

ANTÔNIO CARLOS SANTOS

**A INFLUÊNCIA DO USO DO ETANOL COMBUSTÍVEL NAS
EMISSÕES DOS GASES DO EFEITO ESTUFA NOS
MOTORES DO CICLO OTTO**

SÃO CAETANO DO SUL
2008

ANTÔNIO CARLOS SANTOS

**A INFLUÊNCIA DO USO DO ETANOL COMBUSTÍVEL NAS
EMISSÕES DOS GASES DO EFEITO ESTUFA NOS
MOTORES DO CICLO OTTO**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia Mauá do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos.

Linha de Pesquisa: Impacto Ambiental de Processos Industriais

Orientador: Prof. Dr. Roberto de Aguiar Peixoto

**SÃO CAETANO DO SUL
2008**

Santos, Antônio Carlos

A influência do uso do etanol combustível nas emissões dos gases do efeito estufa nos motores do Ciclo Otto/ Antônio Carlos Santos. — São Caetano do Sul, SP: CEUN-EEM, 2008.90 p.

Dissertação de Mestrado — Programa de Pós-Graduação. Linha de Pesquisa: Impacto Ambiental de Processos Industriais — Escola de Engenharia Mauá do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, SP, 2008.

Orientador: Prof. Dr. Roberto de Aguiar Peixoto.

1. Emissões de gases de efeito estufa. Consumo de combustíveis no Brasil. Frota brasileira de veículos. Instituto Mauá de Tecnologia. Centro Universitário. Escola de Engenharia Mauá.
II. Título.

ANTÔNIO CARLOS SANTOS

**A INFLUÊNCIA DO USO DO ETANOL COMBUSTÍVEL NAS
EMISSÕES DOS GASES DO EFEITO ESTUFA NOS
MOTORES DO CICLO OTTO**

Projeto apresentado à Escola de Engenharia Mauá
do Centro Universitário do Instituto Mauá de
Tecnologia para aprovação no Exame de
Qualificação para obtenção do Título de Mestre em
Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos.

Linha de Pesquisa: Impacto Ambiental de
Processos Químicos

Banca Examinadora:

Dr. Roberto Aguiar Peixoto

Dr. Oswaldo dos Santos Lucon

Dr Eduardo Antonio Licco

São Caetano do Sul, 28 de novembro 2008.

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus netos Fábio, Filipi, Isabelli e à minha bisneta Yasmin, aos sobrinhos-netos Joana, Gabriel, Renata, Bruno e Tainá, a um jovem especial Thiago e aos amiguinhos Alberto e Gustavo, pois eles representam a geração que herdará os problemas aqui relatados.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, quero agradecer a Deus por ter proporcionado a possibilidade de fazer o curso de mestrado, num país em que a maioria da população não chega sequer completar o primeiro grau.

À minha esposa Teresa, pela paciência nesses anos que estive fazendo o mestrado.

Ao orientador prof. Dr. Roberto Peixoto pelo seu profissionalismo, competência, dedicação, caráter e amizade durante esses anos de ensino e labor.

Aos professores, entre outros, prof. Dr. Oswaldo Lucon, que me enviou muitos sites e artigos a respeito do assunto Meio Ambiente, prof. Dr. Roberto Moreira, com quem mantive diálogos a respeito da Eficiência Energética, prof. Dr. Cláudio Garcia, que me fez estudar como um louco a disciplina Modelagem e Simulação de Processos bem como aos funcionários do CEUN-IMT, dos quais cito, Margareth.

Aos meus parentes que me ajudaram quando no início da minha formação, dos quais ressalto, minha tia Laurentina Fernandes (in memorian), meu padrinho Francisco Pita (in memorian), sua esposa Jacira Pita (in memorian), minha madrinha Maria José Pita, minha irmã Dalva S. Gonçalves (in memorian) e minha prima Celeste Pita.

Gostaria de estar partilhando este momento com o meu genro Edson Donizetti Marques dos Santos, porém, ele infelizmente faleceu pouco antes da minha defesa. Agradecimento em especial a um colega da Empresa de Pesquisa Energéticas, João Augusto Bastos Matos, e ao Engenheiro da Cetesb Olimpio de Melo cujas colaborações foram imprescindíveis para o sucesso desse trabalho.

Não é possível nomear o agradecimento a todos, mas fica manifestada minha gratidão a todos aqueles que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

Há muito tempo eu pretendia fazer o mestrado, mas somente agora, já no final da carreira, estou realizando um sonho. Por este motivo, estou adotando este trecho da Bíblia para mostrar que Deus tem os seus propósitos.

“Tudo tem a sua ocasião própria, e há tempo para todo propósito debaixo do céu”.

Há tempo de nascer, e tempo de morrer; tempo de plantar, e tempo de arrancar o que se plantou; tempo de matar, e tempo de curar; tempo de derribar, e tempo de edificar; tempo de chorar, e tempo de rir; tempo de prantear, e tempo de dançar; tempo de espalhar pedras, e tempo de ajuntar pedras; tempo de abraçar, e tempo de abster-se de abraçar; tempo de buscar, e tempo de perder; tempo de guardar, e tempo de deitar fora; tempo de rasgar, e tempo de coser; tempo de estar calado, e tempo de falar; tempo de amar, e tempo de odiar; tempo de guerra, e tempo de paz”.

(Eclesiaste, 3 versículos 1 a 8)

RESUMO

O consumo de energia e seus impactos ambientais, como a chuva ácida, a poluição urbana e a ameaça crescente da mudança do clima global devido às crescentes concentrações dos gases estufa antropogênicos na atmosfera têm causado preocupações das nações do mundo inteiro. Este trabalho, como parte dessas preocupações, procura analisar o consumo de energia pela utilização dos combustíveis fósseis e as emissões de gases de efeito estufa por veículos leves. A metodologia recomendada pelo “Revised 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gás Inventories” foi usada para avaliar o impacto da adição de etanol à gasolina nessas emissões. Esta avaliação, para efeito de comparação, foi feita por dois métodos – o “Top Down” e “Bottom Up”. Adicionalmente são necessários os conhecimentos da frota nacional de veículos leves, calculada a partir das vendas de veículos novos, a quilometragem média anual percorrida, o consumo específico médio da frota brasileira e o consumo nacional publicado. Faz-se, também, uma comparação dos resultados com os obtidos pelo Primeiro Inventário Brasileiro de Gases de Efeito Estufa. As comparações mostram que a aplicação da metodologia às condições nacionais necessita de melhorias consideráveis e os resultados obtidos demonstram que a adição de etanol reduz substancialmente as emissões dos gases de efeito estufa.

ABSTRACT

The consumption of energy and its environmental impacts, acid rain, urban pollution and the increasing threat of global climate change such as the growing concentrations of the anthropogenic gases greenhouse in the atmosphere, have caused concerns of nations in the entire world. This work, as part of these concerns, aims to analyze the consumption of energy from the use of fossils fuels and the emissions of greenhouse gases for light duty vehicles, utilizing the methodology recommended by the "Revised 2006 IPCC Guidelines for Greenhouse Gas National Inventories", to assess the impact of the addition of ethanol to gasoline in these emissions. This assessment, for comparison effect, was made through two methods, the "Top Down" and "Bottom Up" - for this evaluation it was necessary the knowledge of the national fleet of light duty vehicles, which is calculated from sales of new vehicles, the covered annual average kilometers, the average specific consumption of the Brazilian fleet and the published national consumption. Results are compared with the First Brazilian Inventory of Greenhouse Gases. The comparison shows that the application of the methodology to the national conditions needs considerable improvements and the results obtained demonstrate that the addition of ethanol reduces substantially the emissions of the effect greenhouse gases.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA INCLUINDO MUDANÇAS NO USO DA TERRA (%)	3
FIGURA 2 – PERCENTUAL DE ETANOL NA GASOLINA NO PERÍODO 1978 – 2006.	17
FIGURA 3- VARIAÇÃO RELATIVA NA EMISSÃO DE POLUENTES EM FUNÇÃO DO TEOR DE ALCOOL ANIDRO NA GASOLINA.	23
FIGURA 4 – EVOLUÇÃO DAS VENDAS DE AUTOMÓVEIS POR COMBUSTÍVEL	45
FIGURA 5 – EVOLUÇÃO DAS VENDAS DE COMÉRCIAIS LEVES POR COMBUSTÍVEL.	45
FIGURA 6 – EVOLUÇÃO DA FROTA DE VEÍCULOS POR CATEGORIA NO BRASIL.	50
FIGURA 7 – CURVA DE VENDA DE VEÍCULOS USADOS	51
FIGURA 8 – CURVA DA FROTA NACIONAL CIRCULANTE 2006	51
FIGURA 9 – DISTÂNCIA MÉDIA ANUAL DA FROTA.	54
FIGURA 10 – CONSUMO DE COMBUSTÍVEIS.	58
FIGURA 11 – MELHOR RELAÇÃO DE PREÇO ÁLCOOL/GASOLINA NO ABASTECIMENTO DO CARRO.	59
FIGURA 12 – VARIAÇÃO DOS FATORES DE EMISSÃO DOS HC.	75
FIGURA 13 – VARIAÇÃO DOS FATORES DE EMISSÃO DO CO.	75
FIGURA 14 – VARIAÇÃO DOS FATORES DE EMISSÃO DO NOx.	75
FIGURA 15 – EMISSÕES TOTAIS DE GASES DE EFEITO ESTUFA.	79

