

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Impactos Ambientais e na Matriz de Consumo
de Combustíveis pela Introdução de uma Frota
de Veículos Leves com Células a Combustível
na Cidade de São Paulo - SP**

Autora: Paula Duarte Araújo
Orientador: Prof.Dr. Ennio Peres da Silva

03/2006

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ENERGÉTICOS**

**Impactos Ambientais e na Matriz de Consumo
de Combustíveis pela Introdução de uma Frota
de Veículos Leves com Células a Combustível
na Cidade de São Paulo - SP**

Autor: Paula Duarte Araújo
Orientador: Prof. Dr. Ennio Peres da Silva

Curso: Planejamento de Sistemas Energéticos.

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Planejamento de Sistemas Energéticos.

Campinas, 2004
S.P. – Brasil

UNIDADE	BR
Nº CHAMADA	TZONICAMP
	Ar15i
V	EX
TOMBO BC/	69533
PROC.	16.123.06
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	11,00
DATA	09/08/06

leilão-id 384048

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Ar15i	<p>Araújo, Paula Duarte</p> <p>Impactos ambientais e na matriz de consumo de combustíveis pela introdução de uma frota de veículos leves com células a combustível na cidade de São Paulo – SP / Paula Duarte Araújo. --Campinas, SP: [s.n.], 2004.</p> <p>Orientador: Ennio Peres da Silva Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.</p> <p>1. Células a combustível. 2. Hidrogênio. 3. São Paulo, Região Metropolitana de (SP). I. Silva, Ennio Peres da. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.</p>
-------	---

Titulo em Inglês: Impacts on the Environment and on the Consumption of Fuels due to the Intoduction of a Light Fuel Cell Vehicle Fleet in Sao Paulo City -SP.

Palavras-chave em Inglês: Vehicles fuel cells, Hydrogen, City of São Paulo
 Área de concentração: Planejamento Energético
 Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica
 Banca examinadora: Sônia Regina da Cal Seixas Barbosa e Gerhard Ett
 Data da defesa: 11/02/2004

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ENERGÉTICOS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADEMICO

**Impactos Ambientais e na Matriz de Consumo
de Combustíveis pela Introdução de uma Frota
de Veículos Leves com Células a Combustível
na Cidade de São Paulo - SP**

Autor: Paula Duarte Araújo
Orientador: Prof. Dr. Ennio Peres da Silva

**Prof. Dr. Ennio Peres da Silva , Presidente
UNICAMP**

**Profa. Dra. Sônia Regina da Cal Seixas Barbosa
UNICAMP**

**Dr. Gerhard Ett
Electrocell**

Campinas, 11 de fevereiro de 2004

Dedicatória:

À minha mãe.

Agradecimentos

Agradeço ao Prof. Ennio Peres da Silva pela confiança, pela orientação e apoio durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos meus pais, principalmente a minha mãe, pela calma e paciência nos momentos de angústia e insegurança. À Tia Mininha pelos solidários e-mails, todos os dias.

Aos colegas do Laboratório de Hidrogênio, que muito me ajudaram neste trabalho, em especial o Cristiano, a quem devo muito pelas informações e pelo inglês, Cristiane, Gheisa, Antônio, João, Fernando, Paulo, Pimenta, Ana Maria e todos os demais.

Ao Prof. Gileno Oliveira que foi o meu primeiro incentivador na carreira acadêmica. Ao Dr. Renato Linke, da CETESB, pelas informações sobre a frota de veículos da cidade de São Paulo.

Ao Laboratório de Hidrogênio pelo apoio material durante todo este trabalho e pelo apoio financeiro durante o primeiro ano do curso.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro concedido no segundo ano do curso.

Meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que de alguma forma me ajudaram a chegar até aqui. Muito obrigado.

*“O que for a profundidade do teu ser
assim será o teu desejo
O que for o teu desejo,
assim será tua vontade
O que for a tua vontade,
assim serão teus atos
O que forem os teus atos,
assim será o teu destino!*

Brihadaranyaka Upanishad

Resumo

ARAÚJO, Paula Duarte, *Impactos Ambientais e na Matriz de Consumo de Combustíveis pela Introdução de uma Frota de Veículos Leves com Células a Combustível na Cidade de São Paulo – SP*, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2004. 145 p. Dissertação (Mestrado)

Percebe-se, atualmente, em todo o mundo, que as grandes cidades enfrentam problemas de poluição do ar derivados do crescimento do tráfego de veículos urbanos. Este aumento no número de veículos além de ocasionar um maior consumo de combustíveis de origem fóssil (não renovável), também é responsável pela emissão de vários poluentes que impactam negativamente sobre a saúde da população, assim como contribuem para o aumento do efeito estufa, que tem sido apontado como um dos responsáveis pela mudança climática global.

A proposta deste trabalho é determinar quantitativamente os impactos ambientais e na matriz de consumo de combustíveis advindos da introdução de uma frota de veículos com células a combustível na cidade de São Paulo. Para determinar estes impactos foram construídos três cenários para diferentes frotas de veículos novos, que foram comparados com um cenário tendencial de veículos convencionais, tomando-se como ano base o ano de 2002.

Os resultados obtidos demonstram tanto a redução das emissões de poluentes como a diminuição das emissões de CO₂. Também ocorre a redução do consumo de combustíveis de origem fóssil e também demonstra a viabilidade do abastecimento de hidrogênio para pequenas frotas de veículos com células a combustível.

Palavras Chave

- Veículos com células a combustíveis, hidrogênio, Cidade de São Paulo

Abstract

ARAÚJO, Paula Duarte, *Impacts on the Environment and on the Consumption of Fuels due to the Introduction of a Light Fuel Cell Vehicle Fleet in Sao Paulo City - SP.*, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2004. 145 p. Dissertação (Mestrado)

Nowadays, the largest cities, all over the world, faces the problem of air pollution caused by the increase of the urban vehicles number. This endless growing of the urban vehicles number at this cities besides of causing a larger consumption of fossil fuels (fuels not renewable), also can be responsible for the emissions of diverse pollutants that leads to the reduction in the life quality standards of the people in the living areas. They also contribute substantially to the raise of the greenhouse effect which has been pointed out as one of the major causes of the world climatic change.

Focusing in the problems listed above, the article will measure the environmental and fuel pattern consumption impacts resulted from the introduction of a fuel cell vehicles fleet at São Paulo city. To define the impacts, three scenarios were constructed to different new vehicles fleets, which were compared with a scenario that keeps the trend of the growing of the fossil fuel fleet. The year of 2002 was considered the year-base.

The results showed both a reduction of the pollutants and CO₂ emitted. A reduction of the fossil fuels consumption was also showed. Those information obtained from the analysis proves the hydrogen supply availability when dealing with small fuel cell vehicles fleets.

Key Words

- Vehicles fuel cells, hydrogen, City of São Paulo

Índice

Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	vii
Nomenclatura	xvi
1 Introdução	1
1.1 Objetivo	3
1.2 Justificativa	4
1.3 Delimitação	5
1.4 Organização	6
2 Revisão da Literatura	8
2.1 Consumo de energia e emissões de CO ₂	9
2.2 - Emissões Veiculares	15
2.3 Poluição atmosférica e qualidade do ar	16
2.3.1 Fontes de Poluição Atmosférica	19
2.4 Impactos ambientais decorrentes do aumento da poluição atmosférica	20
2.4.1 Substâncias tóxicas liberadas pelo cano de escapamento	24
2.5 Medidas para controlar as emissões veiculares	30
2.6 Trabalhos relacionados com o tema	41
3 Material e Métodos	47
3.1 Cálculo de emissões de poluentes pela frota de veículos leves a gasolina e álcool na cidade de São Paulo em 2002	47
3.1.1 Estimativa da frota circulante para o ano base de 2002	48
3.1.2 Quilometragem média anual	49
3.1.3 Fator de Emissão	49

3.1.4 Cálculo do Fator de Emissão para SO _x	53
3.2 Cálculo da parcela emitida de CO ₂ pela gasolina	54
3.3 Comparação dos veículos de combustão interna e veículos com células a combustível	54
3.4 Cenários	56
4 Consumo de combustíveis veiculares na cidade de São Paulo e suas emissões associadas	58
4.1 Descrição da Frota de Veículos Leves da Cidade de São Paulo	59
4.2 Consumo de Combustíveis Veiculares na Cidade de São Paulo	62
4.3 Emissões Veiculares pela Frota de Veículos na Cidade de São Paulo	64
5 Veículos leves com células a combustível	67
5.1 As Células a Combustível	68
5.1.1 Funcionamento básico de uma célula a combustível	69
5.1.2 Tipos de células a combustível	73
5.1.3 Vantagens, desvantagens e aplicações das células a combustível	75
5.2 Aplicações Veiculares das Células a Combustível	77
5.2.1 Configuração dos veículos com células a combustível	79
5.2.2 Emissões nos veículos com células a combustível	83
5.3 Veículos com Células a Combustível	84
6 Análise das alterações no consumo de combustíveis e das emissões veiculares na cidade de São Paulo pela introdução de uma frota de veículos leves com células a combustível	96
6.1 Projeção da frota de veículos leves a gasolina e a álcool na cidade de São Paulo – 2020	97
6.2 Emissões da frota de veículos leves a gasolina e a álcool na cidade de São Paulo – 2020	98
6.3 Consumo de combustível para as frotas projetadas de veículos leves na cidade de São Paulo – 2020	99
6.3.1 Consumo de energia para a produção de hidrogênio via eletrolise para as frotas projetadas de veículos com células a combustível na Cidade de São Paulo – 2020	100

6.4 Análise dos resultados obtidos	101
7 Conclusões e Sugestões	104
Referências	108
Anexo I	115
Anexo II	118
Anexo III	134
Anexo IV	137
Anexo V	142

Lista de Figuras

2.1	Produção Mundial de Energia Primária por fonte em 2001.	10
2.2	Emissões Mundiais de CO ₂ originadas do consumo e da queima de combustíveis fósseis.	10
2.3	Consumo mundial de petróleo por setor em 2001.	11
2.4	Consumo final de energia no Brasil por fonte.	12
2.5	Consumo de combustível pelo setor de transporte no Brasil.	13
2.6	Emissões Brasileiras de CO ₂ originadas do consumo e da queima de combustíveis (MtC – milhões de toneladas equivalentes de Carbono).	13
2.7	Frota mundial de veículos automotores 1990 a 2000.	14
2.8	Vendas internas (nacionais e importados) no Brasil – 1957/2002.	14
3.1	Distribuição da quilometragem atual pela frota do veículo.	49
4.1	Composição etária da frota de automóveis leves a gasolina e a álcool na cidade de São Paulo em 2002.	61
4.2	Evolução da frota de automóveis por tipo de combustível na cidade de São Paulo.	63
4.3	Emissões no tubo de escapamento dos veículos na RMSP e CSP (Cidade de São Paulo) em 2002 (1000 t/ano)	66
5.1	Esquema de uma célula a combustível unitária.	69
5.2	Módulos de uma célula a combustível e um stack.	71
5.3	Ilustração de um sistema de célula a combustível completa tipo hidrocarboneto/ar.	73
5.4	Resumo das aplicações e vantagens de cada tipo de célula a combustível em	

	diferentes utilizações.	76
5.5	Sistema de propulsão de um veículo tradicional de combustão interna.	79
5.6	Sistema de suprimento de combustível direto em um veículo com células a combustível.	80
5.7	Sistema de suprimento de combustível indireto em um veículo com células a combustível.	81
5.8	Sistema de propulsão de um veículo híbrido paralelo com célula a combustível.	82
5.9	Sistema de propulsão de um veículo híbrido paralelo com célula a combustível.	82
5.10	Primeiro veículo com célula a combustível	84
5.11	Veículo Hy-Wire da GM	87
5.12	<i>Skateboard</i> utilizado no Hy-Wire	88
5.13	Ford Focus FCV	88
5.14	Veículo F-Cell da DaimlerChrysler	89
5.15	Honda FCX, primeiro veículo com certificação de emissão zero.	90
5.16	Toyota FCHV	91
5.17	Toyota Fine-S conceito de carro de esporte com célula a combustível, apresentado no Detroit Motor Show em 2003	92
5.18	Veículo com célula a combustível X-Trail da Nissan	93
5.19	Veículo táxi da PSA Peugeot Citroën	93
5.20	Fiat Seicento Elettra H ₂ Fuel Cell.	94
6.1	Projeção da frota de veículos leves a gasolina e álcool para a cidade de São Paulo no período de 2003 a 2020.	97
6.2	Evolução da frota de veículos a gasolina para os diversos cenários	98
6.3	Evolução da frota de veículos com células a combustível para os cenários de substituição da frota a gasolina	98
6.4	Emissões originadas pela frota de veículos a gasolina e a álcool no ano de 2020 para os vários cenários	99

Lista de Tabelas

2.1	Evolução do consumo final de energia no setor de transporte (%).	12
2.2	Índice de qualidade do ar.	17
2.3	Limites para concentração de poluentes.	18
2.4	Critérios para avaliar episódios agudos de poluição do ar (resolução CONAMA nº03 de 28/06/90).	19
2.5	Principais fontes de poluição atmosférica e os principais poluentes.	20
2.6	Impactos causados pela poluição atmosférica.	21
2.7	Fontes, características e efeitos dos principais poluentes na atmosfera.	23
2.8	Substâncias tóxicas contidas no gás de escapamento dos veículos.	24
2.9	Tempos médios de vida dos GEE na atmosfera.	29
2.10	Limites de emissões para os veículos de serviço leve nos Estados Unidos.	31
2.11	Consumo de combustível e emissões típicas de um automóvel (gramas/milhas percorridas).	32
2.12	Obrigações de veículos ZEVs após modificações em 2001.	33
2.13	Tipos de veículos ZEVs.	35
2.14	Níveis de veículos AT PZEV.	36
2.15	Cotas de veículos com células a combustível a serem introduzidas no mercado pelos fabricantes de veículos.	36
2.15	Limites máximos de emissão de poluentes para veículos leves de passageiros (novos) a partir de 01.01.1997.	39
2.17	Limites máximos de emissão de poluentes para veículos leves de passageiros, a partir de 01 de Janeiro de 2007 (PROCONVE L-4)	39
2.18	Limites máximos de emissão de poluentes para veículos leves de passageiros a partir	

	de 01 de Janeiro de 2009 (PROCONVE L-5).	40
3.1	Fatores médios de emissão de veículos leves novos ¹	51
3.2	Principais características.	55
3.3	Limites de emissão para cada veículo.	56
3.4	Consumo de combustível.	56
4.1	Composição da frota de veículos para a cidade de São Paulo.	60
4.2	Índice de motorização na cidade de São Paulo.	61
4.3	Consumo de combustível por setores para o Estado de São Paulo (10 ⁹ kcal).	63
4.4	Vendas de combustíveis na cidade de São Paulo.	64
4.5	Estimativa de emissão das fontes móveis de poluição do ar na RMSP em 2002.	65
4.6	Fatores médios de emissão para a frota de automóveis da cidade de São Paulo - 2002.	66
5.1	Características dos vários tipos de células.	74
5.2	Características operacionais das células a combustível.	78
5.3	Tipo de energia x emissões	79
6.1	Composição da frota de veículos em 2020	97
6.2	Redução quantitativa das emissões em relação ao Cenário A (1.000 t/ano)	99
6.3	Consumo de combustível para os cenários na cidade de São Paulo – 2020	100
6.4	Consumo de energia requerido para a produção de hidrogênio a ser consumido pela frota projetada nos cenários de introdução dos veículos com células a combustível	101

Nomenclatura

Abreviações

AFC – *Alkaline fuel cell* (Célula a combustível alcalina)

AT PZEV – *Advanced technology PZEV* (Tecnologia avançada PZEV)

CFC – Clorofluorcarbono

DMFC – *Direct methanol fuel cell* (Célula a combustível de metanol direto)

Ev – *Electric vehicle* (Veículo elétrico)

FC – *Fuel cell* (Célula a combustível)

FCV – *Fuel cell vehicle* (Veículo com célula a combustível)

GEE – Gases de efeito estufa

GNV – Gás natural veicular

GWP – *Global warming potencial* (Potencial de aquecimento global)

HEV – *Hybrid eElectric vehicle* (Veículo elétrico híbrido)

HFC – Hidrofluorcarbono

LEVs – *Low-emission vehicle* (Veículos com baixas emissões)

LPG – *Liquid petroleum gás* (Gás de petróleo liquefeito)

MCFC – *Molten carbonate fuel cell* (Célula a combustível de carbonato fundido)

NMOG – *Non-methane organic gás* (Gás não metano)

PAFC – Phosphoric Acid Fuel Cell (Célula a combustível de ácido fosfórico)

PFC – perfluorcarbono

PEMFC – Próton exchange membrane fuel cell (Célula a combustível de membrana de troca de prótons)

PM – Material particulado

ppm – Parte por milhão

PZEV – *Partial zero emissions vehicle* (Veículo com emissão quase zero)

SOFC – *Solid oxide fuel cell* (Célula a combustível de óxido sólido)

TLEV – *Transitional low-emission vehicle* (Veículos de transição com baixas emissões)

Ultra LEVs – *Ultra-Low-Emission Vehicle* (Veículo com emissão ultra baixa)

ZEV – *Zero-Emission Vehicle* (Veículo com emissão zero)

Siglas

ANFAVEA - Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores

CARB – *California Air Resources Board* (Comitê de Qualidade de Ar da Califórnia)

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

DETRAN SP - Departamento Estadual de Trânsito do Estado de São Paulo

EIA - *Energy Information Administration* (Administração de Informações sobre Energia)

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

IEA – *International Energy Agency* (Agência Internacional de Energia)

IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change* (Grupo Intergovernamental sobre Mudança Climática)

OECD - *Organisation for Economic Co-operation and Development* (Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico)

OMS – Organização Mundial de Saúde

PROCONVE - Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores

PRODESP - Companhia de Processamento de Dados do Estado de São Paulo

RMSP: Região Metropolitana de São Paulo

US EPA – *United States Environmental Protection Agency* (Agência de Proteção ambiental dos EUA)

USP: Universidade de São Paulo

Símbolos

CH₃CHO – acetaldeído

CH₂=CHCHO – acrolein

CH₄ – metano

CO - monóxido de carbono

CO₂ - dióxido de carbono

HC – hidrocarbonetos

HCHO – formaldeído

HCL – ácido clorídrico

HF – ácido fluorídrico

H₂O – água

H₂S – ácido sulfrídico

NO_x - óxidos de nitrogênio (NO e NO₂)

N₂O - óxido nitroso

O₃ - ozônio

SO - monóxido de enxofre

SO₂ - dióxido de enxofre

SO₃ - trióxido de enxofre

SO_x - óxidos de enxofre

R-CHO - aldeídos

Ah – ampere hora

GJ – gigajoules

TJ – terajoules

KW – quilowatts

mtC – milhões de toneladas de carbono

Capítulo 1

Introdução

O processo de urbanização, a expansão da produção industrial, o aumento excessivo do uso de automóveis (Hogan, 2000) e da geração de energia expõem os habitantes das grandes cidades a níveis de poluição do ar que excedem os limites máximos admitidos pela Organização Mundial de Saúde – OMS, causando vários problemas à saúde da população. Além disso, a elevada emissão de compostos de carbono, resultante da queima de combustíveis fósseis, contribui para o aumento do efeito estufa, que tem sido apontado como um dos responsáveis pela mudança climática global. Percebe-se, atualmente, em todo o planeta, que as grandes cidades enfrentam problemas de poluição do ar derivados do crescimento do tráfego de veículos urbanos.

Além disso, já vem sendo divulgado que as fontes de petróleo se tornarão escassas para as próximas gerações (Ramage, 1997), existindo então uma necessidade de se estabelecer medidas preventivas como: conservação dos produtos de petróleo, desenvolvimento de combustíveis alternativos e de fontes renováveis de energia.

A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) apresenta a maior frota regional circulante do país com 7,2 milhões de veículos automotores (incluem-se aqui todos os tipos de veículos, leves e pesados), que representam 1/5 da frota nacional (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - CETESB, 2003). Somente na cidade de São Paulo concentram-se 5,5 milhões de veículos, aproximadamente 1 veículo para cada 2 habitantes, valor este entre os mais

altos índices do mundo (World Bank, 2002), com uma tendência crescente de uso de veículos particulares em detrimento do transporte público.

O aumento da frota de veículos também é responsável pelo consumo crescente de combustível de fonte não renovável. O Estado de São Paulo responde atualmente por aproximadamente 40% do consumo nacional de gasolina, 25% de óleo Diesel e 35% de álcool combustível¹, tornando-se o maior consumidor nacional de energia automotiva (Secretária do Estado de Meio Ambiente SP, 2000).

Além do CO₂, que é um gás que contribui para o efeito estufa, mas não é considerado um poluente, os tubos de escapamentos dos veículos emitem uma mistura com mais de 1.000 poluentes diferentes, sendo que as maiores emissões são as de monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC), óxidos de nitrogênio (NO_x), óxidos de enxofre (SO_x), ácidos orgânicos e material particulado (MP). Apesar dos veículos automotores não serem a maior fonte de material particulado e óxidos de enxofre, sua contribuição é significativa, pois a emissão ocorre no nível da rua e, com isso, a população sofre uma exposição acentuada a esses poluentes veiculares.

Estima-se que estes veículos lancem na atmosfera 80% de toda a poluição do ar (CO, HC, NO_x, MP e SO_x) na RMSP, podendo-se chegar a 98% se forem consideradas apenas as emissões de monóxido de carbono (CETESB, 2003).

Outra estatística preocupante é fornecida pelo Laboratório de Poluição Atmosférica da Faculdade de Medicina da USP, onde se constata que em dias de altos níveis de poluição do ar o risco de morte por doenças respiratórias e cardiovasculares aumenta em 12% e ocorre também um aumento de 50% nos atendimentos em prontos-socorros da cidade, a maioria envolvendo pessoas com bronquite ou pneumonia. Quem sofre mais são as crianças, os idosos e os portadores de doenças respiratórias crônicas (Saldiva, Braga & Pereira, 2001).

¹ Álcool combustível é o álcool utilizado em motores de combustão interna, mais conhecido como álcool etílico. Ele pode ser hidratado, que é utilizado diretamente nos motores de veículos a álcool ou anidro, que é utilizado junto com a gasolina pura para formar a atual gasolina C (78% de gasolina + 22% de álcool).

A CETESB, através do monitoramento da qualidade do ar, tem mostrado que os índices de poluição do ar na cidade de São Paulo, principalmente o monóxido de carbono, têm apresentado uma significativa redução devido ao uso de catalisadores e outras melhorias tecnológicas nos veículos, contudo, vem aumentando o crescimento de ozônio (O₃) que também é consequência da poluição veicular.

O Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE foi estabelecido e regulamentado a partir de 1986 pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA, através de várias Resoluções, sendo suportado pela Lei n.º 8.723/93, e prevê limites de emissões para os veículos novos. Entretanto, se os mesmos não passarem por manutenção constante e adequada podem, quando desregulados, emitir muito mais poluentes que o previsto, representando um impacto significativo na qualidade do ar (Laboratório Interdisciplinar de Meio Ambiente - LIMA, 2002).

Este trabalho tratará dos veículos elétricos com células a combustível como uma alternativa de transporte urbano, em substituição aos veículos leves de combustão interna do ciclo Otto. Esses veículos elétricos são considerados “limpos”, pois a célula a combustível é um dispositivo eletroquímico onde a geração de energia elétrica ocorre diretamente da energia química da reação do hidrogênio com o oxigênio, tendo como subproduto água.

1.1 Objetivo

Este trabalho teve como objetivo principal determinar quantitativamente os impactos ambientais e na matriz de consumo de combustíveis advindos da introdução de uma frota de veículos leves com células a combustível a hidrogênio na cidade de São Paulo.

Para determinar estes impactos foram elaborados para a cidade de São Paulo alguns cenários para diferentes frotas de veículos, que foram comparados com um cenário tendencial de veículos convencionais, tomando-se como ano base o ano de 2002. Como objetivos secundários buscou-se:

- a) estudar e quantificar a frota de veículos leves na cidade de São Paulo;

- b) estimar o consumo de combustíveis desta frota de veículos e suas emissões atmosféricas;
- c) analisar a tecnologia das células a combustível para uso em veículos automotores;
- d) estimar o consumo de hidrogênio de diferentes frotas de veículos com células a combustível e suas respectivas emissões veiculares.

1.2 Justificativa

É importante ressaltar que a proposta deste trabalho tem como pano de fundo o modelo de desenvolvimento capitalista globalizado (Altvater, 1995), que privilegia o individual em detrimento do coletivo. Também é importante lembrar que existem várias outras alternativas para o problema aqui apresentado (melhoria do transporte coletivo, restrição de circulação, substituição do combustível, mudança dos hábitos individuais em prol do coletivo entre outras) que infelizmente não atendem aos interesses deste modelo de desenvolvimento.

Substituir os veículos novos de combustão interna por veículos com células a combustível tem sido a proposta adotada pelos países desenvolvidos, pois tende a melhorar a qualidade de vida urbana, através da redução dos impactos dos poluentes atmosféricos na saúde da população e no meio ambiente, garantindo um futuro melhor para as próximas gerações. Por outro lado permite reduzir o consumo de combustíveis de origem fóssil, diminuindo a dependência deste energético por parte dos países desenvolvidos, uma vez que o hidrogênio pode ser obtido através de fontes renováveis e também porque os veículos com células a combustível apresentam maior eficiência energética que os veículos de combustão interna.

A troca da frota de veículos aqui proposta, baseada no modelo desenvolvido para a cidade de Los Angeles, que visa exclusivamente reduzir as emissões de poluentes locais, não se destina a resolver um dos problemas críticos na cidade de São Paulo que são os congestionamentos, pois não ocorrerá a redução da frota de veículos. Porém ensaios realizados pela CETESB (Murgel & Szwarc, 1990) mostraram que durante os congestionamentos, os veículos do ciclo Otto apresentam um aumento médio de 25% nas emissões de monóxido de carbono e 20% nas emissões de hidrocarbonetos, assim como foi verificado um aumento de 20% no consumo de

combustível. Este fato é explicado como sendo consequência do mal uso do veículo no tráfego local, que não permite desenvolver as velocidades projetadas para o melhor consumo de combustível.

Outra razão para a substituição desta frota de veículos é que os padrões de concentração de poluentes atualmente definidos estão acima do aceitável em termos de saúde pública. Isto quer dizer que mesmo que os índices de poluição se mantenham dentro dos limites estabelecidos em lei, como será visto no capítulo 4, eles ainda são insatisfatórios para garantir o bem-estar da população (Jacobi & Macedo, 2000).

Neste trabalho também não será considerada a possibilidade de melhoria da qualidade do ar nas grandes metrópoles através da ampliação e da melhoria do transporte público, que representa uma medida eficaz, de aplicação imediata. O objeto deste estudo é a frota de veículos leves, particulares, que representam para seus usuários economia de tempo, maior privacidade e conforto, além de serem vistos como um símbolo de status (Jacobi & Macedo, 2000; Aquino, Pereira & Lopes, 2000). Deve-se observar que a alternativa aqui analisada não é excludente ou concorrente às políticas de uso do transporte de massas, mas sim complementar, podendo-se afirmar que os melhores resultados seriam alcançados através da aplicação simultânea destas duas medidas.

1.3 Delimitação

Este trabalho tratará apenas das emissões originadas por veículos leves novos de combustão interna na cidade de São Paulo, a gasolina e a álcool, sendo que não será objeto de estudo as emissões provenientes de veículos a gás natural, Diesel e motocicletas.

Com relação aos veículos com células a combustível, considera-se que eles utilizarão como combustível hidrogênio gasoso, armazenado em tanques de alta pressão, como já ocorre nos veículos com gás natural. Não serão discutidos neste trabalho a produção de hidrogênio (apenas será realizada uma estimativa da produção por eletrólise para determinar quando de energia será necessário ter disponível para abastecer a frota a ser introduzida), os tipos de armazenamento e a

infra-estrutura de distribuição e abastecimento necessários. Também não serão objeto de estudos específicos as células a combustível, seus processos de fabricação, materiais utilizados e custos.

Neste momento, também não será discutida a questão econômica relacionada à introdução desta frota de veículos. O problema ficará restrito apenas a análise da quantidade de emissões de poluentes automotivos.

1.4 Organização

Esta dissertação está estruturada em sete capítulos. O Capítulo 1 faz a introdução do problema que se pretende analisar, indicando os procedimentos a serem adotados para seu estudo. Apresenta também os objetivos, as delimitações do tema e a organização da dissertação.

O Capítulo 2 é a Revisão de Literatura, onde são apresentados e analisados trabalhos semelhantes ao aqui proposto, que buscam melhorar a qualidade do ar em grandes cidades através de mudanças no transporte urbano. Também são descritos os impactos das emissões veiculares na saúde pública e no meio ambiente local, regional e global.

O Capítulo 3 enfoca o consumo de combustíveis veiculares na cidade de São Paulo, as emissões associadas ao uso destes combustíveis e os impactos locais que elas ocasionam.

O Capítulo 4 aborda os veículos com células a combustível. Neste capítulo é descrito o funcionamento básico da célula a combustível e apresenta os tipos de células disponíveis no mercado, dando ênfase a célula do tipo PEMFC. A seguir discute-se as aplicações desta tecnologia em veículos leves, suas vantagens e desvantagens. Também apresenta um resumo sobre as principais montadoras que estão desenvolvendo veículos/protótipos/conceito que utilizam esta tecnologia.

O Capítulo 5 apresenta a metodologia que será utilizada nesta dissertação e descreve os cenários que foram propostos para a introdução dos veículos com células a combustível na cidade de São Paulo.

O Capítulo 6 descreve as alterações provocadas na matriz de combustível e nas emissões veiculares a partir dos cenários propostos. A seguir analisa os resultados que foram obtidos com a introdução dos veículos novos com células a combustível na cidade de São Paulo.

Finalmente, o Capítulo 7 apresenta as conclusões e indica caminhos para futuros trabalhos, que complementarão a proposta aqui considerada.

O Anexo I apresenta um glossário com alguns termos utilizados nesta dissertação. O Anexo II contém várias planilhas referentes à frota da cidade de São Paulo até o ano de 2002 e o os cálculos de emissões de poluentes para o mesmo ano. O Anexo III apresenta os veículos com células a combustível desenvolvidos até o ano de 2003. O Anexo IV demonstra o cálculo estequiométrico utilizado para contabilizar as emissões de CO₂. O Anexo V apresenta as planilhas para as frotas projetadas e os respectivos inventários emissões para os três cenários no ano de 2020. O Anexo VI contém as planilhas para projeção da frota de veículos da cidade de São Paulo e cálculo de emissões de poluentes, referentes a um Cenário D, que não foi tratado no Capítulo 5.

Capítulo 2

Revisão de Literatura

O consumo elevado de energia do petróleo nos dias atuais é o resultado da produção em massa de veículos no início do Século XX, que teve como consequência um rápido crescimento na demanda de petróleo combustível (Hirao & Pefley, 1988). Um maior número de veículos aliados ao uso de combustíveis derivados do petróleo significou o aumento de poluição atmosférica devido aos gases de escapamento dos automóveis. Esta poluição tornou-se séria na década de 70, originando o maior problema para a qualidade de vida, e mostrou-se inseparável da destruição ambiental (Hirao & Pefley, 1988).

Esse capítulo trata inicialmente da relação entre o consumo de gasolina pelos veículos leves (automóveis) e a emissão de dióxido de carbono na atmosfera por esses veículos. A seguir apresenta quantitativamente a contribuição dos automóveis para a emissão de poluentes atmosféricos e expõem quais são as consequências destas emissões para o meio ambiente e para os seres humanos. Em vista destes problemas, apresenta também as medidas tomadas pelos governos na tentativa de minimizar o problema da poluição atmosférica de origem veicular.

Finalmente, realiza uma revisão e uma análise dos principais trabalhos que tiveram objetivos semelhantes aos aqui buscados.

2.1 Consumo de energia e emissões de CO₂

A energia é essencial para a existência da vida na Terra. Ao longo de quase toda sua História a humanidade vem obtendo os mais diversos benefícios através do aproveitamento de alguma fonte de energia.

Os recursos energéticos são importantes por suas aplicações, entre as quais destacam-se a geração de energia elétrica e seu uso como combustível. A utilização da energia elétrica permite o desenvolvimento da produção e transformação dos bens naturais em bens utilizáveis e também visa atender inúmeras outras necessidades, tais como iluminação artificial, aquecimento, seja de água ou do ambiente. Já os combustíveis são utilizados principalmente nos diferentes meios de transportes ou também na geração indireta de energia elétrica.

Devido à grande disponibilidade e à facilidade no uso final propiciada por grandes desenvolvimentos tecnológicos no aproveitamento dos combustíveis fósseis, principalmente no caso dos derivados do petróleo, eles se tornaram um dos recursos mais importantes para as sociedades desenvolvidas. Atualmente, 80% de toda a energia aproveitada pela humanidade tem origem nestes recursos finitos, como mostrado na figura 2.1. Mesmo que as reservas destes recursos permanecessem acessíveis por um tempo consideravelmente longo, os danos ambientais decorrentes de sua utilização já justificariam tal empenho.

O petróleo tem sido a fonte de energia primária dominante, sendo que cerca de 57% de todo o petróleo consumido no mundo (International Energy Agency - IEA, 2003) destina-se ao setor de transporte, conforme indicado na figura 2.2.

Segundo a IEA, no ano de 2001, cerca de 52,3% do consumo de energia ocorreu nos países pertencentes à OECD², sendo que estes mesmos países também foram responsáveis pela emissão de 23 milhões de toneladas de CO₂ na atmosfera. Projeções realizadas pelo Energy Information Administration - EIA (2003) indicam um aumento de 58% no consumo mundial de energia para

² Organisation for Economic Co-operation and Development, composta pelos seguintes países membros: Alemanha, Austrália, Áustria, Bélgica, Canadá, Coreia, Dinamarca, Espanha, Estados Unidos, Finlândia, França, Grécia, Hungria, Inglaterra, Islândia, Irlanda, Itália, Japão, Luxemburgo, México, Nova Zelândia, Noruega, Países Baixos, Polónia, Portugal, República Eslovaca, República Tcheca, Suécia, Suíça e Turquia.

o período de 2001 a 2025, sendo que as nações em desenvolvimento³ serão responsáveis por 42,1% deste consumo.

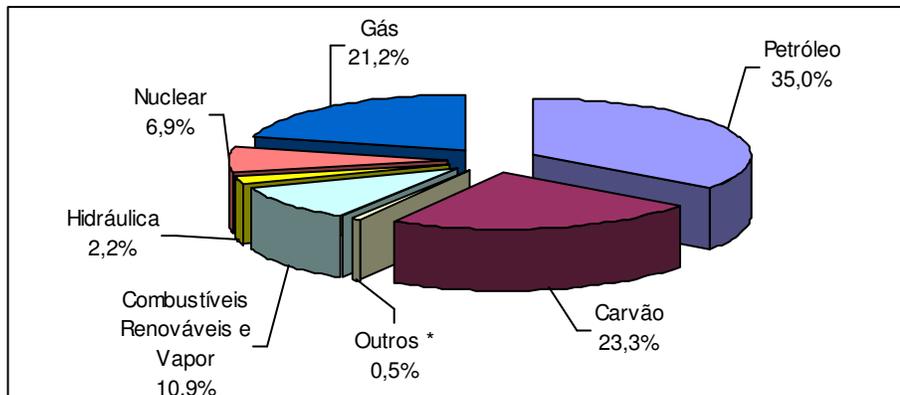


Figura 2.1 – Produção mundial de energia primária por fonte em 2001.

* Inclui a geotérmica, solar, eólica, etc.

Fonte: IEA, 2003.

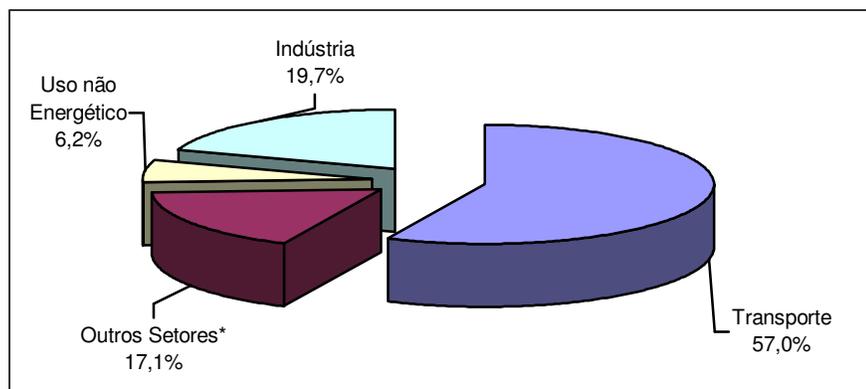


Figura 2.2 – Consumo mundial de petróleo por setor em 2001.

* compreende o setor agrícola, comercial, serviços público, residencial e não residencial.

Fonte: IEA, 2003.

A combustão do carvão, do petróleo e do gás natural representa cerca de 80% de todas as emissões mundiais de CO₂, sendo que a extração e o uso dos combustíveis fósseis também emitem metano (CH₄), certa quantidade de CO₂, grandes quantidades de monóxido de carbono e outros poluentes atmosféricos. O CH₄ e o CO₂ são conhecidos pelo nome de “Gases de Efeito

³ Ásia, Oriente Médio, África, América Central e América do Sul.

Estufa” e são apontados como sendo os principais responsáveis pelo aumento da temperatura média da biosfera do planeta verificada nas últimas décadas. A figura 2.3 mostra as emissões mundiais de CO₂ mundiais.

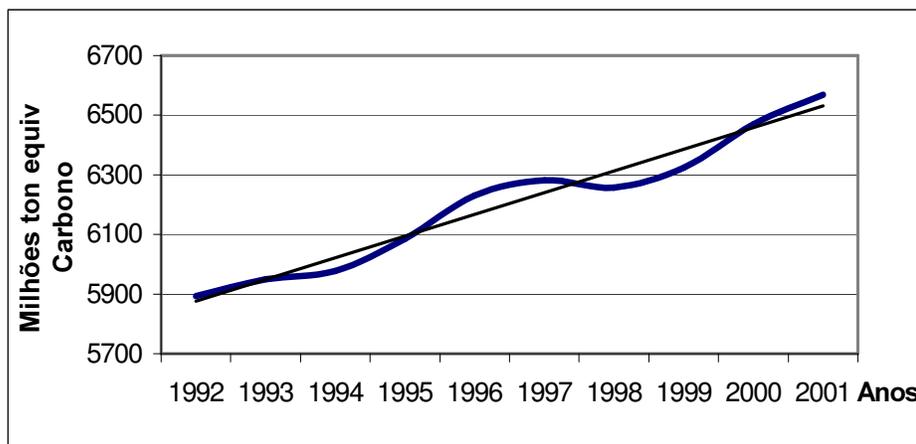


Figura 2.3 – Emissões Mundiais de CO₂ originadas do consumo de combustíveis fósseis.

Fonte: EIA, 2003.

A tendência é que a produção destes gases aumente a partir de incrementos no consumo de combustíveis fósseis. As projeções da EIA (2003) indicam um aumento de 3,8 bilhões de toneladas equivalentes de carbono para o período de 2001 a 2025, o que representa um crescimento de 1,9% ao ano. Os derivados de petróleo e do gás natural contribuirão com 1,5 e 1,3 bilhões de toneladas respectivamente, a partir de 2001, e o carvão proverá 1,1 bilhão de toneladas de carbono equivalentes.

