível em: http://www.rmi.org. Acesso em Março 2005.

MACEDO, I. C. **A produção de etanol carburante e o mecanismo de desenvolvimento limpo**, material apresentado no XV Simpósio Nacional de Bioprocessos, Recife, Agosto de 2005. Disponível em: <http://www.nipeunicamp.org.br/proalcool/palestras> Acesso em 22 jan. 2006.

MACEDO, I.C. **Aspectos da sustentabilidade da produção da cana-de-açúcar, açúcar e etanol no Brasil**, Campinas. Workshop Etanol combustível – Balanço e perspectivas. UNICAMP 16-17 Nov. 2005. Disponível em: <http://www.nipeunicamp.org.br/proalcool/palestras> Acesso em 22 jan. 2006.

MAGALHÃES, M. **Datagro revê números da safra 2003/04**, São Paulo. Disponível em:

<http://www.jornalcana.com.br/conteudo/noticia.asp?area=Producao&secao=Exclusivas&ID_Materia=7085> Acesso em 22/08/03.

METZ, B., KUIJPERS, L., SOLOMON, S., ANDERSEN, S.O., DAVIDSON, O., PONS, J., JAGER, D., KESTIN, T., MANNING, M., MEYER, L.. **IPCC/TEAP Special report on safeguarding the ozone layer and the global climate system: issues related to hydrofluorcarbons and perfluorcarbons**, Cambridge University Press, 2005.

MIDDLETON, P.; LARSON,R.; NICKLAS, M.; COLLINS, B. **Renewable Hidrogen Forum: A Summary of Expert Opinion and Policy Recommendations**, National Press Club, Washington DC, 2003.

MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balanço Energético Nacional 2007**, Disponível em:
<http://www.mme.gov.br> Acesso em 07/05/08.

MOREIRA, J.R. **Biomass as a Source of Energy in Brazil**, Material apresentado na International Energy Agency, Task 38 Meeting; Utrecht, 2002; Disponível em:
<http://www.cenbio.org.br> Acesso em 10/04/05.

_____. **Energia Alternativa - Biomassa**; Material apresentado no Seminário de Expansão do Setor Elétrico promovido pelo Instituto ABAMEC-NE, Fortaleza, Dezembro de 2002. Disponível em:
<http://www.sfiec.org.br/palestras/energia/energia_alternativa_biomassa091202.htm>
Acesso em 10/04/05.

_____. **Policies for Promotion of New and Renewable Sources of Energy**; Material apresentado no 5o. Workshop of Latin American Biomass Network; Morelia, 2003; Disponível em: <http://www.cenbio.org.br> Acesso em 10/04/05.

OGDEN, J., **Economia movida a hidrogênio**, Revista Scientific American Brasil, n.53, ano 5, Edição especial, Duetto Editorial, Outubro de 2006.

PACHAURI, R. K. **Climate Change 2007 – Sysnthesis Report**, IPCC, Genebra, 2007.

PAGANINI, R. N.; RESENDE, L. M.; PILATTI, L. A.; **Tecnização e civilização: a interação destes processos no pensamento de Norbert Elias**, IX Simpósio Internacional de Processo Civil. Paraná. Disponível em: www.pg.cefetpr.br/ppgep/ebook/cd_simpósio/artigos/comunicação_oral/art14.pdf.

PANIK, M. S. **Greenhouse gases are global**, XCELLSIS GmbH, Nabern, 2001.

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

PIMENTEL, D. **The limits of biomass utilization, Encyclopaedia of Physical Science and Technology**, Academic Press, Nova Iorque, 2001.

POWELL, J. C., PETER, M. D., RUDDELL, A., HALLIDAY, J. **Fuel cells for a sustainable future?**, Working paper 50. Disponível em:
<http://tyndall.web.app1.uea.ac.uk/publications/working_papers/wp50.pdf> Acesso em maio de 2008.

REBOUÇAS, A. C. et al, **Águas Doces no Brasil**, São Paulo: Ed. Escrituras, 1999.

RIFKIN, J. **A Economia do Hidrogênio**. São Paulo: Editora Makron Books, 2003.

ROSSELL, C. **O setor sucroalcooleiro e a produção de etanol – Transformações após o Protocolo de Kyoto**, Campinas. Workshop Etanol combustível – Balnço e perspectivas. UNICAMP 16-17 Nov. 2005. Disponível em: <http://www.nipeunicamp.org.br/proalcool/palestras> Acesso em 22 jan. 2006.