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – AS EMISSÕES DE CO ₂ NO SETOR DE TRANSPORTE RODOVIARIO.	4
TABELA 2 - GWP _s DIRETOS PARA UM HORIZONTE DE TEMPO de 100 ANOS	9
TABELA 3 – CONCENTRAÇÕES E POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL DIRETO PARA UM HORIZONTE DE TEMPO DE 100 ANOS	11
TABELA 4 – LIMITES DE EMISSÕES EM VEÍCULOS LEVES.	14
TABELA 5 – IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA DE DIAGNOSTICO DE BORDO.	15
TABELA 6 – MODELO DA CINÉTICA QUÍMICA.	18
TABELA 7 – PRINCIPAIS CONSTITUINTES DA GASOLINA.	27
TABELA 8 – DISTRIBUIÇÃO DA VENDA DE VEÍCULOS USADOS POR FAIXA ETÁRIA.	47
TABELA 9 – EVOLUÇÃO DA FROTA À GNV NO BRASIL.	49
TABELA 10 – PARTICIPAÇÃO DOS VEÍCULOS DE 1000 CC NO MERCADO DE VEÍCULOS.	55
TABELA 11 – VALORES DE μ PARA GASOLINA E O ETANOL.	57
TABELA 12 – EMISSÕES DE CO ₂ DA GASOLINA C PARTIR DOS FATORES DE EMISSÃO.	62
TABELA 13 – CARACTERISTICAS DA GASOLINA PRODUZIDA NA PETROBRAS/REGAP	63
TABELA 14 – CÁLCULO DAS EMISSÕES A PARTIR DA COMPOSIÇÃO CENTESIMAL DA GASOLINA C.	63
TABELA 15 – EMISSÕES DE CO ₂ PROVENIENTE DO ETANOL HIDRATADO MÉTODO TOP-DOWN.	64
TABELA 16 – EMISSÕES EVITADAS DE CO ₂ A PARTIR DOS FATORES DE EMISSÃO.	65
TABELA 17 – EMISSÕES EVITADAS DE CO ₂ A PARTIR DA COMPOSIÇÃO CENTESIMAL DA GASOLINA C.	65

TABELA 18 – FATORES DE EMISSÃO DE CO ₂ PARA GASOLINA C.	66
TABELA 19 – EMISSÕES DE CO ₂ DA GASOLINA C METODO “BOTTOM UP”.	66
TABELA 20 – FATORES DE EMISSÃO DE CO ₂ PARA O ETANOL HIDRATADO	67
TABELA 21 – EMISSÕES DE CO ₂ DO ETANOL HIDRATADO MÉTODO “BOTTOM UP”.	67
TABELA 22 – EMISSÕES DE CH ₄ PROVENIENTE DA GASOLINA C NO BRASIL - METODO “BOTTOM UP”.	69
TABELA 23 – FATORES EMISSÃO PARA CH ₄ DO ETANOL HIDRATADO.	69
TABELA 24 – EMISSÕES CH ₄ PELO ETANOL HIDRATADO.	69
TABELA 25 – FATORES DE EMISSÃO DO N ₂ O PARA GASOLINA EUROPÉIA.	70
TABELA 26 – EMISSÕES N ₂ O PELA GASOLINA C.	71
TABELA 27 – FATORES EMISSÃO PARA N ₂ O DO ETANOL HIDRATADO.	71
TABELA 28 – EMISSÕES N ₂ O PELO ETANOL HIDRATADO.	72
TABELA 29 – RESUMO DAS EMISSÕES DE CO ₂ , CH ₄ e N ₂ O.	72
TABELA 30 – COMPARAÇÃO ENTRE AS EMISSÕES CALCULADAS PELO PRIMEIRO INVENTÁRIO BRASILEIRO POR FONTES MÓVEIS E AS CALCULADAS POR ESTA DISSERTAÇÃO.	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ANFAVEA - Associação Nacional de Fabricantes de Veículos Automotores

ANP - Agência Nacional de Petróleo

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental

COP - Conferência das Partes da Convenção do Clima.

COPPE – Coordenação dos Cursos de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente.

COV – Compostos Orgânicos Voláteis.

DENATRAN - Departamento Nacional de Trânsito.

EIA/DOE - Energy Information Administration Office of Integrated Analysis and Forecasting

U.S. Department of Energy

EPE - Empresa de Pesquisas Energéticas

EPA - Environmental Protection Agency

GWP – Global Warming Potential

GEIPOT - Empresa Brasileira de Planejamento e Transportes

HC – Hidrocarbonetos.

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

IEA - International Energy Agency

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change

NOx – Óxidos de nitrogênio.

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

TRU - Taxa Rodoviária Única.

UNEP - United Nations Environmental Programme

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change.

