



## **CÉLULAS A COMBUSTÍVEL COMO ALTERNATIVA PARA REDUÇÃO DE CO<sub>2</sub> EQUIVALENTE NA FROTA DE VEÍCULOS LEVES**

### **FUEL CELLS AS ALTERNATIVE TO REDUCE CO<sub>2</sub> EQUIVALENT IN THE LIGHT VEHICLE FLEET**

Luiz Henrique Targa Gonçalves Miranda<sup>1</sup>

Emília Satoshi Miyamaru Seo<sup>2</sup>

Alcir Vilela Junior<sup>3</sup>

#### **Resumo**

O aumento populacional e a demanda provocada pelos modernos sistemas de produção, transportes e de conforto em geral, tornou crescente a busca por energia em âmbito mundial. No Brasil a porcentagem de consumo de combustíveis fósseis em 2007 era de 51%, sendo que 60% deste total eram utilizados no setor de transporte. A frota nacional, até dezembro de 2011, contemplava um total de 70.543.535 veículos registrados. Só no Estado de São Paulo, os veículos leves representam 65% da frota total, correspondendo a 30% das emissões. Medidas de controle dessas emissões provenientes dos veículos vêm sendo estudadas para tentar diminuir os problemas causados à saúde e ao meio ambiente, mas apenas estas medidas não estão sendo suficientes para contribuir satisfatoriamente na redução das emissões de CO<sub>2</sub> equivalente. Pensando em somar alternativas, a pesquisa objetivou analisar a potencial contribuição das células a combustível (PEMFC) na redução das emissões pela frota de veículos leves no Estado de São Paulo. Foram estudados três cenários para verificar a potencial contribuição das células - conservador, realista e otimista. Os resultados apresentaram redução nas emissões nos diferentes cenários, mas longe de atingir a meta

<sup>1</sup> e-mail: luizhtgm@gmail.com. Centro Universitário SENAC, São Paulo.

<sup>2</sup> e-mail: emilia.smseo@sp.senac.br. Centro Universitário SENAC e Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

<sup>3</sup> e-mail: alcir.vilela@sp.senac.br. Centro Universitário SENAC, São Paulo.



da PEMC. Concluindo, a implantação das células na frota veicular leve contribui para a redução das emissões, mas o real problema está no crescimento da frota e apenas essa tecnologia não soluciona os problemas causados a saúde e ao meio ambiente, sendo necessárias alternativas complementares.

**Palavras-chaves:** Energias renováveis, célula a combustível, emissões de CO<sub>2</sub> equivalente.

## Abstract

The population increase and the demand developed by the modern system of production, transports and confort in general, have made increasing the search for energy in the world wide. In Brazil the fossil fuel percentage consumption in 2007 was 51%, with 60% of this total were used in the transportation sector. The national fleet by December 2011, contemplated a total of 70,543,535 registered vehicles. Only in the São Paulo state, the light vehicles account for 65% of the total fleet, accounting for 30% of emissions. Measures to control these emissions from vehicles are already in process to try to reduce the problems caused to health and the environment, but only these are not enough to contribute satisfactorily in reducing emissions of CO<sub>2</sub> equivalent. Thinking about other alternatives, the research aimed to analyze the potential fuel cells contribution in the reduction of emissions by light vehicle fleet in the São Paulo state. It studied three scenarios to verify the potential cell contribution - conservative, realistic and optimistic. The results showed a reduction in emissions in the different scenarios, but far from achieving the goal of the PEMC. In conclusion, the implantation of the cells in the light vehicle fleet contributes to reduce emissions, but the real problem lies in the growth of the fleet and only this technology does not solve the problems caused to health and the environment, requiring complementary alternatives.

**Key words:** Renewable energies, fuel cell, CO<sub>2</sub> equivalent emissions.



## 1. INTRODUÇÃO

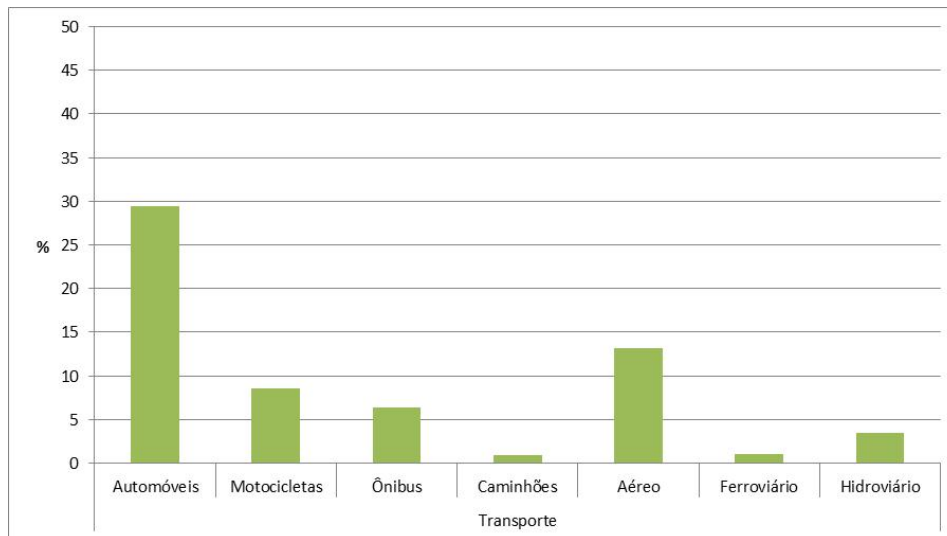
O aumento populacional e a demanda provocada pelos modernos sistemas de produção, transportes e de conforto em geral, tornou crescente a busca por energia em âmbito mundial. Isso gerou a preocupação de como satisfazer as necessidades atuais e futuras obtendo energia de forma técnica e economicamente viável, segura e com uma eficiência aceitável.

Segundo o Balanço Energético Nacional (2010) as fontes não renováveis correspondem a 81,5% da demanda anual mundial. Esta porcentagem refere-se apenas à combustíveis fósseis (carvão natural, petróleo e derivados e gás natural), excluindo os materiais nucleares (VECCHIA, 2010). Isso se dá pela alta densidade energética desses combustíveis, ou seja, em um determinado volume de combustível é possível armazenar grande quantidade de energia, de fácil transporte, armazenamento e manuseio. O problema no emprego dos combustíveis fósseis está na emissão de poluentes para a atmosfera tais como: monóxido de carbono, compostos nitrogenados, enxofre, fuligens e entre outros, que degradam o meio ambiente e colocam em risco à saúde humana.

No Brasil, aquela porcentagem de consumo de combustíveis fósseis em 2007 atingiu 51%. Esta diminuição é devido ao grande potencial hidráulico e às extensas produções de cana de açúcar, a qual tem como derivados o biodiesel e etanol (BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL, 2010).

De toda energia consumida a partir dos derivados do petróleo, aproximadamente 60% é para transporte (BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL, 2010).

Segundo levantamento do Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN, 2011) o Brasil possuía uma frota total de 70.543.535 veículos registrados até dezembro de 2011. Na Região Sudeste está concentrado mais de 50% desse total, sendo que São Paulo é o Estado que possui a maior frota de veículos do país, cerca de 30% do total, ou seja, quase 22 milhões de veículos automotivos, seguido por Minas Gerais (7.662.556) e Paraná (5.558.521). Desta forma, os veículos automotivos são os maiores responsáveis pela emissão de CO<sub>2</sub>, correspondendo a 55% do total de todas as fontes – esta se implica em transporte, industrial, comercial, residencial, agropecuário, público, não energético e energético amplo. Destes 55%, aproximadamente, 30% das emissões são provenientes de automóveis leves, no Estado de São Paulo (figura 1).