SÁ, H. **Biocombustíveis – Álcool, óleos e gorduras - Biodiesel**, Bahia. Disponível em: <http://www.ambientebrasil.com.br/composer.php3?base=./energia/index.html&conteudo=./energia/artigos/biocombustivel.html> Acesso em 07/06/05.

SCHETTINO, M. R. A., RIBEIRO, O. O. **Estratégia energético-ambiental: ônibus com célula a combustível – hidrogênio para o Brasil**.
Disponível em: <http://www.emtu.sp.gov.br/artigos>. Acesso em: março 2009.

SCHINDLER, J., ZITTEL, W. **Crude oil – the supply outlook**. Energy Watch Group
Disponível em: <http://www.energywatchgroup.org>. Acesso em: março 2009.

SHAPOURI, H. et al. **Estimating the Net Energy Balance of Corn Ethanol**, U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service, Office of Energy. Agricultural Economic Report No. 721, 1995.

SHELL HYDROGEN ROYAL DUTCH. **The Ultimate Fuel**. Shell Royal Dutch. Amsterdan. Disponível em: <http://www.shel.com/hydrogen>. Acesso em: out. 2004.

SHELL INTERNATIONAL. **Global Scenarios 1998-2020**. Londres. Disponível em: <http://www.shell.com>. Acesso em: mar. 2004.

_____. **Energy needs, choices and possibilities** – Scenarios to 2050. Exploring the future. Global Business Environment. Shell International. Londres. 2001. Disponível em: <http://www.shel.com/hydrogen>. Acesso em: mar. 2004.

SILVA, E.P.; CAMARGO, J.C. **Integração e Sistemas com Células a Combustível**, material apresentado no 1º. Workshop Internacional sobre Células a Combustível, São Paulo. Disponível em:
<http://www.ifi.unicamp.br/ceneh> Acesso em junho/2003.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERING – SAE. **Fuel Cells Starts to Look Real**. Disponível em:
<http://www.sae.org/automag/features/fuelcells/veh1.htm> Acesso em 24/05/2003.

THOMAS, S.; ZALBOWITZ, M. **Fuel Cells – Green Power**; Los Alamos National Laboratory, 2001. Disponível em: <http://www.education.lanl.gov/resources/fuelcells>.
Acesso em: abril/2003.

TOLMASQUIM, M.; **Alternativas energéticas sustentáveis no Brasil**. Ed. Relume, Rio de Janeiro, 2004.

TROMP, T. K.; SHIA, R.; ALLEN, M.; EILER, J. M.; YUNG, Y. U. **Potential Environmental Impact of a Hydrogen Economy on the Stratosphere**, Science Magazine, Vol. 300, 13 de Junho de 2003.

URQUIAGA, S. et al. **Produção de Biocombustíveis – A Questão do Balanço Energético**. Revista de PolíticaAgrícola, Ano XIV – no. 1, jan/fev/mar de 2005. Disponível em: http//www.agronegocios.com.br/agr/down/artigos/pol_agr_1_2005_art06.pdf. Acesso em janeiro/2005.

VAN WYLEN, G.; SONNTAG, R.; BORGNAKKE C. **Fundamentos da termodinâmica**. 3ª ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1993.

VEHICLE of change: how fuel-cell cars could revolutionize the world. Scientific American. Outubro 2002.

VIVEIROS, M. **Represa perde 930 milhões de litros em 24 horas**. Artigo publicado no jornal Folha de São Paulo, 16 de outubro de 2002, pág. C4; São Paulo.

VOLKSWAGEN. **Umweltbericht 2001/2002 - Mobilität und Nachhaltigkeit**; Volkswagen AG; 2002

_____; **Encarte do manual do proprietário – Gol, Parati e Saveiro**; Volkswagen do Brasil; 2003.

WEISS, M. A.; HEYWOOD, J. B.; DRAKE, E. M.; SCHAFER, A., AUYEUNG, F. F. **On the Road in 2020: A life-cycle analysis of new automobile technologies**, Energy Laboratory Report # MIT EL 00-003, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2000.

WEISS, M. A.; HEYWOOD, J. B.; SCHAFER, A., NATARAJAN, V. K. **Comparative Assessment of Fuel Cell Cars**, Energy Laboratory Report # MIT LFEE 2003-001 RP, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2003.

WRI, **Car Companies and Climate Change: Measuring the Carbon Intensity of Sales and Profits**. World Resources Institute, 2003. Disponível em: < http://www.anfavea.com.br >. Acesso em: junho / 2005.