WMO - World Meteorological Organization

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2 EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA.....	6
2.1 O EFEITO DOS GASES DE COMBUSTÃO NO SISTEMA CLIMÁTICO.....	6
2.1.1 <i>CLIMA E SUAS ALTERAÇÕES.....</i>	6
2.1.2 <i>O POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL.....</i>	8
2.1.3 <i>PRINCIPAIS GASES DE EFEITO ESTUFA E AS REAÇÕES QUÍMICAS NA TROPOSFERA.....</i>	10
2.2 LEGISLAÇÕES QUE LIMITAM A EMISSÕES PELOS VEÍCULOS LEVES.....	12
2.3 DECRETOS QUE REGULAMENTAM A ADIÇÃO DE ETANOL A GASOLINA.....	16
2.4 FATORES QUE INFLUENCIAM NA EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA PELOS VEÍCULOS.....	17
2.4.1 <i>FORMAÇÃO DOS GASES DE EFEITO ESTUFA NO PROCESSO DE COMBUSTÃO.....</i>	17
2.4.2 <i>CARACTERÍSTICAS DOS VEÍCULOS FABRICADOS.....</i>	23
2.4.3 <i>TECNOLOGIA DOS COMBUSTÍVEIS.....</i>	26
2.4.4 <i>ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO CONJUNTO MOTOR E COMBUSTÍVEL.....</i>	30
3 METODOLOGIA EMPREGADA.....	32
3.1 TIPOS DE METODOLOGIA	32
3.2 METODOLOGIA PARA ESTIMAR AS EMISSÕES NO TRANSPORTE RODOVIÁRIO.....	33
3.2.1 <i>"TIERS".....</i>	33
3.2.2 <i>DETERMINAÇÃO DOS FATORES DE EMISSÃO.....</i>	34
3.2.3 <i>EMISSÕES DE CO₂.....</i>	35
3.2.4 <i>EMISSÕES DE CH₄ E N₂O.....</i>	36
4. AVALIAÇÃO DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEIS PELA FROTA DE VEÍCULOS LEVES.	39
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA FROTA BRASILEIRA DE VEÍCULOS	39
4.2 MODELO PARA AVALIAÇÃO DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL PELA FROTA DE VEÍCULOS	40
4.3 CÁLCULO DA FROTA BRASILEIRA DE VEÍCULOS LEVES.....	42
4.3.1 <i>METODOLOGIA PARA ESTIMAR A FROTA DE VEÍCULOS LEVES</i>	42
4.3.2 <i>VENDAS DE VEÍCULOS NOVOS</i>	44
4.3.3 <i>CURVA DE SUCATEAMENTO</i>	46
4.3.4 <i>CONVERSÕES NA FROTA NACIONAL CIRCULANTE.....</i>	47
4.3.5 <i>FROTA NACIONAL DE VEÍCULOS EM CIRCULAÇÃO.....</i>	49
4.4 DISTÂNCIA ANUAL PECORRIDADA	52
4.5 CONSUMO MÉDIO ANUAL	54
4.5.1 <i>CONSUMO ESPECÍFICO MÉDIO DE COMBUSTÍVEL.....</i>	54
4.5.2 <i>CONSUMO MÉDIO DE COMBUSTÍVEL</i>	56
4.6 CONSUMO TOTAL DE COMBUSTÍVEL.....	57
5 EMISSÕES DA FROTA DE VEÍCULOS LEVES.....	60
5.1 ADAPTAÇÕES DOS MÉTODOS A REALIDADE NACIONAL	60
5.2 EMISSÕES DE DIÓXIDO DE CARBONO	62
5.2.1 <i>EMISSÕES DE CO₂ PELA GASOLINA C - MÉTODO "TOP-DOWN"</i>	62
5.2.2 <i>EMISSÕES EVITADAS DE CO₂ PELA GASOLINA C - MÉTODO "TOP-DOWN"</i>	64
5.2.3 <i>EMISSÕES DE CO₂ PELA GASOLINA C - MÉTODO "BOTTOM-UP"</i>	65
5.2.4 <i>EMISSÕES DE CO₂ PELA ETANOL HIDRATADO - MÉTODO "BOTTOM-UP"</i>	67
5.3 EMISSÕES DE METANO E ÓXIDO NITROSO	68
5.3.1 <i>EMISSÕES DE CH₄ PELA GASOLINA C - MÉTODO "BOTTOM-UP"</i>	68
5.3.2 <i>EMISSÕES DE CH₄ PELA ETANOL HIDRATADO - MÉTODO "BOTTOM-UP"</i>	68
5.3.3 <i>EMISSÕES DE N₂O PELA GASOLINA C - MÉTODO "BOTTOM-UP"</i>	70
5.3.4 <i>EMISSÕES DE N₂O PELA ETANOL HIDRATADO - MÉTODO "BOTTOM-UP"</i>	71
5.4 RESUMO DAS EMISSÕES DE CO ₂ , CH ₄ E N ₂ O.....	72
5.5 COMPARAÇÃO COM OS RESULTADOS OBTIDOS PELO PRIMEIRO INVENTÁRIO BRASILEIRO POR FONTES MÓVEIS.....	76
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	78
BIBLIOGRAFIA.....	82
ANEXOS.....	90

1. INTRODUÇÃO

A produção de bens de consumo, de maquinário, o transporte de mercadorias e pessoas, o comércio e o conforto das residências do mundo moderno dependem fundamentalmente da produção em larga escala de energia, mas o seu consumo é responsável por 57% das emissões de gases de efeito estufa, tais como dióxido carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) e os precursores do ozônio (O_3) troposférico¹ - compostos orgânicos voláteis (COV) e óxidos de nitrogênio (NOx). A produção de energia é, também, responsável pela emissão de monóxido de carbono (CO), que mesmo não sendo um gás de efeito estufa contribui indiretamente para o efeito, pois influi positivamente na concentração de metano na atmosfera.

Na década de 1980 havia evidências científicas relacionando as emissões de gases de efeito estufa provenientes das atividades humanas com a mudança do clima global. Essas evidências inspiraram uma série de conferências internacionais cujas conclusões indicavam que havia urgência de um tratado mundial para enfrentar o problema.

Reconhecendo a necessidade de informações científicas confiáveis e atualizadas para os formuladores de políticas, a World Meteorological Organization (WMO) e a United Nations Environmental Programme (UNEP) estabeleceram, conjuntamente, o Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) em 1988. O Primeiro Relatório de Avaliação, em 1990, confirmou que a mudança do clima era, de fato, uma ameaça e propôs um acordo global para tratar do problema.

A Assembléia Geral das Nações Unidas, adotando a sugestão do Governo de Malta, propôs a discussão sobre o tema da mudança do clima pela primeira vez em 1990. Como resultado dessa discussão foi estabelecida a resolução 43/53 sobre a "*Proteção do clima global para as gerações presentes e futuras da humanidade*" e a criação do Comitê Intergovernamental de Negociação para conduzir as negociações no sentido de estabelecer a Convenção-Quadro sobre Mudança do Clima.

A Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, a chamada "Cúpula da Terra", no Rio de Janeiro, em 4 de junho de 1992, propôs um acordo que

¹ O ozônio troposférico está situado nas camadas mais baixas da atmosfera onde ele é prejudicial, diferentemente do ozônio estratosférico que está situado nas camadas altas e protege a Terra contra as radiações ultravioleta b.
Fonte: Peixoto R. A., et al. "The Phase-Out of CFCs and HCFCs and the Refrigeration and Air Conditioning Industry", Brazilian Journal of Mechanical Sciences, vol. XVI, n. 3, 1993.

foi assinado durante o encontro por Chefes de Estado e outras autoridades de 154 países (e a Comunidade Européia), entrando em vigor em 21 de março de 1994. Neste mesmo encontro estabeleceu-se a Convenção Quadro sobre a Mudança do Clima (UNFCCC).

O objetivo estabelecido pela Conferência conforme está escrito no artigo 2 da convenção é estabilizar as concentrações dos gases de efeito estufa em um nível que:

- Impeça uma interferência perigosa no sistema climático;
- Seja alcançado num prazo suficiente que permita aos ecossistemas adaptarem-se naturalmente à mudança do clima;
- Assegure que a produção de alimentos não seja ameaçada;
- O desenvolvimento econômico prossiga de maneira sustentável.

O objetivo do UNFCCC não garante a não ocorrência de impactos ambientais de proporções catastróficas, porque não foram estabelecidos os valores necessários e nem prazos para obtenção da estabilidade, portanto, dentro do que ficou acordado na Convenção até acontecer um equilíbrio, muitos desastres naturais poderão ter ocorrido.

A Conferência das Partes (COP) – estabelecida como órgão supremo da Convenção – reuniu-se doze vezes entre 1995 e 2006. A terceira sessão realizada em dezembro de 1997 em Quioto, Japão, tomou, entre outras medidas, a redação de um acordo, que ficou conhecido como Protocolo de Quioto, contendo compromissos para os países desenvolvidos no sentido de reduzir suas emissões, pois o histórico indica que eles foram e continuam sendo quem mais emitem os gases de efeito estufa.

Dentro do objetivo da Convenção, o Protocolo de Quioto, artigo 3, parágrafo 1, estabeleceu a meta de redução das emissões totais desses gases em pelo menos 5% abaixo dos níveis de 1990 no período de compromisso, de 2008 a 2012, para tanto foram atribuídas as quantidades (anexo B do protocolo) que os países listados no Anexo I poderiam emitir.

O Protocolo de Quioto definiu dois outros mecanismos, a partir dos quais se pode cumprir a meta estabelecida no artigo 3: a Transferência de Certificados de Aquisição de Redução de Emissões, Programa de Implementação Conjunta (artigo 3) e o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (artigo 12).

Para o acompanhamento das metas individuais colocadas no Anexo I do Protocolo de Quioto foi feita uma avaliação com dados apresentados nas “Comunicações Nacionais” dos Países do anexo I do Protocolo de Quioto do ano de 2005, enviados para o UNFCCC e consolidados no documento SBI/2006/26. Ele estima que as emissões totais estejam 4,6% abaixo do previsto no acordo, vide figura 1, portanto, bastante próxima à meta estabelecida.