No Brasil, diferindo do que ocorre no mundo, a produção de energia elétrica é principalmente de origem hidráulica (Ministério das Minas e Energia - MME, 2002). Porém, pode-se observar o aumento do consumo de derivados de petróleo no país como indicado na figura 2.4.

Este aumento de consumo por combustíveis fósseis é devido principalmente ao setor de transporte, no qual o segmento rodoviário é o maior consumidor de energia (tabela 2.1), correspondendo a 90,0% do total (MME, 2002). Os principais combustíveis utilizados neste setor são indicados na figura 2.5.

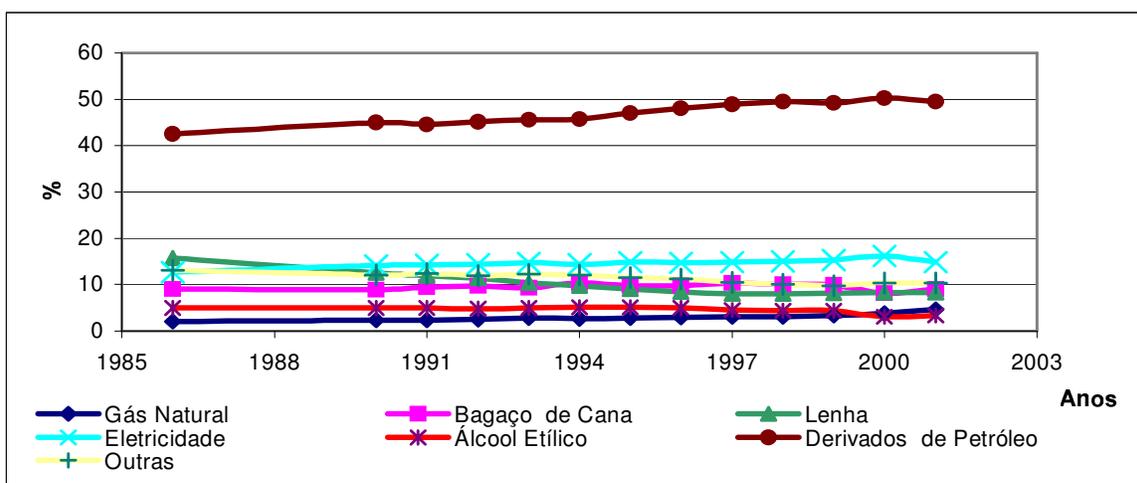


Figura 2.4 - Consumo final de energia no Brasil por fonte.

Fonte: MME, 2002.

Tabela 2.1 – Evolução do consumo final de energia no setor de transporte (%).

	1986	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Rodoviário	21,6	23,0	23,7	23,5	23,8	24	25,4	26,1	26,0	26,5	25,9	25,5	25,7
Ferroviário	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Aéreo	1,6	1,5	1,6	1,5	1,5	1,5	1,7	1,7	1,8	1,9	1,8	2,1	1,9
Hidroviário	1,7	0,9	0,8	0,8	0,9	0,8	0,8	0,9	0,6	0,6	0,6	0,7	0,6
Transporte	25,5	25,9	26,6	26,3	26,7	26,6	28,2	29,0	28,6	29,3	28,6	28,5	28,6

Fonte: MME, 2002.

De modo análogo aos outros países, no Brasil, as emissões de CO₂ também vêm aumentando gradativamente, como mostra a figura 2.6. Estas emissões estão diretamente associadas à queima de combustíveis fósseis e às queimadas.

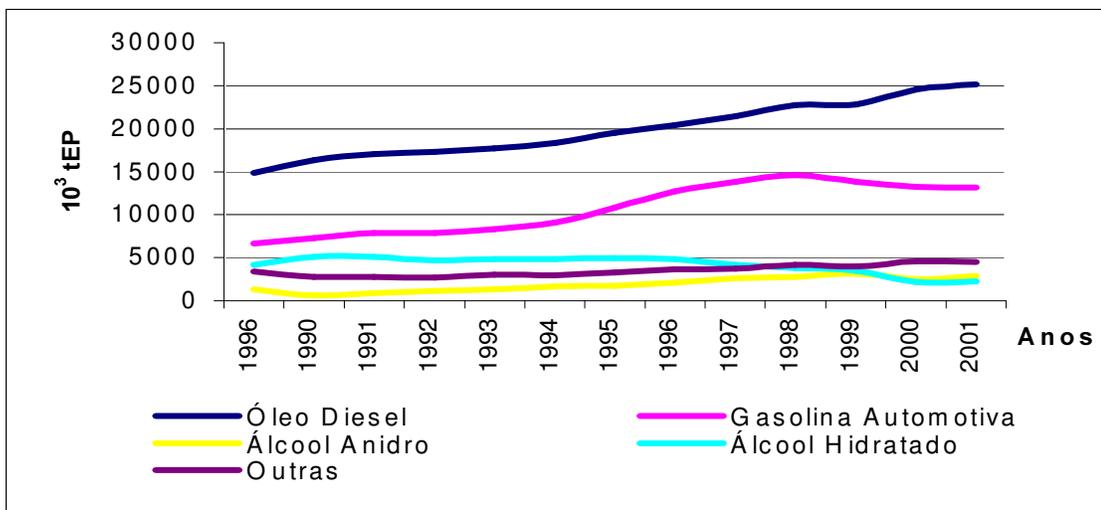


Figura 2.5 - Consumo de combustível pelo setor de transporte no Brasil.

Fonte: MME, 2002.

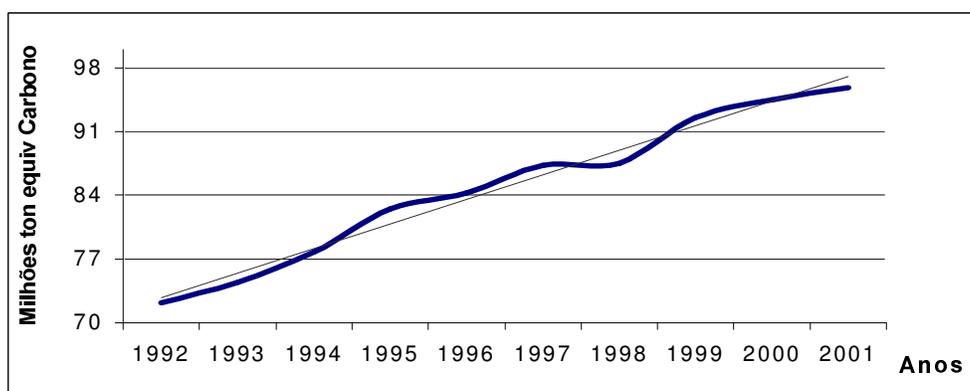


Figura 2.6 – Emissões Brasileiras de CO₂ originadas do consumo de combustíveis (MtC – milhões de toneladas equivalentes de Carbono).

Fonte: EIA, 2003.

O aumento do consumo de energia do petróleo associado à maior emissão de CO₂ se deve principalmente à crescente taxa de motorização da população mundial. Para se ter uma idéia, a quantidade de CO₂ na atmosfera, por exemplo, calculada em cerca de 0,03%, já atinge até 0,07%, mais que o dobro, em grandes cidades e mais ainda em grandes concentrações industriais. Nos últimos cem anos o aumento de CO₂ foi de 15%, devido, principalmente, à queima dos combustíveis fósseis e à perda de extensas áreas florestais (Acioli, 1993). A figura 2.7 mostra como a frota mundial de veículos automotores cresceu no período de 1991 a 2000.

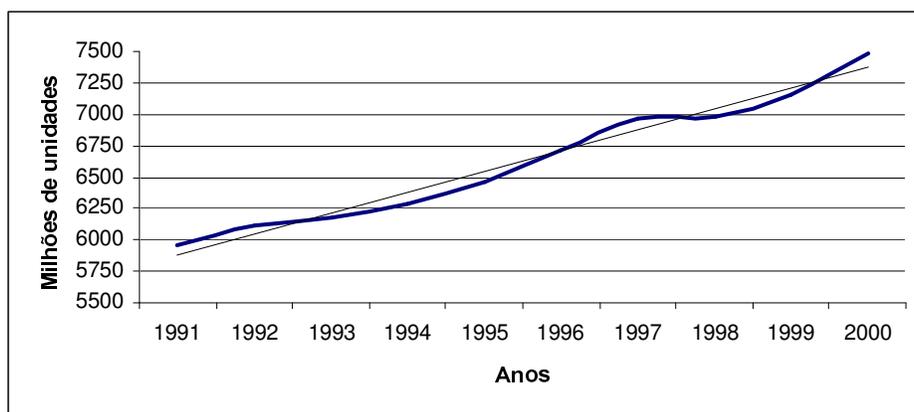


Figura 2.7 – Frota mundial de veículos automotores 1990 a 2000.

Fonte: ANFAVEA, 2003.

No Brasil o número de veículos em circulação passou de 3 milhões em 1970, para cerca de 29 milhões em 2001, 68% constituídos por automóveis (Secretária do Estado do Meio Ambiente SP, 2003). Segundos dados da Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores - ANFAVEA (2003), no ano de 2002 a venda de automóveis representou 81% do total de veículos vendidos no Brasil. A figura 2.8 mostra a curva de vendas internas para o período de 1957 a 2002.

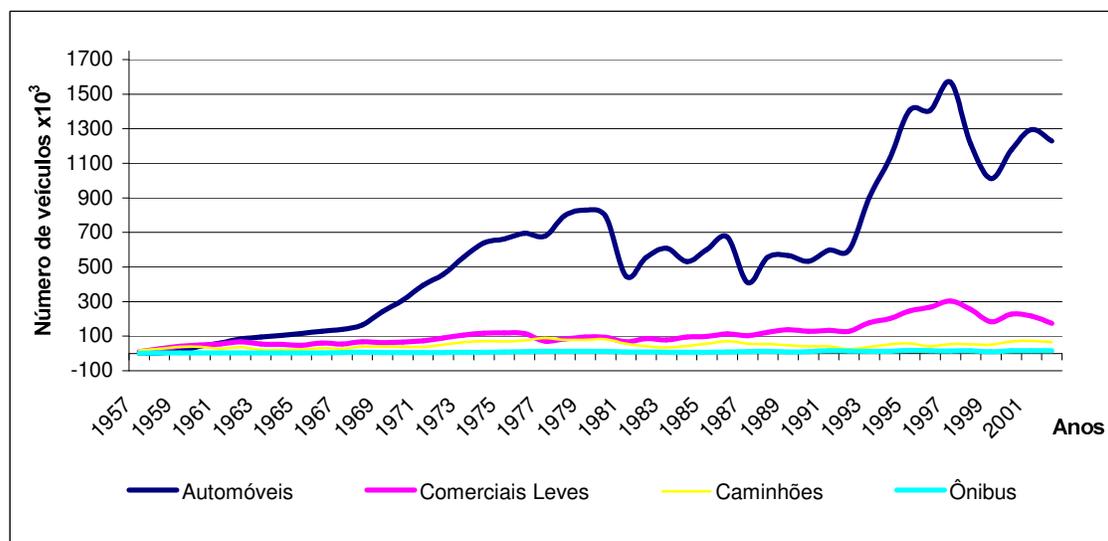


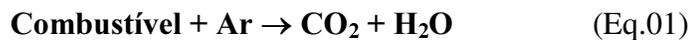
Figura 2.8 - Vendas internas (nacionais e importados) no Brasil – 1957/2002.

Fonte: ANFAVEA, 2003.

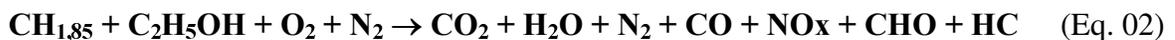
2.2 Emissões Veiculares

A poluição atmosférica urbana é considerada um dos problemas ambientais mais significativos tanto em países desenvolvidos como nos em desenvolvimento. De um modo geral, os meios de transporte, como automóveis, ônibus e caminhões, são responsáveis por parte importante da degradação da qualidade ambiental nas áreas urbanas.

Quando se queima um combustível baseado no carbono lança-se CO_2 e água para atmosfera, ao mesmo tempo em que se consome oxigênio (geralmente utiliza-se o oxigênio contido no ar), como mostra a equação 01 (ANFAVEA, 2002).



Se o combustível for fóssil (petróleo, carvão, gás natural, xisto) esse processo tem um caráter irreversível, pois além de consumir o oxigênio, a queima destes combustíveis aumenta, de fato, a quantidade de CO_2 na atmosfera. Como os processos de queima da gasolina ou do óleo Diesel em um motor nunca são completos, eles inevitavelmente lançam também para a atmosfera dióxido de carbono, hidrocarbonetos, aldeídos (R-CHO), óxidos de nitrogênio (NO_x), óxidos de enxofre (SO_x) e material particulado. A formação de NO_x ocorre devido ao nitrogênio e ao oxigênio existentes no ar e a emissão de SO_x devido ao enxofre geralmente contido nesses combustíveis. O resultado final está esquematizado na equação 02 (ANFAVEA, 2002). O ozônio troposférico (O_3), outro importante poluente, tem a sua formação associada à presença de HC e NO_x .



A queima de combustíveis fósseis gera impactos ambientais de alcance, local, regional e global, assim como o aumento da concentração na atmosfera de poluentes de efeito tóxico como monóxido de carbono, ozônio, dióxido de enxofre e material particulado.

A expansão das frotas circulantes, associadas às características tecnológicas dos veículos mais antigos e dos combustíveis então em uso, acabam por acarretar uma elevação preocupante nos níveis de emissões automotivas.

As emissões originadas pelo uso de veículos de combustão interna podem ser divididas nas seguintes categorias:

- Emissões de gases e partículas pelo escapamento do veículo, subprodutos da combustão lançados à atmosfera;
- emissões de gases do cárter do motor (subprodutos da combustão que passam pelos anéis de segmento do motor e vapores do óleo lubrificante);
- emissões de partículas provenientes do desgaste de pneus, freios e embreagem;
- ressuspensão de partículas de poeira do solo e;
- emissões evaporativas de combustível nas operações de transferência (associadas ao armazenamento e abastecimento de combustível).

A emissão de poluentes varia de acordo com o tipo de veículo (leve ou pesado), com o ano/modelo, com o tipo de combustível utilizado, com a relação ar/combustível do processo de combustão, com a velocidade do motor, com a geometria da câmara de combustão e com a existência de equipamento de controle de emissão (catalisador).

2.3 Poluição atmosférica e qualidade do ar

Misturados ao oxigênio do ar, vital para a nossa sobrevivência, existem poluentes – como o monóxido de carbono, dióxido de enxofre, ozônio, óxidos de nitrogênio, hidrocarbonetos e uma classe de materiais particulados em suspensão – que podem ter efeitos prejudiciais à saúde humana. A maior ou menor concentração desses poluentes na atmosfera é que determina a qualidade do ar que se respira.

A legislação brasileira (Silva, 2000) define a poluição como sendo:

“a degradação da qualidade ambiental resultante de atividades que direta ou indiretamente:

- a) prejudiquem a saúde, a segurança, o bem-estar da população;
- b) criem condições adversas às atividades sociais e econômicas;
- c) afetem desfavoravelmente a biota;
- d) afetem as condições estéticas ou sanitárias do meio ambiente;
- e) lancem matérias ou energia em desacordo com os padrões ambientais estabelecidos”.

A poluição do ar se torna pior principalmente nas regiões metropolitanas, pois além de possuir uma grande densidade populacional, coexistem uma grande frota de veículos (fontes móveis) e um vasto parque industrial (fontes estacionárias). Por isso a concentração dos poluentes na atmosfera deve respeitar, no caso brasileiro, os índices estabelecidos na resolução CONAMA N.º3/90, que aparece na tabela 2.2. O índice nacional foi estabelecido com base no PSI – Pollutant Standarts Index, parâmetro adotado há vários anos nos Estados Unidos e Canadá, sendo um número adimensional.

Tabela 2.2 – Índice de qualidade do ar.

ÍNDICE	QUALIDADE DO AR
0 - 50	BOA
50 - 100	REGULAR
101 –199	INADEQUADA
200 –299	MÁ
300 –399	PÉSSIMA
>400	CRÍTICA

Fonte: CETESB, 2003a.

São estabelecidos dois tipos de padrão de ar: os primários e os secundários. Segundo o CONAMA:

“São padrões primários de concentração de qualidade do ar as concentrações de poluentes que, ultrapassadas, poderão afetar a saúde da população, podendo ser entendidos como níveis máximos toleráveis de concentração de poluentes atmosféricos, constituindo-se em metas de curto e médio prazo.

São padrões secundários de qualidade do ar as concentrações de poluentes atmosféricos abaixo das quais se prevê o mínimo efeito adverso sobre o bem estar da população, assim como o

mínimo dano à fauna e à flora, aos materiais e ao meio ambiente em geral, podendo ser entendidos como níveis desejados de concentração de poluentes, constituindo-se em metas de longo e médio prazo.”

A tabela 2.3 estabelece o limite para a concentração de poluentes segundo o padrão CONAMA.

Tabela 2.3 – Limites para concentração de poluentes.

Padrões Nacionais de Qualidade do Ar (Resolução CONAMA n.º3 de 28/06/90)			
Poluentes	Tempo de Amostragem	Padrão Primário	Padrão Secundário
Partículas Totais em Suspensão ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24 horas (1)	240	150
	MGA (2)	80	60
Dióxido de Enxofre ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24 horas	365	100
	MAA (2)	80	40
Monóxido de Carbono	1 hora (1)	40.000	40.000
	8 horas	35.000 ppm	35.000 ppm
		10.000	10.000
		(9 ppm)	(9 ppm)
Ozônio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1 hora (1)	160	160
Fumaça ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24 horas (1)	150	100
	MAA (3)	60	40
Partículas Inaláveis ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24 horas (1)	150	150
	MAA (3)	50	50
Dióxido de Nitrogênio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1 hora (1)	320	190
	MAA (3)	100	100

(1) Não deve ser excedido mais de uma vez ao ano.

(2) Média geométrica anual.

(3) Média aritmética anual.

ppm – partícula por milhão

Fonte: CETESB, 2003a.

O CONAMA estabelece ainda os critérios para episódios agudos de poluição do ar. Estes critérios são apresentados na tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Critérios para avaliar episódios agudos de poluição do ar (resolução CONAMA nº03 de 28/06/90).

Parâmetros	Atenção	Alerta	Emergência
Dióxido de Enxofre ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) - 24h	800	1.600	2.100
Partículas Totais em Suspensão ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) - 24h	375	625	875
SO ₂ x PTS ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) - 24h	65.000	261.000	394.000
Monóxido de Carbono (ppm) - 8h	15	30	40
Ozônio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) - 1h	400*	800	1.000
Partículas Inaláveis ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) - 24h	250	420	500
Fumaça ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) - 24h	250	420	500
Dióxido de Nitrogênio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) - 1h	1.130	2.260	3.000

Fonte: CETESB, 2003a.

2.3.1 Fontes de Poluição Atmosférica

As fontes de poluição atmosférica podem ser fixas ou móveis. Em relação às fontes fixas, as indústrias constituem as fontes de maior potencial poluidor deste tipo, ao lado das quais figuram as lavanderias, os hospitais e os hotéis, entre outras. As fontes móveis de poluição são representadas pelos trens, aviões, embarcações marinhas e veículos automotores. As principais fontes de poluição atmosférica são listadas na tabela 2.5.

Se a alguns anos atrás as fontes fixas respondiam por quase toda a poluição atmosférica, hoje são os veículos automotores os principais poluidores, cuja emissão corresponde a aproximadamente 90% da poluição atmosférica, por exemplo, na cidade de São Paulo (Saldiva, Braga & Pereira, 2001).

Tabela 2.5 – Principais fontes de poluição atmosférica e os principais poluentes.

Fontes		Poluentes
Fixas	Combustão	Material particulado, dióxido de enxofre e trióxido de enxofre, monóxido de enxofre, monóxido de carbono, hidrocarbonetos e óxidos de nitrogênio.
	Processo Industrial	Material particulado (fumos, poeiras, névoas) Gases: SO ₂ , SO ₃ , HCl Hidrocarbonetos, mercaptanas, HF, H ₂ S, NO _x
	Queima de Resíduos Sólidos	Material Particulado Gases: SO ₂ , SO ₃ , HCl, NO _x
	Outros	Hidrocarbonetos, material particulado
Móveis	Veículos automotores, aviões, motocicletas, barcos, locomotivas, etc.	Material particulado, monóxido de carbono, dióxido de carbono, óxidos de enxofre, óxidos de nitrogênio, hidrocarbonetos, aldeídos, ácidos orgânicos
Naturais		Material particulado: poeiras Gases: SO ₂ , H ₂ S, CO, NO, NO ₂ , hidrocarbonetos
Reações Químicas na Atmosfera	Ex: HC + NO _x (luz solar)	Poluentes secundários: O ₃ , aldeídos, ácidos orgânicos, nitratos orgânicos, aerossol fotoquímico, etc.

Fonte: Azuaga, 2000.

Segundo a OMS, mais de 50% das cidades do mundo possuem um nível de monóxido de carbono superior ao limite considerado saudável, devido às emissões lançadas na atmosfera pelos automóveis. Estudos médicos (Silva, 2000) revelam que os automóveis são responsáveis por aproximadamente:

- 90% das emissões de monóxido de carbono, hidrocarbonetos e óxidos de nitrogênio;
- 60% das emissões de enxofre;
- 50% das emissões de partículas que oferecem riscos à saúde pública.

2.4 Impactos ambientais decorrentes do aumento da poluição atmosférica

Os efeitos da poluição atmosférica se caracterizam tanto pela alteração das condições consideradas normais como pelo aumento de problemas já existentes, e podem causar impactos no local de origem, na região e também no planeta (impacto global). A produção e o uso da

energia são apontados como a causa principal de muitos dos atuais problemas ambientais, como mostrado na tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Impactos causados pela poluição atmosférica.

Impacto	Efeito	Principal causa
Local	Poluição urbana do ar	Uso dos combustíveis fósseis para transporte
	Poluição do ar em ambientes fechados	Uso de combustíveis sólidos (biomassa e carvão) para aquecimento, cocção e processo industrial
Regional	Chuva ácida	Emissões de enxofre e nitrogênio, material particulado e ozônio na queima de combustíveis fósseis, principalmente no transporte
Global	Mudança climática global	Emissões de gases de efeito estufa na queima de combustíveis fósseis.

Fonte: Villanueva, 2002.

Impactos locais

A poluição urbana do ar é sem dúvida o efeito ambiental mais indesejável e visível do mundo globalizado. Desde que o homem intensificou as atividades antropogênicas trouxe maior contribuição para a poluição atmosférica e desde então muitos “episódios agudos de poluição” têm ocorrido e provocado morte, doenças e desconforto, principalmente em grandes centros urbanos. O episódio mais crítico aconteceu em Londres no ano de 1952, quando morreram 4.000 pessoas, vítimas da poluição atmosférica ou smog, como ficou conhecido este fenômeno.

Estes episódios agudos de poluição do ar ocorrem devido à permanência de condições desfavoráveis para a dispersão dos poluentes. Pode-se citar como condições desfavoráveis a ausência de chuvas e de ventos e o fenômeno da inversão térmica (Álvares Júnior, Lacava & Fernandes, 2002).

Os impactos locais da poluição atmosférica podem ser classificados como físicos, químicos e biológicos. Entre os efeitos físicos estão a sujidade e a perda de visibilidade devido a grandes concentrações de material particulado. Como incide diretamente na estética da cidade onde ocorre, este tipo de impacto tem recebido mais atenção do que provavelmente receberia, se os danos à saúde fossem considerados (Álvares Júnior, Lacava & Fernandes, 2002).

Os efeitos químicos da poluição podem ser percebidos pela deterioração de metais, estruturas, superfícies, pinturas, obras de artes, entre outros, quando expostos a atmosferas ácidas com altas concentrações ambientais, principalmente de SO_x, NO_x e fluoretos.

Os efeitos biológicos da poluição do ar são correlacionados, direta ou indiretamente, através dos estudos epidemiológicos⁴. As correlações indiretas incluem a maioria das doenças respiratórias e mais recentemente doenças cardíacas. Já os efeitos diretos são melhores observados em plantas do que em seres humanos e animais. Algumas plantas sensíveis a determinados poluentes são frequentemente utilizadas como bioindicadores da presença de níveis de contaminação.

Os estudos e as pesquisas epidemiológicas individualizadas para cada poluente são sempre restringidos pela dificuldade de separar seus efeitos a longo prazo sobre a população exposta, uma vez que a exposição aos poluentes presentes na atmosfera ocorre de modo simultâneo. Contudo, com o auxílio de cobaias e da estatística, comprovações irrefutáveis têm sido obtidas. A tabela 2.7 mostra um quadro geral dos principais poluentes indicadores da qualidade do ar e seus efeitos à saúde humana e ao meio ambiente.

⁴ Epidemiologia é o estudo das relações dos diversos fatores que determinam a frequência e distribuição de um processo ou doença infecciosa numa comunidade.

Tabela 2.7 – Fontes, características e efeitos dos principais poluentes na atmosfera.

Poluente	Características	Fontes Principais	Efeitos Gerais Sobre a Saúde	Efeitos Gerais ao Meio Ambiente
Partículas Totais em Suspensão (PTS)	Partículas de material sólido ou líquido que ficam suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça, fuligem, etc. Faixa de tamanho < 100 micra.	Processos industriais, veículos motorizados (exaustão), poeira de rua ressuspensa, queima de biomassa. Fontes naturais: pólen, aerossol marinho e solo.	Quanto menor o tamanho da partícula maior o efeito à saúde. Causam efeitos significativos em pessoas com doença pulmonar, asma e bronquite.	Danos à vegetação, deterioração da visibilidade e contaminação do solo.
Partículas Inaláveis (MP10) e Fumaça	Partículas de material sólido ou líquido que ficam suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça, fuligem, etc. Faixa de tamanho < 10 micra.	Processos de combustão (indústria e veículos automotores) aerossol secundário (formado na atmosfera).	Aumento de atendimentos hospitalares e mortes prematuras.	Danos à vegetação, deterioração da visibilidade e contaminação do solo.
Dióxido de Enxofre (SO ₂)	Gás incolor, com forte odor, semelhante ao gás produzido na queima de palitos de fósforos. Pode ser transformado a SO ₃ que na presença de vapor de água, passa rapidamente a H ₂ SO ₄ . É um importante precursor dos sulfatos, um dos principais componentes das partículas inaláveis.	Processos que utilizam queima de óleo combustível, refinaria de petróleo, veículos a diesel, polpa e papel.	Desconforto na respiração, doenças respiratórias, agravamento de doenças respiratórias e cardiovasculares já existentes. Pessoas com asma, doenças crônicas de coração e pulmão são mais sensíveis ao SO ₂ .	Pode levar à formação de chuva ácida, causar corrosão aos materiais e danos à vegetação: folhas e colheitas.
Dióxido de Nitrogênio (NO ₂)	Gás marrom avermelhado, com odor forte e muito irritante. Pode levar a formação de ácido nítrico, nitratos (o qual contribui para o aumento das partículas inaláveis na atmosfera) e compostos orgânicos tóxicos.	Processos de combustão envolvendo veículos automotores, processos industriais, usinas térmicas que utilizam óleo ou gás, incinerações.	Aumento da sensibilidade à asma e à bronquite, reduz a resistência às infecções respiratórias.	Pode levar à formação de chuva ácida, danos à vegetação e à colheita.
Monóxido de Carbono (CO)	Gás incolor, inodoro e insípido.	Combustão incompleta em veículos automotores.	Altos níveis de CO estão associados a prejuízo dos reflexos, da capacidade de estimar intervalos de tempo, no aprendizado, de trabalho e visual.	
Ozônio (O ₃)	Gás incolor, inodoro nas concentrações ambientais e o principal componente da névoa fotoquímica.	Não é emitido diretamente à atmosfera. É produzido fotoquimicamente pela radiação solar sobre os óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis.	Irritação nos olhos e vias respiratórias, diminuição da capacidade pulmonar. Exposição às altas concentrações pode resultar em sensações de aperto no peito, tosse e chiado na respiração. O O ₃ tem sido associado ao aumento de admissões hospitalares.	Danos às colheitas, à vegetação natural, plantações agrícolas; plantas ornamentais.

Fonte: Cetesb, 2003a.

2.4.1 Substâncias tóxicas liberadas pelo cano de escapamento

A primeira preocupação é com a quantidade de substâncias poluentes danosas à saúde liberadas pelo escapamento dos automóveis, como mostrada tabela 2.8. Fica evidente que automóveis a gasolina e GLP (gás liquefeito de petróleo) liberam principalmente CO, automóveis leves liberam hidrocarboneto e CO, e ônibus a Diesel liberam NOx e fuligem.

Tabela 2.8- Substâncias tóxicas contidas no gás de escapamento dos veículos * (g/km)

	HC	Fuligem	HCHO	CO	NOx
Automóveis leves	15,4	Traço	0,056	23,5	0,41
Automóveis a gasolina	5,50	Traço	0,037	17,82	2,22
Automóveis GLP	3,44	Traço	0,096	13,22	4,27
Ônibus a Diesel	1,10	1,07	0,086	5,92	11,49
Caminhões leves (gasolina)	5,82	0,05	0,039	33,40	4,75
Caminhões a Diesel	1,23	0,56	0,069	5,94	5,26

*Conforme o teste *10-mode driving cycle*. Para os veículos a Diesel o teste padrão é os dos 13 pontos.

Fonte: Hirao & Pefley, 1988.

Hidrocarbonetos

O escapamento dos veículos contém hidrocarbonetos oriundos do combustível não queimado e hidrocarbonetos de baixo peso molecular formados pela decomposição térmica do combustível. As substâncias resultantes consistem de metano, que tem a estrutura mais simples e mais de 200 tipos de compostos de hidrocarbonetos saturados, não saturados e aromáticos com 10 átomos de carbono. A influência destes hidrocarbonetos no organismo humano depende consideravelmente de sua estrutura (Hirao & Pefley, 1988).

Hidrocarbonetos saturados não são nocivos ao organismo humano, porém hidrocarbonetos com baixo peso molecular têm algum efeito anestésico e este efeito aumenta com o peso molecular. Também é conhecido que as cadeias longas de hidrocarbonetos parafínicos, assim como os ácidos alifáticos, provocam a formação de câncer (Hirao & Pefley, 1988).

Fuligem

A quantidade de fuligem nos escapamento de motores de ignição por centelha é bem pequena, mas nos sistemas de ignição por compressão é muito abundante. A toxicidade da fuligem é causada pela existência de hidrocarbonetos condensados policíclicos, com carcinógenos potentes como o benzopireno. As substâncias carcinógenas afetam o pulmão porque seus condensados são partículas suspensas, com aproximadamente 8 μm de diâmetro e com alta permeabilidade no pulmão. Administrando 62,5 μg de benzenopireno por semana em hamsters, 10% deles desenvolveram câncer após 52 semanas (Hirao & Pefley, 1988).

Compostos de chumbo contidos na fuligem são substâncias tóxicas formadas pela decomposição de chumbo alcalino adicionado em alguns países como agente detonante na gasolina. Depois que as finas partículas de compostos de chumbo se depositam no pulmão. Ao serem absorvidas no pulmão tornam-se um obstáculo para a oxigenação do sangue.

Óxidos de hidrocarbonetos incompletos

Nos óxidos de hidrocarbonetos incompletos é avaliada a toxicidade dos aldeídos e do monóxido de carbono. Aldeídos no limite de 10 – 100 ppm estão contidos nos gases de escapamento e são compostos de formaldeídos (HCHO), acetaldeídos (CH_3CHO), acrolein ($\text{CH}_2=\text{CHCHO}$) e outros.

O formaldeído irrita a mucosa dos olhos em baixas concentrações e, em altas concentrações, o esôfago e os brônquios. A pele e as membranas mucosas são irritadas pelo acetaldeído (Hirao & Pefley, 1998) e eles causam um aumento na atividade do coração. Quando altas concentrações de vapores são inaladas ocorre asfixia temporária. Se o vapor é inalado por um longo tempo, o número de eritrócitos (glóbulos vermelhos) e leucócitos (glóbulos brancos) do sangue diminui. Em concentrações de 50 ppm os olhos ficam levemente irritados. Concentrações em torno de 200 ppm podem comprometer um dia de trabalho. A toxicidade é bem baixa se comparada com o HCHO.

O Acrolein é considerado nocivo. Se for inalado por 10 minutos na concentração de 0,5ppm ou por 2 a 3 minutos na concentração de 1ppm, os olhos e as mucosas do nariz ficarão fortemente irritadas. Na concentração de 1ppm o vapor não pode ser inalado por mais de 5 minutos. As concentrações admissíveis para exposição contínua é de 2ppm para HCHO, 100ppm para CH₃CHO e 0,1ppm para CH₂=CHCHO (Hirao & Pefley, 1998).

Monóxido de carbono

O monóxido de carbono é a substância mais tóxica encontrada nos gases de escape dos veículos e é incolor, insípido e sem odor. Como o CO não irrita a pele e nem as mucosas, sua existência não é percebida. A forte ligação que existe entre o CO e a hemoglobina no sangue é 210 vezes maior que a ligação da hemoglobina com o oxigênio. Se CO se liga a hemoglobina, a função da hemoglobina diminui. Se a ligação entre o CO e a hemoglobina aumenta para 20%, dores de cabeça, tonturas e outros sintomas tóxicos aparecem e se a ligação for de 50% causa inconsciência. Uma ligação de 70% pode levar à morte (Hirao & Pefley, 1998).

Óxidos de nitrogênio

O componente nitrogenado principal dos gases de escapamento é o óxido de nitrogênio. Mas após o gás ser expelido para o ar, ele é imediatamente oxidado e transformado em dióxido de nitrogênio (NO₂).

Apesar do NO não ser irritante, ele se liga com a hemoglobina do sangue. A força de ligação é aproximadamente 1.000 vezes maior que a do NO₂. Pela oxidação do NO com a hemoglobina no sangue forma-se metemoglobina⁵, e ela aumenta a necessidade de oxigênio no sangue e causa danos no sistema nervoso central (Hirao & Pefley, 1998). Em geral, a concentração de NO na atmosfera é menor que 1/10 da concentração de CO, e níveis normais de NO e CO no organismo humano não causam preocupação.

O gás NO₂ irrita fortemente as mucosas, é tóxico para os brônquios e os pulmões e influencia na formação de metemoglobina. Em geral, os sintomas tóxicos do NO₂ são insônia,

⁵ Esta substância difere da hemoglobina por conter ferro em estado de alta oxidação e por ser capaz de combinar-se reversivelmente com oxigênio molecular.

tosse, respiração rápida e corrosão das membranas mucosas. Se o NO_2 é absorvido pelo sangue, a metemoglobina é formada e causa danos no sistema circulatório e no sistema nervoso central. Em casos sérios, o sangue aparece na saliva e após alguns dias a morte vem através de um edema pulmonar. A concentração de 100 ppm de NO_2 mantém os sintomas tóxicos por um curto período de tempo e as concentrações de 200 ppm rapidamente tornam-se um perigo para a vida (Hirao & Pefley, 1998).

Impactos Regionais

A poluição atmosférica local muitas vezes pode ser carregada por correntes atmosféricas, percorrendo distâncias de até centenas de quilômetros. Um exemplo disto ocorre com a Alemanha, que recebe carga ácida “importada” da antiga Tchecoslováquia, ou com o Uruguai, que sofre com as emissões da usina termelétrica de Candiota, situada no Brasil (Álvares Júnior, Lacava & Fernandes, 2002).

Um dos impactos regionais mais conhecidos é a chuva ácida. A deposição ácida, ou chuva ácida, como é mais conhecida, tem origem predominantemente nas emissões de dióxido de enxofre, originadas da queima de combustíveis fósseis por veículos e industriais e de dióxido de nitrogênio, produzidas principalmente nos diversos processos de combustão. Estas substâncias combinam-se com a água presente no ar e no solo, formando vários compostos ácidos, sendo que os principais são o ácido sulfúrico (H_2SO_4) e o ácido nítrico (HNO_3).

A precipitação da chuva ácida pode ocorrer de várias formas: por meio da chuva, do granizo, da neblina e de partículas secas. O pH da chuva em condições normais já é levemente ácido (entre 5 e 6). Nas áreas expostas à contaminação industrial e veicular os valores encontrados estão em torno de 4. Foram registrados na Noruega e no estado da Virgínia nos EUA índices extremamente ácidos, que chegaram a 2 e até 1, configurando situações de calamidade ambiental.

Além da flora e da fauna, os prejuízos causados pela chuva ácida atingem as estruturas metálicas, edifícios, monumentos, obras de artes, etc., que somados chegam a dezenas de bilhões de dólares anuais nos países industrializados.

Impactos Globais

Os impactos globais são aqueles que atingem toda a população mundial, independentemente de onde tenham sido gerados. Entre eles se encontram a depleção da camada de ozônio, os gases de efeito estufa e o aquecimento global.

A **depleção da camada de ozônio** recebeu nas últimas décadas grande atenção da opinião pública em todo o mundo. Diferentemente do ozônio troposférico⁶, prejudicial à saúde, o ozônio estratosférico⁷ tem um papel muito importante para os seres humanos, na manutenção do equilíbrio da Terra, através da absorção da radiação ultravioleta (UV), com comprimentos de onda entre 240 a 320 nm (nanômetros), que são prejudiciais aos seres humanos e ao meio ambiente. Sem esta camada protetora, os principais problemas que surgiriam seriam: eritema (queimadura solar) e câncer de pele, querato-conjuntivite (inflamação fotoquímica provocada pelos raios UV), catarata, fragilização do sistema imunológico, redução das colheitas, degradação do ecossistema dos oceanos e redução da pesca.

O buraco (depleção) de ozônio aparece durante a primavera, no hemisfério sul, sobre a Antártida. Trata-se de uma região de 20 a 25 milhões de km que contém baixa concentração de ozônio. O problema se agrava nesta região do planeta devido à atmosfera fria e à presença de nuvens polares estratosféricas que retêm as substâncias que reagem com o ozônio.

Os clorofluorcarbonos (CFCs), substâncias produzidas pelo homem e utilizadas como refrigerante, agente produtor de espumas e propelente, reagem quimicamente com o ozônio, destruindo-o. Devido ao seu alto poder de destruição do ozônio, os CFCs tiveram a sua produção proibida, através do Protocolo de Montreal. Através deste protocolo os países signatários se comprometeram em banir completamente os CFCs até o ano de 2000. A implantação deste acordo tem-se mostrado positiva, pois as concentrações atmosféricas de muitos CFCs estão se estabilizando, devendo cair nas próximas décadas (Álvares Júnior, Lacava & Fernandes, 2002).

⁶ A troposfera é a parte mais baixa da atmosfera, vai da superfície até cerca de 10 km de altitude em latitudes médias. Ela é definida como a região onde a temperatura decresce com a altitude.

⁷ A estratosfera é região mais estável da atmosfera acima da troposfera e se estende de cerca de 10 km até cerca de 50 km da superfície da Terra.

Os **gases de efeito estufa** possuem a propriedade de reter o calor, como o vidro de uma estufa de plantas. Eles são os responsáveis pelo aquecimento da superfície da Terra e da atmosfera. A cobertura de gases permite a passagem da radiação solar, mas evita a liberação da radiação infravermelha emitida pela superfície da Terra. O efeito estufa chamado de natural, aquele que não foi potencializado pela atividade do homem, resulta numa temperatura média da Terra em torno de 15°C. Sem os gases de efeito estufa, estima-se que a temperatura média na superfície seria de -15 a -20 °C.