**Figura 1 - Porcentagens dos responsáveis das emissões de CO<sub>2</sub> dentro da classe de transportes no Estado de São Paulo.**

**(Fonte: Elaborado pelo autor, com base de dados da CETESB, 2011).**

Algumas medidas de controle para a mitigação destas emissões estão sendo tomadas. Um dos exemplos é o controle legal nos fabricantes, exigindo que os automóveis saiam das fábricas com padrões de emissões aceitáveis, tendo como referência o CONAMA 18 de junho de 1986 que estabelece o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE e o CONAMA 315 de outubro de 2002, que dispõe sobre novas etapas deste programa.

Outras medidas, envolvendo tecnologia, são a otimização da combustão da gasolina e/ou diesel e o uso de materiais mais leves na fabricação dos veículos. Ainda assim, criou-se, na cidade de São Paulo, outra medida de controle das emissões veiculares, a inspeção veicular. Regulamentada pelo órgão ambiental, a Secretaria Municipal do Verde e do Meio Ambiente (SMMA) de São Paulo, exige que as emissões dos Gases de Efeito Estufa (GEEs) estejam nos padrões preestabelecidos com inspeções periódicas.

Mas apenas essas ações não são suficientes para uma redução significativa de emissões de GEEs. Com o intuito de melhorar este cenário, o Estado e o Município de São Paulo estabeleceram metas por meio da Política Estadual de Mudanças Climáticas, que visa a redução de 20% das emissões de dióxido de carbono, em relação a 2005, até 2020.



Para alcançar essa meta e propiciar melhor qualidade do ar, sem interferir no conforto da população, outra medida é a substituição dos combustíveis fósseis por combustíveis alternativos e novas tecnologia, como o biocombustível (etanol e biodiesel), a introdução do carro elétrico com o armazenamento em baterias e/ou híbridos e a tecnologia de célula a combustível. Esta última tecnologia perdeu enfoque, pois os carros elétricos, com o armazenamento em baterias, são cada vez mais abordados pelas empresas automobilísticas como uma alternativa sustentável, tornando-o uma tecnologia comercialmente competitiva.

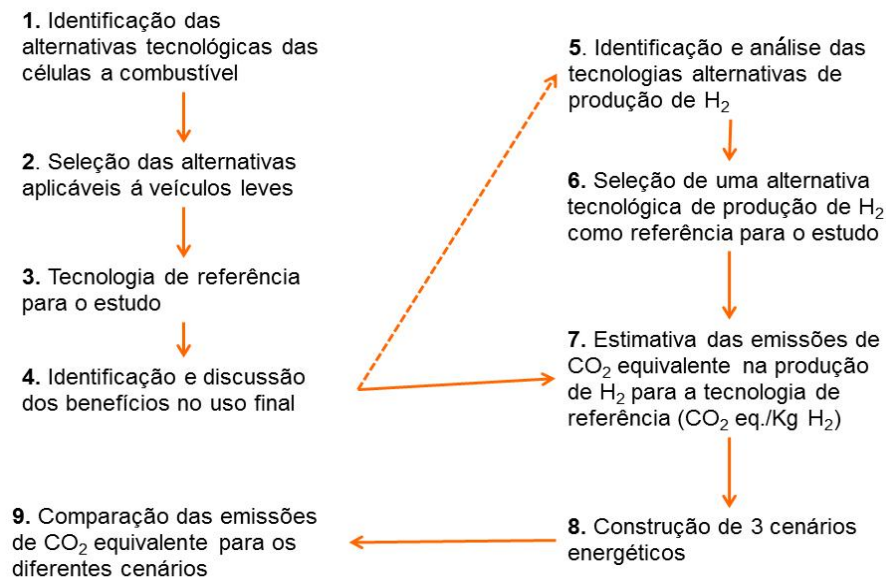
Neste contexto, o presente artigo pretende contribuir apresentando vantagens e desvantagens da tecnologia de células a combustível, particularmente do tipo PEMFC, como alternativa para redução das emissões de CO<sub>2</sub> equivalente pela frota de veículos leves no Estado de São Paulo.

## 2. METODOLOGIA

A metodologia do presente trabalho é apresentada por etapas, conforme a figura 2. Buscou-se dados secundários sobre células a combustível em literaturas especializadas, a fim de selecionar o tipo de célula a combustível aplicável em veículos leves. Foram realizadas visitas ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, para o entendimento da tecnologia e auxílio na seleção da tecnologia.

Com o intuito de avaliar o impacto da tecnologia de célula a combustível com relação à emissão de CO<sub>2</sub> equivalente avaliou-se três cenários, sendo:

- a. Cenário conservador (0% de introdução dos veículos de CaC);
- b. Cenário real (10% de introdução dos veículos de CaC);
- c. Cenário otimista (30% de introdução dos veículos de CaC);



**Figura 2 – Metodologia adotada para desenvolvimento do presente trabalho.**

**Fonte: Elaborado pelo autor.**

### 3. CÉLULAS A COMBUSTÍVEL

A célula a combustível foi descoberta na década de 1830, mas na época esta tecnologia não teve inicialmente grande repercussão. Atualmente, há grande investimento de pesquisa no desenvolvimento dessas tecnologias e já há, em mercado europeu e norte americano, veículos disponíveis para venda.

A questão principal para a disseminação da tecnologia ainda é o preço, que deverá reduzir com a escala e inovação tecnológica na produção.

Atualmente, existem seis tipos de células a combustível em pesquisas e no limiar da comercialização, cada uma com um processo químico de funcionamento, classificadas pelo tipo de eletrólito utilizado e pela temperatura de operação. Estas são as células a combustível com uso de Membrana Trocadora de Prótons (PEMFC), Células a Combustível Alcalinas (AFC), Células a Combustível de Ácido Fosfórico (PAFC), Células a Combustível de Carbono Fundido (MCFC), Células a Combustível de Óxido Sólido (SOFC) e Células a Combustível de Metanol Direto (DMFC). Pode-se



observar, no quadro 1, os tipos de células com suas respectivas características, aplicação e disponibilidade.

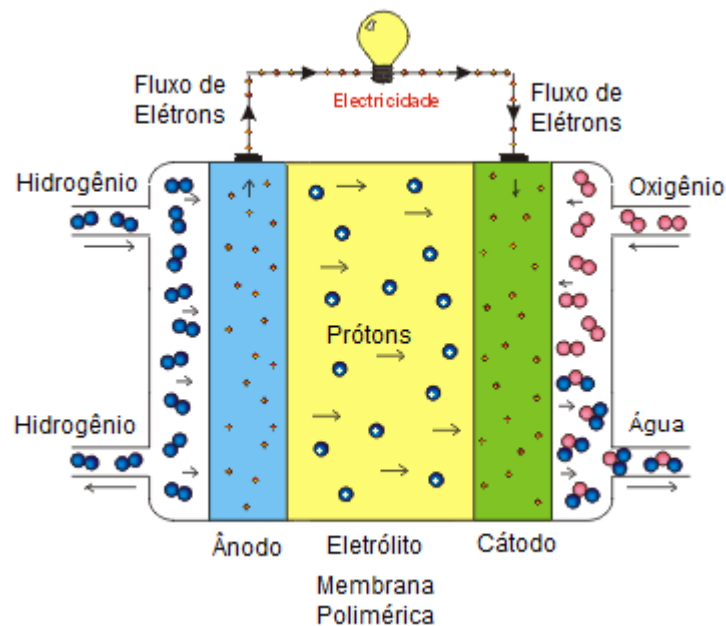
**Quadro 1 - Características gerais dos diferentes tipos de células a combustível.**