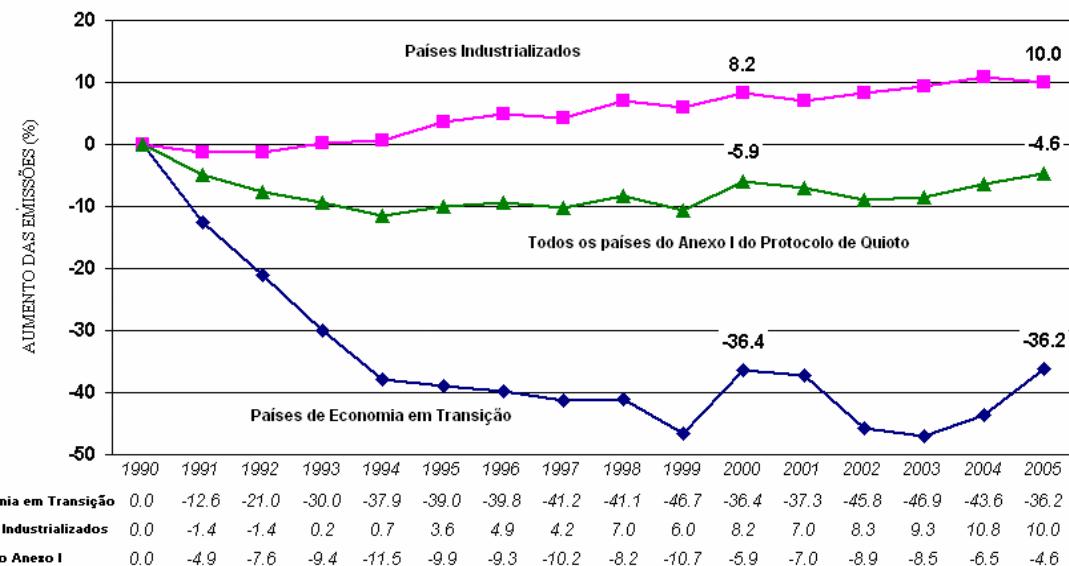


FIGURA 1 – EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA INCLUINDO MUDANÇAS NO USO DA TERRA (%)

Fonte: UNFCCC (2006)

Uma análise da situação em 2006 mostra que esse número só é possível porque os países considerados com a economia em transição (Leste da Europa e ex-União Soviética) têm suas emissões 36,2% abaixo das previstas pelo acordo de Quioto². Os países industrializados da América do Norte, Oeste da Europa, Ásia e Oceania, cujas economias de mercado estão consolidadas vão ter que reduzi-las em 10%.

Cumpre notar que a base de dados desta última comunicação constam quatro países, que não estavam na lista original do Anexo I do Protocolo de Quioto, quais sejam: Bielorrússia, Croácia, Eslovênia e Turquia. Foi feita, também, uma revisão dos cálculos das emissões de 32 países.

O uso de energia no setor de transporte é dominado pelo emprego de derivados de petróleo. A International Energy Agency - IEA (2006) - no documento Key Statistics de 2006,

² Essas duas últimas regiões devido à crise econômica na década de 90 tiveram uma queda brusca em suas emissões e atualmente possuem créditos de carbono.

estimou o uso em 57,7% do consumo de petróleo do mundo; 5,6% do consumo de gás natural; e 0,7% do carvão mineral. Conseqüentemente é um setor que gera mais poluição atmosférica do que qualquer outra atividade humana.

A Energy Information Administration / Department of Energy - EIA/DOE (2005) - em seu relatório International Energy Outlook 2005, num cenário de referência, projeta um crescimento médio anual do uso de energia primária no setor de transporte entre 2001 a 2025 de 2,1%, não levando em conta a participação dos biocombustíveis na matriz energética, e consequentemente o crescimento do uso de petróleo no setor de transporte. É esperado, portanto, que o setor nos próximos anos seja o maior problema a ser resolvido no que diz respeito às emissões de gases de efeito estufa.

Os dados do relatório da UNFCCC, FCC SBI 2006, mostra que as emissões de dióxido de carbono no setor de transporte rodoviário representam aproximadamente 83% das emissões da área de transporte e 20% das emissões totais dos países que fazem parte do anexo I do Protocolo de Quioto, tabela 1.

TABELA 1 – AS EMISSÕES DE CO₂ NO SETOR DE TRANSPORTE RODOVIARIO.

	T. Rodov. Tg/ano	Transp. Tg/ano	Emis. Totais* Tg/ano	TR/T (%)	TR/ET (%)
Ásia / Oceania	328,57	342,65	1674,53	95,89	19,62
América do Norte	1535,81	1945,15	6383,35	78,96	24,06
Europa (economia de mercado)	843,87	921,75	3505,84	91,55	24,07
Europa (economia de transição)	56,8	62,37	764,65	91,07	7,43
Ex-União Soviética	6,97	62,37	1918,48	11,18	0,36
Total Anexo I	2772,02	3334,29	14246,85	83,14	19,46

Fonte: UNFCCC (2006)

Nota: As emissões totais não incluem as remoções

Os combustíveis objetos de estudo neste trabalho são: a gasolina pura e a mistura gasolina + etanol anidro e etanol hidratado. Enquanto o etanol anidro é uma substância praticamente pura, a gasolina é uma mistura complexa de hidrocarbonetos, cuja composição pode ser expressa da seguinte maneira: hidrocarbonetos alifáticos ramificados (Isoparafinas), não ramificados (n-Parafinas) e cílicos (Naftênicos e Aromáticos), podendo ser classificados em saturados (ligações simples) e insaturados (contendo ligações duplas e triplas), com moléculas contendo entre 4 a 12 átomos de carbono e em menor proporção outras substâncias orgânicas. Essas substâncias contêm átomos de enxofre, nitrogênio, metais e oxigênio.

A partir da metodologia desenvolvida pelo IPCC e adaptada para as condições nacionais pelo Ministério de Ciência e Tecnologia no Primeiro Inventário Brasileiro dos Gases de Efeito Estufa, pode-se quantificar e comparar as emissões de gases do efeito estufa em veículos automotores, ciclo Otto, quando utiliza a gasolina e a mistura gasolina/álcool.

Para o cálculo das emissões dos gases de efeito estufa da gasolina pura e a mistura álcool/gasolina faz-se necessário utilizar os fatores de emissão dos respectivos combustíveis publicados no primeiro caso pelo IPCC e no segundo pelo Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (Proconve)³.

Esta avaliação pode vir a ser uma ferramenta para que os planejadores possam decidir pelo uso da mistura gasolina/álcool na matriz energética visando reduzir o aquecimento do planeta e os índices de poluição dos grandes centros urbanos.

Tendo em vista a situação relatada, um dos objetivos deste trabalho é fazer uma avaliação das emissões de gases de efeito estufa, dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O) e metano (CH_4) quando se adiciona etanol no combustível, que é a situação existente no Brasil e com possibilidades de expandir para outros países, e comparar com as emissões da gasolina pura expressando os resultados em termos da unidade gigagramas de dióxido de carbono equivalente pela utilização dos potenciais de aquecimento global.

Além do estudo acima citado, avaliam-se aqui as metodologias utilizadas no Brasil e a qualidade dos dados estatísticos disponíveis para a realização do inventário das emissões no setor de transportes, quando aplicada à mistura gasolina/álcool.

³ O Proconve é um programa instituído pela Resolução 018/1986 do Conselho Nacional do Meio Ambiente cujos objetivos entre outros são de reduzir os níveis de emissões, criar programas de inspeção e manutenção de veículos automotores, promover a melhoria das características técnicas dos combustíveis líquidos .

2 EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA.

2.1 O EFEITO DOS GASES DE COMBUSTÃO NO SISTEMA CLIMÁTICO.

2.1.1 CLIMA E SUAS ALTERAÇÕES.

Leggett (1992) define o clima como: “*O Clima é o produto de interações da atmosfera, oceanos, calotas glaciais, seres vivos e até mesmo rochas e sedimentos*”.

O clima em um sentido estrito é definido pelo IPCC (1998) como a descrição estatística das variáveis que definem o estado da atmosfera, tais como, temperatura, pressão, vento (direção e intensidade), precipitação e umidade, durante um intervalo de tempo que pode variar de meses a milhares ou milhões de anos. O clima de uma área, portanto, não tem relação com as variações locais de temperatura.