A capacidade desses gases em contribuir para o aquecimento global depende de seu tempo de vida na atmosfera e de suas interações com os outros gases e com vapor d'água. Tal eficiência é medida por um indicador denominado potencial de aquecimento global (GWP, do inglês, *Global Warming Potencial*). O GWP estipula a contribuição relativa devido à emissão, na atmosfera, de 1 kg de um determinado gás estufa, comparado com a emissão de 1 kg de CO₂. O GWP, calculado para diferentes períodos de tempo mostra a influência da vida média do gás estufa na atmosfera, segundo apresentado na tabela 2.9.

Tabela 2.9 – Tempos médios de vida dos GEE na atmosfera.

GEE	Fórmula	Tempo de vida (anos)	GWP* 20 anos	GWP* 100 anos	GWP* 500 anos	Contribuição (%)
Dióxido de carbono	CO ₂	variável	1	1	1	55
Metano	CH ₄	12 ± 3	5.556	21	6.5	15
Óxido nitroso	N ₂ O	120	280	310	170	6
CFCs	n.d.**	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	17

*GWP dado o horizonte de tempo.

** n.d. – não disponível

Fonte: Álvares Júnior, Lacava & Fernanades, 2002.

O **aquecimento global** é o aumento potencial da temperatura média global resultante do aumento da concentração dos Gases de Efeito Estufa na atmosfera, emitidos pela atividade

humana (queima de combustíveis fósseis, combustão da biomassa das florestas e desmatamento). Entre as principais consequências para o planeta do aumento das emissões de GEE, destacam-se:

- ✓ Mudanças climáticas;
- ✓ Deslocamento das zonas climáticas e agrícolas em direção aos pólos;
- ✓ Elevação dos níveis do mar com o derretimento de geleiras e a expansão térmica dos oceanos, ameaçando zonas costeiras e pequenas ilhas de baixa altitude.

2.5 Medidas para controlar as emissões veiculares

Neste tópico serão apresentadas algumas medidas de controle de emissões veiculares. Serão analisadas as medidas tomadas nos Estados Unidos, especificamente o Mandato ZEV (*Zero emission vehicle*) que deverá ser implantado na Califórnia e que serve de referência neste trabalho para a introdução dos veículos com células a combustível na cidade de São Paulo e o PROCONVE implementado no Brasil.

A partir dos anos 60 as emissões veiculares começaram a ser reguladas nos países em desenvolvimento. Mais recentemente os combustíveis utilizados nos motores de ignição e nos motores Diesel estão sujeitos a algum tipo de restrição, cuja intenção é a de reduzir as emissões para um futuro próximo.

Nos Estados Unidos, carros, caminhões e veículos *off-road* são constantemente responsabilizados por 40 a 50% das emissões de hidrocarbonetos, 50% das emissões de óxidos de nitrogênio e 80 a 90% das emissões de óxido de carbono em áreas urbanas. As emissões relativas em outros lugares do mundo desenvolvido, como a Europa e o Japão, são similares. Uma fração significativa destes poluentes ainda é produzida pelos carros e caminhões leves com sistema de ignição, embora a importância relativa do óxido de nitrogênio e materiais particulados, produzidos pelos motores a Diesel, esteja aumentando (Heywood, 1998).

O controle de emissões veiculares tem uma longa história. Padrões de descarga de emissões para veículos novos foram estabelecidos em 1968 nos Estados Unidos (1965 na Califórnia), e

foram a cada ano ficando mais rígidos, até o início da década de 80. Já os padrões para os anos 90 são muito mais restritivos do que os estabelecidos anteriormente, especialmente nos Estados Unidos e na Europa (tabela 2.10). A estratégia adotada para minimizar o *smog* foi a redução nas emissões de queima incompleta, que emite HC, e redução acentuada de NOx. Esta estratégia foi escolhida porque o *smog* de origem fotoquímica responde bem às mudanças relativas de HCs e NOx. Os padrões de emissões para veículos grandes abastecidos com gasolina ou Diesel também ficaram mais rígidos.

Tabela 2.10 - Limites de emissões para os veículos de serviço leve nos Estados Unidos.

Tipo de Padrão	NMOG	CO	NOX	HCHO
Precontrol (1966)	10,6	84	4,1	
Federal				
Tier I (1994)	0,25	3,4	0,4	
Tier II (2003)	0,125	1,7	0,2	
Califórnia				
Veículos convencionais (1993)	0,25	3,4	0,4	
TLEVs (1994)	0,125	3,4	0,4	0,015
LEVs (1997)	0,04	1,7	0,2	0,015
Ultra LEVs (1997)	0,04	1,7	0,2	0,008

NMOG – gases orgânicos não metanos

Padrões para 5 anos ou 50.000 milhas (80.400 km)

TLEVs – veículos de transição para baixas emissões

LEVs – veículos com baixas emissões

Fonte: Heywood, 1998.

Para estabelecer algumas perspectivas entre os níveis de emissões no passado e no presente, a tabela 2.11 apresenta números típicos para o consumo de combustível, para as emissões dos motores e para as descargas de emissões na atmosfera por milha percorrida para o Precontrol e para carros de passageiros modernos.

Tabela 2.11 – Consumo de combustível e emissões típicas de um automóvel (gramas/milhas percorridas).

	HC	CO	NOx
Precontrol (1960)	11	85	4
Veículos Modernos:			
Emissões do motor	3	15	2
Emissões do escapamento	0,3	2	0,4

Consumo de combustível: 25 milhas/galão US = 120g/milha

Fonte: Heywood, 1998.

Califórnia e a Lei de Veículos com Emissão Zero (ZEV)

Em 1990, a Califórnia Air Resources Board (ARB) adotou um ambicioso programa para reduzir drasticamente o impacto ambiental causado pelos veículos leves e pesados através da introdução gradual de veículos de emissão zero (ZEVs – *Zero emission vehicle*) em sua frota. Este programa ficou conhecido como Mandato ZEV e foi baseado no número de veículos de passageiros e pequenos caminhões que os fabricantes vendem na Califórnia. Especificamente, o ARB estipulava que 2%, 5 % e 10% da venda de veículos novos fossem do tipo emissão zero para 1998, 2001 e 2003 respectivamente. Para facilitar este processo, o regulamento permitia que os fabricantes bancassem e comercializassem créditos de carbono obtidos com o uso de veículos ZEV. Embora os regulamentos ZEV não exigissem uma tecnologia específica, a expectativa naquele momento era que a exigência seria satisfeita com a introdução de veículos elétricos a bateria (EVs).

As exigências para veículos do tipo ZEV foram mudadas três vezes desde o começo do programa: em 1996, 1998 e 2001. Embora a implementação do programa tenha sido mudada quando necessário por causa do desenvolvimento da tecnologia, o objetivo original não mudou. O estado da Califórnia continua mantendo um compromisso forte para reduzir as emissões nos veículos de passageiros e na frota de caminhões leves e pesados. Com respeito às exigências ZEV, os fabricantes desenvolveram e colocaram no mercado um número limitado de veículos deste tipo para avaliar a viabilidade tecnológica e comercial. Adicionalmente, os fabricantes

demonstraram e comercializaram uma série de veículos com emissão próxima de zero e com tecnologia avançada para suportar as metas de emissão zero.

Em 1996, o ARB modificou os regulamentos, criando um tempo adicional para o desenvolvimento da tecnologia. A exigência de 10% de ZEVs nos modelos a partir de 2003 foi mantida, mas a exigência de vendas durante o período de 1998 até 2002 foi eliminada (ARB, 2003a). O ARB também realizou um acordo com os sete maiores fabricantes de veículos para colocar mais mil ZEVs na Califórnia. Estes ZEVs demonstraram a capacidade de desempenho dos veículos a bateria, e também resultaram em um grupo de consumidores que eram, e continuam sendo, apaixonados por esta tecnologia.

Em 1998 foi criada uma nova classe de veículo, o veículo ZEV com emissão parcial, ou PZEV. Para ser certificado como um PZEV, o veículo tem que satisfazer o padrão de emissão mais severo do ARB, ter emissão evaporativa zero e uma garantia de 15 anos ou 240 mil km em todas as emissões dos componentes relacionados (ARB, 2003a).

Em janeiro de 2001 o ARB aprovou emendas adicionais aos regulamentos dos ZEVs, para manter progresso da comercialização de veículos com emissão zero, enquanto reconhecia os constrangimentos de mercado criados pelo custo da tecnologia com bateria. As emendas preservarão o requerimento principal de 10% de veículos de passageiros novos e caminhões leves e pesados serem ZEVs a partir de 2003, como mostrado na tabela 2.12.

Tabela 2.12 – Número mínimo de veículos ZEVs após modificações em 2001.

Modelo/Ano	Mínimo ZEV requerido
2003 – 2008	10%
2009 – 2011	11%
2012 – 2014	12%
2015 – 2017	14%
2018 - posteriores	16%

Fonte: ARB, 2003a.

Um elemento importante das emendas de 2001 foi o estabelecimento de uma categoria de veículos novos chamados “Tecnologia Avançada PZEV” ou “AT PZEV”. Pelas emendas

aprovadas, os veículos certificados com o padrão AT PZEV (que inclui veículos híbridos gasolina-bateria) poderiam ser usados para até metade da obrigação dos fabricantes por veículos ZEV. Esta alteração foi feita para criar maiores incentivos de modo a prosseguir o desenvolvimento de tecnologias mais avançadas que permitam a comercialização de veículos com emissão zero e ofereçam flexibilidade adicional aos fabricantes, para que eles possam cumprir as exigências do programa.

Em junho de 2002, o ARB recebeu uma notificação judicial proibindo o cumprimento das emendas ZEV de 2001 a respeito da venda de automóveis novos nos anos de 2003 ou 2004. Esta notificação federal foi pedida pelos fabricantes de automóveis, que alegavam ser desnecessária a entrada dos ZEVs naquele momento pois o padrão de economia de combustíveis, especificado no *Energy Policy and Conservation Act* de 1975, poderia ser mantido com os veículos disponíveis (ARB, 2003a).

Quando o ARB retificou o regulamento em 2001, o fez com a compreensão que no curto prazo a fração de veículos ZEV puros exigidos pelo regulamento seria muito cara para os fabricantes. Desde aquele tempo, não houve nenhuma redução significativa no custo de bateria para os EVs. Enquanto isso, o marketing de bateria para os EVs alcançou apenas um modesto sucesso. Estes fatores, junto com a decisão judicial, reduziram a velocidade ou igualaram os planos dos fabricantes em relação ao desenvolvimento de baterias para os EVs.

Em adição, as projeções relativas à regulação de comercialização de células a combustível, que foram projetadas para suprir uma segunda tecnologia de ZEV mais tarde, ficaram menos evidentes, embora os fabricantes permaneçam completamente comprometidos e continuem a investir pesadamente nesta tecnologia.

Há discordâncias consideráveis sobre os efeitos e benefícios relativos do programa ZEV atual. Partidários da tecnologia a bateria para os EVs argumentam que a bateria adicional requerida pelo EV no regulamento atual ajudará a construir o mercado para produtos ZEVs. Eles também mantiveram a continuidade do desenvolvimento de bateria criando uma “rede de segurança”, pois acham que a tecnologia de células a combustível encontrará barreiras

impenetráveis. Por outro lado, os fabricantes de automóveis argumentaram que a necessidade para dedicar pessoal de engenharia e recursos na bateria dos EVs na verdade diminuirá o ritmo de comercialização de células a combustível. Também declararam que preferem direcionar seus investimentos para a tecnologia de células a combustível, porque estes equipamentos têm maior apelo comercial do que a bateria dos EVs .

Em Março de 2003 foram propostas novas modificações ao regulamento ZEV, que foram adotadas em de imediato. A porcentagem de ZEV requerida será reiniciada com os modelos de 2005; durante este tempo os fabricantes poderão receber créditos pelos veículos produzidos antes deste prazo (ARB, 2003b).

O modo como os créditos ZEVs são calculados foi revisado para remover o multiplicador de eficiência e especificar os números de créditos ganhos por cada modelo/ano de cada um dos cinco tipos de ZEVs puros, mostrados na tabela 2.13.

Tabela 2.13 - Tipos de veículos ZEVs.

Tipo de veículo	Descrição	Rendimento (UDDS)*
NEVs	Baixa velocidade <i>Neighborhood Electric Vehicles</i>	Não há
Tipo 0	Veículo utilitário elétrico com bateria para distâncias pequenas.	< 80 km
Tipo 1	Veículos elétricos para cidade, distâncias médias	/ 80 km, < 160 km
Tipo 2	Veículos elétrico totalmente a bateria	/ 160 km
Tipo 3	Veículos com células a combustível	/ 160 km com reabastecimento adicional

* *Urban Dynamometer Driving Schedule*

Fonte: ARB, 2003b.

Os métodos de calcular os AT PZEV foram corrigidos para remover todas as referências à economia de combustível ou eficiência. Os veículos elétricos híbridos (HEV) para se tornarem um híbrido elétrico PZEV, precisam exibir uma elevada tensão de tração, freio regenerativo e *start/stop* sem carga para serem classificados em um dos níveis descritos na tabela 2.14.

Será permitido aos fabricantes escolherem como cumprirão o mandato ZEV a partir de 2005. Ou optam por um “caminho de complacência básico” que se baseia nas porcentagens exigidas nas emendas ZEV de 2.001, ou com um “caminho de complacência alternativa”. No primeiro caso é permitido fazer um mix de veículos: 2% de ZEV puros, 2% de AT PZEV e 6% de PZEV (ARB, 2003b).

Tabela 2.14 – Níveis de veículos AT PZEV.

Nível	Descrição	Créditos AT PZEV
Nível 1: baixa voltagem, baixa potência	Menos que 60 Volts e pelo menos 4 kW de potência no motor	0,2 créditos para modelos novos até modelos do ano 2008
Nível 2: alta voltagem	60 Volts ou mais e um mínimo de 10 kW de potência no motor	0,4 créditos, reduzido em fases nos modelos dos anos de 2012 a 2015 para 0,25
Nível 3: alta voltagem, alta potência	60 Volts ou mais e mínimo de 50 kW de potência no motor	0,5 créditos, reduzido em fases nos modelos dos anos de 2012 a 2015 para 0,35

Fonte: ARB, 2003b.

A outra opção permite utilizar os AT PZEVs para cumprir as obrigações de veículos ZEVs puros, 4% e 6% respectivamente, desde que os fabricantes satisfaçam as exigências especificadas na tabela 2.15.

Tabela 2.15 – Cotas de veículos com células a combustível a serem introduzidas no mercado pelos fabricantes de veículos.

Modelo Ano	Cota de veículos com células a combustível
2001 – 2008	250
2009 – 2011	2.500
2012 – 2014	25.000
2015 – 2017	50.000

Fonte: ARB, 2003b.

Um painel especializado independente de revisão será estabelecido para orientar o ARB nos avanços de tecnologia alcançados em ZEV puro e em ATPZEV, para que o possam executar mudanças às exigências para os modelos a partir de 2009 e subsequentes.

O ARB espera avanços na utilização do gás natural e outras alternativas de abastecimento para os veículos, nos veículos com gasolina super limpa, em híbridos com energia fornecida através da combinação de motor elétrico e motor de combustão interna, e em veículos com células a combustível gerando eletricidade a partir do hidrogênio, sem emissão de poluentes.

PROCONVE

O Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores - PROCONVE, foi estabelecido e regulamentado a partir de 1986 pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA, através de várias Resoluções, sendo suportado pela Lei n.º 8.723/93.

Este programa, baseado na experiência dos países desenvolvidos, estabelece as diretrizes, prazos e padrões legais de emissão admissíveis para as diferentes categorias de veículos e motores, nacionais e importados.

Seu principal objetivo é a redução da contaminação atmosférica através da fixação dos limites de emissão, induzindo o desenvolvimento tecnológico dos fabricantes e determinando que os veículos e motores atendam a limites máximos de emissão, em ensaios padronizados e com combustível de referência. Também impõe a certificação de protótipos e o acompanhamento estatístico em veículos de produção, a autorização do IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis) para uso de combustíveis alternativos, o recolhimento e reparo de veículos ou motores encontrados em desconformidade com a produção ou projeto e proíbe a comercialização de modelos de veículos não homologados. O CONAMA estabelece ainda que o PROCONVE deve ser associado a programas de educação ambiental, de transporte e de inspeção de manutenção de veículos automotores.

O PROCONVE classifica os veículos em três categorias: leve de passageiros, leve comercial e veículo pesado. Para este estudo a ênfase será nos veículos leves de passageiro. Segundo o PROCONVE:

“Veículo leve de passageiros (automóveis): é o veículo automotor com massa total máxima autorizada até 3.856 kg e massa do veículo em ordem de marcha até 2.720 kg, projetado para o transporte de até 12 passageiros, ou seus derivados para o transporte de carga” (IBAMA, 1998).

Desde 1997 está em vigor o limite máximo de emissão de poluentes que é mostrado na tabela 2.16, porém o controle de emissão destes veículos iniciou-se antes desta época, sendo que ele foi escalonado em três fases:

- Fase I: (1988 a 1991): aprimoramento dos projetos mecânicos dos veículos e controle da emissão evaporativa;

- Fase II (1992 a 1996): aplicação de tecnologias novas, tais como a injeção eletrônica ou carburadores assistidos eletronicamente e conversores catalíticos para redução de emissões;

- Fase III (1997 – em diante): através do atendimento aos limites estabelecidos, a partir de 1º de janeiro de 1997, o fabricante/importador está sendo induzido a empregar as melhores tecnologias disponíveis para a formação de mistura e controle eletrônico do motor.

No estágio em que o Programa se encontra, tem-se notado a melhoria do parque industrial nacional voltado para o controle de emissões veiculares, com a instalação de linhas de produção de sistemas de injeção de combustível, conversores catalíticos e sistemas de absorção de vapores de combustível, bem como equipamentos de medição.

Embora de fundamental importância para o atendimento das metas de um programa de controle veicular, o Brasil ainda não tem definido, de maneira clara e permanente, a especificação e o fornecimento regular dos combustíveis comerciais devido às indefinições na estruturação de sua matriz energética. Os combustíveis padrões para ensaios de emissão de poluentes no escapamento dos veículos automotores foram definidos pelo PROCONVE de modo a representar os combustíveis distribuídos comercialmente no País. A mistura gasolina-etanol anidro é preparada na proporção de $22\% \pm 1\%$ (em volume) de álcool.

A Resolução Nº 315, de 29 de outubro de 2002, estabeleceu as novas etapas para o Programa de Controle de Emissões Veiculares, determinando novos limites de emissão para os anos de 2007 e 2009, como mostrado na tabela 2.17 e 2.18.

Tabela 2.16 - Limites máximos de emissão de poluentes para veículos leves de passageiros (novos) a partir de 01.01.1997.

Poluentes	Limites
CO	2,0 (g/km)
HC	0,3 (g/km)
NOx	0,6 (g/km)
MP	0,05 (g/km)**
CHO*	0,03 (g/km)
CO	0,5 m.l.* (%)
HC	N/A m.l.(ppm)
Evaporativa	6,0 (g/ensaio)
Gás Cáster	nula

* exceto para veículos com motores Diesel

** exceto para veículos com motores do ciclo Otto

m.l. - marcha lenta

Fonte: IBAMA, 1998.

Tabela 2.17 - Limites máximos de emissão de poluentes para veículos leves de passageiros, a partir de 01 de Janeiro de 2007 (PROCONVE L-4).

Poluentes	Limites
Monóxido de Carbono (CO)	2,0 g/km
Hidrocarbonetos totais (THC) ¹	0,30 g/km
Hidrocarbonetos não metano (NMHC)	0,16 g/km
Óxidos de Nitrogênio (NOx) ²	0,25 g/km
Óxidos de Nitrogênio (NOx) ³	0,60 g/km
Aldeídos (HCO) ⁴	0,03 g/km
Material Particulado (MP) ⁵	0,05 g/km
Teor de monóxido de carbono em marcha lenta ⁶	0,50% vol

¹ somente para veículos a gás natural;

² para motores do ciclo Otto;

³ para motores do ciclo Diesel;

⁴ somente para motores do ciclo Otto (exceto gás natural);

⁵ somente para motores ciclo Diesel;

⁶ somente para motores do ciclo Otto.

Fonte: Ministério do Meio Ambiente - MMA, 2002.

Tabela 2.18 - Limites máximos de emissão de poluentes para veículos leves de passageiros a partir de 01 de Janeiro de 2009 (PROCONVE L-5).

Poluentes	Limites
Monóxido de Carbono (CO)	2,0 g/km
Hidrocarbonetos totais (THC) ¹	0,30 g/km
Hidrocarbonetos não metano (NMHC)	0,05 g/km
Óxidos de Nitrogênio (NOx) ²	0,12 g/km
Óxidos de Nitrogênio (NOx) ³	0,25 g/km
Aldeídos (HCO) ⁴	0,02 g/km
Material Particulado (MP) ⁵	0,05 g/km
Teor de monóxido de carbono em marcha lenta ⁶	0,50% vol

¹ somente para veículos a gás natural

² para motores do ciclo Otto

³ para motores do ciclo Diesel

⁴ somente para motores ciclo Otto (exceto gás natural)

⁵ somente para motores ciclo Diesel

⁶ somente para motores do ciclo Otto

Fonte: MMA, 2002.

O procedimento adotado pelo PROCONVE para a estimativa das emissões baseia-se nos métodos utilizados pela CETESB e pela Agência de Proteção Ambiental dos EUA – EPA. A principal vantagem de empregar este método reside na comparabilidade com outros estudos de inventário elaborados anteriormente, desde que conhecidos os parâmetros adotados.

São considerados no inventário das emissões a quilometragem média percorrida anual, os fatores médios de emissão de cada poluente, o número de veículos da frota circulante e o fator de deterioração das emissões da frota desagregado por ano-modelo.

A emissão de cada poluente em um determinado ano para cada faixa de ano-modelo considerada é calculada multiplicando-se o número de veículos existentes pela sua quilometragem média anual percorrida, pelo fator de emissão médio (g/km) e pelo seu fator de deterioração. O resultado é expresso em toneladas de poluente emitido por ano.

Com relação aos programas adotados tanto pelo EUA (Tier 1 e 2), como pela Comunidade Européia (Euro 1 a 5), observa-se que a legislação adotada para a redução de emissões dos veículos leves são mais severas que as do PROCONVE, porém cabe lembrar: nestes países a frota de veículos a passeio utiliza principalmente Diesel e a gasolina utilizada nos veículos possui uma composição diferente da composição brasileira, que utiliza álcool anidro como detonante.

Dentro dos programas de controle de emissões de poluentes é importante lembrar que o PROCONVE é um programa nacional. Para a cidade de São Paulo foram desenvolvidos outros programas pelo governo estadual e municipal. Podem ser destacados a Operação Inverno, o Programa de Combate à Poluição do Ar, a Operação Caça Fumaça e a Operação Rodízio, sendo este último o mais polêmica.

A Operação Rodízio foi implantada de 1995 em caráter experimental durante uma semana no período de inverno. De 1996 a 1998 ela foi aplicada aos paulistanos sob a pena de multa. Atualmente coexistem na cidade de São Paulo dois tipos de rodízio, o estadual que pretende diminuir a poluição e o municipal que busca reduzir os congestionamentos (Medeiros & Augusto, 2001). Constatou-se uma redução de aproximadamente 17%, mas muitos especialistas não acreditam que este crédito seja exclusivamente da operação. Segundo Medeiros & Augusto a redução resultou devido a uma conjunção de fatores ambientais como temperatura, umidade do ar, chuvas e ventos que contribuíram para a dispersão dos poluentes.

2.6 Trabalhos relacionados com o tema

A questão do aquecimento global será uma das maiores preocupações do século XXI, tanto nos países desenvolvidos quanto nos países em desenvolvimento, sinalizando a queima de combustíveis fósseis como a maior fonte de emissões de dióxido de carbono, o principal gás de efeito estufa. O setor de transporte rodoviário é apontado como o maior responsável pela emissão de CO₂, além de ser a principal fonte de poluição local nos grandes centros urbanos, emitindo gases tóxicos como o monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, óxidos de enxofre, aldeídos e material particulado.

A seguir são apresentados alguns resultados de trabalhos desenvolvidos no Brasil relacionando o uso de combustíveis fósseis no setor de transporte com o aumento das emissões de gases de efeito estufa e poluentes atmosféricos. Também apresenta alguns dados que mostram os danos que estes poluentes podem causar a saúde.

Mattos realizou um estudo para a cidade do Rio de Janeiro buscando analisar a importância do setor de transporte na emissão dos gases de efeito estufa, desenvolvendo três cenários, onde considerou apenas a mudança do tipo de combustível, sendo que os dados de emissão de CO₂ foram obtidos a partir do consumo de combustíveis fósseis, através da metodologia *top-down*⁸.

Os dados obtidos com a realização do estudo mostraram que para o ano de 1998, na cidade do Rio de Janeiro, o transporte rodoviário leve foi responsável por 27,9% das emissões de CO₂, enquanto que o transporte pesado foi responsável pela emissão de 25,0%, e os combustíveis responsáveis por estas emissões foram respectivamente a gasolina e o Diesel.

Outro fato importante foi observado na redução do consumo de energia e nas emissões de CO₂, na década de 90, decorrente de uma crise econômica. Observou-se que a queda no consumo de álcool hidratado, a partir de 1990, levou a um aumento nos coeficientes de emissão de CO₂ por unidade de energia consumida na cidade. Em 1990, o coeficiente de emissão de CO₂ para transporte rodoviário leve era de 32,4t de CO₂ por TJ de energia, em 1998 saltou para 49,0t de CO₂ por TJ de energia. Isto representou um crescimento de 51% nas emissões de CO₂ por unidade de energia fornecida ao transporte rodoviário leve.

Já os dados obtidos da construção dos cenários indicam que a simples troca de combustíveis, no caso a substituição da gasolina, nos automóveis por álcool e gás natural e do Diesel, nos ônibus por gás natural, reduzirá as emissões de CO₂ no futuro. Caso essa substituição não ocorra, as emissões serão até 3 vezes maiores do que as de 1998.

⁸ A metodologia “*top-down*” calcula as emissões de gases de efeito estufa através da quantidade de combustível queimado, seu teor carbônico e as emissões correspondentes de CO₂ (Álvares Júnior & Linke, 2003).

Mattos adverte que somente a substituição dos combustíveis não garantirá menores reduções de CO₂, pois a frota de veículos para transporte urbano tende a crescer, o que implicará em maior consumo de combustíveis. A esta medida é necessário que se juntem outras como a troca de tipo de transporte, redução da intensidade energética através da redução do tamanho da frota, maior eficiência das máquinas térmicas, controle da emissão de poluentes locais além dos globais, maior utilização das fontes alternativas de energia, entre outros.

Outro trabalho propondo a substituição de combustível para reduzir as emissões de poluentes da frota veicular foi desenvolvido por Villanueva (2002). Neste caso converteu-se veículos à gasolina, utilizando kits de terceira geração, para veículos a gás natural veicular (GNV) com o objetivo de reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Para isto foram convertidos nove veículos leves e realizados dois testes específicos. No primeiro, comparou-se a emissão de gases de escapamento dos veículos antes e após a conversão e no segundo comparou-se a emissão de gases de escapamento da implementação alternada de kits com regulagem manual e regulagem eletrônica da vazão do gás num mesmo veículo. Os gases considerados na análise foram CO₂, CO, NO_x e HC.

O resultado obtido com o teste apurou que as emissões dos veículos antes da conversão (gasolina) apesar de não serem novos (faixa etária entre 1 e 5 anos) não atendiam os limites estabelecidos pelo PROCONVE. Importante observar que estes veículos passaram por uma inspeção técnica antes dos testes. A causa provável destas emissões foi apontada como sendo a perda da eficiência do catalisador, pois estes veículos já estavam com uma alta quilometragem.

Também foi observado que a conversão de veículos a gasolina para gás natural com a utilização de kits de conversão⁹ não diminui da forma esperada as emissões principalmente dos gases NO_x e HC. Isto mostra que os veículos convertidos a gás natural no Brasil, não atenderiam aos limites de emissões do PROCONVE, caso o programa de inspeção e manutenção fossem implantados. Para que essa redução ocorra de forma efetiva é necessário que as montadoras disponibilizem veículos bi-combustíveis no mercado (gasolina/GNV) e veículos cativos a GNV.

⁹ Kits de conversão são equipamentos necessários para se converter um veículo a gasolina ou a álcool para o uso de gás natural. Estes kits são vendidos em lojas especializadas.

A redução de CO₂ ocorre porque o gás natural possui menor teor de carbono em sua estrutura molecular.

O trabalho desenvolvido por Monteiro (1998) propôs a substituição modal no setor de transporte para reduzir as emissões de poluentes na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP).

A idéia neste caso foi estimar o custo de abatimento dos gases, compostos principalmente de carbono, provenientes de veículos automotores, ao substituir uma parcela dos veículos (2% da frota) particulares por ônibus.

Para isto Monteiro construiu cenários para a RMSP a partir de hipóteses (tendencial e otimista) baseadas em variáveis macroeconômicas. A projeção do número de veículos automotores e as demais variáveis determinaram as emissões de gases, os custos e os investimentos associados a esses veículos. Os resultados obtidos indicaram que as emissões de CO e de HC foram discretas, enquanto que as emissões de NO_x apresentaram um aumento de 1995 para 2020. O aumento de NO_x se deve ao fato de serem as emissões deste gás em ônibus 100 vezes superiores as dos veículos a gasolina. Quanto às emissões de CO₂, ele continuou sendo emitido, pois a fração de veículos a gasolina substituída por ônibus foi muito pequena. Os veículos à gasolina são determinantes na emissão de CO₂, com ou sem substituição.

Azuaga (2000) desenvolveu uma metodologia de cálculo para estimar um índice que determinasse o valor do dano ambiental provocado no Brasil pela frota de veículos leves. Este índice foi expresso em valor monetário por distância percorrida pelo veículo e se baseou nos moldes de análise de ciclo de vida, identificando a contribuição de cada etapa envolvida desde a produção do veículo leve, seu uso até sua disposição final. Neste estudo Azuaga limitou-se a analisar apenas a etapa de utilização do veículo, sendo dividida em emissões veiculares e emissões do ciclo de suprimento do combustível. Outra etapa analisada foi o custo dos danos causados ao ambiente e a saúde.

Para obter estes dados foram traçados quatro cenários, dois para a frota de 1998 e dois para uma suposta frota em 2020, com base em duas hipóteses; uma otimista e outra tendencial.

Os dados obtidos indicam que, caso não sejam tomadas medidas que busquem melhorar a qualidade de vida, o índice de dano ambiental ficará entre 0,6 e 5 centavos de US\$ por quilômetro. Caso não ocorram as inovações tecnológicas, os custos ambientais e à saúde aumentarão de 2 a 16 bilhões de dólares em 1999 para 3,4 a 28 bilhões de dólares em 2020. Com relação à economia de combustível observou-se que se continuar a tendência do período estudado ocorrerá um aumento de consumo em torno de 100% em relação ao ano de 1998.

Miraglia (1997) buscou identificar as relações existentes entre o sistema de transporte e os efeitos agudos da poluição do ar na cidade de São Paulo para o período de 1991 a 1994. Seu trabalho enfocou principalmente a associação entre mortalidade por causas respiratórias e o consumo de diferentes tipos de combustíveis e constatou que existe uma relação indireta entre o consumo de combustíveis e mortalidade, sendo o PM10 (material particulado) foi o poluente mais associado a incidência de mortes por doença respiratória em idosos. Também observou que maiores níveis de etanol estavam relacionados a menores níveis de concentração de PM10 e à menor incidência de mortalidades por doenças respiratórias em idosos.

A seguir Miraglia (2002) estimou as perdas econômicas decorrentes da morbidade e mortalidade causadas por doenças respiratórias e cardiovasculares em crianças com menos de 5 anos e idosos com mais de 65 anos. Dois resultados importantes foram obtidos. O primeiro refere-se a redução na expectativa de vida devido a poluição atmosférica. Para os idosos a redução é de 4 anos se for considerado as doenças respiratórias e de 10 anos se for considerado doenças cardiovasculares. Para as crianças a redução na expectativa de vida é de 19 anos considerando-se doenças respiratórias. O outro resultado obtido diz respeito aos custos anuais de saúde atribuídos à poluição atmosférica, que são da ordem de US\$ 15 a 972 milhões no município de São Paulo.

Cifuentes et al. (2001), realizaram um estudo de redução de emissões a partir da queima de combustível fóssil para quatro cidades: México, Nova Iorque, Santiago e São Paulo. Eles calcularam que se fossem adotadas tecnologias de mitigação dos gases de efeito estufa, reduzindo o material particulado e as concentrações de ozônio em 10% para o período de 2001 a 2020,

seriam evitadas 64 mil mortes prematuras (incluindo mortes infantis), 65 mil casos de bronquite crônica e 37 mil faltas ao trabalho ou restrições de atividades.

Dos trabalhos descritos percebe-se claramente a necessidade de propostas concretas para o setor de transporte que efetivamente reduzam a poluição, contribuindo assim para a melhoria da qualidade de vida nos grandes centros urbanos. A análise dos impactos decorrentes da implantação de uma frota de veículos com células a combustível a hidrogênio na cidade de São Paulo, motivo deste trabalho, é um estudo novo, que servirá de base para estudos e propostas que busquem tecnologias e combustíveis com emissão zero de poluentes.

Capítulo 3

Material e Métodos

A metodologia utilizada para avaliar os impactos ambientais e na matriz de combustível da cidade de São Paulo ao se introduzir uma frota de veículos leves com células a combustível constou de três etapas. Inicialmente, foram calculadas as emissões de poluentes pelos veículos leves a gasolina e a álcool na cidade de São Paulo para o ano de 2002. Depois foram comparados dois veículos: um com motor de combustão interna a gasolina e um com célula a combustível a hidrogênio, com o objetivo de estimar os fatores de emissão e de consumo de combustível para cada um. Por último, foram desenvolvidos três cenários para analisar os efeitos da introdução dos veículos com células a combustível a hidrogênio em substituição ao veículo convencional.

3.1 Cálculo de emissões de poluentes pela frota de veículos leves a gasolina e álcool na cidade de São Paulo em 2002

A determinação das emissões de poluentes veiculares foi baseada na metodologia utilizada no inventário de emissão veicular da CETESB (Murgel et al, 1987). Esta metodologia é semelhante à vigente nos EUA (*bottom-up*¹⁰) e foi adotada porque as condições de simulação de tráfego na RMSP são similares às das grandes cidades americanas.

¹⁰ A metodologia *bottom-up* foi desenvolvida pelo IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) e permite identificar e quantificar as emissões de todos os gases separadamente. Esta metodologia leva em consideração o tipo de equipamento empregado e respectivos rendimentos (Mattos, 2001).

Através desta metodologia, que considera a relação entre a idade do veículo, a quilometragem percorrida anualmente e o fator de emissão para cada categoria veicular, é possível caracterizar e quantificar as emissões dos gases de escapamento da frota de automóveis na cidade de São Paulo.

A emissão de cada gás realizada para cada ano pode ser obtida:

$$E_p = NVSP * QM * FE_p \quad (\text{Eq. 01})$$

onde:

E_p = emissão do poluente considerado para a frota (g/ano)

$NVSP$ = número de veículos que compõem a frota da cidade de São Paulo

QM = quilometragem média anual (km)

FE_p = fator de emissão da frota para o poluente de interesse (g/km)

Os cálculos realizados para obter as parcelas descritas na Equação 01 serão explicados nos itens a seguir.

3.1.1 Estimativa da frota circulante para o ano base de 2002

A frota de veículos leves utilizada neste trabalho foi obtida através da CETESB (ver Anexo II, Planilhas de 01 a 07). Estes números foram processados pela PRODESP (Companhia de Processamento de Dados do Estado de São Paulo) a partir dos dados de veículos licenciados na cidade de São Paulo, fornecidos pelo DETRAN SP (Departamento Estadual de Trânsito).

Optou-se trabalhar com os dados da CETESB, pois são os mesmos dados utilizados na elaboração do Relatório de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo 2002. Porém, é importante notar que a CETESB agrupa os veículos leves de passageiros e os veículos leves comerciais¹¹ em um único grupo denominado de automóveis leves e são diferenciados apenas pelo tipo de combustível: gasolina ou álcool. Outra observação importante é que esta frota de automóveis

¹¹ Ver classificação dos veículos leves segundo resolução CONAMA nº15 no Capítulo 4.

leves é a frota composta pelos veículos leves que foram licenciados na cidade de São Paulo, o que não é exatamente a frota que realmente circula na cidade. Os números e dados específicos sobre a frota automóveis leves estão detalhados no Capítulo 4.

3.1.2 Quilometragem média anual

O cálculo da quilometragem média anual (QM) percorrida pela frota segue a Equação 02:

$$QM = \sum_{i=1984}^{2002} \frac{(\text{km anual} * \text{n}^\circ \text{veículos})_{(i,c)}}{(\text{n}^\circ \text{total de veículos})_{(i)}} \quad (\text{Eq. 02})$$

onde i representa o ano em questão e c a categoria veicular (automóvel). A quilometragem anual, para os automóveis leves, na fórmula está diretamente relacionada com a idade do veículo como mostrado na figura 3.1.

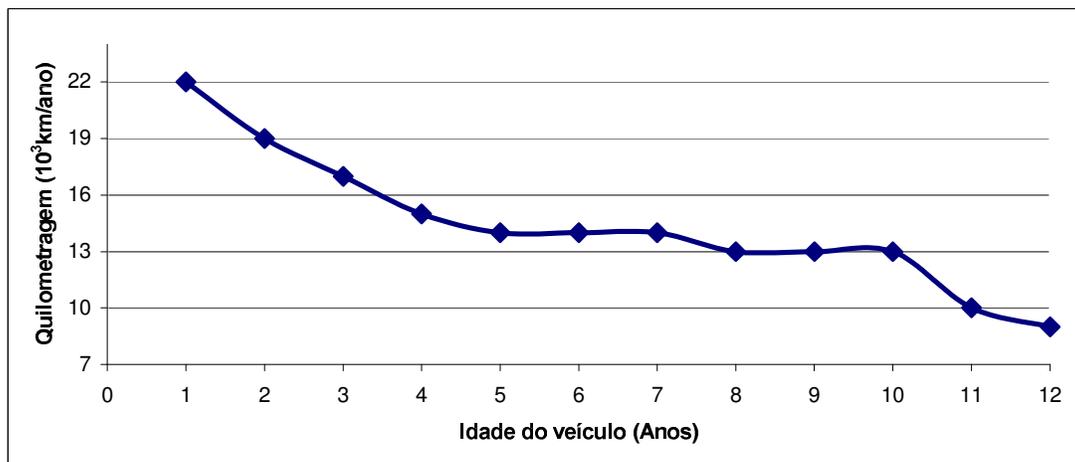


Figura 3.1 – Distribuição da quilometragem atual pela frota do veículo.

Fonte: Elaboração própria a partir de Murgel et al., 1987.

3.1.3 Fator de emissão

O fator de emissão (FE) é um valor médio das quantidades emitidas e é obtido através de cálculos estatísticos e/ou medições reais, sendo específico para um dado poluente e típico de um

determinado modelo de veículo, classe, ano ou frota de veículos (automóveis, caminhões, motos, etc), e é expresso em gramas de poluentes por quilometro percorrido (MURGEL et al., 1987).