Sites na Internet:

Japão aspira ter 20% dos carros do país movidos por veículoa a hidrogênio no ano 2030; ***Brasil H2 Fuel Cell Energy, 2004. Disponível em: <http://www.celulaacombustivel.com.br> . Acesso em: abril/2005.***

DAIMLER-CHRYSLER. Research & technology
Disponível em: <*http://www.daimlerchrysler.com/index_e.html/products/products_e.htm****> . Acesso em: outubro/2002.***

ELETROCELL
Disponível em: <*http://www.electrocell.com.br****>. Acesso em: outubro/2002.***

FORD MOTOR Co.
Disponível em: <*http://www.ford.com****>. Acesso em: maio/2003.***

XCELLSIS FUEL CELL ENGINES INC.
Disponível em: < *http://www.xcellsis.com* ***>. Acesso em: junho / 2002.***

8.2 Bibliografia Complementar

ABRAHANSON, D.E. **The Challenge of Global Warming**. Island Press. Washington DC. 1989.

ALBRITTON, D. *et al*. **Summary for Policymakers: A Report of Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** IPCC, 2001.

BATES, A.K. **Climate in Crisis: The Greenhouse Effect and What We Can Do**. Book Publishing Company. London. 1990.

BENTLEY, J., DERBY, R. **Ethanol and Fuel Cells: Converging Paths of Opportunities**. Artigo disponível em: http:/www.ethanolRFA.org. Acesso em Julho, 2003.

BERMANN, C. **Energia no Brasil: para quê? Para quem?** Livraria da Física Editora, São Paulo, 2002.

BOCKRIS, J.O'M. Energy**: The Solar-Hydrogen Alternative**. The Architectural Press. Londres.1976.

BORTHOLIN, E., GUEDES, B. D. **Efeito Estufa**.
Disponível em: <http://www.educar.sc.usp.br/licenciatura/2003/ee/Efeito_Estufa.html>. Acesso em: julho/2009.

BRAGA, B. et al. **Introdução à engenharia ambiental**. São Paulo: EPUSP, 1998.

BROOKS, A. **Fuel Cell Disruptor**. Publicado em 07/12/2002.
Disponível em: <http://www.evworld.com>. Acesso em: janeiro / 2003.

DORIA, J. **Ônibus Verde**.
Disponível em: <http://www.mct.gov.br/temas/meioambiente/news/onibusverde.htm>
Acesso em: junho/2001.

ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION – U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **International Total Primary Energy Consumption and Related Data**. Washington, 2002. Energy Consumption by Source. Disponível em:
< www.eia.doe.org/pub/international/ieapdf/t01_08.pdf > Acesso em: junho / 2002.

FARFAN, E. **Combustíveis Alternativos – Hidrogênio (combustível poluição zero)**. Centro de referência em gestão ambiental para assentamentos humanos. Disponível em: <www.unilivre.org.br/centro/experiencias/experiencias/322.html> Acesso em: maio / 2002.

FOLEY, J. **H2: Driving the Future**. Institute for Public Policy Research.
Disponível em: <http:// www.ippr.org> Acesso em: junho/2001

Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies: Rev 0, Dezembro 2001, College of the Desert.
Disponível em: <**Erro! A referência de hiperlink não é válida.**> . Acesso em: maio/2003.

LOVINS, A.B.; BRETT,D.W. **A Strategy for the Hydrogen Transition**. National Hydrogen Association. Virginia. 1999.

LOVINS,A.B., **Fueling the Hydrogen Transition: Start Decentralized**. National Hydrogen Association. Virginia. 1999.

MEIER-ENGEL,K.; REICHENBACH,C. **Measurement of the Energy Consumption of Vehicles**. Berner Fachhchschule University of Applied Sciences.
Disponível em: < www.hta-bi.bfh.ch > Acesso em junho / 2002.

MELIS, A.; LIPING, Z.; FORESTIER, M.; GHIRARDI, M.L.; SEIBERT, M.; **Sustained photobiological hydrogen gas production upon reversible inactivation of oxygen evolution in the green alga Chlamydomonas reinhardtii**; Plant Physiol, Janeiro 2000, Vol. 122, pp. 127-136

MELIS, A.; HAPPE, T.; **Hydrogen production – green algae as a source of energy**; Plant Physiol, Novembro, 2001, Vol. 127, pp. 740-748.

MOORE, B. **Future Fuel Folly**.
Disponível em: <**Erro! A referência de hiperlink não é válida.**>. Acesso em: fevereiro/2003.

NOWELL, G.P. **The Promise of Methanol Fuel Cell Vehicles**. American Methanol Institute.
Disponível em: < www.methanol.org > Acesso em junho / 2002.