A Environmental Protection Agency (EPA apud Legett, 1992), órgão de proteção ambiental dos EUA, define a mudança climática como: “flutuações de longo prazo na temperatura, precipitação, vento e outros elementos do sistema climático da Terra”.

Quando se aborda o tema clima, realmente está se referindo a um período longo, as suas alterações levam, às vezes, milhares de anos para ocorrerem. Ou seja, um, dois ou três verões muito quentes não indicam que o clima mudou, mas tão somente a ocorrência de anomalias que fogem do alcance estatístico.

Pequenas alterações no clima podem ter grandes efeitos. Um exemplo é a era glacial, cuja temperatura média global da Terra era apenas 5°C mais baixa do que as médias atuais, portanto, um aumento de um ou mais graus Celsius em um período de cem a duzentos anos seria considerado aquecimento global.

Existem fatores naturais, conhecidos como “radiative forcing” que alteram o equilíbrio do sistema climático. O termo foi empregado nas avaliações de IPCC (2001) com um significado técnico específico para denotar uma perturbação imposta externamente no balanço de energia radiativa (medido em Wm^{-2}), modificando-o. Nesse caso, pode haver mudanças nos parâmetros do clima.

Entre estes fatores estão as posições dos continentes na superfície da Terra, das configurações das bacias oceânicas, da topografia dos continentes, as variações na irradiação solar e nos parâmetros orbitais da Terra⁴ que alteram o “radiative forcing” em longo prazo, mudanças num prazo de tempo mais curto podem ocorrer devido a modificações na composição da atmosfera por causa de fatores naturais, por exemplo, as atividades vulcânicas.

As alterações no clima do planeta no passado estão ligadas a esses fatores e ao fluxo de energia, cuja intensidade depende em primeira instância dos movimentos de rotação e translação em torno do Sol. Por conta desses fenômenos pode-se estimar a alternância dos períodos glaciais em cerca de dez mil anos. Porém, do ponto de vista dos efeitos imediatos sobre os sistemas climáticos, o fator que mais influí é a composição química da atmosfera.

A presença de vários gases na atmosfera afeta a absorção de radiação, tanto no sentido de aquecer como de resfriar a Terra. As atividades vulcânicas, por exemplo, às vezes lançam quantidades de dióxido de enxofre que na atmosfera formam aerossóis que causam resfriamento. Os gases de efeito estufa emitidos por fenômenos naturais, porém, absorvem a radiação e aquecem naturalmente a atmosfera.

Essas mudanças na concentração dos gases-estufa na atmosfera podem inclusive alterar a transferência de energia entre os diversos componentes que compõe o sistema climático e vizinhanças, quais sejam: o espaço, a atmosfera, a criossfera, a litosfera, os oceanos e a biosfera.

A existência desse último efeito é benéfica à vida na Terra, pois eles atuam como estabilizadores contra mudanças da temperatura média global, mantendo-a constante em 15°C. Se não fosse o efeito estufa esse valor seria entre 15 a 20°C abaixo de zero (IPCC 2001, “Summary for Policymakers”) o que inviabilizaria a vida no planeta, tal como conhecemos.

Antes da Revolução Industrial o sistema encontrava-se em equilíbrio, ou seja, a radiação solar absorvida encontrava-se em perfeito equilíbrio com a emitida para o espaço, as modificações dependiam unicamente da rotação da Terra em torno do Sol.

Após a Revolução Industrial, as atividades humanas, tais como queima de combustíveis fósseis, desmatamento, agricultura, agropecuária intensiva e emissões de

⁴ Por exemplo, excentricidade, processão e inclinação.

clorofluorcarbonos (CFCs) alteraram a concentração dos gases de efeito estufa e consequentemente aumentaram a absorção da energia solar pela atmosfera da Terra. As consequências foram um aumento da temperatura média global maior do que aquelas que ocorrem de modo natural.

O IPCC (2007), em seu quarto relatório registra que 11 das 12 maiores temperaturas globais de superfície terrestre a partir de 1850 ocorreram no período de 1995 e 2006. O incremento médio de 0,74°C (faixa de 0,56°C - 0,92°C) é maior do que a média entre 1901 e 2000, que foi de 0,6°C (0,4°C – 0,8°C). A tendência do aquecimento linear nos últimos 50 anos é de 0,13°C (0,10°C – 0,16°C) por década. São quase duas vezes maiores do que aquela registrada nos últimos 100 anos. Com base nestas observações, os cientistas do IPCC descartam a possibilidade do aquecimento ser devido à variabilidade do clima.

2.1.2 O POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL.

As concentrações atmosféricas de um gás-estufa, em uma primeira aproximação, são proporcionais ao acúmulo das emissões num horizonte de tempo. É necessário levar em consideração que quanto mais antiga a emissão, menor é o seu efeito na concentração, por causa um decréscimo exponencial natural dos gases de efeito estufa na atmosfera, com um tempo de vida diferente para cada gás. A quantificação desse efeito é dada pelo Potencial Global de Aquecimento (GWP).

A definição de Potencial de Aquecimento Global (GWP) do IPCC é uma medida que tenta retratar os efeitos radiativos relativos de uma emissão de um gás de efeito estufa ao longo de um horizonte de tempo em uma atmosfera constante de fundo. O IPCC define o índice como:

‘O GWP é a capacidade de uma unidade de massa de gás de efeito estufa de aquecer a atmosfera, em relação à mesma unidade de massa de dióxido de carbono, cujo valor atribuído é 1 (um), levando-se em conta as diferentes durações, ou seja, períodos de permanência dos gases na atmosfera.

O GWP, vide tabela, de uma emissão é medido, por recomendação do IPCC, em teragrama (um trilhão) de gramas de dióxido de carbono equivalentes (Tg CO₂ eq.), porém

outras unidades têm sido utilizadas nas comunicações nacionais, como o gigagrama CO₂ equivalente e a tonelada CO₂ equivalente. Observa-se que os participantes do UNFCCC concordaram em usar os GWPs baseado de um modo geral em um horizonte de tempo de 100 anos, embora outros horizontes de tempo possam ser usados pelos participantes.

TABELA 2 - GWPs DIRETOS PARA UM HORIZONTE DE TEMPO de 100 ANOS

Gás	Potencial de Aquecimento Global (GWP)	Tempo de residência (anos)
Dióxido de carbono	1	- (1)
Metano	23	12 (2)
Óxido de nitrogênio	310	114
HFC-23	260	12.000
HFC-134a	13,8	1.300
HFC-134	9,6	1.100
HFC-161	0,3	12

Fonte: IPCC (2000).

(1) Não se pode definir um tempo de vida único para o CO₂ por causa das diferentes taxas de absorção por diferentes processos de sumidouros.

(2) Isso foi definido como um tempo de ajuste que leva em consideração o efeito indireto do metano sobre seu próprio tempo de vida.

Atualizações são feitas ou novos GWPs são calculados para vários compostos essenciais. A base dessas atualizações são: estimativas melhoradas ou novas dos tempos de vida na atmosfera, fatores do “radiative forcing” molecular e melhor representação do ciclo do carbono. A revisão dos tempos de vida dos gases destruídos por reações químicas na baixa atmosfera (particularmente o metano, os HCFCs e os HFCs) resultou em GWPs ligeiramente mais baixos (entre 10 e 15%, em geral) do que os citados pelo Intergovernmental Panel on Climate Change (1994).

Não é possível quantificar o potencial global de impacto dos gases como: vapor de água, ozônio troposférico, e nem os efeitos indiretos de vários outros gases tais como os precursores do ozônio (NO_x, CO e CVO) e aerossóis troposféricos (produtos do SO₂). Por este motivo, não são atribuídos valores de GWP para estes gases que são de permanência curta e não-homogêneos espacialmente na atmosfera.

O aquecimento global futuro provocado por um gás de efeito estufa em um determinado horizonte de tempo pode ser estimado multiplicando-se o GWP adequado pela quantidade de gás emitida. O conhecimento deste valor permite aos planejadores de políticas compararem os impactos das emissões e as reduções de diferentes gases. Os GWPs poderiam ser utilizados, por exemplo, para comparar os efeitos das reduções das emissões de CO₂ em relação às reduções das emissões de metano para um determinado horizonte de tempo.