Tipo de Célula Combustível	Eletrólito	Combustível Principal	Catalizador	Eficiência (%)	Temperatura (°C)	Aplicação	Disponibilidade
Alcalina (AFC)	Hidróxido de Potássio	H <sub>2</sub>	Pt/Ni/Ag	45 - 65	50 - 120	Aparelhos portáteis, Transporte	Demonstração
Ácido Fosfórico (PAFC)	Ácido Ortofosfórico	GN H <sub>2</sub>	Pt	40 - 50	180 - 210	Geração Estacionária	Comercial
Membrana Trocadora de Prótons (PEMFC)	Ácido Sulfônico em Polímero	H <sub>2</sub>	Pt Pt/Ru	35 - 55	60 - 110	Veículos	Pré-Comercial
						Geração Estacionária	Pesquisa
Metanol Direto (DMFC)	Ácido Sulfônico e Sulfúrico em Polímero	Metanol	Pt/Ru	40 - 50	45 - 100	Transporte, Aparelhos Portáteis	Pesquisa, Demonstração
Carbonato Fundido (MCFC)	Carbonatos de Lítio e Potássio	GN	Ni	50 - 65	600 - 800	Geração Estacionária	Demonstração
Óxido Sólido (SOFC)	Zincônia estabilizado em Ytria	GN H <sub>2</sub>	Ni	50 - 65	500 - 1000	Geração Estacionária	Pesquisa

**Fonte: Adaptado de SERRA, 2005; BERNARDI JUNIOR, 2011; MARUYAMA, 2002.**

O funcionamento da célula a combustível do tipo PEMFC (figura 3) consiste em: o hidrogênio, sendo combustível, é alimentado ao ânodo da célula (terminal negativo), onde é oxidado no catalisador, havendo a produção de dois elétrons livres e dois íons de hidrogênio (H<sup>+</sup>), o hidrogênio em excesso que não tiver suas ligações rompidas será realimentado posteriormente. Em seguida, estes elétrons produzidos são transportados através de um circuito elétrico e utilizados para produzirem trabalho (corrente contínua). Por sua vez, aqueles prótons produzidos são transportados do ânodo para o cátodo, através do eletrólito (no centro da célula). No cátodo (terminal positivo), o oxigênio ou ar é alimentado reagindo com os prótons (H<sup>+</sup>), transportados através do eletrólito, e com os elétrons provenientes do circuito elétrico, tendo como produto final da reação o vapor de água. Ou seja, o combustível deste sistema nada mais é que o elemento mais simples e abundante, e a emissão é apenas vapor d'água.





**Figura 3 - Célula a Combustível com uso de Membrana Trocadora de Prótons.**

**Fonte: MARQUES, 2004**

De acordo com os autores Larminei, (2003) e Gomes Neto, (2005), as vantagens que as células a combustível apresentam são:

- Conversão de mais de 85% da energia contida em um combustível em energia elétrica e térmica (calor), a partir de ciclo combinado;
- Centrais de produção de energia através de células a combustível podem ser implementadas junto aos pontos de fornecimento, permitindo a redução dos custos de transporte e de perdas energéticas nas redes de distribuição.
- Alternativa de energia em regiões onde há falta ou o acesso é precário.
- Como este sistema não possui partes móveis, as células apresentam maiores níveis de confiança em comparação aos motores de combustão interna, não sofrendo paradas bruscas devido ao atrito ou falhas das partes móveis durante a operação;
- Baixos custos de manutenção e ausência de ruídos na geração de energia, também pela inexistência de partes móveis;
- São modulares, ou seja, podem ser acrescentadas diversas células em série, interligando com pratos bipolares, e obter maior geração de energia;





➤ Podem ser flexíveis na questão do combustível, ou seja, algumas células funcionam a partir de gás natural, gasolina, biodiesel ou outros combustíveis, não sendo necessária a aplicação direta do hidrogênio. Isso ocorre com a instalação de um reformador químico que produz hidrogênio com a reformulação do combustível introduzido ou pela reformulação interna em algumas células;

➤ Ganho ambiental pela implantação das células, uma vez que a emissão, caso o combustível seja hidrogênio, é apenas água.

Gomes Neto (2005) ainda ressalta os ganhos sociais, ambientais e econômicos com relação à aplicação das células a combustível, a saber:

➤ Redução de até 50% da emissão de poluentes e gases causadores do efeito estufa, como o CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>, com relação a utilização de combustíveis fósseis, tendo como consequência a melhoria do sistema respiratório, especialmente em áreas urbanas e a preservação do meio ambiente;

➤ Crescimento econômico, desenvolvimento e criação de empregos em diversas áreas, desde o setor rural, com a produção de combustíveis renováveis, até o setor industrial;

➤ Redução da sobrecarga nas linhas de transmissão, possibilitando o direcionamento dos investimentos para outras áreas;

➤ Aumento da segurança nacional com relação à demanda energética, minimizando a necessidade de racionamento em determinadas épocas;

➤ Redução da poluição sonora;

➤ Redução de lixo tóxico causado pelas baterias e pilhas, sendo as células a combustível um potencial na substituição das mesmas, reduzindo, assim, suas quantidades e evitando a contaminação dos solos e lençóis freáticos.

➤ Minimização da dependência do petróleo e da importação deste combustível;

➤ O hidrogênio não é um combustível tóxico, ou seja, caso ocorra algum vazamento não contaminará o meio ambiente;

➤ Interesses econômicos associados às indústrias de combustíveis fósseis.

Em contrapartida, como todo e qualquer sistema, existem suas desvantagens, sendo elas:

➤ Elevados custos, por ser uma tecnologia recém-pesquisada;

➤ Vida útil curta e redução da eficiência relacionada;



- Algumas necessitam da utilização de metais nobres, como a platina;
- Problemas relacionados com transporte e armazenamento do hidrogênio, por ser este um combustível extremamente inflamável;
- O hidrogênio alimentado à célula deve ter um elevado teor de pureza podendo, assim, minimizar a contaminação do catalisador.

Alguns tipos de células a combustível possuem melhor desempenho trabalhando em geração estacionária e outras podem ser úteis em aplicações portáteis e móveis. Cabe verificar a necessidade de projeto e sua viabilidade para tal.

No uso em veículos, existe a substituição do motor a combustão pelas células a combustível, as quais fornecerão eletricidade para seu funcionamento. Esta eletricidade fornecida é convertida em energia de movimento e em energia mecânica. Já o motor a combustão utiliza a energia química contida nos combustíveis. Esta energia química é convertida em calor através da combustão. A expansão dos gases resultante dessa combustão, em altas temperaturas, fornece energia mecânica. Este processo envolve muitas partes móveis e produz diversas emissões.

Para que as células sejam aceitas no setor de transportes, necessitam ter baixo custo e peso, fornecerem alta densidade de potência, serem seguras e flexíveis para diferentes tipos de combustíveis, serem compactas e fáceis de usar e de mantê-las. Para os automóveis e motocicletas, em particular, deve estar em funcionamento logo quando dada a partida, ou seja, operar em temperaturas baixas e responder perfeitamente a partida, desligamento, acelerações e frenagens bruscas.