OHLSTRÖM, M.; LAURIKKO, J.; MÄKINEN, T.; PIPATTI, R. **Greenhouse Impact of Biomass-based Methanol Use in Fuel Cell Vehicles**. VTT Energy.Finlândia. 2000.

PARRA FILHO, D. **Apresentação de Trabalhos Científicos: monografia, TCC, teses e dissertações**. 3ª edição. Editora Futura. São Paulo. 2000.

PEARCE, F. **O Efeito de Estufa**. Edições 70, Rio de Janeiro, 1989

RAMOS, A. P.; ITÁO, D. C.; KIMURA, O. A. **Proposta de uma Metodologia de Projeto de uma Célula a Combustível Unitária que Utiliza Membrana Polimérica como Eletrólito;** Trabalho de conclusão do curso de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia Mauá, 2002

ROZENBERG, I.M. **O Sistema Internacional de Unidades – SI**, 2ª edição, Instituto Mauá de Tecnologia, São Paulo, 2002.

Transport mit neuem antrieb; Dialog Magazin, Ausgabe 2, 1999.

UNEP – United Nation Environment Protection; **Climate Change 1995 – The Science of Climate Change – Summary for Policymakers**, UNEP/ WMO, Part of the Second Assessment Report of the Intergovernmental on Climate Change, 1995.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Hydrogen and Fuel Cell basics**.
Disponível em: <http://www.eren.doe.gov/hydrogen/basics.html > . Acesso em: junho/2002.

WEINER, J. **Os Próximos Cem Anos**, Editora Campus, Rio de Janeiro, 1992.

Sites na Internet:

Balanço Energético Nacional 2000. ***MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA .***
Disponível em: <*http://www.mme.gov.br*> ***. Acesso em: outubro / 2002.***

BALLARD POWER SYSTEMS, Inc.
Disponível em: <*http://www.ballard.com****> . Acesso em: maio / 2002.***

FUEL CELL ENERGY, Inc.
Disponível em: <*http://www.fuelcellenergy.com****> Acesso em: outubro/2002.***

FUEL CELLS 2000. The online fuel cell information center.
Disponível em: <*http://www.fuelcells.org****> Acesso em: dezembro/2001.***

H2FC COMPANIES. **Fuel cell companies**
Disponível em: <*http://www.h2fc.com/companies.html*> ***. Acesso em: junho / 2002.***

9. ANEXOS

9.1 Tabelas

TABELA A1 - Previsão de aumento da produtividade e de eficiência industrial nos processos de produção de etanol a partir da cana de açúcar

		2005	2015	2025
Produtividade da cana de açúcar	t / ha	70,0	82	96,0
	litros / ha	6.000	8.200	10.400
Eficiência industrial	%	83,5	90	90,0

FONTE: adaptado de Macedo (2003)

TABELA A2 - Previsão da demanda de etanol, ocupação de área de plantio da cana e consumo de água em função do crescimento da frota mundial de veículos leves

Ano		2000	2010	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
Frota mundial de veículos a etanol (milhões)		650	800	1.100	1.400	1.700	2.000	2.300	2.600	2.900	3.200	3.500
Demanda etanol (milhões m^3)		1.393	1.714	2.357	3.000	3.643	4.286	4.929	5.571	6.214	6.857	7.500
Produtividade (litros/ha)		6.000	7.000	8.200	10.400	10.400	10.400	10.400	10.400	10.400	10.400	10.400
Área necessária para plantio de cana	(milhões km^2)	2,3	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	5,1
	(milhões ha)	232	286	287	288	289	290	333	376	420	463	507
Toneladas de cana (em milhões de ton)		17.411	21.429	21.559	21.635	21.684	21.718	24.976	28.234	31.491	34.749	38.007
Consumo de água (em milhões de m^3)		52.232	64.286	64.678	54.087	54.209	54.295	62.440	70.584	78.728	86.873	95.017

TABELA A3 - Previsão da demanda de gasolina e petróleo em função do crescimento da frota mundial de veículos leves

Ano	2000	2010	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
Frota (em milhões veíc.)	650	800	1.100	1.400	1.700	2.000	2.300	2.600	2.900	3.200	3.500
Consumo de gasolina (em bilhões litros)	975	1.200	1.650	2.100	2.550	3.000	3.450	3.900	4.350	4.800	5.250
Consumo de barris de petróleo (em trilhões barris)	18,396	22,642	31,132	39,623	48,113	56,604	65,094	73,585	82,075	90,566	99,057
% da capacidade de produção mundial de petróleo	62%	77%	105%	134%	163%	191%	220%	249%	278%	306%	335%

TABELA A4 - Previsão das emissões de CO_2 em função da tecnologia e combustível utilizado, considerando a substituição integral da frota mundial de veículos leves