2.1.3 PRINCIPAIS GASES DE EFEITO ESTUFA E AS REAÇÕES QUÍMICAS NA TROPOSFERA.

O Protocolo de Quioto, estabelecido em 1997, baseado nos relatórios do IPCC, definiu em seu anexo D os principais gases que contribuem diretamente para o efeito estufa, os quais fazem parte deste trabalho: CO₂, CH₄ e N₂O. Além desses gases, existem aqueles que contribuem indiretamente, tais como CO e O₃, por outro lado, o radical hidroxila (*•OH*), tem um papel importante na remoção, por oxidação, de compostos químicos da atmosfera que diretamente ou indiretamente contribuem para o efeito.

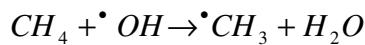
O CO₂ é o gás de efeito estufa direto mais importante, respondendo por cerca de 60% do “radiative forcing” total dos gases de efeito estufa. O seu Potencial de Aquecimento Global (GWP) é 1 e o seu tempo de residência na atmosfera varia entre 50 e 200 anos. A sua concentração na atmosfera está em torno de 379 ppm e vem aumentando rapidamente, com uma taxa média de 1,9 ppm ao ano entre 1995 e 2005, vide tabela 3.

O CO₂ é produzido pela queima de combustíveis fósseis, pela mudança no uso da terra e processos industriais, tais como: calcinação, fermentação etc. Os principais sumidouros são: a fotossíntese das plantas e algas, a absorção pelas águas do oceano, lagos e os sedimentos resultantes de diversos processos, por exemplo, o aterrramento de plantas e microorganismos.

O CH₄ é o segundo gás de efeito estufa em importância respondendo por cerca de 20% do “radiative forcing”. O GWP é 23 vezes maior do que o do dióxido de carbono, sua concentração e tempo de residência na atmosfera são bem menores, cerca de 10 anos. A sua concentração na atmosfera em 2005 está em torno de 1.744 ppb e vem aumentando rapidamente, em média de 1% ao ano (vide tabela 3).

O CH₄ é emitido devido à decomposição da matéria orgânica em fontes naturais (30%), tais como os pântanos e as áreas alagadas, e por fontes antrópicas (70%). Entre as essas fontes pode-se citar a decomposição da matéria orgânica em plantações de arroz, nos reservatórios das hidroelétricas, dejetos de animais, em aterros sanitários e lixões, vazamentos nos sistemas de produção de gás natural, petróleo e carvão mineral e a queima de biomassa e combustíveis fósseis.

Os sumidouros do metano na natureza são as interações com o solo, emissões da estratosfera para o espaço exterior, sendo que o mais importante é a reação com radicais hidroxilos segundo a equação:



O óxido nitroso tem um potencial de aquecimento 310 vezes maior do que o dióxido de carbono e seu tempo de residência é em torno de 120 anos, o volume de suas emissões são bem menores e sua concentração na atmosfera tem cerca de 319 ppb, vide tabela 3. Ele é emitido principalmente nos processos de fertilização por adubos nitrogenados, pela queima de biomassa, combustíveis fósseis e na produção dos ácidos nítrico e adipico.

Segundo Kaiser e Suntharalingam (2008), o sumidouro mais importante do óxido nitroso, existente na atmosfera é a destruição na estratosfera pela radiação (90%) e a subsequente reação com os átomos de oxigênio e ozônio excitados.

No solo, a destruição do óxido nitroso é feita pelas bactérias que o convertem em nitrogênio gasoso, porém não é um sumidouro importante.

TABELA 3 – CONCENTRAÇÕES E POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL DIRETO PARA UM HORIZONTE DE TEMPO DE 100 ANOS

Gás	(GWP)	Conc. Pré-industrial	Concentração na Atmosfera
CO ₂	1	280 ppm	379 ppm
CH ₄	23	715 ppb	1774 ppb
N ₂ O	310	270 ppb	319 ppb

FONTE: IPCC (2007).

2.2 LEGISLAÇÕES QUE LIMITAM A EMISSÕES PELOS VEÍCULOS LEVES.

Antes da crise do petróleo os veículos eram mais poluidores, devido a um conjunto de características, por exemplo, a eficiência de queima do motor. Na época não existia uma preocupação com ela dado o preço muito baixo dos combustíveis ao lado da inexistência de uma legislação que regulamentasse as emissões.

Após a crise, os fabricantes de veículos desenvolveram novas tecnologias que permitiram uma maior eficiência em termos do combustível consumido por quilometragem percorrida. Visando uma economia de energia, elas foram implantadas no Brasil a partir do ano de 1978, paralelamente com a implantação do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores - Proconve pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente – Conama.

Esse programa, como primeira medida, estabeleceu um cronograma de redução gradual da emissão de poluentes, baseado na experiência dos países desenvolvidos. Foram inicialmente previstas três fases para sua implantação. A primeira fase entrou em vigor em 1988, a segunda, em 1992 e a terceira, em 1997.

A Resolução CONAMA nº. 18, de 1986, que entrou em vigor em junho de 1988, iniciou a primeira fase (L-1) que se encerrou em 1991. A prioridade desta fase foi para o segmento de veículos leves devido ao seu grande número e utilização intensiva. A ênfase foi conferida à eliminação dos modelos mais poluentes. Para tanto, foram estabelecidos limites de emissão no escapamento.

O programa adotou providências diversas para a implantação das tecnologias industriais já existentes, adaptadas às condições e às necessidades brasileiras. Para o seu cumprimento foi necessário estabelecer prazos para: desenvolver os veículos, por exemplo, com o aperfeiçoamento dos motores; adaptar a indústria de autopeças; e melhorar as especificações dos combustíveis.

O Proconve impõe ainda a certificação de protótipos e linhas de produção, a proibição da comercialização dos modelos de veículos não homologados segundo seus critérios e o seu recolhimento e reparo, inclusive de motores encontrados em desacordo com o projeto e a autorização especial do órgão ambiental federal para uso de combustíveis alternativos.

A Resolução do Conama, portanto, obrigou os veículos leves do ciclo Otto da década de 90 a reduzirem os níveis de emissão de CO, NOx, compostos orgânicos voláteis (COVs).

A segunda fase (L-2), iniciado em 1992 e concluída em 1996, foi regulamentada na Resolução Conama Nº 007, de 31 de agosto de 1993. Ela impõe no seu artigo primeiro os limites máximos de CO, HC, diluição, velocidade angular para os motores do ciclo Otto e opacidade de fumaça preta para os motores do ciclo Diesel e ruído para ambos.

A Resolução acima citada estabelecia um cronograma para redução das emissões até o ano de 1997 e previa, também, os Programas de Inspeção e Manutenção de Veículos em Uso, a serem implantados pelas administrações estaduais e municipais.

O Governo Federal, a partir de 1992, deu incentivos fiscais para construção de motores de 1000 cilindradas, medida que aumentou a autonomia média da frota brasileira. Esse fato, aliado à adoção dos catalisadores, da injeção eletrônica e multiponto, cujas tecnologias atualmente equipam todos os veículos novos, reduziu o consumo de combustível e consequentemente emissões de gases.

O preço final mais atraente e o consumo mais baixo de combustível e custos operacionais menores foram o motivo do sucesso das vendas desses novos veículos que a partir de 1995, que atualmente respondem aproximadamente, por 58% da frota brasileira.

Nesse período, o governo federal aprovou a Lei Nº 8.723, de 28 de outubro de 1993, prevê no seu artigo 1º:

Como parte integrante da Política de Meio Ambiente os fabricantes de motores e veículos automotores e os fabricantes de combustíveis ficam obrigados a tomar as providências necessárias para reduzir os níveis de monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, hidrocarbonetos, álcoois, aldeídos, fuligem, material particulado e outros compostos poluentes nos veículos comercializados no País, enquadrando-se aos limites fixados nesta Lei e respeitando, ainda, os prazos nela estabelecidos.