Em algumas cidades em países como Japão, EUA, China, Austrália, Islândia, Alemanha, Espanha, Portugal e Inglaterra, circulam diariamente ônibus movidos por célula a combustível.

O primeiro automóvel movido à célula a combustível foi desenvolvido por Kordesch em 1960. Em 1970, Schwabe e colaboradores, montaram um ciclomotor com células movidas a hidrazina e, posteriormente, um micro-ônibus VW. Os três eram movidos com células alcalina (LINARDI, 2010).

A partir dessa inovação, grandes empresas automobilísticas começaram a desenvolver protótipos elétricos (baterias, células ou ambos) e híbridos (elétrico + combustão), como Daimlerchrysler/Mercedes-Bens, General Motors, Honda, Ford Motors, Volkswagen/Audi, Toyota e até mesmo de maneira mais tímida as empresas



Peugeot, Nissan, Hyundai, Fiat e Citroën

#### 4. SELEÇÃO DO TIPO DE CÉLULA A COMBUSTÍVEL

O levantamento bibliográfico mostrou que existe uma série de células a combustível, conforme apresentado anteriormente, que as diferem uma das outras em termos de tipo de eletrólito e faixa de temperatura de operação.

Entre todas as células a combustível citadas, segundo Gomes Neto (2005), Serra (2005) e Linardi (2010), as adequadas para aplicação em automóveis são as células a combustível com baixa temperatura de operação (até 140°C), pois proporcionam uma partida rápida ao ligar o veículo e respondem com flexibilidade às variações de carga. Estes tipos de células eliminam a instalação de baterias adicionais para as necessidades citadas.

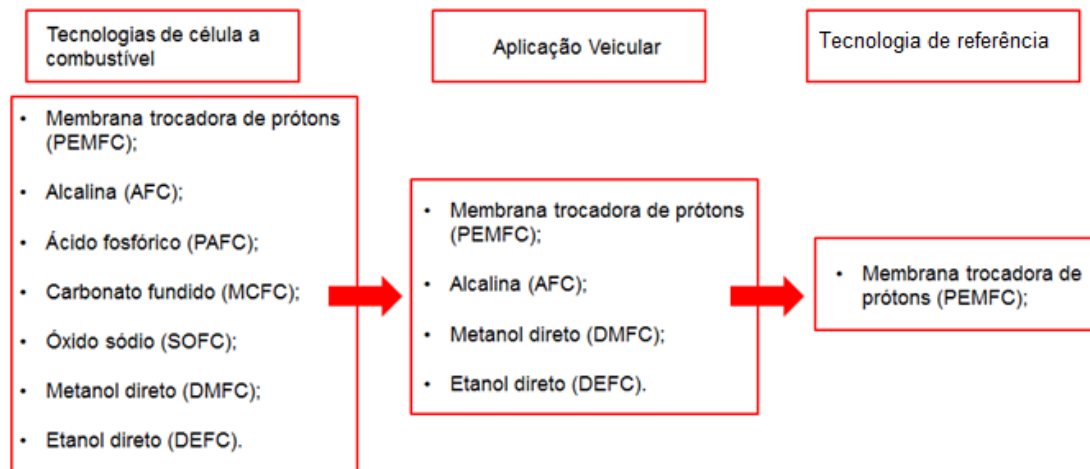
Dessa forma, dentre todas as tecnologias citadas, considerou-se como mais adequadas à aplicação veicular (figura 4):

- Célula a Combustível com uso de Membrana Trocadora de Prótons (Proton Exchange Membrane Fuel Cell – PEMFC);
- Células a combustível Alcalinas (Alkaline Fuel Cell – AFC);
- Células a combustíveis de Metanol Direto (Direct Methanol Fuel Cell – DMFC);
- Células a Combustível de Etanol Direto (DirectEthanolFuelCell – DEFC);

Vale ressaltar que não foi abordada a questão da viabilidade econômica, apenas a viabilidade técnica com relação à aplicação.

Ao efetuar pesquisas entre os fabricantes de automóveis com célula a combustível, a tecnologia mais utilizada atualmente para esta aplicação é a membrana trocadora de prótons (PEMFC).

A figura 4 apresenta os resultados obtidos na seleção da tecnologia de célula a combustível aplicável em veículos.



**Fonte: Elaborado pelo autor.**

**Figura 4 - Escolha da tecnologia da célula a combustível para aplicação móvel.**

De acordo com as informações obtidas, o trabalho teve seu embasamento da frota veicular leve considerando veículos movidos por célula a combustível do tipo PEMFC, cujas características gerais são: Temperatura de operação: 60 a 110 °C; Eficiência: 35 a 55%; Eletrólito: Membrana polimérica; Catalizador: Platina – Pt; Combustível: Hidrogênio puro.

Os ganhos ambientais envolvidos no uso final deste sistema, comparados com os veículos à combustão são diversos, tais como: Redução da emissão de material particulado, fuligem, gases poluentes e de efeito estufa (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, entre outros). O que reduz a poluição precipitada nas cidades, os problemas respiratórios relacionados, a destruição do meio ambiente, conseqüentemente, a formação de poluentes secundários, como o ozônio próximo a superfície; e a redução da poluição sonora, uma vez que as células operam silenciosamente não envolvendo explosões como os motores a combustão.

A partir destes resultados, procurou-se identificar e analisar as alternativas tecnológicas para obter o H<sub>2</sub>, obter uma análise ambiental mais ampla e verificar os ganhos ambientais com a implantação real das células.

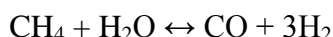
Como a alternativa mais utilizada, devido fatores econômicos e tecnológicos, é a reforma do gás natural, o presente trabalho partiu deste sistema para a produção de H<sub>2</sub>, o qual foi utilizado como comparação dos gases gerados pela reforma do combustível para a criação dos cenários de estudos e análises.



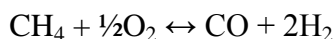
## 5. REFORMA DO GÁS NATURAL E EMISSÃO TOTAL MÉDIA DE CO<sub>2</sub> EQUIVALENTE POR QUILOMETRO RODADO DE UM VEÍCULO

Serra *et al* (2005) apresenta os três principais processos de reforma do gás natural: a vapor, por oxidação parcial e autotérmica.

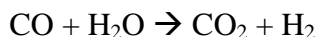
A seguir é apresentada a reação da reforma a vapor, sendo que os reatores operam na faixa de pressão entre 3 a 25 atm e temperaturas entre 700 e 850°C.



Reação da reforma por oxidação parcial:



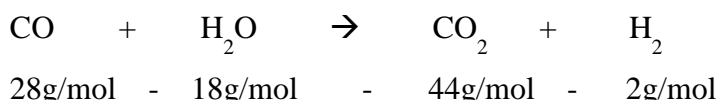
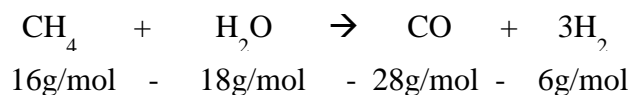
Após a reforma, o gás de síntese resultante, de ambas as reformas, é direcionado para reatores de conversão, onde com a presença de água se obtém maior quantidade de oxigênio. Esta reação ocorre abaixo dos 600°C, podendo ocorrer até a 200°C na presença de catalisadores ativos. Por seguinte sua reação (SERRA *et al.*, 2005):



Ao término dos três processos é necessário que o gás passe por um purificador para eliminar o CO, pois existe o problema da contaminação do catalisador na célula a combustível, como mencionado anteriormente.