O fator de emissão para veículos novos é obtido através de ensaios determinados pela norma NBR-6.601 – Análise dos Gases de Escapamento de Veículos Rodoviários Automotores Leves a Gasolina. Esses fatores são fornecidos pela CETESB (2003a) e encontram-se na tabela 3.1. É importante observar que estes fatores de emissão são relativos ao veículo que acaba de sair da fábrica.

O uso do veículo provoca um desgaste nos seus componentes, o que ocasiona um aumento nas emissões de CO e HC. Por isto é utilizado um fator multiplicativo, chamado fator de deterioração (FD), que é incorporado ao fator de emissão, conforme a Equação 03. Para a emissão de NOx considera-se que não ocorre deterioração ao longo do tempo, portanto o $FD_{NOx} = 1$ (Murgel et al., 1987).

$$FE_{\text{corrigido}} = FE(\text{veículo novo}) * FD \quad (\text{Eq. 03})$$

Assumiu-se aqui que os fatores de deterioração para veículos nacionais, para efeito de cálculo, são os mesmos utilizados para a frota americana de veículos automotores, já que a própria CETESB leva em conta a similaridade tecnológica de modelos sem controle de emissão ao selecionar esses fatores. Estes fatores são calculados conforme as Equações 04, 05, 07 e 08. Considera-se para os veículos leves a álcool os mesmos fatores de deterioração dos veículos leves movidos à gasolina.

Para os veículos a gasolina anteriores a 1977 são utilizados os mesmos fatores de deterioração que para os modelos veiculares pré-1968 dos EUA. Os fatores de deterioração para o CO e o HC são calculados conforme as equações 04 e 05 respectivamente.

Tabela 3.1 - Fatores médios de emissão de veículos leves novos¹

ANO MODELO	COMBUSTÍVEL	CO (g/km)	HC (g/km)	NOx (g/km)	RCHO (g/km)	CO ₂ ⁽²⁾ (g/km)	Autonomia ⁽³⁾ (km/L)	EMIÇÃO EVAPORATIVA (g/teste)
PRÉ - 80	Gasolina	54	4.7	1.2	0.050	nd	nd	nd
80 - 83	Gasolina C	33	3.0	1.4	0.050	nd	nd	nd
	Álcool	18.0	1.6	1.0	0.160	nd	nd	nd
84 - 85	Gasolina C	28	2.4	1.6	0.050	nd	nd	23.0
	Álcool	16.9	1.6	1.2	0.180	nd	nd	10.0
86 - 87	Gasolina C	22	2.0	1.9	0.040	nd	nd	23.0
	Álcool	16.0	1.6	1.8	0.110	nd	nd	10.0
88	Gasolina C	18.5	1.7	1.8	0.040	nd	nd	23.0
	Álcool	13.3	1.7	1.4	0.110	nd	nd	10.0
89	Gasolina C	15.2 (-46%)	1.6 (-33%)	1.6 (0%)	0.040 (-20%)	nd	nd	23.0 (0%)
	Álcool	12.8 (-24%)	1.6 (0%)	1.1 (-8%)	0.110 (-39%)	nd	nd	10.0 (0%)
90	Gasolina C	13.3 (-53%)	1.4 (-42%)	1.4 (-13%)	0.040 (-20%)	nd	nd	2.7 (-88%)
	Álcool	10.8 (-36%)	1.3 (-19%)	1.2 (0%)	0.110 (-39%)	nd	nd	1.8 (-82%)
91	Gasolina C	11.5 (-59%)	1.3 (-46%)	1.3 (-19%)	0.040 (-20%)	nd	nd	2.7 (-88%)
	Álcool	8.4 (-50%)	1.1 (-31%)	1.0 (-17%)	0.110 (-39%)	nd	nd	1.8 (-82%)
92	Gasolina C	6.2 (-78%)	0.6 (-75%)	0.6 (-63%)	0.013 (-74%)	nd	nd	2.0 (-91%)
	Álcool	3.6 (-79%)	0.6 (-63%)	0.5 (-58%)	0.035 (-81%)	nd	nd	0.9 (-91%)
93	Gasolina C	6.3 (-77%)	0.6 (-75%)	0.8 (-50%)	0.022 (-56%)	nd	nd	1.7 (-93%)
	Álcool	4.2 (-75%)	0.7 (-56%)	0.6 (-50%)	0.040 (-78%)	nd	nd	1.1 (-89%)
94	Gasolina C	6.0 (-79%)	0.6 (-75%)	0.7 (-56%)	0.036 (-28)	nd	nd	1.6 (-93%)
	Álcool	4.6 (-73%)	0.7 (-56%)	0.7 (-42%)	0.042 (-77%)	nd	nd	0.9 (-91%)
95	Gasolina C	4.7(-83%)	0.6 (-75%)	0.6(-62%)	0.025(-50%)	nd	nd	1.6 (-93%)
	Álcool	4.6 (-73%)	0.7 (-56%)	0.7 (-42%)	0.042 (-77%)	nd	nd	0.9 (-91%)
96	Gasolina C	3.8 (-86%)	0.4 (-83%)	0.5 (-69%)	0.019 (-62%)	nd	nd	1.2 (-95%)
	Álcool	3.9 (-77%)	0.6 (-63%)	0.7 (-42%)	0.040 (-78%)	nd	nd	0.8 (-92%)
97	Gasolina C	1.2 (-96%)	0.2 (-92%)	0.3 (-81%)	0.007 (-86%)	nd	nd	1.0 (-96%)
	Álcool	0.9 (-95%)	0.3 (-84%)	0.3 (-75%)	0.012 (-93%)	nd	nd	1.1 (-89%)
98	Gasolina C	0.79 (-97%)	0.14 (-94%)	0.23 (-86%)	0.004 (-92%)	nd	nd	0.81 (-96%)
	Álcool	0.67 (-96%)	0.19 (-88%)	0.24 (-80%)	0.014 (-92%)	nd	nd	1.33 (-87%)
99	Gasolina C	0.74 (-97%)	0.14 (-94%)	0.23 (-86%)	0.004 (-92%)	nd	nd	0.79 (-96%)
	Álcool	0.60 (-96%)	0.17 (-88%)	0.22 (-80%)	0.013 (-92%)	nd	nd	1.64 (-84%)
2.000	Gasolina C	0.73 (-97%)	0.13 (-95%)	0.21 (-87%)	0.004 (-92%)	nd	nd	0.73 (-97%)
	Álcool	0.63 (-96%)	0.18 (-89%)	0.21 (-83%)	0.014 (-92%)	nd	nd	1.35 (-87%)
2.001	Gasolina C	0.48 (-98%)	0.11 (-95%)	0.14 (-91%)	0.004 (-92%)	nd	nd	0.68 (-97%)
	Álcool	0.66 (-96%)	0.15 (-91%)	0.08 (-93%)	0.017 (-91%)	nd	nd	1.31 (-87%)
2.002 ⁽⁴⁾	Gasolina C	0.43 (-98%)	0.11 (-95%)	0.12 (-95%)	0.004 (-92%)	198	10.9	0.61 (-97%)
	Álcool	0.74 (-96%)	0.16 (-90%)	0.08 (-93%)	0.017 (-91%)	191	7.2	nd

1- Médias ponderadas de cada ano-modelo pelo volume da produção.

2- A inclusão dos dados do dióxido de carbono, foi feita em 2002.

3- Obtida por balanço de carbono, conforme a NBR 7.024, para o ciclo de condução urbana.

4- Para os modelos à gasolina predominam motores de 1.0L; para os a álcool, de 1,5 à 1,9L.

nd não disponível

(%) refere-se à variação verificada em relação aos veículos 1985, antes da atuação do PROCONVE.

Gasolina C: 78% gasolina + 22% álcool (v/v)

Fonte: CETESB, 2003a.

$$FD_{(CO)} = \frac{78,27 + 2,5 * Y}{78,27} \quad (\text{Eq. 04})$$

$$FD_{(HC)} = \frac{7,25 + 0,18 * Y}{7,25} \quad (\text{Eq. 05})$$

Onde Y é definido como sendo:

$$Y = \frac{\text{km acumulada pelo veículo}}{1,61 * 10.000} \quad (\text{Eq. 06})$$

O valor y passa a ser constante depois de percorridos 100.000 km, e é fixado em 6,27.

Para os veículos a gasolina fabricados a partir de 1977, inclusive, são utilizados os mesmos fatores de deterioração que para os modelos veiculares 1968/1969 dos EUA. Os fatores de deterioração para o CO e o HC são calculados conforme as equações 07 e 08 respectivamente.

$$FD_{(CO)} = \frac{56,34 + 2,55 * Y}{56,34} \quad (\text{Eq. 07})$$

$$FD_{(HC)} = \frac{4,43 + 0,25 * Y}{4,43} \quad (\text{Eq. 08})$$

O fator de emissão corrigido por sua vez será utilizado no cálculo do fator de emissão médio (FEM) da frota de veículos na cidade de São Paulo, segundo a Equação 09.

$$FEM = \sum_{i=1984}^{2002} (X * FE_{\text{corrigido}})_{(i,c)} \quad (\text{Eq. 09})$$

onde *i* representa o ano em questão, *c* a categoria veicular (automóvel), e X é um fator calculado como mostrado na Equação 10:

$$X_{(i,c)} = \frac{(km \text{ anual} * n^\circ \text{ veículos})_{(i,c)}}{\sum_{i=1984}^{2002} (km \text{ anual} * n^\circ \text{ veículos})_{(i,c)}} \quad (\text{Eq. 10})$$

As emissões de CO₂ e SO_x serão obtidas através de outra metodologia que será detalhada no próximo item.

3.1.4 Cálculo do fator de emissão para SO_x

O fator de emissão do SO_x é calculado através da equação 11 (Murgel et al, 1987):

$$FE_{(SO_x)} = \frac{M1 * d * M2}{M3 * 100 * C1} \quad (\text{Eq. 11})$$

onde:

M1 é a massa molecular do SO₂ (64 g)

d é a massa específica do combustível (g/l)

M2 é a porcentagem em massa do enxofre no combustível (%)

M3 é a massa molecular do S (32g)

C1 é o consumo médio de combustível (km/l)

Para os veículos a gasolina considera-se M2=0,11%, C1=7,5 km/l e d=755g/l. Para os veículos a álcool considera-se que a emissão de SO_x é desprezível. Os resultados dos fatores de emissão de SO_x para o ano de 2002 não foram calculados porque não estavam disponíveis os dados sobre consumo de combustível.

3.2 Cálculo da emissão de CO₂

Para o cálculo dos fatores de emissão do CO₂ utiliza-se o cálculo estequiométrico baseado na metodologia “*top-down*” do IPCC e que é utilizada pelo Ministério de Ciência e Tecnologia (2002) no relatório de referência de emissões de gases de efeito estufa.

A parcela emitida de CO₂ pela gasolina depende da composição da mistura de gasolina pura e álcool anidro que varia ano a ano. Para 2002 considera-se a composição da “gasolina c” como sendo 78% de gasolina e 22% de etanol. A parcela de CO₂ emitida pela gasolina C fica dividida entre a parcela devida a gasolina pura e a parcela devida ao etanol contido na gasolina. As massas de CO₂ emitida pela queima de 1 litro de gasolina C são respectivamente 1.770 e 333 gramas de CO₂.

Já a parcela de CO₂ emitida pelo etanol utilizado pelos veículos a álcool é de 1.514 gramas por litro. Apesar da parcela de CO₂ emitida pelo etanol ser considerada nula no ciclo do carbono, devido a ação da fotossíntese, é importante conhecer as quantidades emitidas deste gás que é considerado um dos principais causadores do efeito estufa.

Os cálculos estequiométricos para a obtenção das massa de CO₂ obtida tanto para a gasolina C, como para o etanol estão detalhados no Anexo III. Também neste caso, para o ano de 2002, não foi realizado o cálculo de CO₂.

3.3 Comparação dos veículos de combustão interna e veículos com células a combustível

Para fazer uma análise comparativa em termos de emissão de poluentes e consumo de combustível, inicialmente optou-se por fazer uma comparação individual veículo a veículo, para então depois fazer uma projeção de frota. Para isto foram escolhidos dois modelos: um veículo de combustão interna a gasolina e outro veículo com célula a combustível a hidrogênio.

O veículo de combustão interna escolhido foi o Gol Trend 1.0 versão 2002 da Volkswagen, que é considerado o modelo de carro mais vendido no País. Segundo a ANFAVEA

(2003) os veículos de 1.000 cilindradas (vulgarmente chamados de populares) representaram em 2002, 66,7% das vendas de automóveis leves no Brasil.

O veículo com célula a combustível escolhido foi o modelo FCX da Honda. Este veículo foi o primeiro veículo com célula a combustível a ser certificado pela US Environmental Protection Agency (EPA, 2003) como veículo sem emissão (emissions-free) em novembro de 2002. Os dados do Gol Trend 1.0 e do Honda FCX são apresentados na tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Principais características.

	GOL Trend	Honda FCX
Motor	Combustão interna 1.0	Elétrico, CA assíncrono
Potência	65 cv a 6000 rpm	60 kW
Torque	892 Nm a 4500 rpm	272 Nm
Combustível	gasolina	hidrogênio comprimido
Tanque	51 L	3,75kg a 345 bar*
Velocidade máx.	157 km/h	150 km/h
Consumo cidade	13,6 km/litro	82 km/kg
Consumo estrada	16,8 km/litro	77 km/kg
Autonomia máx.	694 km	355 km

*1 kg de hidrogênio contém energia equivalente a 3,78 litros de gasolina.

Fonte: VW, 2003; Honda, 2003.

Como as montadoras de veículos não liberam os fatores de emissão dos veículos novos, será adotado o fator de limite de emissão de poluentes exigido pelo PROCONVE. A tabela 3.3 apresenta os limites de emissões para cada veículo no momento em que são disponibilizados para venda.

Tabela 3.3 – Limites de emissão para cada veículo.

	GOL Trend⁽¹⁾	Honda FCX⁽²⁾
CO	2 g/km	0
HC	0,3 g/km	0
NOx	0,6 g/km	0
MP	0,05 g/km	0
Aldeídos	0,03 g/km	0

1- Limite de emissão determinado pelo PROCONVE para veículos novos no Brasil, a partir de 1997.

2- Limite de emissão determinado pelo EPA (USA) para os veículos classificados como de emissão zero.

Fonte: Elaboração própria.

O consumo de combustível para cada um dos veículos é mostrado na tabela 3.4

Tabela 3.4 – Consumo de combustível.

Veículo	Combustível	Km anual	Consumo na cidade	Consumo anual	Consumo energético
Gol Trend	Gasolina	22.000 km*	13,6 km/l	1.618 litros de gasolina	56.391 GJ
Honda FCX	Hidrogênio	22.000 km*	82 km/kg	288kg H ₂	38 GJ
Flex -fuel	Álcool	22.000 km*	9,4 km/l		

*dados CETESB para veículos novos.

Fonte: Elaboração própria.

3.4 Cenários

Para a construção dos cenários, que são apresentados a seguir, foi preciso antes estimar a frota de veículos a gasolina e a álcool até o ano 2020. Primeiro transformou-se os dados da frota de 1996 a 2002 em valores percentuais. Utilizou-se então duas funções estatísticas do Excel, para estimar o tamanho da frota até o ano de 2020. Enquanto a primeira função (previsão) é uma função linear a segunda (crescimento) é uma função exponencial. Como os valores percentuais ultrapassavam os limites estipulados foi necessário um ajuste para a correção destes valores. Por último fez-se a transformação dos valores percentuais para valores numéricos, obtendo-se o tamanho da frota. A frota estimada para o ano de 2020 para a cidade de São Paulo se encontra no Anexo II, Planilhas 10 e 11.

Para este trabalho foram desenvolvidos três cenários, que tiveram como referência o ano de 2020.

Cenário A - cenário tendencial, onde não será adotada nenhuma modificação nos veículos de combustão interna a gasolina ou a álcool, permanecendo os fatores médios de emissão fornecidos pela CETESB para os veículos novos no ano de 2002 (ver Tabela 3.1). Este cenário servirá de base para o desenvolvimento dos outros dois cenários e permitirá a comparação dos níveis de emissões obtidos.

A frota projetada de veículos a álcool permanecerá a mesma para todos os cenários, pois o álcool é um combustível renovável; com menores emissões de poluentes que a gasolina. Portanto, a partir do Cenário B apenas os veículos novos a gasolina são substituídos pelos veículos com células a combustível.

Cenário B - cenário para introdução dos veículos com células a combustível na cidade de São Paulo em substituição aos veículos de combustão interna. Serão utilizados os índices de introdução propostos para Los Angeles, Califórnia (ver Tabela 2.12, Capítulo 2).

Cenário C – trata-se do cenário realista para a cidade de São Paulo, onde serão introduzidos veículos com células a combustível. O percentual de veículos com células a combustível a ser introduzido na cidade de São Paulo baseia-se no percentual do cenário B, porém ele foi corrigido por um fator igual a 3,67 que é a razão entre o PIB de 2000 para a região metropolitana de Los Angeles¹² e o PIB da Região Metropolitana de São Paulo¹³ para o mesmo ano.

Os resultados obtidos a partir da construção destes cenários, são apresentados e analisados no capítulo 6. No Anexo II estão as planilhas para as frotas projetadas e os respectivos inventários emissões para os três cenários no ano de 2020.

¹² O PIB de Los Angeles County em 2000 foi de US\$363.70 billion. U.S. CONFERENCE OF MAYORS. Disponível em :<<http://www.losangelesalmanac.com/topics/Economy/ec001.htm>>. Acesso em: 12 Jan. 2004.

¹³ O PIB da RMSP em 2000 foi de US\$99 bilhões. PREFEITURA DA CIDADE DE SÃO PAULO. Disponível em: <http://www6.prefeitura.sp.gov.br/secretarias/planejamento/sp_em_numeros/dados_socioeconomicos/atividades_economicas/0001/0010>. Acesso em: 12 Jan. 2004.

Capítulo 4

Consumo de combustíveis veiculares na cidade de São Paulo e suas emissões associadas

A história do crescimento urbano de São Paulo tem sido marcada pela falta de priorização de transportes coletivos de qualidade. Ao longo das décadas, o transporte individual foi se tornando uma opção natural, devido não só à insuficiência do transporte público, como também ao acesso facilitado do uso e aquisição do automóvel. Conseqüentemente, a proporção do número de carros por habitante cresceu de 1/40 na década de quarenta, para quase 1/2 nos anos noventa (Saldiva, Braga & Pereira, 2001).

Outra característica do crescimento da cidade é a mudança de várias indústrias do Município de São Paulo para outros municípios. Ao longo dos anos, São Paulo foi se transformando em uma cidade predominantemente de serviços. Devido a este cenário, a emissão de poluentes atmosféricos através de fontes móveis foi aumentando gradativamente sua participação relativa, de forma bastante significativa. Pode-se dizer, aliás, que as fontes móveis são responsáveis por noventa por cento da emissão de poluentes na cidade (Saldiva, Braga & Pereira, 2001).

Este capítulo trata da frota de automóveis leves, do consumo de combustível e das emissões associadas e analisa a relação existente entre estas variáveis e como elas impactam a cidade de São Paulo.

4.1 Descrição da frota de veículos leves da Cidade de São Paulo

No Brasil a Resolução CONAMA nº15 de 1995 é tida como um marco para a classificação dos veículos leves (Azuaga, 2000). Antes dela só existiam duas distinções para veículos leves para efeito de aplicação dos limites máximos de emissão de gases de escapamento. Os veículos eram veículos leves do ciclo Otto ou então eram veículos derivados de automóveis e veículos não derivados de automóveis.

Após esta Resolução, estabeleceu-se a divisão dos veículos leves nas seguintes categorias listadas abaixo para a aplicação dos padrões de emissão de gases de escapamento. Estes padrões foram introduzidos em duas fases, uma a partir de 1º/01/97 (para veículos leves de passageiros e comercial importados) e a outra a partir de 1º/01/98 (para veículos leves comercial nacional ou do Mercosul) nas seguintes categorias:

- Veículo Leve de Passageiros: todos os automóveis (inclui o tipo perua - *station wagon*);
- Veículo Leve Comercial 1: LVW16 = 0 a 1.700 kg;
- Veículo Leve Comercial 2: LVW = acima de 1.700 kg;
- Veículo Leve Comercial de Ciclo Diesel: LVW = acima de 1.700 kg e massa total máxima acima de 2.000 kg.

Comparativamente, nos Estados Unidos da América às categorias definidas pelo EPA são também classificadas por peso dos veículos (Azuaga, 2000):

- Veículo Leve (*Light Duty Vehicle – LDV*): todos os automóveis (inclui as peruas);
- Comercial Leve 1 (*Light Duty Truck 1 – LDT 1*): GVW17 (0 a 2.722 kg) e LVW (0 a 1.700 kg);
- Comercial Leve 2 (*Light Duty Truck 2 – LDT 2*): GVW (0 a 2.722 kg) e LVW (1.701 a 2.608 kg);
- Comercial Leve 3 (*Light Duty Truck 3 – LDT 3*): GVW (2.723 a 3.856 kg) e ALVW18 (0 a 2.608 kg);

- Comercial Leve 4 (*Light Duty Truck 4 – LDT 4*): GVW (2.722 a 3.856 kg) e ALVW (2.609 a 3.856 kg).

Portanto, pela legislação brasileira, os veículos leves estão basicamente divididos em automóveis e comerciais leves, sendo que estes últimos ainda apresentam três subdivisões, dependendo não só do peso veicular, como também do ciclo de operação do motor.

Os dados obtidos para a frota da cidade de São Paulo (CETESB, 2003b) não entram neste nível de detalhamento, apesar de serem os mesmos dados usados pela CETESB¹⁴ para a elaboração do Relatório de Qualidade do Ar. Para fins deste trabalho os veículos comerciais leves serão classificados daqui para frente como automóveis leves (classificação usada pela CETESB) e serão diferenciados somente quanto ao tipo de combustível, gasolina ou álcool (ver anexo II, Planilhas 01 a 07). A tabela 4.1 apresenta a composição da frota de veículos licenciados¹⁵ na cidade de São Paulo para o período de 1995 a 2002.

Tabela 4.1 – Composição da frota de veículos para a cidade de São Paulo.

	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Automóveis Leves	3.641.102	37.44.293	3.747.475	3.816.785	3.870.764	3.975.301	4.114.460	4.224.487
Camionetas	337.124	362.157	369.397	381.896	395.518	418.394	434.144	431.698
Caminhões	142.636	145.614	139.646	161.756	162.909	164.463	166.547	167.689
Ônibus	45.658	49.887	48.235	51.970	54.265	57.172	60.351	62.434
Reboques	0	0	53.030	53.801	54.169	54.753	55.820	56.893
Semi-reboques	0	0	11.129	12.402	13.202	14.395	15.894	16.872
Motos	276.587	287.834	297.031	317.517	342.333	371.029	400.294	431.637
Aluguel - Leve	0	0	47.329	47.155	46.245	45.664	45.391	38.839
Total	4.443.107	4.589.785	4.713.272	4.843.282	4.939.405	5.101.171	5.292.901	5.430.549

Fonte: CETESB, 2003b.

¹⁴ As tabelas com as frotas de veículos para o período de 1995 a 2002 foram adquiridas na CETESB, contudo estas tabelas são produzidas pelo Departamento de Análises – PRODESP.

¹⁵ A frota não se refere aos veículos que circulam diariamente na cidade de São Paulo e sim a frota que esta registrada nesta cidade.

Conclui-se através da tabela 4.1 que 78% dos veículos que estão licenciados no ano de 2002 na cidade de São Paulo são automóveis, enquanto apenas 11% da frota é formada por ônibus. Isto comprova a preferência atual dos usuários pelo transporte particular.

O índice de motorização da cidade de São Paulo, considerando a frota de veículos e a população em Dezembro/2002, é de cerca de 1 automóvel para cada 1,95 habitantes (tabela 4.2).

Tabela 4.2-Índice de motorização na cidade de São Paulo.

	1 9 9 5	1 9 9 6	1 9 9 7	1 9 9 8	1 9 9 9	2 0 0 0	2 0 0 1	2 0 0 2
Frota Total	4.443.107	4.589.785	4.713.272	4.843.282	4.939.405	5.101.171	5.292.901	5.430.549
População *	9.952.805	10.040.370	10.134.220	10.233.627	10.333.057	10.426.384	10.489.159	10.615.844
Índice de Motorização	2,24	2,19	2,15	2,11	2,09	2,04	1,98	1,95

* Dados da Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados - SEADE, 2003.

Fonte: Elaboração própria

A figura 4.1 mostra a composição da frota de automóveis na cidade de São Paulo. Percebe-se claramente que a frota de automóveis a álcool é uma frota muito antiga, pois 63% dos que estão em circulação têm mais de 16 anos de uso. A frota de automóveis a gasolina possui 58% dos veículos com idades variando de 1 a 10 anos, enquanto que 35% têm mais de 16 anos. A frota total é composta por 40% de automóveis com mais de 16 anos.

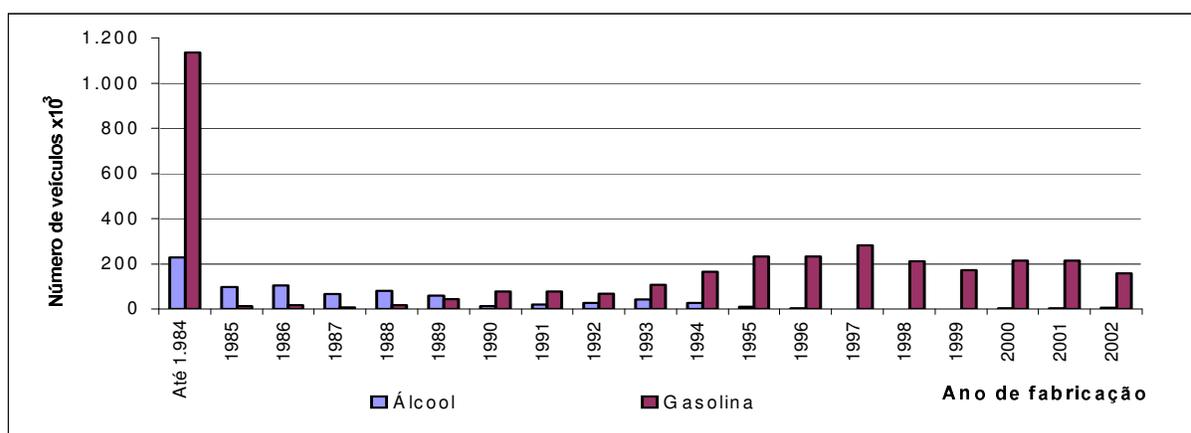


Figura 4.1 – Composição etária da frota de automóveis leves a gasolina e a álcool na cidade de São Paulo em 2002.

Fonte: CETESB, 2003a.

Estes dados reforçam a necessidade, do ponto de vista ambiental, da renovação da frota e da inspeção veicular. Automóveis velhos requerem mais cuidados, pois os desgastes devido ao uso acarretam em mais emissões de poluentes, assim como em maior consumo de combustível, sem falar que a mecânica do automóvel fica comprometida, colocando em risco principalmente a vida do motorista e dos passageiros.

4.2 Consumo de combustíveis veiculares na Cidade de São Paulo

O Brasil é o único país no mundo que possui uma frota veicular que utiliza etanol em larga escala como combustível. Os veículos movidos a etanol hidratado representam 17,2% da frota da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) e os movidos a gasolina C (mistura 22% de etanol e 78% de gasolina) representam 76,3%, sendo, portanto que o álcool corresponde a 34% do combustível consumido. Já os veículos movidos a óleo Diesel representam 6,5% da frota.

No Estado de São Paulo, também, vem aumentando a participação dos combustíveis fósseis na matriz energética, sendo justamente no setor de transporte onde este aumento se torna mais evidente. A tabela 4.3 quantifica o consumo de combustível por setor para o Estado de São Paulo.

A figura 4.2 mostra a evolução da quantidade dos automóveis na cidade de São Paulo em função do combustível utilizado. Percebe-se o declínio do veículo a álcool em detrimento dos veículos a gasolina (basicamente 80% da frota em 2002 utilizava como combustível a gasolina).

Neste trabalho não está sendo considerada a frota de veículos leves a gás natural veicular (GNV), devido principalmente à falta de dados dos veículos licenciados (na maioria das vezes são veículos a gasolina ou a álcool que foram convertidos para GNV) e também pela falta de dados mais precisos sobre o consumo de GNV na cidade de São Paulo.

Tabela 4.3 – Consumo de combustível por setores para o Estado de São Paulo (10⁹ kcal).

SETORES	1986	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Consumo Final	334.934	360.860	379.888	383.162	400.021	424.589	440.945	476.708	507.628	517.676	532.049	510.046	513.396
Cons. Final Não Energ.	39.059	37.280	41.212	42.741	46.284	51.516	54.878	59.528	69.418	72.599	82.338	77.387	90.346
Cons. Final Energético	295.875	323.580	338.676	340.421	353.737	373.073	386.067	417.180	438.210	445.077	449.711	432.659	423.050
Setor Energético	37.773	44.133	43.865	42.445	42.888	40.162	37.148	41.875	42.518	32.428	26.534	24.488	20.392
Residencial	26.294	31.034	32.420	32.816	33.641	34.279	36.095	39.592	39.944	41.814	42.128	43.192	40.142
Comercial	9.471	10.625	10.406	10.634	11.374	11.818	12.792	13.761	14.975	15.480	16.318	17.566	16.313
Público	4.653	5.360	5.756	5.808	6.275	6.657	6.758	7.113	7.622	8.113	8.433	8.673	8.099
Agropecuário	8.634	9.250	9.699	10.027	10.178	10.754	11.320	12.084	12.652	11.517	12.535	11.728	10.684
Transporte	91.691	101.595	107.327	108.110	111.922	123.066	131.269	147.944	156.995	155.846	160.535	150.659	145.429
Rodoviário	77.084	86.373	91.331	92.160	93.990	102.991	108.941	121.690	127.833	124.445	129.958	123.175	122.179
Ferroviano	1.584	1.704	1.550	1.469	1.514	1.446	1.501	1.545	1.514	875	838	841	1.170
Aéreo	3.995	5.076	6.368	6.885	8.520	9.870	12.611	15.309	16.329	18.914	17.516	15.634	13.211
Hidroviário	9.028	8.442	8.078	7.596	7.898	8.759	8.216	9.400	11.319	11.612	12.223	11.009	8.869
Industrial	117.359	121.583	129.203	130.581	137.459	146.337	150.685	154.811	163.504	179.879	183.228	176.353	181.991

Fonte: Secretária de Energia SP, 2002.

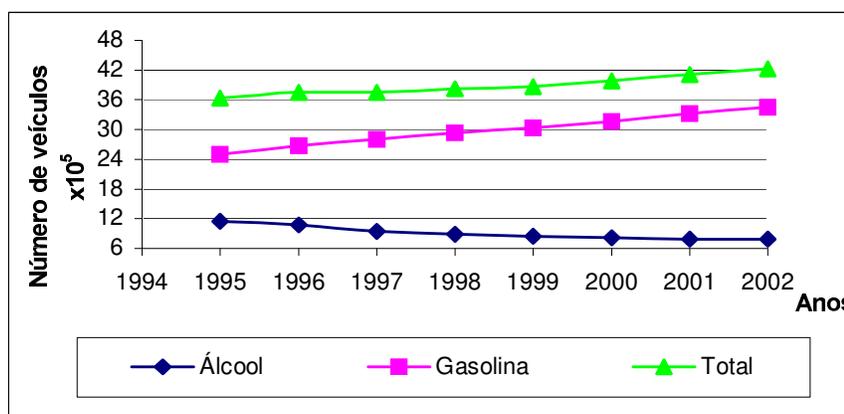


Figura 4.2 – Evolução da frota de automóveis por tipo de combustível na cidade de São Paulo.

Fonte: CETESB, 2003b.

Na tabela 4.4 é apresentado consumo de combustíveis na cidade de São Paulo. O reflexo do menor número de automóveis a álcool é percebido no consumo, que apresenta uma tendência de queda a partir de 1996. O consumo de gasolina vem mantendo um crescimento constante, acompanhando o crescimento desta frota de veículos. A tabela 4.4 também apresenta o consumo

de combustíveis em termos energéticos. O consumo de gasolina na cidade de São Paulo representa 57% do consumo no Estado de São Paulo para o ano de 2001, enquanto que o de álcool foi de apenas 20%.

Tabela 4.4 - Vendas de combustíveis na cidade de São Paulo¹⁶.

Ano	Gasolina		Álcool Hidratado	
	(L)	GJ	(L)	GJ
1990	1.610.058.926	56.126.654	1.910.624.264	43.027.258
1991	1.793.062.050	62.506.143	1.732.433.533	39.014.403
1992	1.833.744.808	63.924.344	1.657.043.516	37.316.620
1993	1.898.006.572	66.164.509	1.606.719.748	36.183.329
1994	1.955.342.787	68.163.250	1.541.060.232	34.704.676
1995	2.228.200.406	77.675.066	1.447.014.430	32.586.765
1996	2.567.458.810	89.501.614	1.395.849.009	31.434.520
1997	2.619.076.755	91.301.016	1.276.470.816	28.746.123
1998	2.725.435.409	95.008.678	1.101.140.290	24.797.679
1999	2.842.288.186	99.082.166	953.778.141	21.479.084
2000	2.918.874.536	101.751.966	823.700.200	18.549.729
2001	3.052.032.554	106.393.855	731.693.685	16.477.742

Observar que os dados são de venda, não significando exatamente consumo na cidade de São Paulo, pois há um intenso tráfego de veículos de outras regiões diariamente pela cidade.

4.3 Emissões Veiculares pela Frota de Veículos na Cidade de São Paulo

A RMSP sofre todo tipo de problemas ambientais, entre os quais está a deterioração da qualidade do ar, devida às emissões atmosféricas de cerca de 2000 indústrias de alto potencial poluidor e por uma frota de aproximadamente 7,2 milhões de veículos, frota esta que representa 1/5 do total nacional (CETESB, 2003a). De acordo com as estimativas de 2002, essas fontes de poluição são responsáveis pelas emissões para a atmosfera, dos seguintes poluentes: 1,7 t/ano de monóxido de carbono, 0,4 t/ano de hidrocarbonetos, 0,4 t/ano de óxidos de nitrogênio, 0,07 t/ano de material particulado total e 0,4 t/ano de óxidos de enxofre. Desses totais os veículos são

¹⁶ LOPES, José. **Informação sobre o consumo de gasolina e álcool na cidade de São Paulo.**[mensagem pessoal]. Mensagem recebida por paulaart@fem.unicamp.br em 27 junho 2003.

responsáveis por 98% das emissões de CO, 97% de HC, 97% NO_x, 52% de MP e 55% de SO_x. A tabela 4.5 mostra a estimativa de emissões originadas por fontes móveis na RMSP em 2.002 (CETESB, 2003a).

Tabela 4.5 – Estimativa de emissão das fontes móveis de poluição do ar na RMSP em 2002.

Fonte de Emissão		Emissão (1000 t /ano)				
		CO	HC	NO _x	SO _x	MP ⁴
Tubo de escapamento de veículos	Gasolina C ¹	790,2	84,2	51,8	9,1	5,2
	Álcool	211,5	22,9	12,6	-	-
	Diesel ²	444,4	72,4	324,5	11,2	20,2
	Táxi	2,3	0,5	0,7	0,3	0,1
	Motocicletas e similares	238,9	31,5	1,2	0,5	0,6
Cárter e Evaporativa	Gasolina C	-	134,1	-	-	-
	Álcool	-	17,2	-	-	-
	Motocicletas e similares	-	17,0	-	-	-
Pneus ³	Todos os tipos	-	-	-	-	8,3
Operações de Transferência de combustível	Gasolina C	-	12,4	-	-	-
	Álcool	-	0,6	-	-	-
Total		1.687,3	392,8	390,8	21,1	34,4

1 – Gasolina C: gasolina contendo 22% de álcool anidro e 700 ppm de enxofre (massa)

2 – Diesel: tipo metropolitano com 1.100 ppm de enxofre (massa)

3 – Emissão composta para o ar (partículas) e para o solo (impregnação)

4 – MP refere-se ao total de material particulado, sendo que as partículas inaláveis são uma fração deste total.

Fonte: CETESB, 2003a.

Com relação às emissões veiculares, é importante o acompanhamento de sua evolução, uma vez que o cenário sofre constantes mudanças como alteração do perfil da frota (álcool e gasolina), composição dos combustíveis, fatores de emissão dos veículos novos que entram em circulação, onde pesa o avanço tecnológico (como por exemplo, o uso de catalisadores).

A tabela 4.6 mostra os fatores médios de emissões (CO, HC e NOx), para veículos a gasolina e álcool, calculados para a cidade de São Paulo segundo a metodologia desenvolvida pela CETESB (Murguel et al., 1987) e que foi detalhada no Capítulo 3 desta dissertação. As tabelas com os cálculos dos fatores de emissões e as emissões totais para cada poluente abaixo encontram-se no Anexo II, Planilhas 08 e 09.

Tabela 4.6 – Fatores médios de emissão para a frota de automóveis da cidade de São Paulo – 2002.

	CO (g/km)	HC (g/km)	NOx (g/km)
Gasolina	10,2	1,0	0,6
Álcool	13,7	1,4	1,2

Fonte: Elaboração própria, 2003.

A figura 4.3 compara o volume de emissões do tubo de escapamento dos veículos na RMSP com o da cidade de São Paulo (CSP) em 2002 por tipo de combustível.

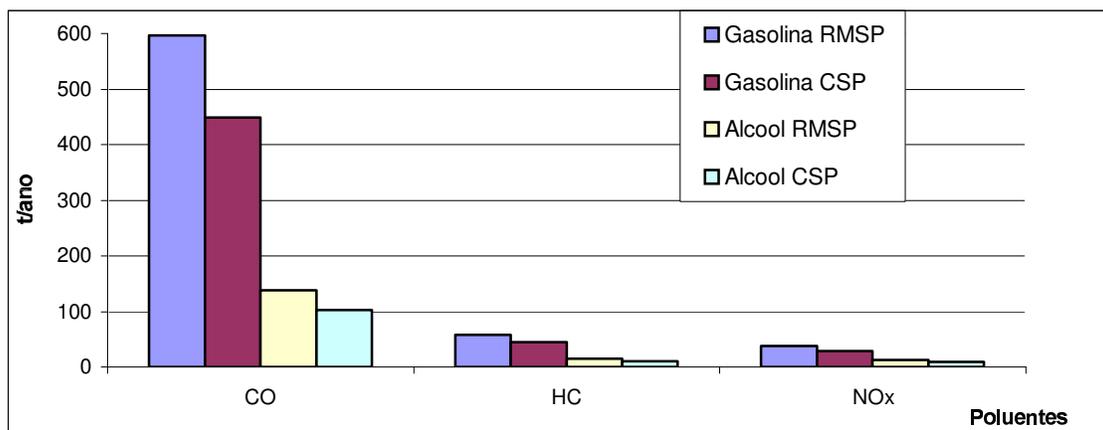


Figura 4.3 – Emissões no tubo de escapamento dos veículos na RMSP e CSP (Cidade de São Paulo) em 2002 (1000 t/ano).

Fonte: Elaboração própria, 2003.

Capítulo 5

Veículos com Células a Combustível

A possibilidade de se substituir o motor de combustão interna usado nos veículos tradicionais por outro mecanismo com emissão de poluentes mais baixa, e que utilizasse outras fontes de energias alternativas, já era considerada desde os anos sessenta. Naquele tempo já se defendia amplamente que a célula a combustível era a fonte de energia capaz de competir com o motor de combustão interna (McNicol, Rand & Williams, 2001).