No artigo 2º § 7º, estabelece os limites de emissão de gases de escapamento para os veículos leves do ciclo Otto, fabricado a partir de 1º de janeiro de 1992, conforme tabela 3, a vigorar a partir de 31 de dezembro de 1996.

Os veículos leves (utilitários, camionetas de uso misto ou veículos de carga) fabricados a partir de 1º de janeiro de 1997 terão os seguintes limites para as emissões de gases de escapamento, tabela 4.

TABELA 4 – LIMITES DE EMISSÕES EM VEÍCULOS LEVES.

Veículos leves	CO		HC	NOx	CHO
	Normal (g/Km)	Lenta (%)	g/Km	g/Km	g/Km
1º de Janeiro de 1992	24,0	3,0	2,1	2,0	0,15
1º de janeiro de 1997	2,0	0,5	0,3	0,6	0,03

Fonte: Presidência da República - Subchefia para Assuntos Jurídicos.

O cumprimento dos limites estabelecidos pela Lei N° 8.723 exige a aplicação de tecnologia e sistemas que aperfeiçoem o funcionamento dos motores para proporcionar uma queima perfeita de combustível e consequente diminuição das emissões. Na fase implantada em 1992, a utilização de catalisadores se fez necessária. Para a fase que iniciou em 1997, além do catalisador, foi preciso também que se acrescentassem novos dispositivos, tais como: a injeção eletrônica e o motor multivalvular.

Foram necessários o desenvolvimento e a introdução de novas tecnologias, em especial a injeção eletrônica de combustível e os conversores catalíticos. Nesta fase, foi intensificado o desafio tecnológico, principalmente para permitir a adequação de catalisadores e sistemas de injeção eletrônica para uso com mistura de etanol, em proporção única no mundo.

Prosseguindo com a implantação do cronograma, em 1997 foi iniciada a terceira fase (L-3) com a Resolução Conama N°. 226, de agosto de 1997 que foi encerrada em outubro de 2002. Esta confirma os limites de CO, NOx e hidrocarbonetos previsto para esta fase, e adicionalmente estabelece os limites máximos para emissão de fuligem à plena carga, conforme tabela constante no anexo A da Resolução.

Nesta fase, a indústria, para atender às exigências da legislação passou a utilizar os sistemas de injeção multiponto, agora já digitais e com sonda de oxigênio, os conversores catalíticos de três vias, com a combustão dos motores sendo constante e continuamente controlada para a queima estequiométrica.

A Resolução do Conama Nº. 282, de 12 de julho de 2001, estabeleceu os requisitos para a reposição dos conversores catalíticos, para assegurar que os conversores tenham a mesma qualidade e durabilidade. O correto funcionamento do catalisador está diretamente relacionado com sua utilização e manutenção⁵. Regulagens adequadas do motor e condições de rodagem influem diretamente na vida útil do equipamento, que é em média de 80.000 quilômetros.

A Resolução Nº 315 de 29 de outubro de 2002, instituiu as novas etapas do programa de controle das emissões por veículos automotores. A quarta fase (L-4) teve início com essa resolução, ao estabelecer novos limites para emissões de gases poluentes.

A indústria automobilística desenvolveu novas tecnologias, possibilitando o aumento da pressão da bomba injetora e o aperfeiçoamento da geometria da câmara de combustão e dos bicos. Para o futuro, ainda está prevista a introdução de catalisadores de oxidação, de filtro de particulados e de recirculação de gases.

A Resolução Nº 354, de 13 de dezembro de 2004, prevê em seu artigo primeiro que os veículos leves de passageiros e comerciais, nacionais e importados, equipados com motores do ciclo Otto, utilizarão um sistema de diagnóstico de bordo a partir de 2007, devendo o sistema estar totalmente implantado no de 2011, tabela 5.

TABELA 5 – IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA DE DIAGNOSTICO DE BORDO.

Sistemas	OBDBr-1			OBDBr-2	
	2007	2008	2009	2010	2011
Nacionais					
Passageiros	40	70	100	60	100
Comerciais	40	70	100	60	100
Internacionais					
Passageiros	40	70	100	60	100
Comerciais	40	70	100	60	100

Fonte: Conama (2004)

⁵ Pesquisas realizadas no Estado de São Paulo, pela Cetesb entre outubro de 2006 e janeiro de 2007, com 426 veículos leves originalmente equipados com catalisadores publicadas no Portal Fator Brasil, revelam que, dos 7 milhões de veículos equipados, cerca de 2,6 milhões (37%) não controlam suas emissões e desses, 1,7 milhão retiraram os catalisadores ou instalaram equipamentos falsos quando da troca do escapamento do veículo.

A quinta fase (L-5) está prevista para 2009 e visa principalmente à redução de emissões de material particulado nos motores diesel, óxidos de nitrogênio, aldeídos e hidrocarbonetos não metano. Para obedecer a esses padrões, novos investimentos terão que ser feitos para obter combustíveis com melhores formulações, além disso, será necessária a eliminação de contaminantes e tratamento dos derivados na refinaria.

Cumpre observar que a legislação até agora desenvolvida tem por objetivo em primeiro lugar eliminar os gases poluentes, não existindo ainda uma legislação que limite as emissões dos gases de efeito estufa.

2.3 DECRETOS QUE REGULAMENTAM A ADIÇÃO DE ETANOL A GASOLINA.

O Programa Nacional do Álcool (Proálcool) foi criado pelo governo Ernesto Geisel, em 14 de novembro de 1975, pelo decreto nº 76.593, com o objetivo de estimular a produção do etanol. A meta era substituir a gasolina pura e, por extensão, reduzir as importações de petróleo, que, na época, representavam um grande peso na balança comercial externa. Nesse período, o preço do açúcar no mercado internacional vinha decaindo rapidamente, o que tornou conveniente a mudança de produção de açúcar para álcool.

O decreto prevê no seu artigo 2º que:

A produção do álcool oriundo da cana-de-açúcar, da mandioca ou de qualquer outro insumo será incentivada através da expansão da oferta de matérias-primas, com especial ênfase no aumento da produtividade agrícola, da modernização e ampliação das destilarias existentes e da instalação de novas unidades produtoras, anexas a usinas ou autônomas, e de unidades armazenadoras.

O decreto foi substituído sucessivamente pelos de nº. 80.762, de 18/11/1977 e nº. 83.700, de 5/7/1979, este último criava e definia a competência do Conselho Nacional do Álcool, entre elas estavam:

Definir os critérios gerais, que deverão ser observados pela Comissão Executiva Nacional do Álcool, para enquadramento dos projetos de modernização, ampliação e implantação de destilarias, observados, especialmente, os seguintes aspectos: a) módulos econômicos de produção; b) níveis, global e unitário, de investimentos; c) disponibilidade e adequação de fatores de produção para as atividades agrícola e industrial; d) centros de consumo; e) custos de transporte e de tancagem; f) infra-estrutura viária, de armazenagem e de distribuição; g) redução das disparidades regionais de renda.

O esforço inicial era de aumentar a produção de 600 milhões de litros, em 1975, para 3,4 bilhões de litros, em 1980 (Biodiesel BR 2007), pelo aumento da proporção da mistura, de 5% para 20% em volume de álcool anidro na gasolina. No período compreendido entre 1975 e 2008 o percentual variou muito em função da produção, dos preços do açúcar, petróleo e etanol, vide figura 2.