Como o principal constituinte do gás natural fornecido pela COMGÁS (distribuidora do Estado de São Paulo) é o metano, aproximadamente 90%, o presente trabalho focou neste para obter o Hidrogênio, desconsiderando, assim, os outros gases.

Desta forma, tem-se pela reforma a vapor e reator de conversão:



Os 75% do hidrogênio foram obtidos pela reforma a vapor e 25% pelo reator de conversão. Desta forma, para se obter 1 (um) quilograma de hidrogênio são necessário 2 (dois) quilogramas de metano, conforme reações abaixo:

Sendo o gás natural composto por 89% de metano, são necessários 2,22kg para se obter 1 (um) quilograma de hidrogênio e, a partir do balanço de massa apresentado acima, para se obter os mesmo 1 (um) quilograma de hidrogênio são emitidos 5,53kg de



gás carbônico – desconsiderando os outros gases participantes da composição do gás natural. Ou seja, para 1kg de H<sub>2</sub> são necessários 2,22kg de gás natural e emitidos 5,53kg de CO<sub>2</sub>.

A autonomia e capacidade do tanque foram obtidas por referência ao último veículo da Mercedes-Benz movido por célula a combustível, denominado Classe –B F-Cell, lançado em 2010. Possui uma autonomia de 400 quilômetros e uma capacidade de armazenar 3,7kg de hidrogênio a 10.150 psi (700 bar). (DAIMLER, 2010)

Desta forma, é possível obter a emissão total média de CO<sub>2</sub> equivalente por quilômetro rodado de um veículo movido por célula a combustível do tipo PEMFC, como apresentada na equação abaixo.

$$E_{\text{CO}_2 \text{ eq}/\text{Km}} = \text{Consumo H}_2/\text{Km} \times E_{\text{CO}_2 \text{ eq}/\text{Kg H}_2}$$

Sendo:

- $E_{\text{CO}_2 \text{ eq}/\text{Km}}$ : Emissão total de CO<sub>2</sub> equivalente para cada quilômetro

rodado por um veículo movido por célula a combustível;

- $\text{Consumo H}_2/\text{Km}$ : Consumo de hidrogênio para cada quilômetro rodado

por um veículo movido por célula a combustível;

- $E_{\text{CO}_2 \text{ eq}/\text{m}^3 \text{ H}_2}$ : Emissão de CO<sub>2</sub> equivalente para cada metro cúbico de

hidrogênio consumido por um veículo movido por célula a combustível.

De acordo com a equação acima apresentada, criaram-se os cenários para posteriormente analisar cada um deles e avaliar a implantação das células na frota veicular, tendo como base dados fornecidos pelos fabricantes.

## 6. CENÁRIOS: CONSERVADOR, REAL E OTIMISTA

Os cenários foram criados a partir do crescimento anual da frota veicular leve do Estado de São Paulo, com base nos anos de 2003 a 2011, por meio da interpolação da linha de tendência até o ano de 2025 (tabela 1). Tais valores foram obtidos a partir de



dados secundários disponibilizados pelo DENATRAN e ANFAVEA.

**Tabela 1 - Estimativa da frota veicular até 2025, com base nos anos de 2003 a 2011.**

Ano	Nº de Automóveis	Ano	Nº de Automóveis
2003	8.962.484	015	18.330.000
2004	9.348.042	016	19.560.000
2005	9.802.647	017	20.790.000
2006	10.379.679	018	22.110.000
2007	11.014.104	019	23.520.000
2008	11.753.856	020	24.930.000
2009	12.536.177	021	26.460.000
2010	13.334.875	022	28.080.000
2011	14.108.047	023	29.700.000
2012	15.090.000	024	31.440.000
2013	16.140.000	025	33.180.000
2014	17.220.000		

**Fonte: Elaborado pelo autor.**

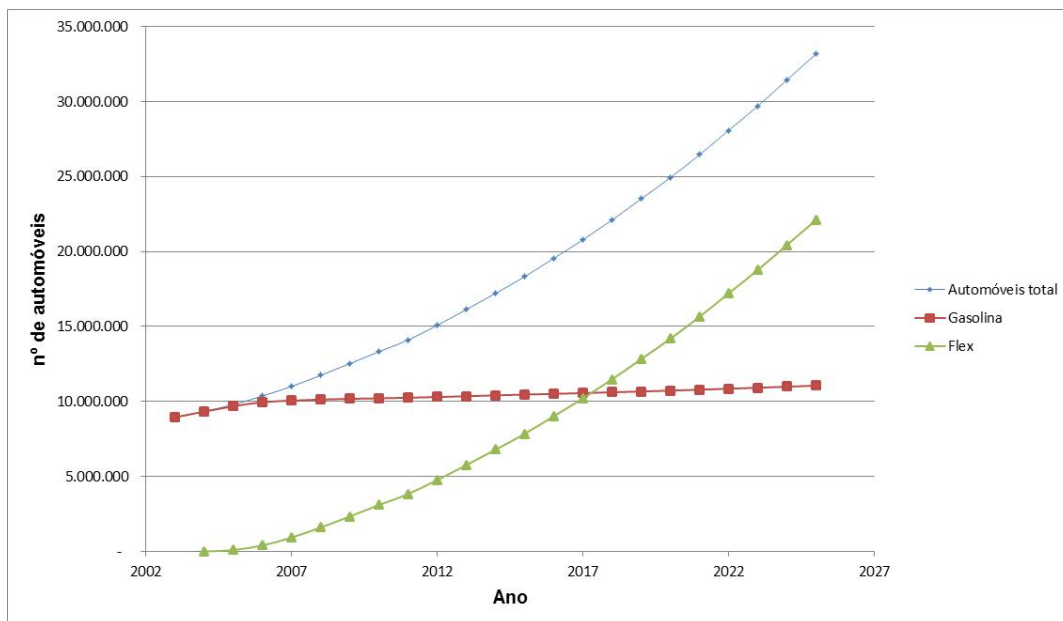
O Cenário Conservador levou em conta como se não houvesse a introdução de veículos movidos por célula a combustível, ou seja, o presente crescimento dos veículos movidos por combustão interna seria uma constante. Este cenário será um comparativo, de emissão de CO<sub>2</sub> equivalente, com relação aos outros dois.

Para que os resultados tenham maior veracidade, os veículos a combustão contabilizado foram subdivididos em dois grupos, com diferentes combustíveis: os veículos a gasolina e os bicompostíveis (*flex*) - mas considerando apenas o etanol como combustível principal.

Segundo ANFAVEA (2011) os automóveis bicompostíveis, *flex*, atualmente compõem uma grande parcela dos veículos. Seu lançamento em 2003 teve críticas



positivas logo no segundo ano de vendas, saltando de 3,5% para 21,5%. Só no ano de 2010, o total de carros fabricados e vendidos bicombustíveis foi de 95%, contra 5% para os de gasolina. Sendo assim, a frota veicular dividida é apresentada na figura 5 – considerando uma constante desses 95%, de 2010 até o ano de 2025.



**Figura 5 – Estimativa de frota veicular.**

**Fonte: Elaborado pelo autor com base de dados da Anfavea, 2011.**

Os cenários Realista e Otimista consideraram a substituição de parte dos veículos a combustão por veículos movidos por célula a combustível, compondo as porcentagens da introdução desta tecnologia, com seu embasamento em um fato na Califórnia.