A célula a combustível foi inventada em 1839 por Sir William Grove e, por volta do século XIX, cientistas renomados como Wilhelm Ostwald predisseram a substituição dos motores térmicos por células a combustível, devido a sua alta eficiência quando comparada com as limitações do ciclo de Carnot. Porém, este prognóstico não se realizou e os veículos de combustão interna que utilizam combustíveis derivados de petróleo dominaram o setor de transporte durante todo o século XX.

Houve alguns períodos de “renascimento” da tecnologia de célula a combustível para aplicações em transporte e também estacionárias durante este tempo, como nos anos cinquenta, quando questões relacionadas com a deterioração da qualidade do ar urbano em países industrializados tornaram as células mais atraentes, devido à sua característica principal: emissões limpas. Nos anos setenta, o aumento dos preços do petróleo no mercado internacional (denominada “Crise do Petróleo”) promoveu a célula a combustível como a provável substituta para o motor de combustão interna em transportes. No atual estágio de desenvolvimento, o custo

elevado do sistema de célula a combustível, comparado ao do motor de combustão interna, tornou qualquer possibilidade de competição econômica inviável.

Durante os anos noventa e até o presente, uma séria preocupação surgiu em torno da sustentabilidade global do sistema de transporte, devido aos impactos ambientais adversos do motor de combustão interna e a continuidade de abastecimento de petróleo. Como consequência, ressurgiu novamente o interesse na aplicação de células a combustível em transportes, particularmente em automóveis e ônibus.

Este capítulo estuda e analisa os veículos com células a combustível. Inicialmente trata do estado da arte das células a combustível: funcionamento, os tipos de células existentes, as suas características principais, aplicações, vantagens e desvantagens. A seguir introduz o conceito de veículos com células a combustível, explicando o funcionamento e as configurações destes veículos, apresentando as principais vantagens e desvantagens, finalizando como os principais fabricantes estão se posicionando com relação a esta tecnologia automotiva.

5.1 As Células a Combustível

As células a combustível (*fuel cells* - FC) são dispositivos eletroquímicos que permitem converter a energia química de uma reação diretamente em energia elétrica (U.S. Department of Energy, 2000). Trata-se de um processo direto, pois a energia química dos combustíveis produz diretamente eletricidade, sem que haja etapas intermediárias neste processo (Ellis, 2002). A estrutura física básica de uma célula consiste de uma camada de eletrólito em contato com um catodo e um anodo poroso de cada lado. Uma representação esquemática da célula, com os reagentes/gases produzidos e a direção do fluxo iônico através da célula, é apresentada na figura 5.1.

Em uma célula a combustível típica, o combustível gasoso ou vaporizado é continuamente fornecido ao ânodo (eletrodo negativo) e um oxidante (oxigênio do ar) é continuamente fornecido ao cátodo (eletrodo positivo); a reação eletroquímica acontece na interface dos eletrodos com o eletrólito, produzindo corrente elétrica. Embora a célula a combustível tenha componentes e

características similares a uma bateria, elas diferem em vários aspectos. A bateria é um dispositivo que armazena energia elétrica, sendo que o máximo de energia disponível é determinado pelas quantidades de reagentes químicos armazenados em seu interior. A sua produção de energia cessa quando os reagentes químicos são consumidos (quando ocorre a descarga da bateria). Estes reagentes são regenerados através de uma recarga, o que envolve colocar energia elétrica na bateria através de uma fonte externa. A célula a combustível, por sua vez, é um dispositivo conversor de energia, que teoricamente tem uma capacidade de produção de energia elétrica por tempo indeterminado, desde que o combustível e o oxidante sejam fornecidos aos eletrodos. (U.S. Department of Energy, 2000).

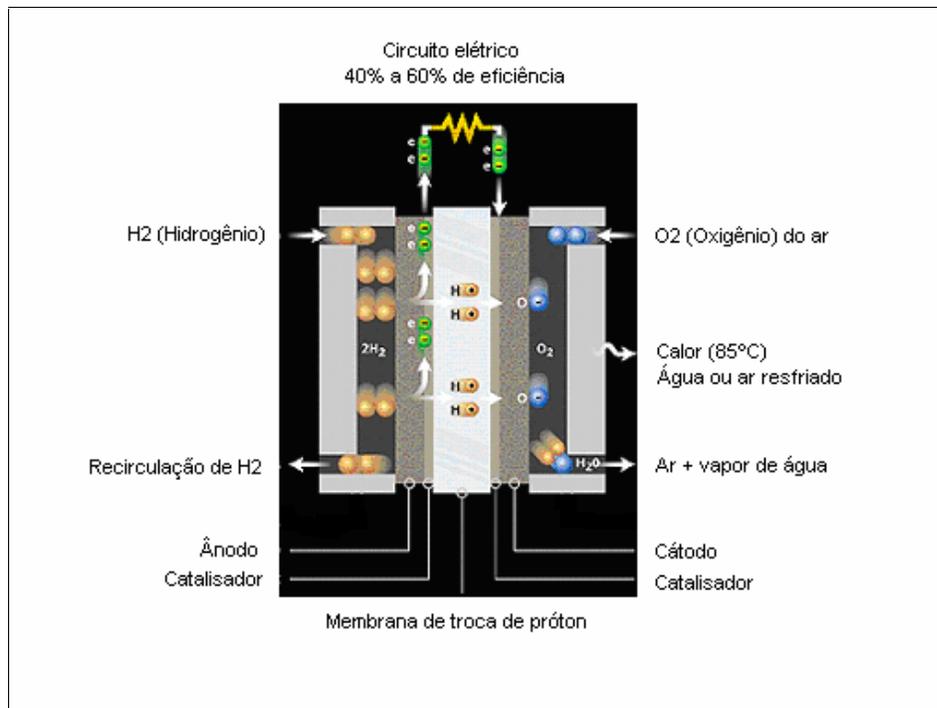


Figura 5.1 – Esquema de uma célula a combustível unitária¹⁷.

5.1.1 Funcionamento básico de uma célula a combustível

Numa célula a combustível do tipo hidrogênio - oxigênio, o hidrogênio introduzido em um eletrodo e o eletrólito reagem na presença de um catalisador formando íons H^+ , enquanto o

¹⁷Ballard Power System. Apresenta foto do esquema de uma célula a combustível unitária. Disponível em : <<http://www.ballard.com>> Acesso em Jan. 2003.

oxigênio introduzido no outro eletrodo reage com as moléculas de água do eletrólito, formando íons OH^- . No eletrólito ocorre a combinação do H^+ com o OH^- , formando água. O eletrodo do hidrogênio se torna negativo em função da liberação de elétrons, enquanto que o eletrodo do oxigênio se torna positivo em função da absorção de elétrons.

Neste mecanismo, na medida em que os eletrodos têm contato com os gases reagentes (hidrogênio para o eletrodo negativo e oxigênio ou ar atmosférico para o eletrodo positivo) há uma diferença de potencial entre os mesmos. Essa diferença de potencial da célula a circuito aberto é da ordem de 1,0 Volt, por par de eletrodo ou célula, o que permite a geração de energia elétrica.

O processo é contínuo quando há o consumo de uma carga ligada ao circuito elétrico externo, que permite o fluxo da corrente simultaneamente à alimentação da célula de combustível pelo combustível e o oxidante. Quando a carga é desligada o processo pára, não havendo consumo de hidrogênio nem de oxigênio assim como, ao se interromper o fornecimento dos mesmos, deixa-se de gerar a corrente elétrica.

A força eletromotriz de uma única célula a combustível teoricamente é da ordem de 1,23 Volts. Porém na prática se obtém apenas 1 Volt. Diversas células são conectadas em série para gerar uma voltagem terminal útil, maior. Esta combinação de células é chamada de módulo. Um número satisfatório de módulos em série ou em paralelo, dependendo do modo de aplicação, constitui o chamado *stack* da célula de combustível. A figura 5.2 mostra esquematicamente um *stack* com destaque de um módulo.

A geração elétrica de uma reação eletroquímica depende da transferência de carga por etapa da reação. A reação de 1 mol de hidrogênio com meio mol de oxigênio gera 2 Faradays, ou 53,6 Ah. As reações envolvidas, com várias fases de transferência, dependem normalmente da temperatura de funcionamento, da natureza do eletrólito e do resultado da reação (se é completa ou se divide em produtos intermediários). Outras perdas podem acontecer por decomposição não-eletroquímica do reagente, ou por reação química entre combustível e oxidante, problemas estes bastante reduzidos atualmente.

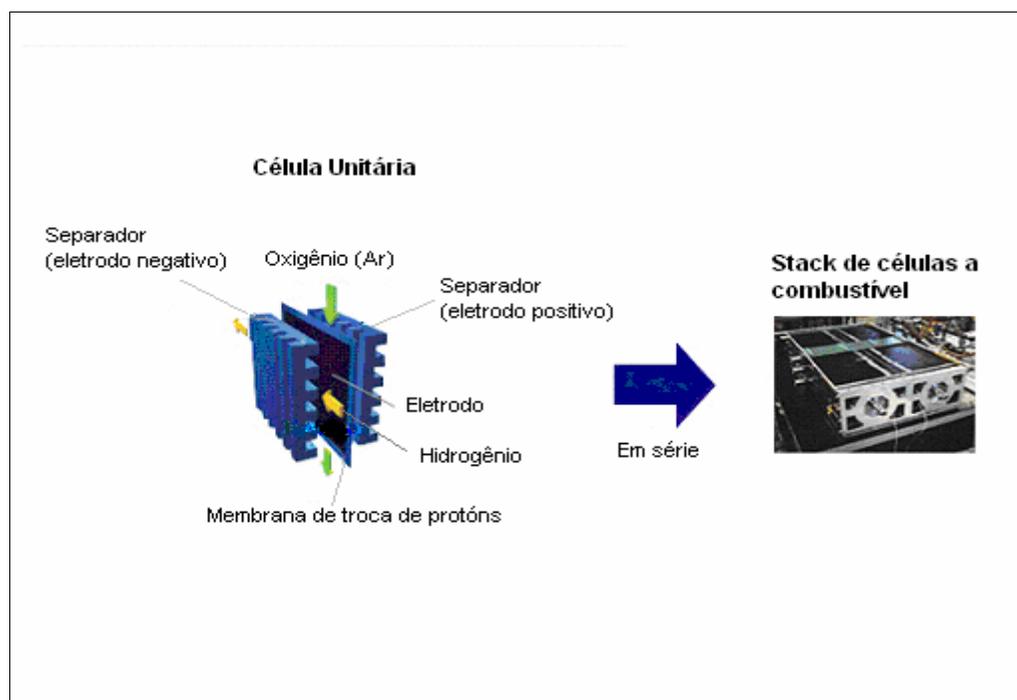


Figura 5.2 - Módulo de uma célula a combustível e um *stack*¹⁸.

A quantidade de energia por unidade de tempo (potência da célula) é determinada efetivamente pela taxa de reação da célula. Isto não depende apenas da reversibilidade do processo de transferência de carga, mas também da transferência de massa dos locais de reação. Esta transferência é complicada pelo fato que a zona de reação é freqüentemente situada no interior das ramificações do sistema de finos poros do eletrodo, onde se encontra também os catalisadores. Durante a reação podem ser estabelecidos elevados gradientes de concentração nos poros, particularmente para sistemas de duas fases (eletrodo/combustível dissolvido em eletrólito) e, se os produtos da reação são pouco solúveis, pode ocorrer precipitação e entupimento dos poros (Amaral, 1998).

Exceto quando condições extremas de trabalho como altas temperaturas e pressões são utilizadas, a escolha do material do eletrodo cataliticamente ativo é um fator decisivo na obtenção de altas densidades de corrente. A composição e a concentração do eletrólito podem

¹⁸ Toyota. Apresenta foto do módulo de uma célula a combustível e um *stack*. Disponível em: <<http://www.toyota.com>> Acesso em Jan. 2003.

facilitar ou dificultar a reação nos eletrodos, e a construção dos eletrodos devem ser tal que possibilite uma grande superfície de contato na zona de reação e, simultaneamente, garanta uma reação mais completa possível dos gases ativos.

Para a utilização prática de células a combustível é preciso contar com todo um sistema de apoio. Além do *stack* da célula é necessário um sistema para alimentação do combustível e do oxigênio em seus respectivos eletrodos. Esta alimentação é feita de forma homogênea e controlada para todas as células simultaneamente, verificando-se a pressão e a vazão.

Quando o oxidante é retirado do ar diretamente, se faz necessário proceder à sua filtragem e introduzi-lo na célula na pressão apropriada. Quando se utiliza um hidrocarboneto como combustível, na maioria dos tipos de células se faz necessário um pré-estágio para a transformação deste hidrocarboneto em hidrogênio, em geral utilizando-se vapor d'água como reagente. É possível a oxidação direta do hidrocarboneto, porém esta não é vantajosa para temperaturas ordinárias em função da baixa velocidade de reação, se comparada com a que ocorre com o hidrogênio. Após sua purificação, o hidrogênio é introduzido na célula também sob pressão apropriada.

Quando a célula está em funcionamento alimentando uma carga, ocorrem perdas que se apresentam na forma de energia térmica. Faz-se necessário então um sistema que retire este calor das células e promova a dissipação no meio ambiente ou, melhor ainda, faça algum uso desta energia. A corrente gerada pela célula precisa ser adequada à aplicação desejada, podendo ser utilizada diretamente como corrente contínua ou ainda transformada em corrente alternada.

Enfim, o sistema é formado por vários outros componentes incluindo-se sensores e outros dispositivos que promovem a integração dos constituintes que trabalham em conjunto com o *stack* da célula, como ilustrado na figura 5.3.

Tabela 5.1 – Características dos vários tipos de células.

Tipo de célula a combustível	Tipo de eletrólito	Temperatura de operação (°C)	Densidade de corrente	Processador de combustível	Compatível com CO ₂	Estágio de desenvolvimento	Perspectivas para: Eficiência alta	Perspectivas para: Custo baixo
PEMFC	Membrana de troca de prótons	70 - 80	Alta	Sim	Sim	protótipos	Boa	Bom
AFC	Alcalino aquoso	80 - 100	Alta	Sim	Não	Aplicação espacial	Boa	Bom
PAFC	Ácido fosfórico	200 - 220	Moderada	Sim	Sim	Aplicações comerciais	Boa	Moderado
MCFC	Carbonato fundido	600 - 650	Moderada	Sim *	Sim	Demonstrações de campo	Boa	Moderado
SOFC	Óxido sólido	800 - 1000	Alta	Sim *	Sim	Demonstrações em laboratório	Boa	Moderado a bom
DMFC	Membrana de troca de prótons	70 - 80	Moderada	Não	Sim	Pesquisa	Ruim	Ruim a moderado

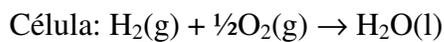
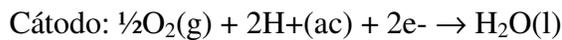
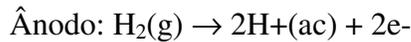
* exceto para gás natural

Fonte: ARB, 2002.

Célula a combustível de membrana de troca de prótons (PEMFC)

Estas células operam a temperaturas relativamente baixas (cerca de 80°C), tem alta densidade de potência, podendo variar rapidamente sua saída de potência, para atender mudanças na demanda da carga. São adequadas para aplicações como os automóveis, onde um *start-up* rápido é exigido. A membrana de troca polimérica é uma folha delgada que permite que íons de hidrogênio passem através dela. A membrana está coberta em ambos os lados com partículas de ligas metálicas altamente dispersas (principalmente a platina), que funcionam como catalisadoras. Os polímeros utilizados como eletrólitos se caracterizam por serem ácidos orgânicos, sendo os mais conhecidos compostos poli-perfluorosulfônico. O eletrólito sólido tem a vantagem de reduzir a corrosão e outros problemas de funcionamento. O hidrogênio é alimentado no ânodo da célula de combustível, onde o catalisador promove a quebra das moléculas de hidrogênio e que seus átomos liberem elétrons e se convertam em íons hidrogênio (prótons). Os elétrons viajam na

forma de corrente elétrica, que pode ser utilizada antes de regressar pelo lado do cátodo da célula de combustível, onde está sendo fornecido o oxigênio. Ao mesmo tempo, os prótons se difundem através da membrana (eletrólito) até o cátodo, onde reagem com íons hidroxila (OH^-), produzidos pela reação do oxigênio com o cátodo, para produzir água, completando assim o processo. Este tipo de célula de combustível é, entretanto, sensível a algumas impurezas presentes no combustível. As reações abaixo mostram de forma simplificada cada etapa do processo.



Como pode-se perceber, a tecnologia PEM requer um reformador para operar com outros combustíveis que não o hidrogênio. A possibilidade de que esta tecnologia possa ter custos competitivos com as máquinas de combustão interna vem atraindo a atenção da indústria para aplicação estacionária de pequena escala (Ellis, 2002).

5.1.3 Vantagens, desvantagens e aplicações das células a combustível

A maior desvantagem das células a combustível até o presente momento, para todos os tipos, é o custo. Porém elas apresentam várias vantagens, por tipo de célula e carga, diferenciando assim as suas aplicações como mostrado na figura 5.4. Estas vantagens são:

Eficiência – As células a combustível geralmente são mais eficientes que máquinas de combustão com pistão ou com turbina. Outra característica dos sistemas de células a combustível é que sistemas pequenos podem ter a mesma eficiência que os sistemas grandes. Esta característica é muito importante para o caso de se ter de geração de energia elétrica de pequeno porte e que possam necessitar de futuros incrementos de potência.

Simplicidade – As células a combustível são muito simples, são compostas por poucas partes móveis, o que as tornam mais seguras e duradouras.

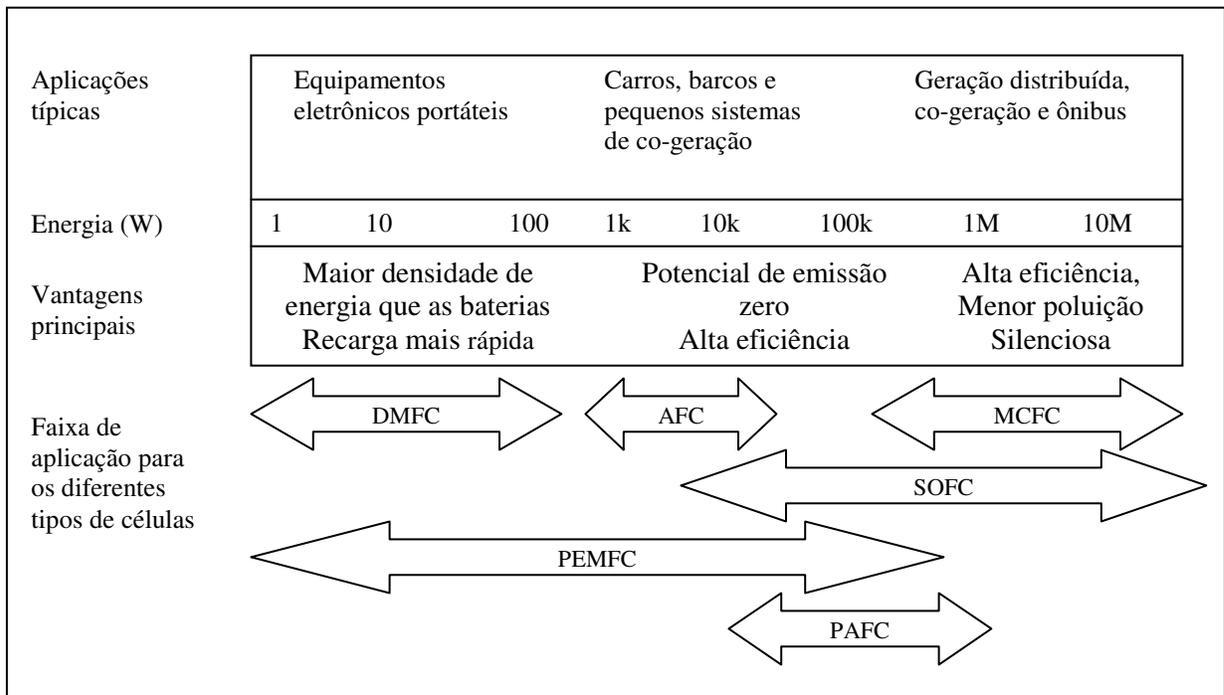


Figura 5.4 – Resumo das aplicações e vantagens de cada tipo de célula a combustível em diferentes utilizações.

Fonte: Larminie & Dicks, 2003.

Baixas emissões – O principal subproduto da reação ocorrida na célula a combustível, quando o combustível utilizado é o hidrogênio em moderadas temperaturas, é água pura, o que permite classificar a célula como um sistema de emissão zero. Esta é a sua maior vantagem quando utilizada em veículos, porém deve ser notado que quase sempre existem emissões de CO₂ envolvidas na produção de hidrogênio.

Silêncio – As células a combustível também são silenciosas, mesmo quando acompanhadas pelo reformador de combustível. Isto é muito importante para aplicações portáteis e veiculares, devido à proximidade de pessoas aos equipamentos.

As vantagens das células a combustível impactam fortemente nos sistemas que combinam calor e energia (para aplicações em pequena e larga escala) e nos sistemas móveis, especialmente para veículos e equipamentos eletrônicos tais como computadores portáteis, telefones móveis e equipamentos de comunicação militar. Estas áreas são os maiores campos onde as células a

combustível poderão ser utilizadas. O ponto chave nesta vasta faixa de aplicações vai de poucos watts até megawatts. As células a combustível são os únicos conversores de energia cuja gama de aplicação excede a de todos os outros concorrentes (Larminie & Dicks, 2003).

5.2 Aplicações Veiculares das Células a Combustível

Os veículos com célula a combustível, também chamados FCVs (*Fuel Cell Vehicles*), representam o abandono dos veículos convencionais de combustão interna, pois utilizam uma tecnologia nova, totalmente diferente. Estas células têm o potencial para reduzir a energia consumida no veículo, bem como a emissão de poluentes prejudiciais ao homem e ao meio ambiente.

Para aplicação em sistemas de propulsão automotivos com vistas à redução de emissões, o fator importante a ser considerado é a temperatura de operação da célula, que deve ser próxima da temperatura ambiente. Além disso, é necessário que ela tenha alta densidade de corrente¹⁹, seja compatível com o processador de combustível e ar, tenha *start-up* rápido e responda rapidamente às freqüentes mudanças de cargas, seja resistente a choques e vibrações e seja relativamente fácil de manter e controlar (ARB, 2002). A tabela 5.2 relaciona os tipos de células com a temperatura de operação, a eficiência do processo e o tempo de *start-up*.

Comparando-se os requisitos apresentados para aplicações automotivas e os vários tipos de células mostrados na tabela 5.2, pode-se perceber porque as células tipo PEM, que utilizam hidrogênio como combustível mais o oxigênio do ar para produzir eletricidade, são as mais indicadas. De fato, estas células operam em temperaturas relativamente baixas (aproximadamente 80°C), têm alta densidade de energia (2.600 W/m²), podem variar sua energia útil rapidamente para satisfazer a demanda de mudanças de energia e permitem ação rápida.

¹⁹ O custo e o volume de um *stack* de células a combustível para o fornecimento de energia são inversamente proporcional ao pico de energia, isto é, o máximo de energia que pode ser fornecida por unidade de volume de células do *stack*.

Tabela 5.2 – Características operacionais das células a combustível.

Tipo de célula	Temperatura de operação (°C)	Eficiência (%HHV)^a	Tempo de <i>start-up</i> (h)^b
PAFC	200	36-45	1-4
AFC	<100	>50	<0,1
MCFC	650	43-55	5-10
SOFC (planar)	1000	43-55	-
PEMFC	<100	32-45 (indireta) >50 (H ₂ direto)	<0,1
DMFC	<100	-	<0,1

a HHV: valor de aquecimento mais alto, isto é o calor total liberado incluindo o calor latente na vaporização da água que é formado pelo processo de oxidação.

b Apenas para o sistema de *stack*, não inclui o tempo de resposta para o processador de combustível caso ele esteja presente.

Fonte: McNicol, Rand & Williams, 2001.

Os veículos com células a combustível acabam por ter uma emissão muito menor que os veículos convencionais de combustão interna porque na célula não ocorre a “queima” de combustível.

Um veículo com célula a combustível é classificado como emissão zero de poluentes quando utiliza hidrogênio diretamente como combustível, em moderadas temperaturas, sendo que do cano de descarga sai apenas água. Porém pode-se armazenar no veículo outro tipo de combustível que contenha hidrogênio em suas moléculas. Este combustível pode, por exemplo, passar por um processo de reforma dentro do veículo (reforma *on board*), que libera hidrogênio para suprir a célula. Nestes casos pode-se utilizar gasolina, gás natural, etanol, metanol entre outros combustíveis, ocorrendo apenas a emissão de vapor de água e dióxido de carbono, como mostrado na tabela 5.3.

Convém ressaltar que as emissões observadas nestas configurações de veículos com células a combustível, que utilizam combustíveis derivados de hidrocarbonetos, satisfazem o futuro

padrão Europeu para carros EURO 04, a ser adotado a partir de 2005, assim como os rígidos padrões da Califórnia (Oertel, 2000).

Tabela 5.3 – Tipo de energia x emissões:

Tipo de Energia	Vapor de água / km	Dióxido de carbono / km
Combustão da gasolina	0,11 kg	0,24 kg
Célula de combustível com tanque de gasolina (hidrogênio reformado)	0,09 kg	0,20 kg
Célula de combustível com tanque de metanol (hidrogênio reformado)	0,07 kg	0,04 kg
Célula de combustível com tanque de hidrogênio	0,07 kg	0,00

Fonte: Fuel Cells 2000, 2000.

5.2.1 Configuração dos veículos com células a combustível.

Os veículos com células a combustível são um tipo especial de veículo elétrico, que possuem uma construção diferente dos veículos tradicionais. Enquanto que nos veículos de combustão a Diesel ou a gasolina a energia do combustível é transmitida do motor para as rodas por um sistema de propulsão mecânico (figura 5.5), nos veículos com células a combustível o sistema de propulsão é elétrico.

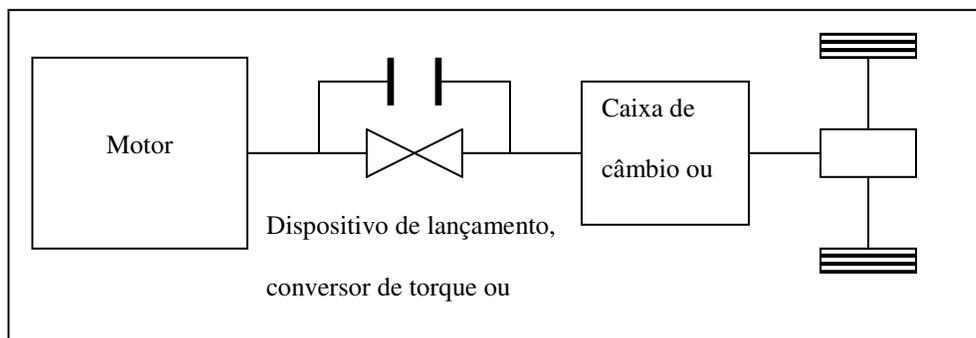


Figura 5.5 – Sistema de propulsão de um veículo tradicional de combustão interna.

Fonte: Laminie & Dicks, 2003.

Os FCVs podem ser classificados de duas maneiras:

- a) pelo sistema de suprimento de combustível: direto (hidrogênio) ou indireto (reforma do combustível)
- b) pelo sistema de propulsão elétrico: puros ou híbridos (série ou paralelo).

Nos sistemas de abastecimento direto, os veículos carregam hidrogênio no tanque de combustível. Este tanque é ligado ao *stack* de células a combustível e fornece hidrogênio sempre que requisitado. O armazenamento de hidrogênio pode ocorrer de três formas: na forma gasosa (comprimido em cilindros de alta pressão), na forma líquida (resfriado a -235°C) e na forma de hidretos metálicos (ligas que funcionam como uma esponja e absorvem o hidrogênio). Os veículos que armazenam hidrogênio desta forma são classificados como veículos de emissão zero. O esquema da configuração para este tipo de tipo de veículo é mostrado na figura 5.6.

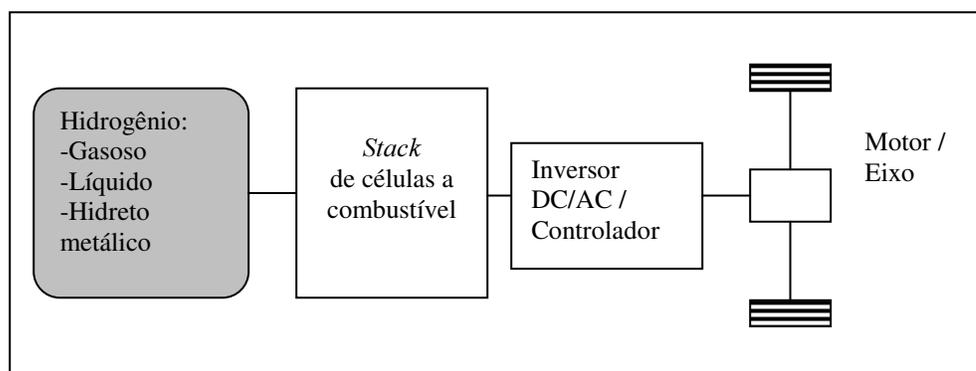


Figura 5.6 – Sistema de suprimento de combustível direto em um veículo com células a combustível.

Fonte: Elaboração própria.

Nos sistemas de abastecimento indireto os veículos utilizam um combustível que contenha hidrogênio em sua estrutura molecular, como o gás natural, o metanol, a gasolina e o etanol (Brasil). Neste processo ocorrem emissões de CO_2 (como foi mostrado na tabela 5.3) e também alguns poluentes. A configuração básica deste tipo de veículo é mostrada na figura 5.7.

Veículo puro com célula a combustível

É o sistema mais simples e a estrutura básica pode ser qualquer uma das mostradas anteriormente.

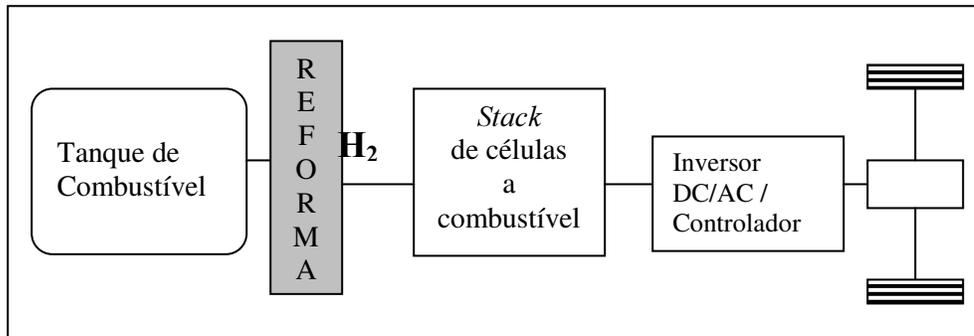


Figura 5.7 – Sistema de suprimento de combustível indireto em um veículo com células a combustível.

Fonte: Elaboração própria.

Veículo híbrido em paralelo com célula a combustível

Um veículo híbrido em paralelo com célula a combustível têm uma configuração como a mostrada na figura 5.8. Neste caso a célula a combustível provê a maior parte da energia para o motor e mantém as baterias carregadas para quando for necessária uma energia extra. Com a bateria completamente carregada, a energia extra pode ser liberada para o motor quando ocorre, por exemplo, uma aceleração. A potência das baterias para este sistema de propulsão é relativamente pequena quando comparada com a da célula a combustível.

Veículo híbrido em série com célula a combustível

A configuração para o veículo híbrido em série está ilustrada na figura 5.9. Neste caso, as baterias provêm toda a energia para o motor, sendo necessário que o conjunto tenha uma potência maior que a da célula. Por outro lado a célula a combustível age como um carregador para as baterias e pode ter uma potência relativamente baixa, que dependerá das condições motrizes. Tais sistemas são particularmente satisfatórios para veículos de entrega urbanos, e foram usados com pouco sucesso com células a combustível do tipo alcalinas.

É importante lembrar que se pode combinar estes dois tipos de configuração, ou seja, um veículo com suprimento direto pode ter um sistema de propulsão puro ou pode ter um sistema de propulsão híbrido em série ou híbrido em paralelo. Da mesma forma um veículo com sistema de suprimento indireto pode ter sistema de propulsão puro, híbrido em série ou híbrido em paralelo. A configuração do veículo vai depender de qual performance se pretende obter do veículo.

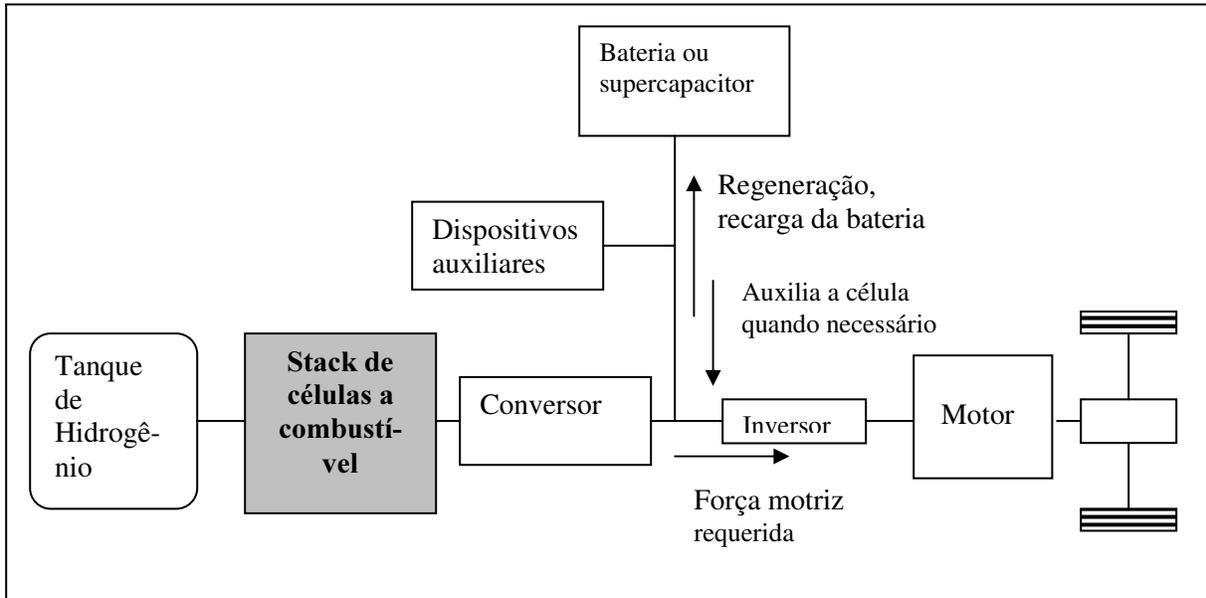


Figura 5.8 – Sistema de propulsão de um veículo híbrido paralelo com célula a combustível.

Fonte: Laminie & Dicks, 2003.

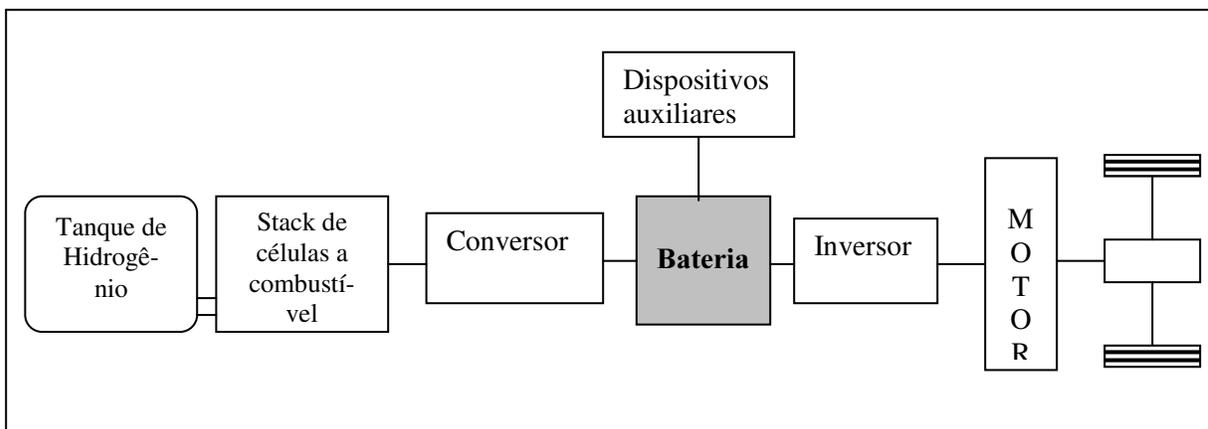


Figura 5.9 – Sistema de propulsão de um veículo híbrido paralelo com célula a combustível.

Fonte: Laminie & Dicks, 2003.

5.2.2 Emissões nos veículos com células a combustível

O potencial de geração de energia sem emissão de poluentes tem sido o maior condutor no desenvolvimento das células a combustível nos últimos 30 anos e a expectativa de emissão zero ou próxima de zero também é responsável por muito do interesse e investimento corrente no desenvolvimento de células a combustível para automóveis com motores elétricos.

Sistemas baseados em hidrogênio/oxigênio do ar são as únicas células a combustível que podem ter emissão zero nos veículos²⁰. Teoricamente, a reforma da gasolina, do metanol e de outros combustíveis a base de carbono, ricos em hidrogênio para o uso em célula a combustível, também pode ser efetuada sem a formação de poluentes, tendo com produtos da reação apenas água e CO₂. Na prática, o reformador de combustível e o sistema de células a combustível envolvem um processo de combustão auxiliar, e assim existe um potencial para formação de NOx e produtos da combustão incompleta, incluindo CO e/ou gases a base de carbono ou vapores. Contudo, se prevalecerem as condições corretas de operação para o metanol e a gasolina, estas emissões podem ser perto de zero para o NOx e extremamente baixas para poluentes a base de carbono, incluindo o CO. A maior razão para isto é o que o processo auxiliar de combustão envolve baixas quantidades de ar, que é conduzida a temperaturas moderadas, conseqüentemente com pouca formação de NOx e fechados nos queimadores catalíticos (ARB, 2002).

As poucas avaliações realizadas para ônibus com células a combustível (ácido fosfórico) indicaram NOx próximo de zero e baixas emissões de outros poluentes, deve-se considerar que o sistema avaliado era experimental e não estava otimizado (ARB, 2002). A confirmação da performance de emissões próximas de zero sobre condições de operação representativas (incluindo *start-up* (ARB, 2003) a frio e rápida mudança de cargas) serão um importante aspecto dos motores com tecnologia PEM e dos programas de testes de veículos com maior desenvolvimento nos próximos anos.

²⁰ Emissões de poluentes ocorrem se o hidrogênio for produzido a partir de gás natural ou outra fonte contendo carbono incluindo o carvão. Tais emissões normalmente são pequenas e ocorrem longe dos grandes centros urbanos. Esses processos naturalmente liberam o gás de efeito estufa CO₂ para a atmosfera. Devido à alta eficiência das células a combustível hidrogênio/ar o total de CO₂ por energia liberada pelo sistema deverá ser significativamente menor que aquele obtido pelos sistemas de combustão interna usando combustíveis derivados de petróleo.