Emissão gases estufa (em bilhões kg/ano)			2000	2010	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
Frota (em milhões veíc.)			650	800	1100	1400	1700	2000	2300	2600	2900	3200	3500
Motor de Combustão Interna		Gasolina	2.638	3.247	4.465	5.683	6.900	8.118	9.336	10.553	11.771	12.989	14.207
		GNV	2.604	3.205	4.407	5.609	6.811	8.013	9.215	10.417	11.619	12.821	14.023
		Etanol cana	644	792	1.089	1.386	1.683	1.980	2.277	2.574	2.871	3.168	3.465
		Etanol milho	1.521	1.872	2.574	3.276	3.978	4.680	5.382	6.084	6.786	7.488	8.190
Célula a Combustível	Eletrólise	Média mundial	2.985	3.674	5.052	6.430	7.808	9.186	10.564	11.942	13.320	14.698	16.076
		Brasil	547	673	926	1.178	1.431	1.683	1.935	2.188	2.440	2.693	2.945
		Europa	3.071	3.780	5.198	6.615	8.033	9.450	10.868	12.285	13.703	15.120	16.538
		EUA	3.837	4.722	6.493	8.264	10.034	11.805	13.576	15.347	17.117	18.888	20.659
	Reforma	Etanol	174	214	294	374	454	534	614	694	774	854	935
		Gás Natural	842	1.037	1.426	1.814	2.203	2.592	2.981	3.370	3.758	4.147	4.536

TABELA A5 – Variação percentual das emissões de CO_2 em relação ao ano base de 2000, considerando a tecnologia e combustível utilizado, e a substituição integral da frota mundial de veículos leves

Emissão gases estufa (em bilhões kg/ano)			2000 (base)	2010	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
Motor de Combustão Interna		MCI Gasolina	100%	123%	169%	215%	262%	308%	354%	400%	446%	492%	538%
		MCI GNV	99%	121%	167%	213%	258%	304%	349%	395%	440%	486%	531%
		MCI Etanol cana	24%	30%	41%	53%	64%	75%	86%	98%	109%	120%	131%
		MCI Etanol milho	58%	71%	98%	124%	151%	177%	204%	231%	257%	284%	310%
Célula a Combustível	Eletrólise	H2 Média mundial	113%	139%	191%	244%	296%	348%	400%	453%	505%	557%	609%
		H2 Brasil	21%	26%	35%	45%	54%	64%	73%	83%	92%	102%	112%
		H2 Europa	116%	143%	197%	251%	304%	358%	412%	466%	519%	573%	627%
		H2 EUA	145%	179%	246%	313%	380%	447%	515%	582%	649%	716%	783%
	Reforma	H2 Reforma Etanol	7%	8%	11%	14%	17%	20%	23%	26%	29%	32%	35%
		H2 Reforma GNV	32%	39%	54%	69%	84%	98%	113%	128%	142%	157%	172%

Livros Grátis

(http://www.livrosgratis.com.br)

Milhares de Livros para Download:

Baixar livros de Administração
Baixar livros de Agronomia
Baixar livros de Arquitetura
Baixar livros de Artes
Baixar livros de Astronomia
Baixar livros de Biologia Geral
Baixar livros de Ciência da Computação
Baixar livros de Ciência da Informação
Baixar livros de Ciência Política
Baixar livros de Ciências da Saúde
Baixar livros de Comunicação
Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE
Baixar livros de Defesa civil
Baixar livros de Direito
Baixar livros de Direitos humanos
Baixar livros de Economia
Baixar livros de Economia Doméstica
Baixar livros de Educação
Baixar livros de Educação - Trânsito
Baixar livros de Educação Física
Baixar livros de Engenharia Aeroespacial
Baixar livros de Farmácia
Baixar livros de Filosofia
Baixar livros de Física
Baixar livros de Geociências
Baixar livros de Geografia
Baixar livros de História
Baixar livros de Línguas

Baixar livros de Literatura
Baixar livros de Literatura de Cordel
Baixar livros de Literatura Infantil
Baixar livros de Matemática
Baixar livros de Medicina
Baixar livros de Medicina Veterinária
Baixar livros de Meio Ambiente
Baixar livros de Meteorologia
Baixar Monografias e TCC
Baixar livros Multidisciplinar
Baixar livros de Música
Baixar livros de Psicologia
Baixar livros de Química
Baixar livros de Saúde Coletiva
Baixar livros de Serviço Social
Baixar livros de Sociologia
Baixar livros de Teologia
Baixar livros de Trabalho
Baixar livros de Turismo