O filme “*Who killed the electric car*” (1996) apresenta esta situação real da implantação dos veículos elétricos. Essa história parte do início do ano de 1990, em que legisladores da Califórnia, EUA, decidiram que as montadoras de automóveis deveriam oferecer veículos elétricos aos consumidores.

A *California Air Resources Board* – CARB, órgão do governo responsável por monitorar a qualidade do ar no estado da Califórnia, definiu um limite de vendas de veículos com emissão zero ou, em inglês, *zero-emission-vehicle* (ZEV). Essa cota de fabricação partiria do ano de 1998 com 2% dos veículos fabricados, 5% em 2001 e 10% em 2003. Os estados de Nova York e Massachusetts adotaram medidas semelhantes em seguida. Entretanto, eram muitas as forças contrárias à iniciativa da CARB e como

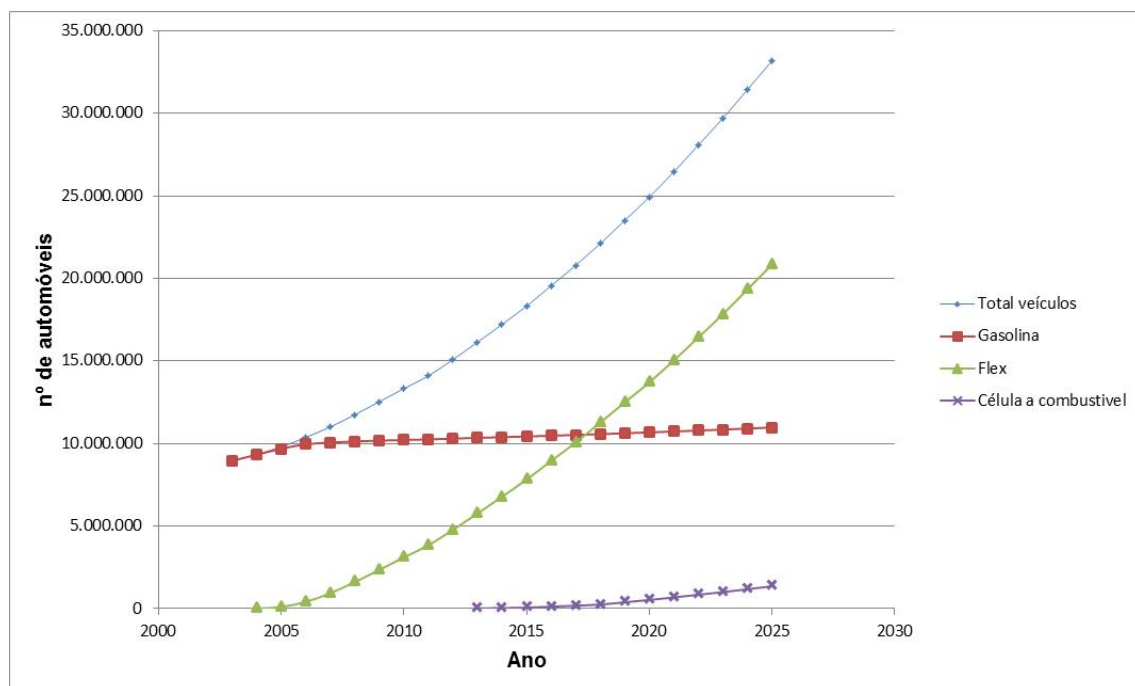
resultado dessas pressões, em 1996 a CARB repensou na proposta e postergou seu cronograma.

Mesmo esta medida não tendo sucesso e sendo aplicado apenas para veículos elétricos, tem-se uma ideia de como poderia ser a introdução dos veículos movidos por célula a combustível na frota veicular.

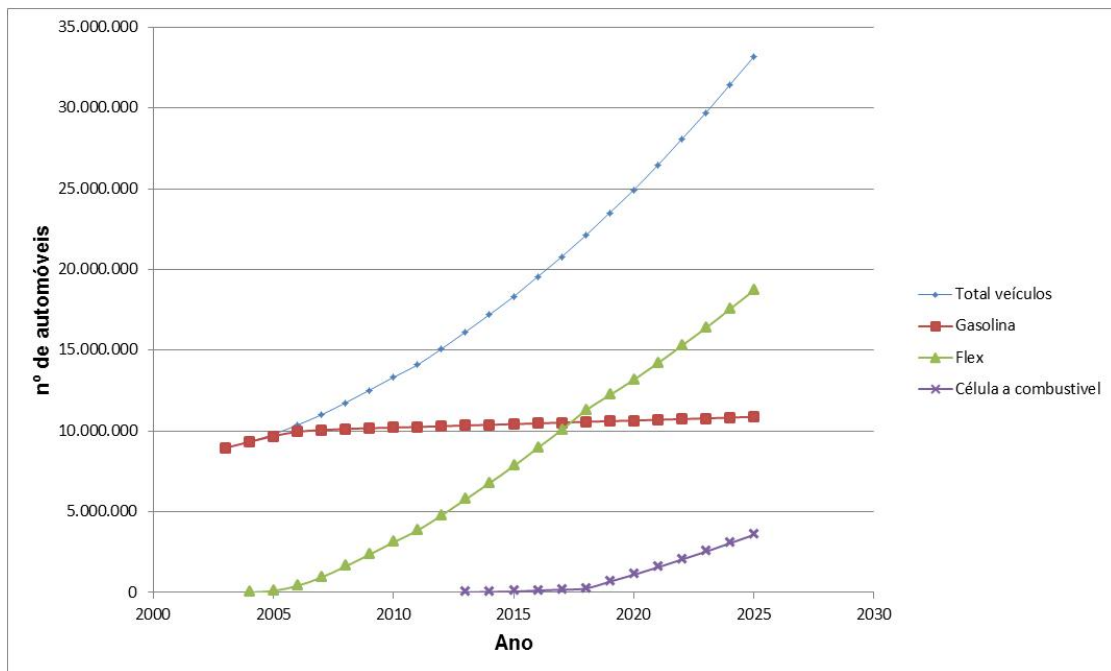
Desta forma, os cenários Real e Otimista tiveram como início da introdução dos veículos, valores idênticos, sendo para o ano de 2013, 2% da frota veicular e para o ano de 2016 5%, assim como o histórico citado. O que se diferenciaram é que no ano de 2019 a porcentagem dessa introdução foi de 10% e 30%, respectivamente para os cenários, mantendo constante esta porcentagem até 2025.

Vale ressaltar que os cenários foram criados com o total da frota veicular, considerando como se todos os carros registrados pelo DENATRAN estivessem em circulação e que a quilometragem média anual destes veículos e dos movidos por célula a combustível são de 20.000 km/ano, aproximadamente 60 km/dia. (MATTOS, 2001 e MMA, 2011).

Sendo assim, têm-se as frotas veiculares dos dois cenários, Realista e Otimista, com a introdução dos veículos de célula a combustível, apresentados nas figuras 6 e 7.