5.3 Veículos com Células a Combustível

As células a combustíveis representam uma grande mudança no mercado de automóveis, tanto em termos de tamanho, valor e impacto ambiental. As primeiras células a combustível foram usadas em veículos a mais de quarenta anos atrás. O primeiro veículo foi desenvolvido em 1962, tratava-se de um *go-cart* (carro de golfe) de Allis-Chalmers, com potência de 4kW fornecida por uma célula a combustível alcalina, Figura 5.10.

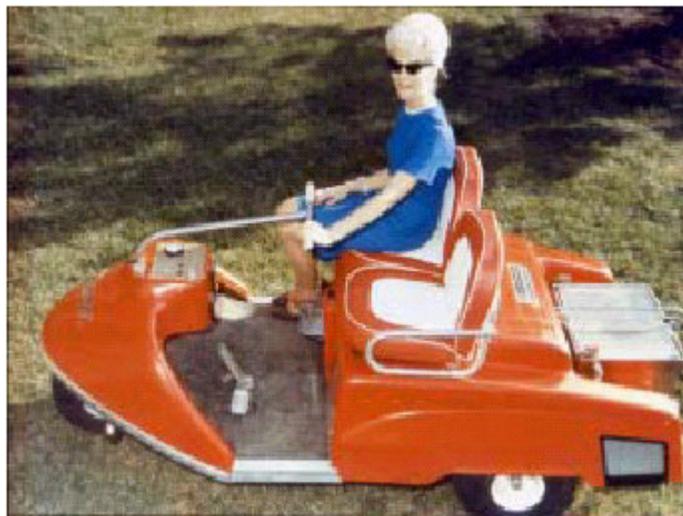


Figura 5.10 – Primeiro veículo com célula a combustível

Fonte: Fuel Cell Today, 2003.

Contudo, durante muitos anos o desenvolvimento desta tecnologia foi insignificante. Somente uns poucos veículos foram fabricados até meados dos anos 90. Desde então o volume de protótipos subiu dramaticamente. Segundo a *Fuel Cell Today* (2003) existe atualmente em torno de 200 veículos com célula a combustível (*fuel cells vehicles-FCVs*) construídos e funcionando no mundo. Este número inclui: veículos comerciais leves (como furgões e *pick-ups*); carros tipo sedan; veículos esportes utilitários (*sport utility vehicles - SUVs*); e veículos menores como carros de golfe e veículos de duas rodas. E este aumento aconteceu porque atualmente mais companhias estão desenvolvendo protótipos e começam a formar pequenas frotas para teste e demonstração.

Em 2002 tanto a Honda como a Toyota entregaram os primeiros FCVs para clientes na Califórnia e no Japão. E isto aconteceu um ano antes do prazo esperado. A DaimlerChrysler também apresentou o ano de 2003 como sua data limite para a introdução de uma pequena frota no mercado de FCVs, assim como a Nissan. A Ford e a General Motors também fizeram um progresso considerável no desenvolvimento de FCV.

O ano de 2002 também foi marcado pelo consenso de que os FCVs estarão disponíveis no mercado antes de 2010. Segundo Brian Walsh da Fuel Cell 2000 que promove educação e projetos em células a combustível, a próxima geração de veículos com célula a combustível entrará disponível para uso por volta de 2006 e 2007, sendo que 2010 será o ano limite para iniciar a produção em massa destes veículos.

Dos veículos produzidos, aproximadamente 96% usam célula do tipo PEM (Fuel Cell Today, 2003). Exceções incluem um *go-cart* com célula a combustível de metanol direto desenvolvida pela DaimlerChrysler e Ballard Power Systems (principal fornecedor de células PEM para veículos leves). Aproximadamente quinze veículos usam células alcalinas (AFCs), inclusive um micro-carro recentemente desenvolvido pela companhia finlandesa Hydrocell (Fuel Cell Today, 2003).

Outro ponto importante foi o consenso com relação ao combustível a ser utilizado. Agora é concordado universalmente que o hidrogênio gasoso comprimido em cilindros de alta pressão será o combustível para a primeira geração de FCVs. A indicação disto foi o anúncio, em janeiro de 2003, onde mais de vinte fabricantes de carros e componentes, inclusive DaimlerChrysler, Ford, Nissan e Toyota, trabalhariam juntos para aprimorar a tecnologia de armazenamento e reabastecimento de hidrogênio. Outro desenvolvimento positivo é o crescente número de estações de hidrogênio em construção ao redor do mundo.

Apesar tantos avanços, estão sendo explorados ainda outros combustíveis, inclusive gasolina e hidrogênio líquido. Em contraste, o metanol já não é tão popular quanto no início. Nenhum veículo novo com célula a combustível a metanol foi desenvolvido desde 2001.

Embora os resultados tenham sido positivos, existem muitos assuntos técnicos e reguladores a serem solucionados antes que os FCVs se tornem uma visão comum nas estradas, assim como também existem desafios comerciais importantes. Veículos com células a combustíveis ainda não possuem preços competitivos quando comparados com os dos veículos convencionais de combustão interna. Só para se ter uma idéia a *General Motors* gasta atualmente cerca de US\$375,000 para desenvolver um veículo com célula a combustível, um custo que não pode ser repassado para a maioria dos consumidores (Fuel Cell Today, 2003).

No longo prazo, espera-se que os custos caiam dramaticamente com a elevação da produção. Por exemplo, a Ballard Power Systems afirmou que seu veículo com célula a combustível do tipo PEM poderá ser tão barato quanto um veículo de combustão interna, desde que se produzam mais de 200.000 veículos por ano (Fuel Cell Today, 2003). Porém, para alcançar tal produção terão que contar com apoio político e público. Além disso, os FCVs enfrentam a competição crescente de outras tecnologias automotivas, como os veículos elétrico/gasolina, particularmente os híbridos.

Não são apenas as montadoras mundiais de automóveis, mas também os fomentadores das células a combustível, de materiais e componentes, assim como os laboratórios e as universidades que estão correndo para trazer ao mercado veículos com células a combustível. A meta perseguida é oferecer uma alternativa para o motor de combustão interna que proporcione uma demanda eficiente de consumidores e ao mesmo tempo seja mais eficiente, ambientalmente amigável, promova a diversificação dos combustíveis e que tenha a sua construção, manutenção e operação mais barata.

Muitos dos principais líderes nos esforços de comercialização são membros do US Fuel Council, uma associação comercial dedicada a comercialização da tecnologia de células a combustível.

A seguir são apresentadas as principais montadoras que estão desenvolvendo protótipos de veículos com células a combustível.

General Motors

A meta da General Motors é ser a primeira a vender um milhão de veículos com células a combustível. Para ajudar nesta transição a GM tem expressado o compromisso para a produção de sistemas estacionários de células a combustível. A idéia é compreender a curva de custo das células a combustível e entrar em diferentes mercados com sistemas que possam se tornar competitivos nestes mercados.

Os custos competitivos para sistemas estacionários estão por volta de \$1.000/kW enquanto que para aplicações em transporte é preciso chegar aos \$50/kW. A GM planeja iniciar as vendas em 2005, vendendo sistemas estacionários de 75 kW de células a combustível a hidrogênio (US Fuel Cell Council, 2003) . E pretende utilizar este mercado para tornar os custos competitivos das células a combustível em aplicação de transporte para o ano de 2010.

A GM introduziu em 2002 o veículo Hy-Wire (Figura 5.11), um novo conceito que combina célula a combustível a hidrogênio com a tecnologia *by-wire* (não existe ligação entre o motor e as rodas). O sistema de células a combustível é montado sobre um *skateboard*, na verdade uma plataforma, que é utilizada como chassi e serve para empacotar o sistema de célula a combustível dentro dela. Esta plataforma plana permite alojar todos os componentes e pode receber inúmeras variedades de carroçarias (Figura 5.12). O Hy-Wire representa a liberdade de projeto que as células a combustível oferecem para a indústria.



Figura 5.11 – Veículo Hy-Wire da GM²¹.

²¹ GM. Apresenta foto do veículo Hy-Wire. Disponível em: < <http://www.gm.com>>. Acesso em Jan. 2003.

Já o protótipo do HydroGen 3 se encontra em fases de testes junto a FedEx Corp. em Tóquio no Japão. A FedEx utilizará o veículo no período de junho de 2003 a junho de 2004. Um técnico da GM estará presente durante este período coletando todos os dados.



Figura 5.12– *Skateboard* utilizado no Hy-Wire²².

Ford

A Ford está promovendo seu programa de células a combustível ativamente na América do Norte e na Europa. Seu objetivo atual é iniciar um pequeno mercado consumidor, com aproximadamente 40 veículos com células a combustível do tipo Focus (Figura 5.13), na Alemanha e na Califórnia a partir de 2004. A sua intenção é aumentar a produção para 50 mil veículos por volta de 2010.



Figura 5.13 – Ford Focus FCV²³.

²² Apresenta foto do *skateboard* utilizado no Hy-Wire. Disponível em: <<http://www.spiegel.de>>. Acesso em Jan. 2003.

²³ Ford. Apresenta foto do Ford Focus FCV. Disponível em: <<http://www.ford.com>>. Acesso em Jan. 2003.

DaimlerChrysler

A DaimlerChrysler desenvolve a tecnologia de células a combustível desde a década de 90, e tem o maior programa de demonstração entre os fabricantes. Atualmente esta demonstrando uma van chamada Hermes na Alemanha. Trata-se de um veículo de entrega e é o primeiro veículo com célula a combustível em serviço regular a rodar em estradas públicas. A DaimlerChrysler também está produzindo 33 ônibus Citaro com células a combustível, que irão trafegar em 11 das principais cidades mundiais a partir de 2003. Ela também irá empregar uma frota de 60 F-Cell (veículos de passageiros com célula a combustível) em todo o mundo. Com o Mercedes-Benz Classe A “F-Cell”, os primeiros carros saíram do estágio de pesquisa e ganharam as ruas, estabelecendo um marco na história automotiva e, mais uma vez, demonstrando a vanguarda tecnológica da DaimlerChrysler (Figura 5.14).

A DaimlerChrysler também incorporou o processo da Millennium Cell’s “Hydrogen on Demand TM” nos veículos Town e Country Natrium FCV, que permite uma autonomia de 482 quilômetros com emissão zero.



Figura 5.14 – Veículo F-Cell da DaimlerChrysler²⁴.

²⁴ DaimlerChrysler. Apresenta foto do veículo F-Cell da DaimlerChrysler. Disponível em: <<http://www.daimlerchrysler.com>>. Acesso em Jan. 2003.

Honda

A Honda começou explorando o potencial das células a combustível em 1989. Seguindo o desenvolvimento de várias gerações de protótipos, está iniciando a formação de frotas pequenas do veículo FCX, trinta dos quais serão destinados a clientes no Japão e na Califórnia durante os próximos dois ou três anos. O veículo FCX da Honda foi o primeiro veículo a receber a certificação de emissão zero pela US Environmental Protection Agency e pelo Califórnia Air Resources Board (Figura 5.15). A Honda também atendeu os padrões de segurança adotados pelos Estados Unidos.



Figura 5.15 – Honda FCX, primeiro veículo com certificação de emissão zero²⁵.

Para os próximos 2 ou 3 anos a Honda pretende alugar 30 veículos para o Estado da Califórnia, o primeiro deles já foi entregue para a cidade de Los Angeles em dezembro de 2002. Sendo que a cidade irá adquirir mais 4 veículos em 2003. Também em dezembro de 2002, a Honda entregou um veículo FCX para o Cabinet Office do Japão por \$6.500 por mês durante um ano.

Embora a Honda desenvolva sua própria tecnologia PEMFC, espera-se que o FCX tenha uma célula a combustível desenvolvida pela Ballard Power Systems, pois foi assinado um acordo com Ballard em dezembro de 2002 para a compra de 32 módulos Mark 902 e serviços de apoio para a frota de FCX.

²⁵ Honda. Apresenta foto do Honda FCX . Disponível em: <<http://www.honda.com>>. Acesso em Jan. 2003.

Toyota

A Toyota começou o desenvolvimento de veículos com células a combustível em 1992 e agora tem um dos programas mais extenso e avançado no mundo. Em 2002 apresentou o arrendamento de seu primeiro “FCVs comercial” e introduziu um protótipo modificado, o FCHV, baseado no modelo popular Highlander SUV (Figura 5.16). Também em dezembro de 2002 alugou quatro destes veículos para agências do governo japonês durante trinta meses a US\$10.000 por mês por cada veículo.



Figura 5.16 – Toyota FCHV²⁶.

Na mesma data a Toyota entregou dois outros FCHVs, um para a Universidade de Irvine, e o outro para a Universidade de Davis (ambas na Califórnia), arrendados nas mesmas condições. As duas universidades tem arrendados um total de seis veículos Toyota (três para cada universidade) e receberão mais quatro durante 2003. No total a Toyota planeja alugar vinte unidades de seus veículos FCHVs até o final de 2003.

Desde dezembro 1999 Toyota mantém um acordo com a General Motors para troca de tecnologia de células a combustível, embora não esteja muito claro como as duas companhias se comunicam. Em janeiro de 2001 as duas companhias se associaram também com Exxon Mobil Corp para desenvolver um combustível de hidrocarboneto limpo como uma fonte de energia para os veículos com células a combustível.

²⁶ Toyota. Apresenta foto da Toyota FCHV. Disponível em: <<http://www.toyota.com>>. Acesso em Jan. 2003.



Figura 5.17 - Toyota Fine-S conceito de carro de esporte com célula a combustível, apresentado no Detroit Motor Show em 2003²⁷.

Em janeiro 2003 Toyota apresentou um conceito de veículo FCV, o FINE-S (*Fuel Cell Innovative Emotion-Sport*). Com um baixo centro de gravidade (obtido com a montagem do sistema de célula a combustível abaixo do assoalho) e controle de rodas independente, é projetado para oferecer desempenho esportivo com capacidade para quatro pessoas (Figura 5.17).

Nissan

A Nissan é a terceira maior fabricante de veículos do Japão, depois da Toyota e da Honda, sendo que a Renault é a sua principal acionista. A Nissan apresentou seu primeiro protótipo de FCV em 1999, e o segundo em 2000, baseados no veículo esporte utilitário Xterra. Ambos com unidades PEMFC da Ballard Power Systems.

Em 2002 ocorreram mais mudanças. Talvez incitada pela Honda e pelos anúncios da Toyota, a Nissan adiantou-se com a introdução de veículos comerciais para o período de 2003 a 2005. Ao mesmo tempo trocou os sistemas de célula a combustível da Ballard para células a combustível da UTC Fuel Cells. A UTC forneceu sistemas PEMFC para o veículo de X-Trail da Nissan que é abastecido com hidrogênio comprimido (Figura 5.18).

²⁷Toyota. Apresenta foto da Toyota Fine-S. Disponível em: <<http://www.toyota.com>>. Acesso em Jan. 2003.



Figura 5.18 – Veículo com célula a combustível X-Trail da Nissan²⁸.

PSA Peugeot Citroën

PSA Peugeot Citroën é líder mundial em vendas de veículos elétricos, depois de ter alcançado a marca de mais que 10.000 unidades vendidas desde 1995. Em 2005 planeja vender veículos elétricos equipados com pequenas células a combustível que serão *back-up* das baterias que acionam o veículo. Em linha com esta estratégia, desenvolveu dois conceitos de FCV híbridos – um táxi e um veículo de bombeiro - ambos equipados com bateria e uma célula a combustível PEM (Figura 5.19).



Figura 5.19 – Veículo táxi da PSA Peugeot Citroën²⁹.

²⁸ Nissan. Apresenta foto do veículo com célula a combustível X-Trail da Nissan NISSAN. Disponível em: <<http://www.nissan.com>>. Acesso em Jan. 2003.

²⁹ PSA Peugeot Citroën. Apresenta foto do veículo táxi da PSA Peugeot Citroën. PSA Disponível em: <<http://www.peugeot.com>>. Acesso em Jan. 2003.

Em janeiro de 2002 a PSA juntou-se com H Power num programa para desenvolver células a combustível que permitissem maiores autonomias em veículos de cargas leves (vans). Não está claro se este desenvolvimento continuará depois da aquisição da H Power pela Plug Power anunciada em dezembro de 2002.

FIAT

A FIAT apresentou seu primeiro protótipo de veículo com célula a combustível em fevereiro de 2001. O Seicento Elettra H₂ (ver Figura 5.20) tem a potência fornecida por um sistema PEMFC de baixa pressão desenvolvido pela Nuvera Fuel Cells, é o resultado de um projeto patrocinado pelo Ministério de Meio Ambiente italiano. Em outubro de 2002 foi relatado que o veículo rodou sem perda de desempenho por mais de 3.000 quilômetros. A próxima geração da FIAT de FCV deverá ser demonstrada em 2003, e terá células a combustível fornecidas pela Nuvera FuelCells. A Nuvera vendeu nove *stacks* de PEMFC ao Centro de Pesquisa da Fiat em outubro de 2002.



Figura 5.20 – Fiat Seicento Elettra H₂ Fuel Cell³⁰.

Muitas outras empresas também estão testando seus veículos com células a combustível.

³⁰ FIAT. Apresenta foto do Fiat Seicento Elettra H₂ Fuel Cell. Disponível em: <<http://www.fiat.com>>. Acesso em Jan. 2003.

A coreana **Hyundai Motor Co.** tem uma parceria estratégica com a UTC Fuel Cells pretende desenvolver uma pequena frota de veículos Santa Fé para o período de 2003 e 2004. O veículo da **Mazda** Premacy FC-EV foi liberado pelo governo japonês para testes em rodovias públicas no Japão. O HyPower da **Volkswagem** esta sendo testado em temperaturas frias a altas altitudes nos Alpes Suíços. Em 1999 a **Mitsubishi** apresentou um conceito de FCV e anunciou planos de comercialização para 2005. A **Hydrocell** (Finlândia) recentemente apresentou um protótipo de um pequeno veículo para cidade com uma pequena célula a combustível de gel alcalina. Chamado de Fantasy, e foi desenvolvido pela companhia finlandesa EL-3. A potência de pico é fornecida pela carga de uma bateria ácida. A potência fica abaixo de 1kW com velocidade constante de 50km/h. No Brasil, o **Laboratório de Hidrogênio** da UNICAMP, esta desenvolvendo um veículo híbrido de célula a combustível e bateria. O protótipo faz parte da parceria entre o Laboratório de Hidrogênio e o Ministério de Minas e Energia.

No Anexo IV é apresentada uma tabela com todos os protótipos de veículos leves com células a combustível desenvolvidos pelas montadoras e algumas universidades. Os veículos são agrupados segundo o ano de fabricação e por montadora. São apresentadas suas principais características: tipo de célula, tipo de configuração, combustível utilizado, armazenamento, velocidade desenvolvida e autonomia.

Capítulo 6

Análise das alterações no consumo de combustíveis e das emissões veiculares na cidade de São Paulo pela introdução de uma frota de veículos leves com células a combustível

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir dos cenários descritos no Capítulo 3. Inicialmente trata da estimativa feita para a frota de veículos leves para a cidade de São Paulo no ano de 2020. Em seguida mostra quais foram os resultados alcançados com a introdução dos veículos com células a combustível, referentes às alterações na matriz de combustível e nas emissões de poluentes. Com relação ao consumo de hidrogênio, apresenta uma estimativa de quanta energia será necessária para a produção do mesmo (por eletrólise da água) para abastecer as frotas propostas em diferentes cenários. No final é feita uma análise dos resultados descritos anteriormente.

O Anexo II apresenta as planilhas com as projeções das frotas para todos os cenários propostos, assim como os cálculos para determinação do volume de emissões correspondente a cada um deles.

6.1 Projeção da frota de veículos leves a gasolina e a álcool na Cidade de São Paulo – 2020

A Figura 6.1 apresenta a evolução da frota de veículos leves a gasolina e a álcool para a cidade de São Paulo de 2003 a 2020. Esta figura também representa o crescimento da frota para o Cenário Tendencial (Cenário A).

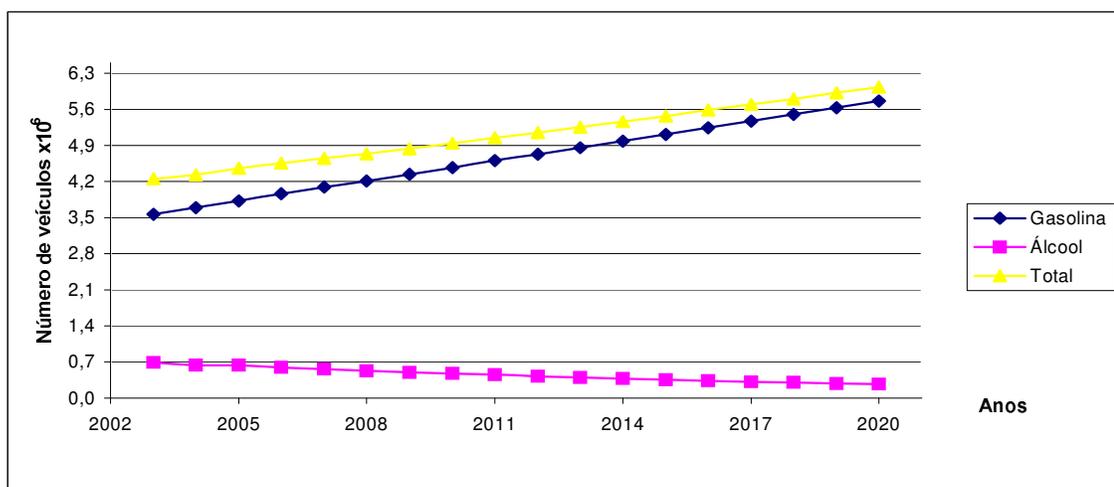


Figura 6.1 – Projeção da frota de veículos leves a gasolina e álcool para a cidade de São Paulo no período de 2003 a 2020.

Fonte: Elaboração própria.

A tabela 6.1 apresenta a composição da frota no ano de 2020 para os cenários traçados, enquanto a figura 6.2 apresenta a evolução da frota a gasolina para os 3 cenários e a figura 6.3 apresenta a projeção dos veículos com células a combustível para os cenários B e C.

Tabela 6.1 – Composição da frota de veículos em 2020.

	Gasolina	Álcool	Hidrogênio	Total
Cenário A	5.762.422	266.526	0	6.028.948
Cenário B	5.596.695	266.526	165.727	6.028.948
Cenário C	5.717.311	266.526	45.111	6.028.948

Fonte: Elaboração própria.

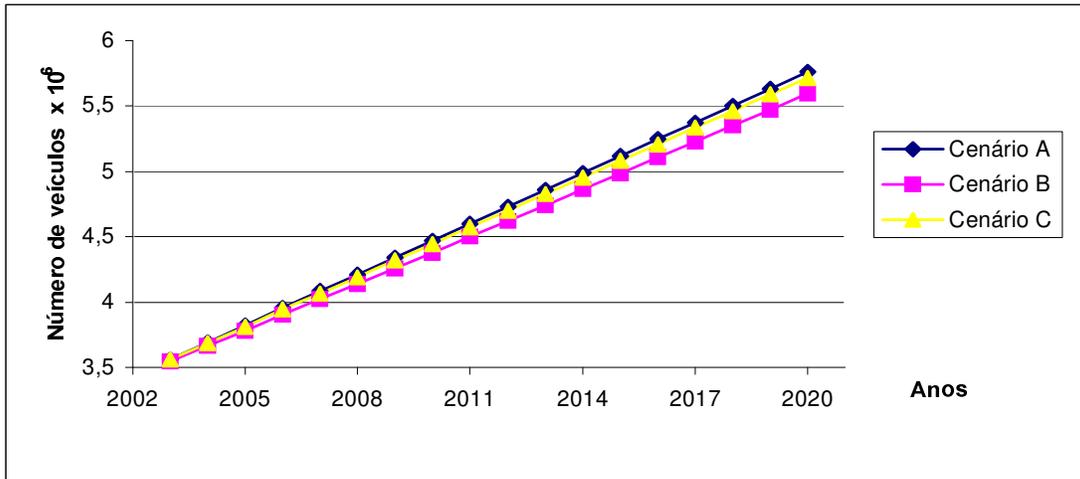


Figura 6.2 – Evolução da frota de veículos a gasolina para os diversos cenários.

Fonte: Elaboração própria.

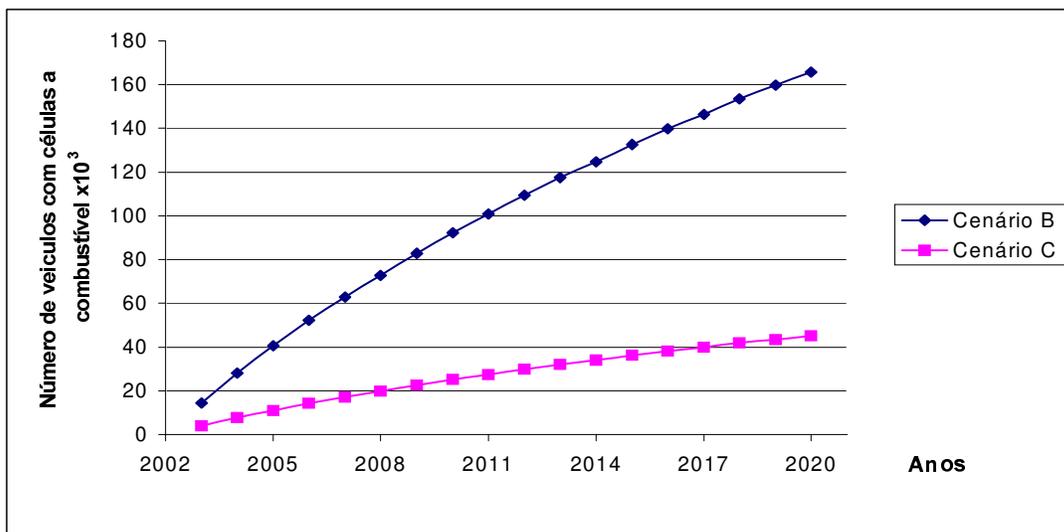


Figura 6.3 – Evolução da frota de veículos com células a combustível para os cenários de substituição da frota a gasolina.

Fonte: Elaboração própria.

6.2 Emissões da frota de veículos leves a gasolina e a álcool na Cidade de São Paulo – 2020

A figura 6.4 apresenta as emissões para a frota a gasolina e a álcool nos vários cenários.

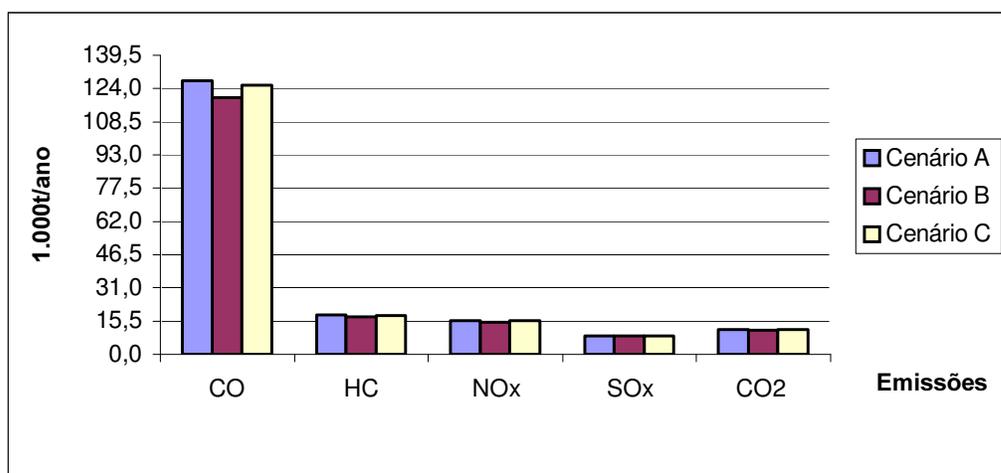


Figura 6.4 – Emissões originadas pela frota de veículos a gasolina e a álcool no ano de 2020 para os vários cenários.

Fonte: Elaboração própria.

Na Tabela 6.2 são apresentadas as reduções quantitativas alcançadas através da introdução dos veículos com células a combustível na cidade de São Paulo. O Cenário A (tendencial) é o cenário de referência para a comparação das reduções.

Tabela 6.2 – Redução quantitativa das emissões em relação ao Cenário A (1.000 t/ano) em 2020.

Emissões	CO		HC		NOx		SOx		CO ₂	
	Emissão	Redução	Emissão	Redução	Emissão	Redução	Emissão	Redução	Emissão	Redução
A	127,6	-	18,4	-	15,9	-	8,7	-	11.576	-
B	119,7	-7,9%	17,5	-0,9%	15,2	-0,7%	8,4	-0,3%	11.274	-30,2%
C	125,4	-2,2%	18,2	-0,2%	15,7	-0,2%	8,6	-0,1%	11.494	-82%

Fonte: Elaboração própria

6.3 Consumo de combustível para as frotas projetadas de veículos leves na cidade de São Paulo – 2020

O consumo de combustível foi calculado a partir das informações contidas na Tabela 3.2 no Capítulo 3 para o veículo a gasolina (Gol Trend) e para o veículo com célula a combustível

(Honda FCX). Já o consumo de álcool hidratado para a frota de veículos a álcool foi calculado a partir de informações para um veículo *flex-fuel* lançado em 2003 pela Volkswagen. Considerou-se que um veículo a álcool percorre na cidade 9,4 quilômetros por litro de álcool. Os resultados para consumo de combustível nos vários cenários propostos se encontram na Tabela 6.3.

Tabela 6.3- Consumo de combustível para os cenários na cidade de São Paulo - 2020.

	Gasolina		Hidrogênio		Álcool	
	m ³	GJ	m ³	GJ	m ³	GJ
Cenário A	5.314.447	185.261.633	-	-	263.634	5.937.037
Cenário B	5.171.114	180.265.048	264.724.842	3.375.665	263.634	5.937.037
Cenário C	5.275.432	183.901.563	72.058.102	918.856	263.634	5.937.037

Fonte: Elaboração própria.

6.3.1 Consumo de energia para a produção de hidrogênio via eletrolise para as frotas projetadas de veículos com células a combustível na Cidade de São Paulo – 2020

Uma das formas mais conhecidas de produção de hidrogênio é a eletrólise, que consiste na quebra da molécula de água através da passagem de uma corrente elétrica, liberando seus elementos estruturais, o hidrogênio e o oxigênio.

Para dimensionar a quantidade de energia hidráulica requerida utiliza-se como referência um eletrolisador com consumo específico de energia (CEE) de 4,4 kWh/Nm³ (Souza, 1998). A energia hidráulica (EH) será calculada através da Equação 01:

$$EH = CEE * VH \quad (\text{Eq. 01})$$

onde VH é o volume de hidrogênio consumido durante o ano. A potência média (PM) requerida ao ano é calculada segundo a Equação 02:

$$PM = EH / TU \quad (\text{Eq. 02})$$

onde TU é o tempo de utilização do equipamento, tomado como igual a 8.760 horas.

As potências requeridas para a produção de hidrogênio para os Cenários B e C são apresentadas na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 - Consumo de energia requerido para a produção de hidrogênio a ser consumido pela frota projetada nos cenários de introdução dos veículos com células a combustível.

	Consumo de H₂ (10⁷Nm³/ano)	Energia hidráulica (GWh)	Potência média anual requerida (MW)
Cenário A	nc	nc	nc
Cenário B	26,5	1.165	133
Cenário C	7,2	317	36

Fonte: Elaboração própria.

6.4 Análise dos resultados obtidos

Percebe-se claramente que pela tendência de crescimento da frota (corresponde ao Cenário A), em 2020 os veículos a gasolina reinarão absolutos. Eles responderão por aproximadamente 96% da frota na cidade de São Paulo, enquanto que os veículos a álcool representarão apenas 4%. Comparando a composição da frota de 2002 com a de 2020, verifica-se que a frota total de veículos na cidade de São Paulo cresce, porém o número de veículos novos tende a diminuir, pois em 2002 representavam 3,9% da frota total e em 2020, pela projeção, não passarão de 0,3%. Em contraste a frota de veículos usados tende a se acumular (ver Planilhas 10 e 11 no Anexo II).

Com relação à emissão da frota projetada para 2020 (Planilhas 08 e 09 no Anexo II), pode-se notar que os fatores de emissão da frota a álcool são maiores que os da gasolina, induzindo ao pensamento de que os veículos a álcool são mais poluentes do que estes. Na verdade, na própria tabela pode-se notar também que os fatores de emissão da gasolina tiveram maiores reduções que os dos veículos a álcool. Este resultado é uma consequência natural da falta de interesse no aprimoramento da tecnologia dos motores a álcool. Tanto é verdade que nos últimos anos não se tem produzido mais tantos veículos com estes motores.

Apesar dos fatores de emissões maiores, a frota a álcool acaba emitindo menos poluentes que a frota de veículos a gasolina, pois apresenta um número de veículos menores e também uma menor quilometragem média.

Comparando-se os fatores de emissão da frota de veículo de 2002 com os de 2020 (Anexo II, Planilhas 08 e 09, e Anexo V, Planilhas 16 e 17) verifica-se que ocorre uma forte redução destes fatores, o que proporciona a redução das emissões de poluentes. No caso dos veículos a álcool a redução das emissões dos poluentes, aproximadamente 87% para o CO, 81% para HC e 82% para NOx, é causada principalmente pela diminuição da frota. No caso dos veículos a gasolina a redução das emissões, de aproximadamente 74% para o CO, 63% para HC e 49% para NOx, se deve principalmente ao fato de se ter, no período de tempo considerado, introduzido uma frota de veículos com baixos fatores de emissão por veículo, uma consequência das medidas de controle adotadas pelo governo na década de 90.

No geral a introdução de veículos com células a combustível não altera significativamente a tendência de crescimento da frota a gasolina. No cenário B a frota de veículos com células a combustível representa 3% do total da frota em 2020, enquanto que a frota a gasolina representa 92%. No cenário C, que é o cenário anterior corrigido pelo PIB, a frota de veículos com células a combustível para este mesmo ano representa 0,7% e a frota a gasolina quase 95% de toda a frota. Consequentemente as reduções nas emissões se apresentam modestas, mas são significativas, pois fazem com que a curva tendencial de redução da frota a gasolina se desloque para baixo mais rapidamente. Nota-se que a emissão de CO está diretamente relacionada com o tamanho da frota a gasolina, pois a emissão da frota a álcool permanece a mesma para todos os cenários.

Outro fator significativo para a introdução da frota com célula a combustível é que estes veículos não emitem CO₂. Apesar dos veículos a gasolina emitirem menos poluentes, não existe limites e nem controle para a emissão de CO₂, pois como já foi dito neste trabalho ele não é considerado um poluente. Por outro lado é apontado como sendo o principal gás de efeito estufa, sendo que o Protocolo de Quioto o considera o mais prejudicial para o planeta, tanto que o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL propõem um crédito para os países e as tecnologias que privilegiem a sua redução.

A matriz de combustível da cidade de São Paulo tem uma diminuição do consumo de gasolina no período considerado, porém este consumo ainda permanece alto, mesmo com a introdução dos veículos com células a combustível a hidrogênio, uma vez que a participação destes veículos em ambos os cenários considerados é relativamente pequena.

Para a produção de hidrogênio via eletrólise a potência média anual requerida para o Cenário B equivale à produção da Usina Hidrelétrica de Ibatinga (SP) que é de 131,5 MW. O Cenário C equivale a Usina de Salto de Carioba de 36,2 MW. Esta é uma potência equivalente a uma PCH, cujo valor limite é de 30 MW. Estes números permitem concluir que para a introdução de frotas pequenas e de forma gradual de veículos com células a combustível, não se criará impactos ambientais significativos para o abastecimento dos mesmos.

Comparando-se o cenário B e o cenário C percebe-se que o cenário C é o mais apropriado para ser aplicado na cidade de São Paulo. Apesar de contar com uma frota menor de veículos, ainda sim ele contribui para a redução de emissões de poluentes e principalmente de CO₂ e apresenta um consumo de hidrogênio menor, viabilizando a produção do mesmo de forma a garantir o abastecimento da frota.

Capítulo 7

Conclusões e Sugestões

O atual modelo de desenvolvimento alicerçado no sistema capitalista baseia-se em um elevado consumo energético e de matérias primas, necessitando de sistemas energéticos e de transformação que sejam eficientes (Altvalter, 1995). O elevado consumo de recursos naturais no sistema industrial libera emissões tóxicas no ar, nas águas e nos solos.

As emissões atmosféricas se tornaram uma questão primordial nos grandes centros urbanos mundiais. A poluição advém justamente de dois fenômenos da sociedade moderna: a industrialização e urbanização, sendo que o crescente número de automóveis é resultado de ambos os processos e contribui de forma determinante para o aumento do nível de poluição local e global (Hogan, 2000).

Os veículos têm uma grande relevância, não só no aspecto ambiental como no setor energético também, pois utilizam como combustíveis substâncias derivadas de petróleo, que provêm de uma fonte não renovável de energia e que durante a sua queima liberam gases e partículas prejudiciais ao meio ambiente e ao próprio homem.

Para diminuir a emissão de poluentes por parte da frota veicular novas tecnologias foram adotadas pelos fabricantes, assim como limites mais rígidos de emissão foram impostos pelas autoridades de cada país.

A cidade de São Paulo é uma das capitais que apresentam estes graves problemas advindos da acelerada urbanização e do processo de industrialização. Com um número cada vez maior de veículos circundo por suas vias, o número de congestionamentos se intensifica, fazendo com que a poluição do ar aumente cada vez mais.

Buscando contribuir para uma solução dentro do contexto exposto acima, este trabalho analisa a substituição de parte da frota de veículos novos a gasolina por veículos com células a combustível a hidrogênio, como uma forma de reduzir as emissões dos poluentes e diminuir o consumo de combustíveis de origem fóssil.

Percebe-se que a questão de redução de emissões é processo de longo prazo. É preciso iniciá-lo cedo, mas os resultados só aparecem com o passar dos anos. Isto ficou claro neste trabalho quando ao projetar a frota de veículos a gasolina com tecnologias de controles de emissão mais rígidos (impostos a partir da década de 90) obteve-se para 2020 reduções nas emissões de poluentes bastantes significativas, em relação ao ano de 2002, apesar do aumento do número total de veículos. De fato, no cenário tendencial considerado, a frota de veículos leves (gasolina e álcool) da cidade de São Paulo crescerá aproximadamente 43% enquanto as emissões diminuirão aproximadamente 77% para o CO, 66% para o HC e 57% para o NOx.

Vê-se que a introdução de melhorias nos veículos novos, como é o caso aqui proposto com os veículos com células a combustível, resultará em impactos significativos algumas décadas depois, uma vez que representam apenas um pequeno percentual anual da frota. E esta por sua vez só se renova totalmente em um período de mais de 30 anos aproximadamente.

Caso se considere um cenário radical para a substituição da frota, onde fossem substituídos todos os veículos novos a gasolina por veículos células a combustível, Cenário D (ver Anexo VI), a frota a gasolina na cidade de São Paulo sofreria uma redução de 25%, comparando-se com o Cenário A. Conseqüentemente a redução percentual das emissões de poluentes seriam de aproximadamente 60% para o CO, 47% para o HC, 42% para o NOx e 11% para o SOx. Para o CO₂ a redução seria de 22%.

Para este Cenário a matriz de combustível é alterada, apresentando uma redução de aproximadamente 23% no consumo de gasolina. Por outro lado o consumo de hidrogênio aumentaria significativamente. Seria necessário uma potência média anual de 4.500 MW para a produção de hidrogênio, que é equivalente a potência média anual da Usina Hidrelétrica de Tucuruí, a segunda maior usina hidrelétrica do País. Uma usina deste porte além de apresentar um alto custo para a sua construção, também leva 15 anos ou mais para entrar em funcionamento, além de causar grandes impactos ambientais no local da sua construção.

Ao se considerar um cenário mais radical obtém-se uma redução substancial dos poluentes e de CO₂, por outro lado o abastecimento dos veículos com células a combustível a hidrogênio se tornaria problemático devido à potência média anual requerida para a produção do combustível.

Portanto, a partir dos resultados obtidos, pode-se dizer que a substituição dos veículos a gasolina pelos veículos com células a combustível é um mecanismo que pode contribuir para o controle de emissões. Apesar de a frota de veículos a gasolina no ano de 2020 já apresentar uma forte redução nas emissões, a introdução da frota de veículos com células a combustível representa um ganho a mais nesta questão, pois ela força uma redução mais rápida das emissões. E com certeza ela se tornará mais vantajosa com o passar dos anos, pois chegará um momento em que as emissões dos veículos a gasolina não sofrerão mais reduções e a frota continuará a crescer.

Este resultado é significativo principalmente para o setor de saúde, onde as emissões de poluentes são responsáveis por vários problemas, principalmente de origem respiratória e se encontram acima do limite aceitável em termos de saúde pública. Portanto a redução obtida com a introdução da frota de veículos com células a combustível representa um ganho em qualidade de vida para a população.

Outro ponto importante a ser lembrado é que os veículos com células a combustível não emitem CO₂, enquanto que os veículos a gasolina são determinantes na emissão deste gás de efeito estufa (Monteiro, 1998). A não emissão de CO₂ será mais atrativa caso o Protocolo de Quioto entre em vigor nos próximos anos, pois representará para a cidade de São Paulo a possibilidade de venda de créditos de carbono.

Também significativo neste trabalho foi a determinação da potência necessária para a produção de hidrogênio que abastecerá a frota de veículos. Para o cenário proposto verificou-se que uma usina hidrelétrica de porte equivalente a uma PCH por ano é suficiente para abastecer a frota proposta.

Portanto o cenário C é o cenário que apresenta as melhores condições de ser implantado na cidade de São Paulo, pois além de ser o mais realista do ponto de vista da capacidade econômica de investimento, contribui com a redução das emissões de poluentes e de CO₂ também torna possível o abastecimento destes veículos sem causar grandes impactos para a produção de hidrogênio.

É importante lembrar que existem outras medidas para redução de emissões de poluentes e que elas podem e devem ser utilizadas em paralelo à introdução da frota de veículos com células a combustível, pois não existe uma única medida definitiva, mas várias alternativas que se complementam para obter o melhor resultado.

Dentro das sugestões para trabalhos futuros ficam alguns temas que não foram discutidos neste trabalho. O primeiro seria realizar um estudo de viabilidade econômica para a introdução da frota do cenário C na cidade de São Paulo.

Outra sugestão seria determinar a produção de hidrogênio por outras fontes alternativas, assim como a logística de distribuição e armazenamento. Uma alternativa para produção de hidrogênio no Brasil seria através da reforma do etanol.

Também seria interessante analisar como a redução destes poluentes impactam a saúde da população de São Paulo, bem como quanto se deixaria de gastar em saúde pública e comparar este ganho com o custo de introdução de uma frota com veículos com células a combustível.

Referências

ACIOLI, José de Lima. **Fontes de energia**. Brasília, UNB, 1993. 138p.

ÁLVARES JR, Olimpio de Melo, LACAVA, Carlos Ibsen Vianna, FERNANDES, Paulo Sérgio. **Emissões Atmosféricas**. Brasília, SENAI/DN, 2002. 273 p.

ÁLVARES JR, Olimpio de Melo, LINKE, Renato Ricardo Antônio. **Metodologia simplificada de cálculos das emissões de gases de efeito estufa de frotas de veículos no Brasil**.

Disponível em: <www.ambiente.sp.gov.br/proclima/inventário.htm>. Acesso em: 22 fevereiro 2003.

AMARAL, Eduardo Gurgel do. **Veículo Elétrico com Sistema Energético Híbrido: Célula de Combustível/Baterias Eletroquímicas**. 1998. 139 p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Elétrica, UNICAMP, Campinas.

ALTVATER, Elmar. Introdução: Porque o desenvolvimento é contrário ao meio ambiente. **O preço da riqueza**. São Paulo: UNESP, 1995. p. 21-41.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES – ANFAVEA. **Novas tecnologias veiculares e novos combustíveis** (Perspectivas dos fabricantes de veículos). Workshop: Melhoria da Qualidade do Ar. São Paulo, 2002.

_____ **Anuário Estatístico da Indústria Automobilística Brasileira 2003.**

AQUINO, Willian, PEREIRA, Livia Fernandes, LOPES, Luis Fernando Azevedo. Aspecto da crise do transporte urbano. **Revista dos Transportes Públicos**. ANTP, 2000, 4º trimestre. p 39.

AIR RESOURCES BOARD - ARB. **Fuel cell technology status and prospects of fuel cell automotive engines**. 2002. Disponível em:

<<http://www.arb.ca.gov/msprog/zevprog/fuelcell/kalhammer/techreport/>>. Acesso em: 10 out. 2003.

_____ **2003 proposed amendments to the California zero emission vehicle program**

regulations. California, Jan. 2003a. Disponível em: <<http://www.arb.ca.gov/>>. Acesso em: 02 out. 2003.

_____ **Zero Emission Vehicle Program Changes**. Fact Sheet, California, 19 Set. 2003b.

Disponível em: <<http://www.arb.ca.gov/>>. Acesso em: 02 out. 2003.

AZUAGA, Denise. **Danos ambientais causados por veículos leves no Brasil**. 2000. 168 f.

Dissertação (Mestrado). COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

BRANCO, Samuel Murgel. **Energia e meio ambiente**. São Paulo, Moderna, 1990. 96p.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB. **Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo 2001**. 18 ed. São Paulo:

CETESB, 2003a. 124 p. Disponível em:

<<http://www.cetesb.sp.gov.br/Ar/relatorios/relatorios.asp>>. Acesso em: 10 fev. 2003.

_____ **Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo 2002**. 18 ed. São Paulo:

CETESB, 2003b. 112 p. Disponível em:

<<http://www.cetesb.sp.gov.br/Ar/relatorios/relatorios.asp>>. Acesso em: 10 fev. 2003.

CIFUENTES, Luis et al.. Climate change: Hidden Health Benefits of Greenhouse Gas Mitigation. **Science Magazine**, v.293, n.5533, p.1257-1259, Aug. 2001.

DODFUELCELL. **Proton Exchange Membrane Fuel Cells**. Disponível em: <<http://www.dodfuelcell.com/proton.html>>. Acesso em: 09 fev. 2003.

ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION - EIA. **International Energy Annual 2001**. March 2003. Disponível em: <<http://www.eia.doe.gov/pub/pdf/international/021901.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2003.

ELLIS, Michael W.. **Fuel cells for building applications**. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc, 2002. p.01-26.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. EPA fuel cell vehicle testing. **Technical Highlights**, Feb. 2003. Disponível em: <<http://www.epa.gov/otaq/fuelcell/testing.htm>>. Acesso em: 20 jun. 2003.

FUEL CELL TODAY. Fuel cell market survey: light duty vehicles. Jan. 2003. Disponível em: <<http://www.fuelcelltoday.com>>. Acesso em: 03 mar. 2003.

FUEL CELLS 2000. Disponível em: <<http://www.fuelcells.org/fuel/whalis.shtml>>. Acesso em: 10 fev. 2000.

_____ Disponível em: <<http://www.fuelcells.org>>. Acesso em: 10 set. 2003

FUNDAÇÃO SISTEMA ESTADUAL DE ANÁLISE DE DADOS - SEADE. **Informações dos municípios paulistas**. Disponível em: <<http://www.seaed.gov.br/cgi-bin/ligcv98>>. Acesso em: 07 nov. 2003.

HEYWOOD, John B.. **Motor vehicle emissions control: past achievements, future prospects.**
London. Academic Press Limited, 1998. p. 03 – 23.

HIRAO, Osamu; PEFLEY, Richard K. **Present and future automotive fuel: performance and exhaust clarification.** New York: John Wiley & Sons Inc., 1988. p. 03-59.

HOGAN, Daniel (coord.). Um breve perfil ambiental do estado de São Paulo. In: HOGAN, Daniel; CUNHA, José Marcos Pinto da; BAENINGER, Rosana; CARMO, Roberto Luiz do (orgs). **Migração e ambiente em São Paulo. Aspectos relevantes da dinâmica recente.** Campinas: NEPO/UNICAMP, 2000. p. 275-381.

HONDA. 2003 **Honda FCX prices and EPA data.** Jun. 2003. Disponível em:
<<http://www.hondanews.com/forms/honda/fcx>>. Acesso em: 05 ago. 2003.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS - IBAMA - **Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores PROCONVE.** 2ed. Brasília, 1998.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA - **Key World Energy Statistics 2003.**
Disponível em: <<http://www.iea.org/statist/key2003.pdf>>. Acesso em: em 25 out. 2003.

LARMINIE, James; DICKS, Andrew. **Fuel cell systems explained.** 2ed. England: Wiley, 2003.
p.22-23.

LABORATÓRIO INTERDISCIPLINAR DE MEIO AMBIENTE - LIMA. **Avaliação do PRONCOVE - Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores.** COPPE/UFRJ. Disponível em:
<<http://www.lima.coppe.ufrj.br/ev/avaliacao%20proncove.pdf>>. Acesso em 30 ago. 2002.

JACOBI, Pedro Roberto, MACEDO, Laura Silvia Valente. **Consciência cidadã e poluição atmosférica: estado de situação na cidade de São Paulo.** CEPAL, 25 abr. 2000.

MATTOS, Laura B. R. de. **A importância do setor de transportes na Emissão de Gases do Efeito Estufa**. 2001.179 p. Dissertação (Mestrado). COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

McNICOL, B.D., RAND, D.A.J., WILLIAMS, K.R. Fuel cells for road transportation purposes – yes or not? **Journal of Power Sources**, v.100, n.1-2, p. 47-59, Nov. 2001.

MEDEIROS, Maria Aparecida, AUGUSTO, Adilson. Menos mortes pelo ar. **Pesquisa FAPESP**, São Paulo, p. 36-39, out. 2001.

MIRAGLIA, Simone Georges El Khouri. **Análise do impacto do consumo de diferentes combustíveis na incidência de mortalidade por doenças respiratórias no município de São Paulo**. 1997. 123p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo.

_____ **O ônus da poluição atmosférica sobre a população do Município de São Paulo: uma aplicação do método DALY estimativa em anos de vida perdidos e vividos com incapacidades**. 2002. 136 p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Medicina, Universidade Estadual de São Paulo, São Paulo.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. **Resolução N° 315, de 29 de outubro de 2002**.

Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/index.cfm>>. Acesso em: 15 dez. 2002.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA – MME. **Balanco Energético Nacional 2002**. Brasília, 2003.

MONTEIRO, Aline Guimarães. **Estratégia de redução de emissões de poluentes no setor de transportes por meio de substituição modal na Região Metropolitana de São Paulo**.1998.114p. Dissertação (Mestrado) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

MURGEL, Eduardo M., SZWARC, Alfred, SANTOS, Maira Daise S. R., BRANCO, Gabriel M., CARVALHO, Homero. Inventário de emissão veicular: metodologia de cálculo. **Engenharia Sanitária**, Rio de Janeiro, v.26, n.3, p. 292-296, set. 1987.

MURGEL, Eduardo M., SZWARC, A.. Efeitos das condições de tráfego na emissão de poluentes por veículos leves. Biblioteca **CETESB**, São Paulo, 12p, set. 1990.

OERTEL, Dagmar, FLEISCHER, Torsten. Future Perspectives of the Fuel Cell Technology – A Technology Assessment Study for the German Parliament. In: HYFORUM- THE INTERNATIONAL HYDROGEN ENERGY FORUM 2000, 2000, Munich. **Anais...**,2000. p. 367-372.

RAMAGE, J. **Energy A Guide Book**. ed. Oxford University Press, Oxford/UK, 1997.

RMI. **Types of fuel cells**. Disponível em:<<http://www.rmi.org/sitepages/pid556.php>>. Acesso em: 06 nov. 2003.

SALDIVA, Paulo Hilário Nascimento, BRAGA, Alfesio, PEREIRA, Luiz Alberto Amador. Poluição Atmosférica e seus Efeitos na Saúde Humana. In: Sustentabilidade na geração e uso de energia no Brasil: os próximos 20 anos.2001,Unicamp. **Anais....CD-ROM**

SECRETÁRIA DE ENERGIA SP. **Balanco energético do Estado de São Paulo 2002**.

SECRETÁRIA DO ESTADO DO MEIO AMBIENTE SP – **Plano de controle da poluição por veículos em uso – PCPV**. 2000. Disponível em: <<http://www.ambiente.sp.gov.br>>. Acesso em: 06 jul. 2003.

SECRETÁRIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE SP – **Agenda 21 em/in São Paulo**. 2003. Disponível em: <<http://ambiente.sp.gov.br>>. Acesso em 02 set. 2003.

SILVA, Solange Teles da. **A proteção da qualidade do ar.** Disponível em <http://www.jus.com.br/doutrina/qualiar.html>>. Acesso em: 2000.

SOUZA, Samuel Nelson Melegari de. **Aproveitamento da energia hidroelétrica secundária para a produção de hidrogênio eletrolítico.** 1998.192 p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, Campinas.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Fuel cell handbook.** USA: p. 1.1 -1.35, OCT.2000.

US FUEL CELL COUNCIL. **Fuel cell power for mobility.** Washington. 2003.

VILANUEVA, Luz Zoraida Dondero. **Uso do gás natural em veículos leves e mecanismo de desenvolvimento limpo no contexto brasileiro.** 2002. 183p. Tese (Doutorado), USP, São Paulo.

VW. **O Gol.** Disponível em: <http://www.volkswagen.com.br/automóveis>>. Acesso em: 17 set. 2003.

World Bank – **Iniciativa de Ar Limpo nas cidades da América Latina.** Disponível em: http://www.worldbank.org/cleanair/cailac/arlimpo/learningactivities/workshops/wsprt_s paulo.htm>. Acesso em 24 abr. 2002.

Anexo I

Glossário

Capítulo 2

Efeito Estufa. Aumento da temperatura média da superfície da Terra causado pelo aumento das concentrações de CO₂, CH₄, CFCs, N₂O e SF₆.

Emissões antrópicas. Emissões de poluentes em decorrência da atividade humana.

Estratosfera. Camada da atmosfera acima de cerca de 11 km de altitude e onde esta localizada a camada de ozônio.

Fonte de poluição. Refere-se à causa responsável pela geração de uma poluição qualquer. Se a fonte é fixa, como por exemplo, uma chaminé, ela é chamada de estacionária. Se for móvel, por exemplo, os automóveis, ela é chamada de fonte móvel.

Gases de efeito estufa. (GEE) são: vapor d'água, dióxido de carbono, metano, óxido de nitroso, ozônio, clorofluorcarbonos, hidrofluorcarbonos, perfluorcarbonos e hexafluoreto de enxofre.

GWP. É o potencial de aquecimento global para alguns gases de efeito estufa. O GWP é a principal medida de comparação entre os diferentes GEE, quanto a habilidade de provocar o efeito estufa.

Inversão térmica. É o fenômeno em que a temperatura aumenta com a altitude, em contraposição à condição normal, que é diminuir com a altitude. Estas inversões afetam freqüentemente as camadas finais de ar junto à superfície do solo durante o solstício de inverno. Tal fato, se ocorrer em centros urbanos, impede o ar poluído de se dissipar, o que ocasiona sérios problemas de saúde.

Mudanças climáticas. Alterações no clima em região ou regiões do planeta. As mais conhecidas são causadas pelo aumento da temperatura média da superfície da Terra em razão do aumento das concentrações dos gases geradores do efeito estufa.

Oxidantes fotoquímicos. Poluentes atmosféricos formados, principalmente quando ativados pela luz solar, pela reação de hidrocarbonetos e óxidos de nitrogênio, produzindo um conjunto de gases oxidantes agressivos, sendo dentre deles o mais importante o ozônio, que é utilizado como indicador da presença de oxidantes fotoquímicos na atmosfera. São chamados de poluentes secundários, por que não são emitidos diretamente pelas fontes de poluição.

Poluente. É qualquer substância presente no ar e que, pela sua concentração, possa torná-lo impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde, inconveniente ao bem estar público, danoso aos materiais à fauna e à flora, ou prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade.

Poluição atmosférica. Significa a presença de um ou mais contaminantes no ar ambiente externo, como poeiras, gás névoa, odor, fumaça ou vapor, em quantidades, características e duração que possam causar efeitos nocivos à saúde humana, às plantas, aos animais ou propriedade.

Smog. Mistura de fumaça e neblina (*smoke + fog*). É formado na atmosfera, resultado da reação fotoquímica entre hidrocarbonetos e óxidos de nitrogênio, durante a primavera, o verão e o outono.

Troposfera. Camada da atmosfera abaixo de cerca de 11 km de altitude, e onde ocorre a maior parte dos fenômenos atmosféricos.

Capítulo 5

Ânodo. Eletrodo negativo em uma célula de combustível.

Catalisador. É um material, como platina, que promove ou aumenta a taxa de reação em uma substância química provocando mudanças permanentes.

Cátodo. Eletrodo positivo em uma célula de combustível.

Corrente. Movimento de cargas elétricas (elétrons ou ânions) através do circuito.

Densidade de energia. É a relação de produção de energia para peso ou volume utilizado.

Eficiência. É a proporção de energia contida em um combustível que é convertido, por meio de um dispositivo de conversão de energia, em trabalho útil, como a eletricidade. Em uma

célula de combustível, a eficiência descreve a quantidade de energia química do combustível que é convertida em energia elétrica como resultado de um processo eletroquímico que combina os gases hidrogênio e oxigênio para formar água.

Eletrodo. É uma estrutura eletricamente condutora, em um dispositivo eletroquímico, que transfere elétrons para interagir com átomos ou moléculas.

Eletrólito. É o meio, em uma célula de combustível, que facilita o transporte de íons entre o ânodo e o cátodo. Este meio é necessário para sustentar o processo eletroquímico.

Elétron. É a carga negativa do átomo e a unidade negativa da corrente elétrica.

Íon. É a denominação dada a um átomo ou a uma molécula que adquiriram uma carga elétrica, seja pela perda ou ganho de elétrons.

Processador de combustível. É um dispositivo que converte um combustível a base de carbono e hidrogênio, como gás natural ou metanol, em uma mistura de hidrogênio e outros gases.

Processo Eletroquímico. Se refere a um processo ou um dispositivo nos quais reações químicas acontecem e resultam na transferência de elétrons para os reagentes que, em uma célula de combustível, são os gases hidrogênio e oxigênio.

Próton. É a carga positiva que existe no núcleo do átomo. O íon de hidrogênio positivamente carregado que permanece quando um elétron é removido de um átomo de hidrogênio é o próton. A carga de positiva do próton é igual em magnitude à carga de negativa do elétron.

Stack. Um *stack* é a união de várias células. Essa união é que recebe a denominação de células de combustível, pois uma única célula não fornece energia suficiente para mover um veículo.

Anexo II

Composição frota de Veículos para a cidade de São Paulo

Planilha 01 Composição da frota de automóveis até Dezembro de 2002

Combustível	Local	Até 1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994
Gasolina	São Paulo	1.134.867	12.496	16.026	8.474	16.575	44.144	77.410	77.321	67.313	107.590	164.529
	RMSP	1.481.371	17.919	22.755	11.890	22.512	60.451	108.130	107.252	92.222	146.928	224.537
	SP	2.765.580	32.434	39.208	19.237	35.837	101.038	189.692	185.413	155.791	250.843	388.614
Álcool	São Paulo	227.916	98.177	105.252	65.056	79.850	57.224	12.076	19.775	27.667	42.217	26.089
	RMSP	294.779	132.776	144.525	89.032	108.802	79.064	16.716	27.666	38.730	59.134	36.215
	SP	564.205	255.752	270.697	162.465	199.704	150.520	31.613	54.344	74.974	111.126	66.230

Fonte: CETESB, 2003

Planilha 02 Composição da frota de automóveis até Dezembro de 2001

Combustível	Local	Até 1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994
Gasolina	São Paulo	1.141.807	12.698	16.273	8.651	17.005	45.127	79.143	79.151	69.160	110.707	169.723
	RMSP	1.485.200	18.067	22.963	12.069	22.872	61.268	109.500	108.501	93.320	149.036	227.959
	SP	2.767.915	32.534	39.366	19.382	36.174	101.719	190.763	186.301	156.353	251.931	390.668
Álcool	São Paulo	229.937	99.411	106.742	66.356	81.536	58.588	12.366	20.378	28.714	43.953	27.303
	RMSP	296.228	133.741	145.698	89.965	110.124	80.142	16.856	28.093	39.412	60.359	37.138
	SP	565.169	256.317	271.102	162.615	199.661	150.417	31.322	53.983	74.726	110.800	66.042

Fonte: CETESB, 2003

Planilha 03 Composição da frota de automóveis até Dezembro de 2000

Combustível	Local	Até 1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994
Gasolina	São Paulo	1.152.053	12.796	16.422	8.754	17.306	46.074	81.264	81.521	71.213	114.261	175.898
	RMSP	1.491.146	18.047	22.992	12.073	23.042	61.875	110.765	109.954	94.433	151.078	231.473
	SP	2.770.792	32.307	39.219	19.309	36.132	101.920	191.274	186.559	156.450	252.039	391.447
Álcool	São Paulo	233.272	101.476	109.210	68.079	83.683	60.338	12.903	21.167	29.960	45.759	28.528
	RMSP	298.984	135.529	147.796	91.336	111.800	81.512	17.251	28.626	40.232	61.561	38.043
	SP	567.541	257.636	272.287	163.231	200.230	150.709	31.354	53.899	74.778	110.738	66.143

Fonte: CETESB, 2003

Planilha 01 Continuação

Combustível	Local	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	Total
Gasolina	São Paulo	232.473	232.580	282.048	210.910	172.618	213.448	213.136	157.286	3.441.244
	RMSP	321.182	326.626	390.726	283.067	228.883	284.009	288.294	217.303	4.636.057
	SP	539.322	563.220	661.454	472.591	375.834	455.525	470.777	342.516	8.044.926
Álcool	São Paulo	8.695	1.834	131	150	1.161	1.678	2.709	5.586	783.243
	RMSP	12.167	2.566	183	203	1.668	1.916	2.987	7.012	1.056.141
	SP	20.884	4.824	834	849	7.324	5.196	8.803	22.726	2.013.070

Planilha 02 Continuação

Combustível	Local	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	Total
Gasolina	São Paulo	241.852	241.816	293.540	219.295	177.096	213.359	185.770	3.322.173
	RMSP	328.533	333.675	400.659	291.169	234.046	286.270	254.404	4.439.511
	SP	544.599	568.802	669.611	479.112	378.257	454.500	413.819	7.681.806
Álcool	São Paulo	9.139	1.951	133	139	1.207	2.095	2.339	792.287
	RMSP	12.565	2.631	181	194	1.681	2.303	2.605	1.059.916
	SP	20.899	4.731	762	805	7.221	5.297	7.481	1.989.350

Planilha 03 Continuação

Combustível	Local	1995	1996	1997	1998	1999	2000	Total
Gasolina	São Paulo	250.366	250.104	302.489	223.772	177.465	184.428	3.166.186
	RMSP	334.141	339.880	408.377	296.656	236.538	251.450	4.193.920
	SP	546.877	571.915	674.001	481.366	377.744	395.420	7.224.771
Álcool	São Paulo	9.554	2.038	132	137	1.219	1.660	809.115
	RMSP	12.887	2.704	178	196	1.948	1.916	1.072.499
	SP	20.992	4.755	761	799	7.506	4.420	1.987.779

Planilha 04 Composição da frota de automóveis até Dezembro de 1999

Combustível	Local	Até 1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994
Gasolina	São Paulo	1.174.447	12.958	16.720	8.910	17.766	47.532	84.437	84.901	74.399	119.721	184.239
	RMSP	1.504.723	18.049	23.085	12.087	23.274	62.878	113.080	112.159	96.378	154.586	236.991
	SP	2.776.889	31.924	38.958	19.120	35.992	102.132	192.266	187.166	156.904	252.714	393.457
Álcool	São Paulo	239.960	105.107	113.196	71.055	87.141	62.982	13.514	22.171	31.500	48.104	29.958
	RMSP	304.561	138.781	151.448	93.955	114.867	83.774	17.713	29.338	41.270	63.144	39.097
	SP	572.264	260.139	274.727	164.749	201.874	151.871	31.596	54.052	75.181	111.077	66.519

Fonte: CETESB, 2003

Planilha 05 Composição da frota de automóveis até Dezembro de 1998

Combustível	Local	Até 1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994
Gasolina	São Paulo	1.212.325	12.981	16.912	8.980	18.263	49.812	89.242	89.557	78.481	126.621	194.948
	RMSP	1.526.930	17.668	22.833	11.910	23.376	64.539	117.039	116.116	99.741	160.621	246.303
	SP	2.780.462	30.419	37.639	18.365	35.308	102.498	194.130	188.928	158.575	255.750	398.962
Álcool	São Paulo	251.378	110.905	119.496	75.326	92.169	66.848	14.402	23.340	33.270	50.732	31.650
	RMSP	314.797	144.374	157.532	97.979	119.584	87.214	18.519	30.361	42.797	65.429	40.625
	SP	582.643	265.370	279.789	167.682	205.044	154.240	32.182	54.657	76.303	112.687	67.585

Fonte: CETESB, 2003

Planilha 06 Composição da frota de automóveis até Dezembro de 1997

Combustível	Local	Até 1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994
Gasolina	São Paulo	1.259.281	12.871	17.131	8.906	18.698	52.839	96.062	96.613	84.348	136.185	208.645
	RMSP	1.556.121	16.820	22.263	11.423	23.228	66.549	122.481	122.254	104.823	169.237	258.989
	SP	2.764.827	26.277	34.222	16.527	33.288	101.504	194.925	190.141	159.796	257.975	403.828
Álcool	São Paulo	266.962	119.271	127.892	80.778	98.990	71.937	15.417	25.094	35.559	54.136	33.641
	RMSP	328.972	151.857	165.318	102.942	125.594	91.742	19.438	32.000	45.026	68.691	42.567
	SP	599.277	272.057	285.796	171.021	208.606	156.876	32.846	55.859	78.033	115.591	69.228

Fonte: CETESB, 2003

Planilha 04 Continuação

Combustível	Local	1.995	1.996	1.997	1.998	1.999	Total
Gasolina	São Paulo	260.754	259.096	308.772	224.322	153.909	3.032.883
	RMSP	342.106	347.816	415.772	300.245	209.142	3.972.371
	SP	550.265	575.878	677.032	481.727	330.159	6.802.583
Álcool	São Paulo	9.957	2.119	135	136	846	837.881
	RMSP	13.230	2.766	183	200	1.443	1.095.770
	SP	21.152	4.800	758	789	5.868	1.997.416

Planilha 05 Continuação

Combustível	Local	1995	1996	1997	1998	Total
Gasolina	São Paulo	271.930	266.096	308.889	189.733	2.934.770
	RMSP	353.767	358.109	421.051	260.015	3.800.018
	SP	557.601	581.830	677.795	416.605	6.434.867
Álcool	São Paulo	10.072	2.198	129	100	882.015
	RMSP	13.399	2.843	218	148	1.135.819
	SP	21.454	4.849	771	470	2.025.726

Planilha 06 Continuação

Combustível	Local	1995	1996	1997	Total
Gasolina	São Paulo	281.154	266.573	265.738	2.805.044
	RMSP	365.942	364.452	369.858	3.574.440
	SP	562.400	579.892	585.608	5.911.210
Álcool	São Paulo	10.416	2.237	101	942.431
	RMSP	13.871	2.893	212	1.191.123
	SP	21.884	4.894	636	2.072.604

Planilha 07 Composição da frota de automóveis até Dezembro de 1996

Combustível	Local	Até 1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994
Gasolina	São Paulo	1.356.350	13.591	18.721	9.634	21.225	61.650	113.598	107.386	91.034	146.341	221.055
	RMSP	1.644.239	16.985	23.266	11.786	25.252	74.478	138.800	131.516	109.938	177.192	268.934
	SP	2.859.730	24.888	33.889	16.223	34.439	108.330	209.340	196.244	161.506	260.788	407.449
Álcool	São Paulo	302.818	137.120	147.968	94.592	116.719	84.680	17.838	27.188	37.746	57.258	34.964
	RMSP	363.458	168.952	184.015	115.780	142.593	103.994	21.876	33.711	46.700	71.245	43.701
	SP	643.301	291.859	305.841	184.023	225.535	169.321	35.388	57.514	79.359	117.772	70.294

Fonte: CETESB, 2003

Planilha 07 Continuação

Combustível	Local	1995	1996	Total
Gasolina	São Paulo	281.731	230.318	2672634
	RMSP	371.578	322.785	3316749
	SP	559.325	497.191	5369342
Álcool	São Paulo	10.594	2.174	1071659
	RMSP	14.281	2.813	1313119
	SP	22.058	4.579	2206844

Planilha 08 Fatores de emissão para a frota de veículos a gasolina na cidade de São Paulo - 2.002

Ano Modelo	km atual	nº veículos	% veículo	% km	km média	FE (g/km)		
						CO	HC	NOx
pré 85	9.000	1.132.187	32,9	23,2	2.958	33,8	3,1	1,4
1.985	9.000	12.484	0,4	0,3	33	28,7	2,5	1,6
1.986	9.000	16.025	0,5	0,3	42	22,6	2,1	1,9
1.887	9.000	8.485	0,2	0,2	22	22,6	2,1	1,9
1.988	9.000	16.522	0,5	0,3	43	19,0	1,8	1,8
1.989	9.000	43.949	1,3	0,9	115	15,6	1,7	1,6
1.990	9.000	77.051	2,2	1,6	201	13,6	1,4	1,4
1.991	9.000	76.774	2,2	1,6	201	11,8	1,3	1,3
1.992	10.000	66.667	1,9	1,5	194	6,4	0,6	0,6
1.993	13.000	106.566	3,1	3,2	402	6,5	0,6	0,8
1.994	13.000	162.543	4,7	4,8	613	6,2	0,6	0,7
1.995	13.000	229.403	6,7	6,8	866	4,9	0,6	0,6
1.996	14.000	228.370	6,6	7,3	928	3,9	0,4	0,5
1.997	14.000	278.121	8,1	8,9	1.130	1,2	0,2	0,3
1.998	14.000	208.358	6,0	6,6	847	0,8	0,1	0,2
1.999	15.000	169.598	4,9	5,8	738	0,8	0,1	0,2
2.000	17.000	211.244	6,1	8,2	1.042	0,8	0,1	0,2
2.001	19.000	214.917	6,2	9,3	1.185	0,5	0,1	0,1
2.002	22.000	185.609	5,4	9,3	1.185	0,5	0,1	0,1
		3.444.873	100,0	100,0	12.746	10,2	1,0	0,6

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da CETESB.

Planilha 09 Fatores de emissão para a frota de veículos a álcool na cidade de São Paulo - 2.002

Ano Modelo	km atual	nº veículos	% veículos	% km	km média	FE (g/km)		
						CO	HC	NOx
pré 85	9.000	227.017	29,19	27,32	2.627	18,5	1,7	1,2
1.985	9.000	97.455	12,53	11,73	1.128	17,3	1,7	1,2
1.986	9.000	104.581	13,45	12,58	1.210	16,4	1,7	1,8
1.987	9.000	64.475	8,29	7,76	746	16,4	1,7	1,8
1.988	9.000	78.962	10,15	9,50	914	13,6	1,8	1,4
1.989	9.000	56.576	7,27	6,81	655	13,1	1,7	1,1
1.990	9.000	11.873	1,53	1,43	137	11,1	1,3	1,2
1.991	9.000	19.442	2,50	2,34	225	8,6	1,1	1,0
1.992	10.000	27.153	3,49	3,63	349	3,7	0,6	0,5
1.993	13.000	41.396	5,32	7,19	692	4,4	0,7	0,6
1.994	13.000	25.591	3,29	4,45	428	4,8	0,7	0,7
1.995	13.000	8.498	1,09	1,48	142	4,8	0,7	0,7
1.996	14.000	1.800	0,23	0,34	32	4,1	0,6	0,7
1.997	14.000	134	0,02	0,03	2	0,9	0,3	0,3
1.998	14.000	148	0,02	0,03	3	0,7	0,2	0,2
1.999	15.000	1.162	0,15	0,23	22	0,6	0,2	0,2
2.000	17.000	1.774	0,23	0,40	39	0,7	0,2	0,2
2.001	19.000	2.755	0,35	0,70	67	0,7	0,2	0,1
2.002	22.000	7.026	0,90	2,07	199	0,8	0,2	0,1
		777.818	100,00	100,00	9.617	13,7	1,4	1,2

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da CETESB.

Planilha 10 Projeção da frota de veículos leves a gasolina para a cidade de São Paulo 2.003 - 2.020 – Cenário A

	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
13	1.356.350	1.272.152	1.242.218	1.213.035	1.207.331	1.241.561	1.309.992	1.218.341	1.202.614	1.186.512	1.170.363	1.150.891	1.129.989
12	13.591	17.131	8.980	17.766	46.074	79.143	77.321	91.654	108.017	125.379	143.805	162.873	182.733
11	18.721	8.906	18.263	47.532	81.264	79.151	67.313	99.805	117.298	134.739	153.236	172.340	192.213
10	9.634	18.698	49.812	84.437	81.521	69.160	107.590	128.791	149.258	170.949	193.948	217.686	242.372
9	21.225	52.839	89.242	84.901	71.213	110.707	164.529	167.737	192.324	218.357	245.940	274.353	303.864
8	61.650	96.062	89.557	74.399	114.261	169.723	232.473	223.912	253.758	286.906	316.347	342.668	357.699
7	113.598	96.613	78.481	119.721	175.898	241.852	232.580	264.347	297.653	324.967	351.059	372.046	393.833
6	107.386	84.348	126.621	184.239	250.366	241.816	282.048	315.484	330.575	346.578	364.767	384.263	407.326
5	91.034	136.185	194.948	260.754	250.104	293.540	210.910	288.929	303.795	318.140	332.166	345.900	360.973
4	146.341	208.645	271.930	259.096	302.489	219.295	172.618	240.460	244.961	249.423	253.910	257.685	261.110
3	221.055	281.154	266.096	308.772	223.772	177.096	213.448	198.494	188.914	179.709	170.915	162.051	153.410
2	281.731	266.573	308.889	224.322	177.465	213.359	213.136	180.581	168.019	156.254	145.280	134.663	124.628
1	230.318	265.738	189.733	153.909	184.428	185.770	157.286	145.241	134.887	125.210	116.201	107.509	99.313
Ano/Total	2.672.634	2.805.044	2.934.770	3.032.883	3.166.186	3.322.173	3.441.244	3.563.777	3.692.073	3.823.123	3.957.937	4.084.928	4.209.465

Dados para a frota de 2003 a 2020 projetados

Planilha 11 Projeção da frota de veículos leves a álcool para a cidade de São Paulo 2.003 - 2.020 – Cenário

	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
13	302.818	653.195	481.779	529.318	595.720	642.570	645.551	604.174	562.421	560.855	534.822	509.611	482.152
12	137.120	127.892	75.326	87.141	60.338	12.366	19.775	11.684	7.742	5.502	3.725	2.505	1.679
11	147.968	80.778	92.169	62.982	12.903	20.378	27.667	11.257	7.852	5.530	4.382	3.859	2.345
10	94.592	98.990	66.848	13.514	21.167	28.714	42.217	16.942	13.901	14.777	16.947	13.143	10.343
9	116.719	71.937	14.402	22.171	29.960	43.953	26.089	18.043	18.980	24.269	20.191	16.886	14.701
8	84.680	15.417	23.340	31.500	45.759	27.303	8.695	12.727	13.048	9.539	6.643	4.860	4.360
7	17.838	25.094	33.270	48.104	28.528	9.139	1.834	4.421	4.087	2.351	1.692	1.209	861
6	27.188	35.559	50.732	29.958	9.554	1.951	131	115	107	106	100	94	88
5	37.746	54.136	31.650	9.957	2.038	133	150	115	107	106	100	94	88
4	57.258	33.641	10.072	2.119	132	139	1.161	1.022	945	937	885	830	777
3	34.964	10.416	2.198	135	137	1.207	1.678	1.477	1.365	1.354	1.279	1.200	1.123
2	10.594	2.237	129	136	1.219	2.095	2.709	2.384	2.204	2.186	2.065	1.938	1.813
1	2.174	101	100	846	1.660	2.339	5.586	4.916	4.545	4.507	4.258	3.995	3.738
Idade/Total	1.071.659	1.209.393	882.015	837.881	809.115	792.287	783.243	689.277	637.304	632.019	597.088	560.223	524.067

Dados para a frota de 2003 a 2020 projetados

Planilha 10 Continuação

2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
1.110.227	1.089.643	1.068.214	1.046.199	1.023.832	1.001.569	979.152	956.391	933.624	910.929	888.326	865.818
203.792	213.841	229.181	245.495	261.638	272.701	287.349	306.306	323.197	342.435	358.103	376.394
202.433	232.037	245.193	256.302	274.986	289.269	307.839	326.754	342.069	356.885	372.005	393.632
259.864	279.783	303.688	323.541	340.803	365.924	387.552	409.034	425.078	442.543	457.527	469.562
330.786	348.571	369.786	390.608	410.785	432.056	450.718	469.195	492.130	509.713	531.175	556.830
374.613	397.208	421.566	446.255	466.374	490.623	514.245	537.339	560.486	583.510	610.337	632.952
416.693	438.454	463.597	488.550	511.637	534.895	557.674	574.539	595.714	620.602	641.178	664.315
436.629	464.309	487.458	513.155	537.999	563.276	583.720	608.757	634.949	660.058	683.703	705.951
388.416	410.273	433.767	458.820	486.039	509.341	536.099	558.665	581.619	603.531	628.575	645.406
264.763	268.179	271.327	274.248	276.983	279.641	282.140	284.410	286.534	288.525	290.380	292.090
145.328	137.525	129.992	122.753	115.826	109.249	102.979	96.982	91.283	85.874	80.744	75.879
115.420	106.778	98.669	91.089	84.025	77.480	71.398	65.735	60.487	55.629	51.135	46.978
91.805	84.774	78.191	72.050	66.339	61.058	56.161	51.611	47.403	43.515	39.925	36.612
4.340.768	4.471.376	4.600.628	4.729.065	4.857.266	4.987.081	5.117.026	5.245.719	5.374.572	5.503.751	5.633.113	5.762.422

Planilha 11 Continuação

2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
454.788	436.621	415.651	391.253	370.712	351.480	333.462	315.931	298.316	282.256	267.477	253.081
1.132	777	527	354	239	162	110	75	50	34	23	16
1.337	1.153	826	581	396	272	200	146	100	70	50	36
8.660	8.940	7.970	6.697	5.663	5.166	4.690	4.155	3.563	3.151	2.821	2.512
15.126	14.793	13.182	11.564	11.017	10.489	9.807	8.901	8.198	7.696	7.216	6.659
4.059	2.887	2.218	1.832	1.527	1.244	973	766	632	513	410	328
617	450	325	232	167	120	87	62	45	32	23	17
82	79	75	70	66	63	59	56	53	50	47	45
82	79	75	70	66	63	59	56	53	50	47	45
731	700	663	620	586	555	525	496	468	442	418	395
1.056	1.012	958	897	847	802	759	717	676	639	604	571
1.705	1.634	1.547	1.448	1.368	1.295	1.226	1.158	1.091	1.031	976	922
3.515	3.370	3.189	2.985	2.820	2.670	2.528	2.389	2.250	2.126	2.012	1.901
492.890	472.496	447.206	418.603	395.476	374.380	354.487	334.908	315.495	298.091	282.126	266.526

Planilha 12

Cenário B - Frota de Veículos Leves a Gasolina para a cidade de São Paulo

2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
1.218.341	1.202.614	1.186.512	1.170.363	1.150.891	1.129.989	1.110.227	1.089.643	1.068.214	1.046.199	1.023.832	1.001.569	964.628
91.654	108.017	125.379	143.805	162.873	182.733	203.792	213.841	229.181	245.495	261.638	258.176	273.860
99.805	117.298	134.739	153.236	172.340	192.213	202.433	232.037	245.193	256.302	260.462	275.780	295.318
128.791	149.258	170.949	193.948	217.686	242.372	259.864	279.783	303.688	309.017	327.315	353.403	375.932
167.737	192.324	218.357	245.940	274.353	303.864	330.786	348.571	355.261	377.120	398.264	420.436	439.967
223.912	253.758	286.906	316.347	342.668	357.699	374.613	382.683	408.077	433.734	454.754	479.872	504.314
264.347	297.653	324.967	351.059	372.046	393.833	402.169	424.965	451.076	476.930	500.886	524.964	547.575
315.484	330.575	346.578	364.767	384.263	392.801	423.140	451.789	475.838	502.404	528.067	553.177	574.395
288.929	303.795	318.140	332.166	331.376	347.485	375.895	398.653	423.016	448.889	475.940	500.016	527.498
240.460	244.961	249.423	239.386	244.196	248.589	253.143	257.428	261.396	264.150	267.658	271.040	273.494
198.494	188.914	165.185	157.426	149.530	141.790	134.577	127.594	119.893	113.428	107.225	100.603	95.018
180.581	153.495	142.765	132.759	123.043	113.877	105.489	96.679	89.344	82.488	75.379	69.519	64.071
130.717	121.398	112.689	104.581	96.758	89.382	81.706	75.448	69.590	63.404	58.379	53.731	48.299
3.549.253	3.664.060	3.782.589	3.905.783	4.022.023	4.136.629	4.257.833	4.379.116	4.499.767	4.619.558	4.739.799	4.862.287	4.984.369

Dados para a frota de 2003 a 2020 conforme a substituição proposta pelo ARB (2003).