**Figura 6 - Estimativa de veículos com a introdução das células a combustível para o Cenário Realista. Fonte: Elaborado pelo autor.**



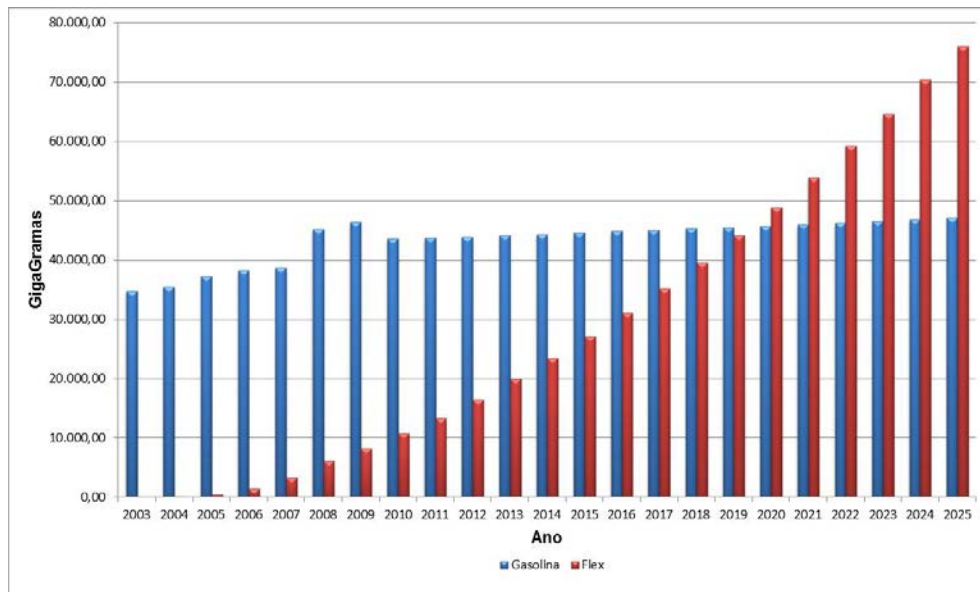
**Figura 7 – Estimativa dos veículos com a introdução das células a combustível para o Cenário Otimista.**

**Fonte: Elaborado pelo autor.**

Como base de dados para as emissões dos veículos a combustão do tipo gasolina e *flex*, utilizou-se informações do banco de dados da CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo), considerando apenas a opção etanol dos veículos *flex*.

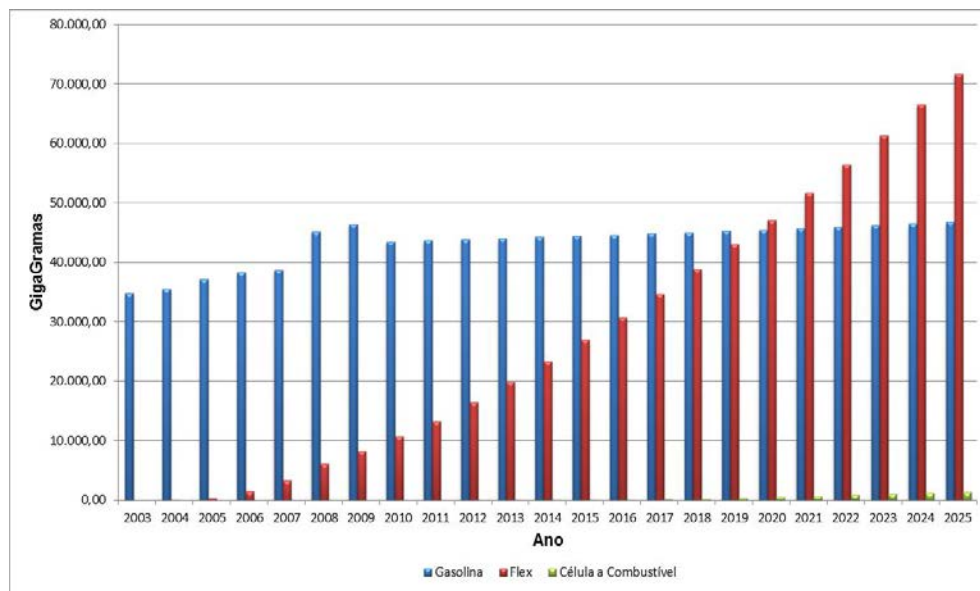
A partir destes valores e informações obtidas no IPCC e GHG Protocol sobre a equivalência dos gases com relação ao CO<sub>2</sub>, elaborou-se a estimativa das emissões de CO<sub>2</sub> eq. até 2025, considerando de 2011 até 2025 as mesmas emissões de 2010 como base de cálculo.

Desta forma, é possível visualizar nas figuras 8, 9 e 10, as emissões de CO<sub>2</sub>eq. para os Cenários Conservador, Real e Otimista.



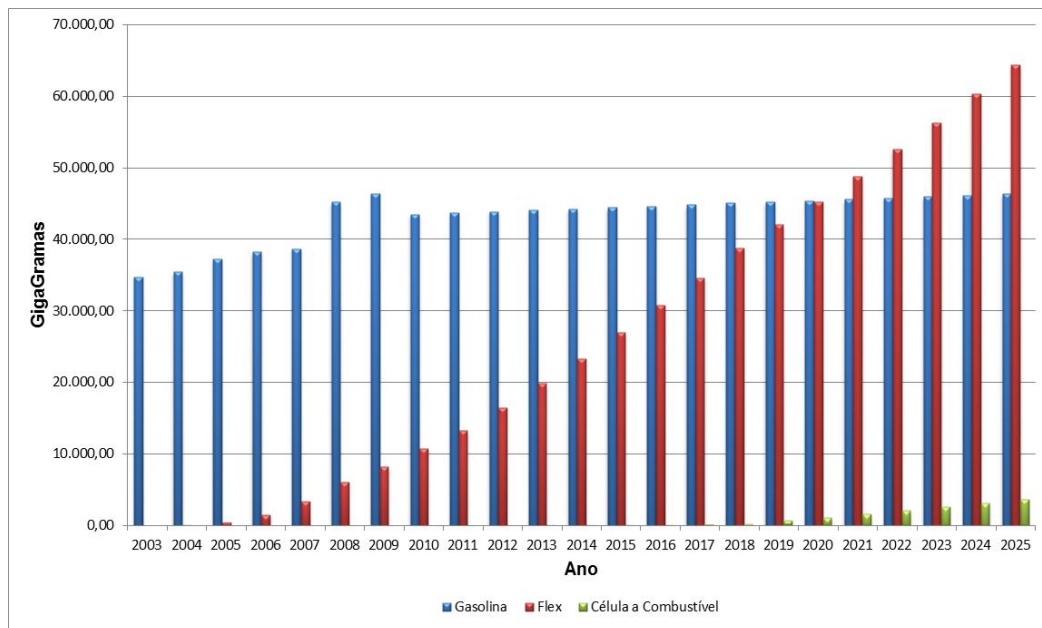
**Figura 8 - Estimativa das emissões de CO<sub>2</sub>eq para o Cenário Conservador.**

**Fonte: Elaborado pelo autor.**



**Figura 9 - Estimativa das emissões de CO<sub>2</sub>eq. para o Cenário Realista.**

**Fonte: Elaborado pelo autor.**



**Figura 10 - Estimativa das emissões de CO<sub>2</sub>eq. para o Cenário Otimista.**

**Fonte: Elaborado pelo autor.**

Como se pode observar, as emissões totais em 2020 de cada cenário são de 94.561,47 GgCO<sub>2</sub>eq. para o Conservador, 93.219,39 GgCO<sub>2</sub>eq. para o Realista e 91.834,65 GgCO<sub>2</sub>eq. para o Otimista.