Planilha 13

Cenário B - Frota de Veículos Leves com células a combustível para a cidade de São Paulo

2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
												14.524
											14.524	13.489
										14.524	13.489	12.521
									14.524	13.489	12.521	11.620
								14.524	13.489	12.521	11.620	10.751
							14.524	13.489	12.521	11.620	10.751	9.931
						14.524	13.489	12.521	11.620	10.751	9.931	10.099
					14.524	13.489	12.521	11.620	10.751	9.931	10.099	9.325
				14.524	13.489	12.521	11.620	10.751	9.931	10.099	9.325	8.601
			14.524	13.489	12.521	11.620	10.751	9.931	10.099	9.325	8.601	8.646
		14.524	13.489	12.521	11.620	10.751	9.931	10.099	9.325	8.601	8.646	7.961
	14.524	13.489	12.521	11.620	10.751	9.931	10.099	9.325	8.601	8.646	7.961	7.327
14.524	13.489	12.521	11.620	10.751	9.931	10.099	9.325	8.601	8.646	7.961	7.327	7.863
14.524	28.013	40.534	52.154	62.905	72.836	82.935	92.260	100.861	109.507	117.467	124.794	132.657

Dados para a frota de 2003 a 2020 conforme a substituição proposta pelo ARB (2003).

Planilha 12 Continuação

2016	2017	2018	2019	2020
928.378	893.090	858.776	825.421	792.982
293.785	311.577	331.684	348.172	366.296
315.134	331.318	346.953	361.906	384.307
398.284	415.147	432.445	448.202	460.961
459.264	482.031	500.388	522.574	548.184
527.241	551.161	574.909	601.691	624.992
565.214	587.113	611.956	633.218	656.988
600.156	626.303	652.097	676.376	698.089
550.019	573.658	596.204	620.713	638.180
276.449	279.207	280.663	283.154	285.453
89.655	83.420	78.648	74.107	68.917
57.872	53.261	48.993	44.172	40.590
44.386	40.766	36.552	33.537	30.754
5.105.837	5.228.053	5.350.270	5.473.244	5.596.695

Planilha 13 Continuação

2016	2017	2018	2019	2020
28.013	40.534	52.154	62.905	72.836
12.521	11.620	10.751	9.931	10.099
11.620	10.751	9.931	10.099	9.325
10.751	9.931	10.099	9.325	8.601
9.931	10.099	9.325	8.601	8.646
10.099	9.325	8.601	8.646	7.961
9.325	8.601	8.646	7.961	7.327
8.601	8.646	7.961	7.327	7.863
8.646	7.961	7.327	7.863	7.226
7.961	7.327	7.863	7.226	6.636
7.327	7.863	7.226	6.636	6.962
7.863	7.226	6.636	6.962	6.388
7.226	6.636	6.962	6.388	5.858
139.883	146.519	153.481	159.869	165.727

Planilha 14 Cenário C - Frota de Veículos Leves a Gasolina para a cidade de São Paulo

2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
1.218.341	1.202.614	1.186.512	1.170.363	1.150.891	1.129.989	1.110.227	1.089.643	1.068.214	1.046.199	1.023.832	1.001.569	975.198
91.654	108.017	125.379	143.805	162.873	182.733	203.792	213.841	229.181	245.495	261.638	268.747	283.678
99.805	117.298	134.739	153.236	172.340	192.213	202.433	232.037	245.193	256.302	271.033	285.597	304.431
128.791	149.258	170.949	193.948	217.686	242.372	259.864	279.783	303.688	319.588	337.132	362.516	384.389
167.737	192.324	218.357	245.940	274.353	303.864	330.786	348.571	365.832	386.937	407.377	428.893	447.791
223.912	253.758	286.906	316.347	342.668	357.699	374.613	393.254	417.894	442.847	463.211	487.696	511.542
264.347	297.653	324.967	351.059	372.046	393.833	412.740	434.783	460.189	485.387	508.710	532.192	554.925
315.484	330.575	346.578	364.767	384.263	403.372	432.958	460.901	484.295	510.228	535.295	560.527	581.181
288.929	303.795	318.140	332.166	341.947	357.302	385.008	407.110	430.841	456.117	483.290	506.803	533.758
240.460	244.961	249.423	249.957	254.013	257.702	261.600	265.252	268.624	271.499	274.445	277.300	279.786
198.494	188.914	175.756	167.243	158.643	150.247	142.402	134.822	127.243	120.215	113.485	106.896	100.812
180.581	164.065	152.582	141.872	131.500	121.702	112.717	104.029	96.131	88.748	81.671	75.313	69.403
141.288	131.215	121.801	113.038	104.582	96.610	89.056	82.235	75.850	69.697	64.172	59.064	54.021
3.559.823	3.684.448	3.812.090	3.943.741	4.067.805	4.189.639	4.318.193	4.446.263	4.573.174	4.699.257	4.825.291	4.953.112	5.080.917

Dados para a frota de 2003 a 2020 conforme a substituição proposta pelo ARB (2003), corrigidos pela relação do PIB.

Planilha 15 Cenário C - Frota de Veículos Leves com célula a combustível para a cidade de São Paulo

2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
												3.953
											3.953	3.672
										3.953	3.672	3.408
									3.953	3.672	3.408	3.163
								3.953	3.672	3.408	3.163	2.926
							3.953	3.672	3.408	3.163	2.926	2.703
						3.953	3.672	3.408	3.163	2.926	2.703	2.749
					3.953	3.672	3.408	3.163	2.926	2.703	2.749	2.538
				3.953	3.672	3.408	3.163	2.926	2.703	2.749	2.538	2.341
			3.953	3.672	3.408	3.163	2.926	2.703	2.749	2.538	2.341	2.353
		3.953	3.672	3.408	3.163	2.926	2.703	2.749	2.538	2.341	2.353	2.167
	3.953	3.672	3.408	3.163	2.926	2.703	2.749	2.538	2.341	2.353	2.167	1.994
3.953	3.672	3.408	3.163	2.926	2.703	2.749	2.538	2.341	2.353	2.167	1.994	2.140
3.953	7.625	11.033	14.196	17.123	19.826	22.575	25.113	27.454	29.808	31.975	33.969	36.109

Dados para a frota de 2003 a 2020 conforme a substituição proposta pelo ARB (2003), corrigidos pela relação do PIB.

Planilha 14 Continuação

2016	2017	2018	2019	2020
948.765	922.591	896.733	871.203	845.992
302.898	320.034	339.508	355.400	373.646
323.591	339.143	354.181	369.256	391.094
406.108	422.375	439.795	454.989	467.221
466.492	489.381	507.175	528.834	554.477
534.591	557.947	581.169	607.983	630.786
572.001	593.373	618.249	639.011	662.321
606.416	632.595	657.891	681.709	703.811
556.312	579.452	601.537	626.435	643.439
282.243	284.540	286.385	288.413	290.283
94.988	89.143	83.907	78.937	73.984
63.595	58.520	53.823	49.240	45.240
49.644	45.596	41.620	38.186	35.018
5.207.643	5.334.690	5.461.973	5.589.597	5.717.311

Planilha 15 - Continuação

2016	2017	2018	2019	2020
7.625	11.033	14.196	17.123	19.826
3.408	3.163	2.926	2.703	2.749
3.163	2.926	2.703	2.749	2.538
2.926	2.703	2.749	2.538	2.341
2.703	2.749	2.538	2.341	2.353
2.749	2.538	2.341	2.353	2.167
2.538	2.341	2.353	2.167	1.994
2.341	2.353	2.167	1.994	2.140
2.353	2.167	1.994	2.140	1.967
2.167	1.994	2.140	1.967	1.806
1.994	2.140	1.967	1.806	1.895
2.140	1.967	1.806	1.895	1.739
1.967	1.806	1.895	1.739	1.595
38.076	39.882	41.778	43.516	45.111

Planilha 16 Fatores de emissão para a frota de veículos a gasolina na cidade de São Paulo - Cenário A

Ano Modelo	km atual	nº veículos	% veículo	% km	km média	FE (g/km)		
						CO	HC	NOx
pré 2.009	9.000	865.818	15,0	10,8	1.352	11,1	1,2	0,8
2.009	9.000	376.394	6,5	4,7	588	0,4	0,1	0,1
2.010	10.000	393.632	6,8	5,4	683	0,4	0,1	0,1
2.011	13.000	469.562	8,1	8,4	1.059	0,4	0,1	0,1
2.012	13.000	556.830	9,7	10,0	1.256	0,4	0,1	0,1
2.013	13.000	632.952	11,0	11,4	1.428	0,4	0,1	0,1
2.014	14.000	664.315	11,5	12,9	1.614	0,4	0,1	0,1
2.015	14.000	705.951	12,3	13,7	1.715	0,4	0,1	0,1
2.016	14.000	645.406	11,2	12,5	1.568	0,4	0,1	0,1
2.017	15.000	292.090	5,1	6,1	760	0,4	0,1	0,1
2.018	17.000	75.879	1,3	1,8	224	0,5	0,1	0,1
2.019	19.000	46.978	0,8	1,2	155	0,5	0,1	0,1
2.020	22.000	36.612	0,6	1,1	140	0,5	0,1	0,1
		5.762.422	100,0	100,0	12.543	1,6	0,2	0,2

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da CETESB.

Planilha 17 Fatores de emissão para a frota de veículos a álcool na cidade de São Paulo - Cenário A

Ano Modelo	km atual	nº veículos	% veículo	% km	km média	FE (g/km)		
						CO	HC	NOx
pré 2.009	9.000	253.081	95,0	91,9	8.546	5,4	0,9	0,7
2.009	9.000	16	0,0	0,0	1	0,8	0,2	0,1
2.010	10.000	36	0,0	0,0	1	0,8	0,2	0,1
2.011	13.000	2.512	0,9	1,3	123	0,8	0,2	0,1
2.012	13.000	6.659	2,5	3,5	325	0,8	0,2	0,1
2.013	13.000	328	0,1	0,2	16	0,8	0,2	0,1
2.014	14.000	17	0,0	0,0	1	0,8	0,2	0,1
2.015	14.000	45	0,0	0,0	2	0,8	0,2	0,1
2.016	14.000	45	0,0	0,0	2	0,8	0,2	0,1
2.017	15.000	395	0,1	0,2	22	0,8	0,2	0,1
2.018	17.000	571	0,2	0,4	36	0,8	0,2	0,1
2.019	19.000	922	0,3	0,7	66	0,8	0,2	0,1
2.020	22.000	1.901	0,7	1,7	157	0,8	0,2	0,1
		266.526	100,0	100,0	9.298	5,1	0,8	0,6

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da CETESB.

Planilha 18 Fatores de emissão para a frota de veículos a gasolina na cidade de São Paulo - Cenário B

Ano Modelo	km atual	nº veículos	% veículo	% km	km média	FE (g/km)		
						CO	HC	NOx
pré 2.009	9.000	792.982	14,2	10,1	1.275	11,1	1,2	0,8
2.009	9.000	366.296	6,5	4,7	589	0,4	0,1	0,1
2.010	10.000	384.307	6,9	5,5	687	0,4	0,1	0,1
2.011	13.000	460.961	8,2	8,5	1.071	0,4	0,1	0,1
2.012	13.000	548.184	9,8	10,1	1.273	0,4	0,1	0,1
2.013	13.000	624.992	11,2	11,6	1.452	0,4	0,1	0,1
2.014	14.000	656.988	11,7	13,1	1.643	0,4	0,1	0,1
2.015	14.000	698.089	12,5	13,9	1.746	0,4	0,1	0,1
2.016	14.000	638.180	11,4	12,7	1.596	0,4	0,1	0,1
2.017	15.000	285.453	5,1	6,1	765	0,4	0,1	0,1
2.018	17.000	68.917	1,2	1,7	209	0,5	0,1	0,1
2.019	19.000	40.590	0,7	1,1	138	0,5	0,1	0,1
2.020	22.000	30.754	0,5	1,0	121	0,5	0,1	0,1
		5.596.695	100,0	100,0	12.566	1,5	0,2	0,2

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da CETESB.

Planilha 19 Fatores de emissão para a frota de veículos a gasolina na cidade de São Paulo - Cenário C

Ano Modelo	km atual	nº veículos	% veículo	% km	km média	FE (g/km)		
						CO	HC	NOx
pré 2.009	9.000	845.992	14,8	10,6	1.332	11,1	1,2	0,8
2.009	9.000	373.646	6,5	4,7	588	0,4	0,1	0,1
2.010	10.000	391.094	6,8	5,5	684	0,4	0,1	0,1
2.011	13.000	467.221	8,2	8,5	1.062	0,4	0,1	0,1
2.012	13.000	554.477	9,7	10,0	1.261	0,4	0,1	0,1
2.013	13.000	630.786	11,0	11,4	1.434	0,4	0,1	0,1
2.014	14.000	662.321	11,6	12,9	1.622	0,4	0,1	0,1
2.015	14.000	703.811	12,3	13,7	1.723	0,4	0,1	0,1
2.016	14.000	643.439	11,3	12,6	1.576	0,4	0,1	0,1
2.017	15.000	290.283	5,1	6,1	762	0,4	0,1	0,1
2.018	17.000	73.984	1,3	1,8	220	0,5	0,1	0,1
2.019	19.000	45.240	0,8	1,2	150	0,5	0,1	0,1
2.020	22.000	35.018	0,6	1,1	135	0,5	0,1	0,1
		5.717.311	100,0	100,0	12.549	1,6	0,2	0,2

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da CETESB.

Anexo III

Cálculo da parcela emitida de CO₂ pela gasolina

A parcela emitida de CO₂ pela gasolina depende da composição de gasolina pura e etanol anidro da mistura que varia ano a ano. Para 2.002 a composição da gasolina C foi (% em volume):

78 % gasolina pura

21% de etanol anidro

densidade da gasolina = 0,7350 kg/L

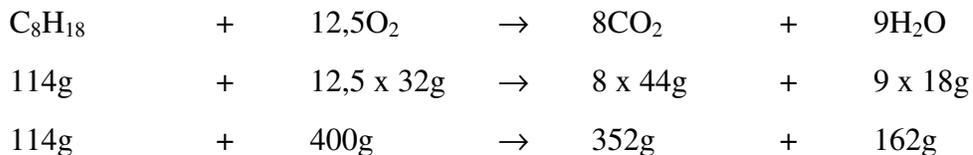
densidade do etanol = 0,7915 kg/L

Composição de 1 mol de gasolina:

$0,78 \times 0,735 \text{ kg/L} = 0,5733 \text{ kg de C}_8\text{H}_{18}$ (gasolina pura)

$0,22 \times 0,7915 \text{ kg/L} = 0,1741 \text{ kg de C}_2\text{H}_5\text{OH}$ (etanol)

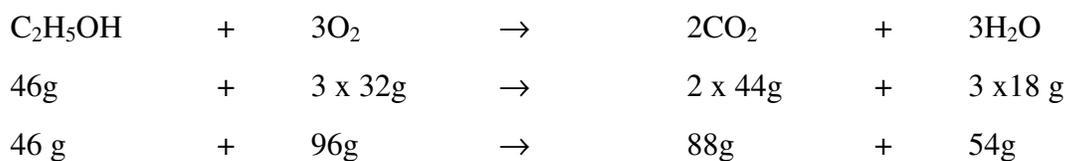
A queima de 1 mol de gasolina apresenta a seguinte relação estequiométrica:



Para a queima de 573,3g de gasolina a quantidade em massa de CO₂ será:

114g	_____	352g	
573,3g	_____	X	X = 1770g CO ₂

A queima de 1 mol de etanol apresenta a seguinte relação estequiométrica:

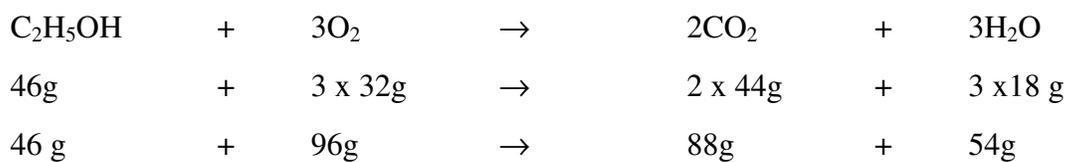


Para a queima de 174,1g de etanol a quantidade em massa de CO₂ será:

$$\begin{array}{ccc} 46\text{g} & \text{_____} & 88\text{g} \\ 174,1\text{g} & \text{_____} & \text{X} \end{array} \quad \text{X= 333g CO}_2$$

Cálculo da parcela emitida de CO₂ pelo álcool hidratado

A queima de 1 mol de etanol apresenta a seguinte relação estequiométrica:



$$1 \text{ litro de etanol} = 0,7915\text{kg} = 791,5\text{g}$$

Para a queima de 791,5g de etanol a quantidade em massa de CO₂ será:

$$\begin{array}{ccc} 46\text{g} & \text{_____} & 88\text{g} \\ 791,5\text{g} & \text{_____} & \text{X} \end{array} \quad \text{X= 1.514g CO}_2$$

Anexo IV

Veículos com células a combustível									
1962 - 1995			Motor	Célula		Combustível		Desempenho do Veículo	
Montadora	Modelo	Configuração	Potência (kW)	Tipo	Potência (kW)	Tipo	Armazenamento	Rendimento máx. (km)	Velocidade máx. (km/h)
Allis-Chalmers	Golf-cart	Nd		Alcalina	4	Nd	Nd	Nd	Nd
GM	Electrovan	Nd	90	Alcalina	150	hidrogênio	líquido	240	110
K. Kordes	Austin A40	Híbrido	7,5		6	hidrogênio	sob pressão	300	45
Energy Partners/Teledyne	Green Car	Puro	25,5	PEM - Energy Partners	15	hidrogênio	comprimido	97	97
Daimler Chrysler	Necar 1	Puro	30	PEM - Ballard	50	hidrogênio	comprimido	130	90
Energy Partners	Genesis	Nd	7	PEM	7,5	hidrogênio	sob pressão	72	24
1996									
Daimler Benz	Necar 2	Puro	Nd	PEM - Ballard	50	hidrogênio	sob pressão	250	110
Energy Partners/Teledyne	Veículo utilitário Gator	Nd	8	PEM	10	hidrogênio	sob pressão	125	24
Toyota	RAV 4 FCEV	Híbrido célula / bateria	45	PEM	20	hidrogênio	metal híbrido	250	100
1997									
Daimler Chrysler	Necar 3	Puro com reformador	45	PEM - Ballard Mark 700	50	metanol	líquido	400	120
GM / OPEL	EVI FCEV	Híbrido célula / bateria reformador	102	PEM	Nd	metanol	líquido	480	128
GM / OPEL	Sintra	Puro com reformador	50	PEM	50	metanol	líquido	Nd	150
Mazda	Demio FCVE	Híbrido célula / ultra capacitor	40	PEM - Ballard Mark 700	50	hidrogênio	metal híbrido	170	90
Renault	Fever (Lagua Station)	Híbrido célula / bateria	30	PEM - Nuvera	30	hidrogênio	líquido	400	120
Toyota	RAV4 FC EV (SUV)	híbrido célula / bateria reformador	50	PEM - Toyota	25	metanol	líquido	500	125
1998									
Coval H2 Partners	T-1000 (small pickup truck)	Híbrido célula / bateria	63	PEM - Nuvera	6,5	hidrogênio	líquido	394	105
Coval H2 Partners	London Truck	Híbrido célula / bateria	Nd	Alcalina - Zevco	63	hidrogênio	comprimido	200	100
Daimler Chrysler	Jeep Commander	Nd	Nd	PEM	Nd	metanol	Nd	970	
GM / OPEL	Zafira (minivan)	Puro com reformador	50	PEM - Ballard	50	metanol	Nd	483	120

1998			Motor	Célula		Combustível		Desempenho do Veículo	
Montadora	Modelo	Configuração	Potência (kW)	Tipo	Potência (kW)	Tipo	Armazenamento	Rendimento máx. (km)	Velocidade máx. (km/h)
Humboldt StateU. / Schatz Energy Research Center	Kewet	Puro	7,5	PEM - De Nora	9	hidrogênio	líquido	48	56
Renault	Laguna Estate	Nd	Nd	PEM	30	hidrogênio	líquido	400	Nd
ZEVCO	Millennium Taxi	Nd	63	AFC	5	hidrogênio	líquido	Nd	Nd
ZEVCO	TUG M3	Nd	Nd	Nd	2,5	Nd	Nd	Nd	26
ZEVCO	van de entrega	Nd	68	Nd	7	Nd	Nd	Nd	Nd
1999									
Daihatsu	Move EV-FC (micro-van)	Híbrido célula / bateria e reformador	32	PEM - Toyota	16	metanol	líquido	Nd	Nd
Daimler Chrysler	Necar 4	Puro	55	PEM - Ballard Mark 900	70	hidrogênio	líquido	450	145
Ford	P2000 FC EV	Nd	67	PEM	50	gás hidrogênio	sob pressão	160	128
Ford	P2000 HFC (sedan)	Puro	90	PEM - Ballard Mark 700	75	hidrogênio	comprimido	160	144
Ford	P2000 SUV (conceito)	Puro com reformador	Nd	PEM - Ballard	Nd	metanol	Nd	Nd	Nd
Honda	FCX - V1	Híbrido célula / bateria	49	PEM - Ballard Mark 700	60	hidrogênio	metal híbrido	177	130
Honda	FCX - V2	Puro com reformador	49	PEM - Honda	60	metanol	líquido	Nd	130
Honda	Passenger car	com reformador	49	PEM	60	metanol	Nd	Nd	Nd
Mazda	Demio FCVE	Nd	Nd	Nd	50	hidrogênio	metal híbrido	Nd	140
Nissan	R'nessa (SUV)	Híbrido célula / bateria e reformador	Nd	PEM - Ballard Mark 700	10	metanol	líquido	Nd	70
Toyota	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	hidrogênio	metal híbrido	Nd	Nd
Mitsubishi	MFCV - Mitsubishi Fuel Cell Vehicle	Nd	Nd	Nd	Nd	metanol	Nd	Nd	Nd
Daimler Chrysler	Necar 4 Advanced	Puro	Nd	PEM - Ballard Mark 900	85	hidrogênio	comprimido	200	145
Daimler Chrysler	Necar 5 (A - class)	Puro	Nd	PEM - Ballard Mark 900	85	metanol	líquido	450	150
Daimler Chrysler	Jeep Commander 2 (SUV)	Híbrido célula / bateria e reformador	Nd	PEM - Ballard Mark 700	50	metanol	líquido	190	Nd
Daimler Chrysler	Go-cart	Puro	Nd	DMFC - Ballard Mark 900	3	metanol	líquido	15	35

1999			Motor	Célula		Combustível		Desempenho do Veículo	
Montadora	Modelo	Configuração	Potência (kW)	Tipo	Potência (kW)	Tipo	Armazenamento	Rendimento máx. (km)	Velocidade máx. (km/h)
Ford	Think FC5	Puro com reformador	65	PEM - Ballard Mark 900	85	metanol	líquido	Nd	128
Ford	Focus FCV	Puro	67	PEM - Ballard Mark 900	85	hidrogênio	comprimido	160	128
GM / OPEL	Precept FCEV (conceito)	Híbrido célula / bateria	85	PEM - GM / Hydrogenics	100	hidrogênio	metal híbrido	800	193
GM / OPEL	HydroGen 1 (Zafira van)	Híbrido célula / bateria	60 55	PEM - GM / Hydrogenics	80	hidrogênio	líquido	400	140
Honda	FCX - V3	Híbrido célula / ultra capacitor	60	PEM - Ballard Mark 700	62	hidrogênio	comprimido	173	130
Hyundai	Santa Fé SUV	Puro	65	PEM - UTC Fuel Cells	75	hidrogênio	comprimido	160	124
Mazda	Premacy FC-EV	ND	65	PEM	65	metanol	Nd	124	Nd
Nissan	Xterra FCV	Híbrido célula / bateria	Nd	PEM - Ballard Mark 900 & UCT Fuel Cells	85	hidrogênio	comprimido	160	120
Volkswagen AG	Capri	Híbrido com bateria	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd
VW	Hymotion	Híbrido célula / super capacitor	Nd	PEM	75	hidrogênio	líquido	350	140
2001									
Beijing Green Power Co & Tssingua University	Station wagon	Puro	Nd	PEM - LN + Beijin Institute of Technology	20	hidrogênio	comprimido	165	72
Beijing Green Power Co & Tssingua University	Van para 12 passageiros	Puro	Nd	PEM - LN + Tsingua University	20	hidrogênio	comprimido	200	80
Daimler Chrysler	Natrium	Híbrido célula / bateria	Nd	PEM - Ballard Mark 900	54	Nd	hidreto de sódio e boro	483	130
Daimler Chrysler	Necar 5.2 (A-class)	Híbrido célula / bateria e reformador	Nd	PEM - Ballard Mark 900	85	metanol	líquido	482	150
Daimler Chrysler	Sprinter	Puro	55	PEM - Ballard Mark 900	85	hidrogênio	comprimido	150	120
Daihatsu	Move EFC-K-II	Híbrido célula / bateria	32	PEM	30	hidrogênio	sob pressão	Nd	Nd
ESORO	Hycar	Híbrido célula / bateria	35	PEM - Nuvera	6,4	hidrogênio	comprimido	360	120
Fiat	Seicento Elettra H ₂	Híbrido célula / bateria	30	PEM - Nuvera	7	hidrogênio	comprimido	140	100
Ford	Think FC5	Nd	Nd	PEM	75	hidrogênio	comprimido	Nd	Nd

2001			Motor	Célula		Combustível		Desempenho do Veículo	
Montadora	Modelo	Configuração	Potência (kW)	Tipo	Potência (kW)	Tipo	Armazenamento	Rendimento máx. (km)	Velocidade máx. (km/h)
Ford	Millenium Cell New Jersey Genesis	Híbrido célula / bateria	Nd	Nd	10	hidrogênio	hidreto de boro/sódio com 20% de água	755	Nd
GM / OPEL	Chevy S-10 (pickup truck)	Híbrido célula / bateria e reformador	Nd	PEM - GM / Hydrogenics	25	gasolina (CHF)	líquido	386	112
GM / OPEL	OPEL HydroGen 3 (Zafira Van)	Puro	60	PEM - GM / Hydrogenics	94	hidrogênio	líquido	400	160
GM (Shanghai) PATAC	Phoenix (mini van)	Híbrido célula / bateria	35	PEM - Shanghai / GM / Hydrogenics	25	hidrogênio	comprimido	200	113
Honda	FCX - V4	Híbrido célula / ultra capacitor	60	PEM - Ballard Mark 900	85	hidrogênio	comprimido	300	140
Hypercar	Revolution (conceito)	Híbrido célula / bateria	Nd	Nd	Nd	hidrogênio	comprimido	531	140
Hyundai	Santa Fé (SUV)	Puro	65	PEM - UTC Fuel Cells	75	hidrogênio	comprimido	402	124
Lada	Antel	Nd	Nd	AFC	Nd	hidrogênio	comprimido	Nd	Nd
Mitsubishi	Space Liner (conceito)	Híbrido célula / bateria	Nd	PEM	40	metanol	líquido	Nd	Nd
Nissan	Xterra 2	Híbrido célula / bateria	Nd	PEM - UTC Fuel Cells	75	hidrogênio	comprimido	160	120
PSA Peugeot Citroen	HYDRO-GEN	Híbrido célula / bateria	20	PEM - Nuvera	30	hidrogênio	comprimido	300	95
PSA Peugeot Citroen	Fuel Cell Cab	Híbrido célula / bateria	22	PEM - H Power	55	hidrogênio	comprimido	300	95
Suzuki	Covie (conceito)	Puro	Nd	PEM - GM / Hydrogenics	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd
Toyota	FCHV3	Híbrido célula / bateria	80	PEM - Toyota	90	hidrogênio	metal híbrido	300	150
Toyota	FCHV4	Híbrido célula / bateria	80	PEM - Toyota	90	hidrogênio	comprimido	250	152
Toyota	FCHV5	Híbrido célula / bateria e reformador	80	PEM - Toyota	90	gasolina	líquido	500	150
Virginia Tech University	ZEurban	Nd	60	PEM	60	hidrogênio	comprimido	120	Nd
2002									
Daimler Chrysler	F- cell (A-class)	Híbrido célula / bateria	65	PEM - Ballard Mark 900	85	hidrogênio	comprimido	145	140
Ford	Advanced Focus FCV	Híbrido célula / bateria	68	PEM - Ballard Mark 900	85	hidrogênio	comprimido	290	Nd

2002			Motor	Célula		Combustível		Desempenho do Veículo	
Montadora	Modelo	Configuração	Potência (kW)	Tipo	Potência (kW)	Tipo	Armazenamento	Rendimento máx. (km)	Velocidade máx. (km/h)
GM / OPEL	Autonomy (conceito)	Puro	100	Nd	Nd	hidrogênio	comprimido	Nd	Nd
GM / OPEL	Hi - Wire	Puro	60	PEM - Gm / Hydrogenics	94	hidrogênio	comprimido	129	160
GM / OPEL	Advanced HydroGen 3	Puro	60	PEM - Gm / Hydrogenics	94	hidrogênio	comprimido	270	160
Green Power	Fuel Cell Passenger	Nd	Nd	PEM	18	hidrogênio	comprimido	Nd	Nd
Green Power	Fuel Cell Passenger	Nd	Nd	PEM	18	hidrogênio	comprimido	Nd	Nd
Honda	FCX	Híbrido célula / ultra capacitor	60	PEM - Ballard Mark 900	85	hidrogênio	comprimido	355	150
Metallic Power	Geo Force conversion	Híbrido célula / bateria	Nd	Célula Zinco/ar - Metallic Power	5	zinco	grãos	480	80
Nissan	X-Trail (SUV)	Híbrido célula / bateria	58	PEM - UTC Fuel Cells	75	hidrogênio	comprimido	Nd	125
Toyota	FCHV	Híbrido célula / bateria	Nd	PEM - Toyota	90	hidrogênio	comprimido	290	155
Virginia Tech University	Magellan	Nd	60	Nd	60	hidrogênio	comprimido	120	Nd
VW	Bora Hy Power	Híbrido célula / super capacitor	Nd	PEM - Paul Scherrer Institute	40	hidrogênio	comprimido	150	115
2003									
Daimler Chrysler	Jeep Treo	Puro	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd
Fiat	Seicento Elletra	Híbrido célula / bateria	Nd	Nuvera	Nd	hidrogênio	comprimido	Nd	Nd
Ford	GloCar (conceito)	Puro	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd
Honda	Kiwami (conceito)	Puro	Nd	Nd	Nd	hidrogênio	Nd	Nd	Nd
Mitsubishi	Grandis FCV (mini-van)	Híbrido célula / bateria	Nd	PEM - Daimler Chrysler / Ballard	68	hidrogênio	comprimido	150	140
Nissan	Effis (conceito)	Híbrido célula / bateria	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd
Suzuki	Mobile Terrace	Puro	Nd	Nd	Nd	hidrogênio	Nd	Nd	Nd
Toyota	Fine-S (conceito)	Puro	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd

Nd – não disponível.

Fonte: Internet.

Anexo V

Planilha 20 Cenário D - Frota de Veículos Leves a Gasolina para a cidade de São Paulo

2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
1.218.341	1.202.614	1.186.512	1.170.363	1.150.891	1.129.989	1.110.227	1.089.643	1.068.214	1.046.199	1.023.832	1.001.569	833.911
91.654	108.017	125.379	143.805	162.873	182.733	203.792	213.841	229.181	245.495	261.638	127.459	152.462
99.805	117.298	134.739	153.236	172.340	192.213	202.433	232.037	245.193	256.302	129.745	154.382	182.630
128.791	149.258	170.949	193.948	217.686	242.372	259.864	279.783	303.688	178.300	205.916	240.714	271.352
167.737	192.324	218.357	245.940	274.353	303.864	330.786	348.571	224.544	255.722	285.576	315.856	343.209
223.912	253.758	286.906	316.347	342.668	357.699	374.613	251.966	286.679	321.046	350.173	383.114	414.932
264.347	297.653	324.967	351.059	372.046	393.833	271.452	303.567	338.388	372.349	404.128	435.582	465.869
315.484	330.575	346.578	364.767	384.263	262.084	301.742	339.100	371.258	405.646	438.686	471.471	498.946
288.929	303.795	318.140	332.166	200.659	226.087	263.206	294.073	326.258	359.507	394.234	424.567	457.908
240.460	244.961	249.423	108.669	122.798	135.901	148.562	160.670	172.014	182.443	192.209	201.450	210.090
198.494	188.914	34.468	36.028	36.842	37.209	37.820	38.212	38.187	37.979	37.635	37.199	36.639
180.581	22.777	21.367	20.071	18.462	17.119	16.107	14.973	13.896	12.898	11.975	11.140	10.339
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.418.536	3.411.945	3.417.785	3.436.399	3.455.881	3.481.105	3.520.603	3.566.437	3.617.498	3.673.885	3.735.747	3.804.504	3.878.287

De 2003 a 2020 não foram introduzidos veículos novos a gasolina.

Planilha 21 Cenário D - Frota de Veículos Leves com célula a combustível para a cidade de São Paulo

2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
												145.241
											145.241	134.887
										145.241	134.887	125.210
									145.241	134.887	125.210	116.201
								145.241	134.887	125.210	116.201	107.509
						145.241	134.887	125.210	116.201	107.509	99.313	91.805
					145.241	134.887	125.210	116.201	107.509	99.313	91.805	84.774
				145.241	134.887	125.210	116.201	107.509	99.313	91.805	84.774	78.191
			145.241	134.887	125.210	116.201	107.509	99.313	91.805	84.774	78.191	72.050
	145.241	134.887	125.210	116.201	107.509	99.313	91.805	84.774	78.191	72.050	66.339	61.058
145.241	134.887	125.210	116.201	107.509	99.313	91.805	84.774	78.191	72.050	66.339	61.058	56.161
145.241	280.128	405.338	521.538	629.047	728.360	820.165	904.939	983.130	1.055.180	1.121.519	1.182.577	1.238.739

De 2003 a 2020 todos os veículos novos introduzidos foram veículos com células a combustível

Planilha 20 Continuação

2016	2017	2018	2019	2020
676.262	528.286	389.391	259.279	137.458
181.096	206.997	234.926	258.790	284.590
210.554	234.560	257.572	280.200	308.859
301.526	325.765	350.738	372.753	391.372
369.882	400.325	424.940	452.984	484.780
445.535	475.712	505.320	538.286	566.613
489.765	517.523	548.552	574.839	603.257
530.566	562.899	593.718	622.645	649.790
486.615	515.280	542.473	572.414	593.794
218.071	225.476	232.364	238.769	244.687
35.924	35.122	34.263	33.341	32.364
9.574	8.876	8.226	7.620	7.053
0	0	0	0	0
3.955.369	4.036.820	4.122.483	4.211.920	4.304.617

Planilha 21 - Continuação

2016	2017	2018	2019	2020
280.128	405.338	521.538	629.047	728.360
125.210	116.201	107.509	99.313	91.805
116.201	107.509	99.313	91.805	84.774
107.509	99.313	91.805	84.774	78.191
99.313	91.805	84.774	78.191	72.050
91.805	84.774	78.191	72.050	66.339
84.774	78.191	72.050	66.339	61.058
78.191	72.050	66.339	61.058	56.161
72.050	66.339	61.058	56.161	51.611
66.339	61.058	56.161	51.611	47.403
61.058	56.161	51.611	47.403	43.515
56.161	51.611	47.403	43.515	39.925
51.611	47.403	43.515	39.925	36.612
1.290.350	1.337.753	1.381.267	1.421.193	1.457.805

Planilha 22 Fatores de emissão para a frota de veículos a gasolina na cidade de São Paulo - Cenário D

Ano Modelo	km atual	nº veículos	% veículo	% km	km média	FE (g/km)		
						CO	HC	NOx
pré 2.009	9.000	137.458	3,2	2,2	287	0,24	0,02	0,02
2.009	9.000	284.590	6,6	4,6	595	0,02	0,005	0,005
2.010	10.000	308.859	7,2	5,5	717	0,02	0,006	0,007
2.011	13.000	391.372	9,1	9,1	1.182	0,04	0,01	0,01
2.012	13.000	484.780	11,3	11,3	1.464	0,05	0,01	0,01
2.013	13.000	566.613	13,2	13,2	1.711	0,06	0,01	0,01
2.014	14.000	603.257	14,0	15,1	1.962	0,07	0,02	0,02
2.015	14.000	649.790	15,1	16,3	2.113	0,07	0,02	0,02
2.016	14.000	593.794	13,8	14,9	1.931	0,07	0,02	0,02
2.017	15.000	244.687	5,7	6,6	853	0,03	0,008	0,007
2.018	17.000	32.364	0,8	1,0	128	0,00	0,001	0,001
2.019	19.000	7.053	0,2	0,2	31	0,00	0,00	0,00
2.020	22.000	0	0,0	0,0	0	0,00	0,00	0,00
		4.304.617	100,0	100,0	12.974	0,67	0,13	0,13

Fonte: Elaboração própria a partir de dados da CETESB.