Ao comparar os resultados obtidos, as emissões provenientes da reforma do gás natural para a obtenção do hidrogênio (combustível das células) chega a ser de aproximadamente 3 e 4 vezes menor que as emissões provenientes da combustão do etanol e da gasolina, respectivamente. Tendo vista que a emissão de um veículo a combustão a gasolina é de 4,26 toneladas de CO<sub>2</sub> eq. por ano, a etanol é de 3,44 toneladas por ano e a reforma do gás natural é de 1,01 toneladas por ano.

Segundo o Inventário de emissões antrópicas de GEEs diretos e indiretos do Estado de São Paulo (2011), as emissões de CO<sub>2</sub> equivalente no ano de 2005 foi estimado em 139.811 GgCO<sub>2</sub>eq, sendo que o setor de transporte representou 40.121 GgCO<sub>2</sub>eq neste mesmo ano. Deste total, 37.615,56 Gg. foram provenientes dos automóveis leves, correspondendo 27% de todas as emissões.

A meta proposta pela Política Estadual de Mudanças Climáticas (PEMC) é a redução de 27.962,2 GgCO<sub>2</sub>eq no período de 2005 para 2020, ou seja, em 2020 as emissões de CO<sub>2</sub> equivalente precisarão representar um total de 111.848,8 Gg.



## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista os resultados e a comparação dos três cenários, observou-se que a introdução desta nova tecnologia contribuirá para a redução das emissões de CO<sub>2</sub> equivalente.

Se considerar o crescimento da frota sem esta nova tecnologia (Cenário Conservador) teríamos emissões de aproximadamente 94.561,47 Gg. de CO<sub>2</sub> eq. em 2020, sendo que a meta proposta pela Política Estadual de Mudanças Climáticas (PEMC), para este mesmo ano, considerando todas as fontes de emissões, estacionárias e móveis, seria de 111.848,8 Gg..

Caso exista a introdução da tecnologia dos veículos movidos por célula a combustível, totalizaria uma emissão de 93.219,39Gg. e 91.834,65Gg. de CO<sub>2</sub> eq. para os Cenários Realista e Otimista, respectivamente.

Mesmo com expressivas reduções nas emissões de CO<sub>2</sub> eq. , 1.342,08 Gg. (Realista) e 2.726,82 Gg. (Otimista), com relação ao cenário Conservador e os diversos ganhos no seu uso final, apenas essa medida não será suficiente para atingir a meta proposta. Percebe-se então, como um dos principais problemas é o excesso do número de veículos, uma vez que prevalece o conceito do transporte individual, faltando iniciativas, incentivos ou propostas da parte do poder público para mudar este conceito de modelo e transforma-la em transporte coletivo, reduzindo, conseqüentemente, a frota de veículos leves.

Alternativas complementares, como restrições de emissões em fontes estacionárias e a introdução de alternativas de geração de energia, terão que trabalhar em conjunto na redução das emissões para conseguir alcançar a meta proposta pela PEMC, uma vez que essa montante de emissões apresentada é apenas relacionada aos automóveis e a PEMC estabeleceu o critério de redução como emissão global (contabilizando todas as fontes).

Por fim, recomendam-se novos estudos relacionados a esta tecnologia em questão, tanto para ampliar a visão e incentivar pesquisas nesta área, quanto para elaborar comparações e análises do ciclo de vida desta tecnologia e suas aplicações para demonstrar a viabilidade técnica e os seus benefícios à saúde humana e ao meio ambiente.

A conscientização e demonstração da existência de tecnologias alternativas, as



quais visam minimizar o impacto ao meio ambiente, suprindo as mesmas necessidades de outros elementos mais poluentes, se faz de extrema importância para a sociedade.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANFAVEA (Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores). **Anuário da indústria automobilística brasileira**. São Paulo, 2011.

BERNARDI JUNIOR, Paulo. **Energias Renováveis**. Curso ministrado em Agosto de 2011. Escola: EDUTECH Ambiental, São Paulo.

BEZERRA FILHO, João Gaspar. **Células a combustível a hidrogênio: estudo de caso comparativo com um motor a combustão**. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) - Curso de Tecnologia Mecatrônica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Ceará, Fortaleza, 2008.

BRASIL. **Banco de dados DENATRAN**. Disponível em <<http://www.denatran.gov.br/frota.htm>>. Acessado em 07/09/2011.

BRASIL. Censo 2010 – IBGE. Disponível em <[http://www.censo2010.ibge.gov.br/resultados\\_do\\_censo2010.php](http://www.censo2010.ibge.gov.br/resultados_do_censo2010.php)>. Acessado em 07/09/2011.

BRASIL. **LEI Nº 13.798, DE NOVEMBRO DE 2009**. Política Estadual de Mudanças Climáticas. Disponível em <[http://www.ambiente.sp.gov.br/legislacao/estadual/leis/2009\\_lei\\_13798.pdf](http://www.ambiente.sp.gov.br/legislacao/estadual/leis/2009_lei_13798.pdf)>. Acessado em 07/09/2011.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia. **Balço Energético Nacional 2010**. Brasília, 2010.





CETESB. **Qualidade do Ar no Estado de São Paulo 2010**. Disponível em <<<http://www.cetesb.sp.gov.br/ar/qualidade-doar/31-publicacoes-e-relatorios>>>.

Acessado em: 20/09/2011.

COMGÁS. **Composição do gás natural**. Disponível em <[http://www.comgas.com.br/conheca\\_sociedade/escola/composicao.asp](http://www.comgas.com.br/conheca_sociedade/escola/composicao.asp)>. Acessado em: 06/04/2012.

DAIMLER. **Electrification of the Drivetrain**. 2010. Disponível em <<http://www.daimler.com>>. Acessado em: 10/02/2012.

FENABRAVE (Federação Nacional da Distribuição de Veículos Automotores). **Semestral da distribuição de Veículos automotores no Brasil de 2009**. 2009.

GOMES NETO, E.H., **Hidrogênio, evoluir sem poluir: a era do hidrogênio, das energias renováveis e das células a combustível**. 1º ed. 2006, Curitiba: Editora: Brasil H2.

GREENHOUSE GÁS (GHG) Protocol. **Contabilização, quantificação e publicação de inventários corporativos de emissões de gases de efeito estufa**: Segunda Edição. 2008

LINARDI, Marcelo. **Introdução à ciência e tecnologia de células a combustível**. São Paulo: Artliber Editora, 2010.

MATTOS, L. B. R. **A Importância do Setor de Transportes na Emissão de Gases do Efeito Estufa – O Caso do Município do Rio de Janeiro**. Tese (Mestrado em Planejamento Energético). 179 p. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2001.

MARQUES, A. R.; AUGUSTO, A. F.; MONTEIRO, P. T. **O Hidrogênio como vector energético nos transportes**. 2004.



MARUYAMA, Flávio M.; *et al.* **Células de combustível e a integração de recursos energéticos.** São Paulo:USP, 2002.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **1º inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários** – Relatório Final. 2011

PAINE, CHRIS. Who killed the electric car? (Quem matou o carro elétrico?). DVD (92 min.), son., color, leg. Califórnia, 1996.

SERRA, Eduardo T.; *et al.* **Células a Combustíveis:** Uma alternativa para Geração de Energia e a sua Inserção no Mercado Brasileiro. CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Rio de Janeiro, 2005.

VECCHIA, Rodnei. **O meio ambiente e as energias renováveis:** instrumentos de liderança visionária para a sociedade sustentável. São Paulo: Minha Editora, 2010.

**Data de Recebimento 16/4/13**

**Data de Aceite 18/9/13**