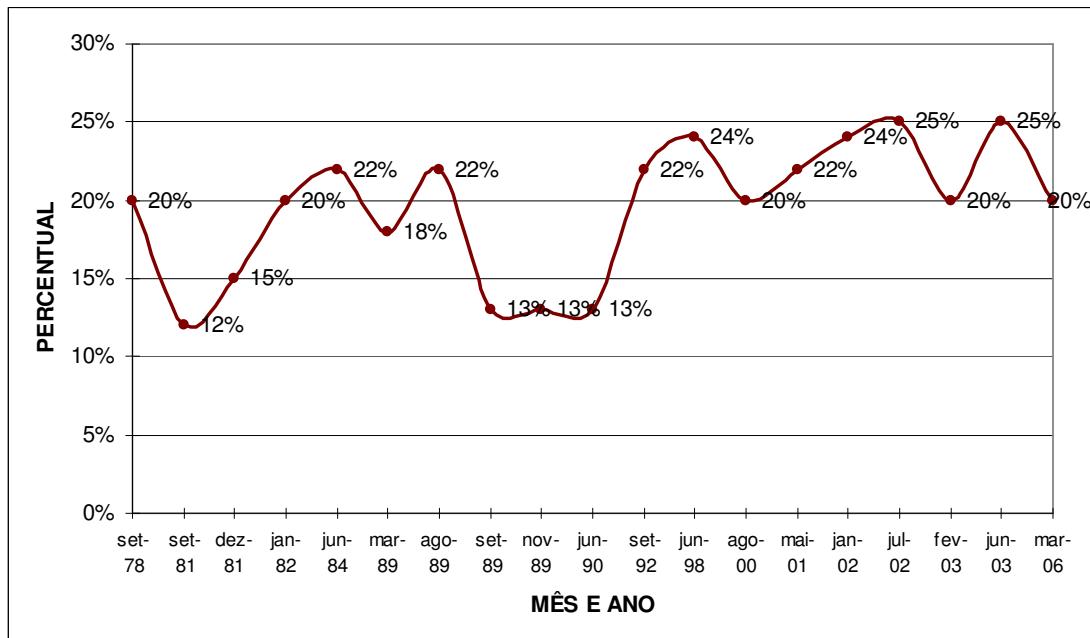


FIGURA 2 – PERCENTUAL DE ETANOL NA GASOLINA NO PERÍODO 1978 – 2006.

Deve ser ressaltado que antes do Programa Proálcool o aumento da octanagem⁶ da gasolina se fazia pela adição de substância extremamente tóxica, o chumbo tetraetila. O uso do etanol eliminou a necessidade dessa substância e as suas perigosas emissões para atmosfera.

2.4 FATORES QUE INFLUENCIAM NA EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA PELOS VEÍCULOS.

2.4.1 FORMAÇÃO DOS GASES DE EFEITO ESTUFA NO PROCESSO DE COMBUSTÃO.

O motor de combustão interna ciclo Otto, quatro tempos, por aproximação pode simular um ciclo termodinâmico composto de aspiração, compressão (combustão), expansão e exaustão.

⁶ A octanagem define o poder anti-detonante da gasolina. Essa característica é necessária para evitar que durante o curso de compressão do pistão do motor não haja ignição antes do centelhamento, conhecida como batida de pino.

Segundo Heywood (1988), as reações químicas nesses motores se caracterizam por uma detonação muito rápida e se distinguem daquelas que ocorrem em outros equipamentos pelas seguintes características: alta pressão, devido à fase de compressão; uma zona de reação extremamente fina (0,1 milímetro); a inexistência de equilíbrio químico por causa de um tempo de residência muito curto; uma queda de temperatura após as válvulas de saída de gases, devido a expansão no escapamento e posteriormente para o ambiente.

A inexistência de equilíbrio químico determina que as concentrações dos poluentes na exaustão do motor sejam diferentes daqueles valores calculados se presumido o equilíbrio. Os processos preliminares da combustão são explicados pelos mecanismos químicos detalhados e suas cinéticas, e são importantes para mostrar como estes poluentes se formam e determinar os níveis de emissão. Para algumas espécies de poluentes, por exemplo, monóxido de carbono (CO), compostos voláteis orgânicos (CVO), as reações de formação e destruição são acopladas intimamente e a compreensão da formação destes requer o conhecimento da química da combustão.

Os mecanismos de reação de combustão de vários hidrocarbonetos entre eles o heptano e o iso-octano (componentes importantes da gasolina) foram estudados Curran et al (1997-98), e o etanol puro por Marinov (1998), ambos no Lawrence Livermore National Laboratory na Califórnia e Westbrook et al (1999) estudou no modelo da cinética química o número de espécies químicas envolvidas nas reações de combustão, tabela 6.

TABELA 6 – MODELO DA CINÉTICA QUÍMICA.

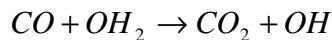
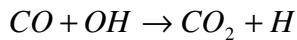
Combustível	H ₂	CH ₄	C ₃ H ₈	C ₆ H ₁₄	C ₁₆ H ₃₄
Nº. de espécies	7	30	100	450	1200
Nº. de reações	25	200	400	1500	7000

Fonte: Westbrook et al (1999)

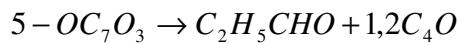
As análises dos gases de combustão realizadas mostram que muitos dos compostos orgânicos encontrados na exaustão não estão originalmente no combustível, indicando que modificações significativas ocorrem durante o processo. As observações realizadas nesses estudos concluíram que as reações de decomposição (pirólise) são predominantes em altas temperaturas, acima de 900K; e nas reações em baixas temperaturas, abaixo de 900K, predominam as reações de adição do oxigênio (anexo 4).

A quantidade relativa dos produtos resultantes para a atmosfera depende da composição química do combustível, do projeto do motor, das circunstâncias de operação, das espécies intermediárias que se formaram durante o processo e da existência de catalisador no escapamento.

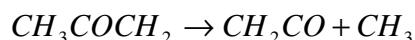
O dióxido de carbono é produzido a 1250 K tem como origem o monóxido de carbono pela reação com os radicais OH (67 %) e HO₂ (26 %):



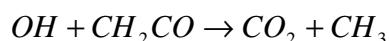
A gênese da formação do CO₂ a 600 e 700 K começa com a decomposição radicais de radicais carbonil (5-OC₇O₃, 6-OC₇O₄, 4-OC₇O₂) formando radicais cetil :



A decomposição e oxidação de pequenas quantidades de radicais cetil, tais como: o isômero etil metil cetona, radical (1,2 C₄O); isômero do acetona radical (CH₃COCH₂); e o isômero do metil propil cetona radical (1-2 C₅O): a 600 K, forma cetonas.



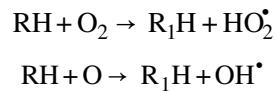
A maior parte da decomposição do radical 1-2 C₄O ocorre a 600 K enquanto que o radical CH₃COCH₂ ocorre a 700 K. A formação do dióxido de carbono ocorre somente através da reação entre cetonas e radicais OH:



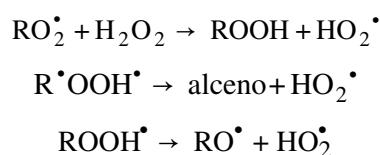
Heywood (1988) estimou as emissões dos gases não-CO₂ para a gasolina sem catalisador em torno dos seguintes valores: NO_x, 500 a 1000 ppm; CO, 1 a 2% e hidrocarbonetos não queimados (expressos como metano) em 3000 ppm. A partir desses valores pode-se estimar o CO₂ entre 96 e 98% do total dos gases que saem pelo escapamento. Esses valores são atualmente bem menores devido ao aumento da eficiência dos motores.

O estudo de Koshland et al., (1998) da mistura gasolina e etanol 10% em volume (3,7% de oxigênio em peso) determinou reduções significativas de CO (13%), COVs (6%) e benzeno (11%). Aumento de NOx (5%), acetaldeido (159%), bem como das emissões evaporativas.

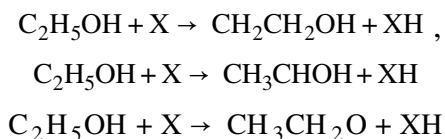
As pesquisas realizadas revelam que, em altas temperaturas, ocorrem decomposição, extração dos átomos de hidrogênio, oxidação, isomerização e adição a dupla ligação. Havendo predominância inicialmente das reações de decomposição e extração do hidrogênio, que segundo Curran at al responde por 50% do consumo do combustível, conforme exemplo abaixo:



Nas temperaturas abaixo de 900°C ocorrem as seguintes reações chaves: extração do átomo H de alcanos, éter cíclico, do aldeído ou cetona, adição de radicais ao oxigênio, cisão hemolítica C-C e O-O e decomposição de diversos radicais, reação do radical peróxido de alquila com HO₂ e H₂O₂, isomerização do radical peróxido e hidroperóxido alquila, cisão β do radical hidroperóxido alquila, oxidação do radical hidroperóxido alquila e formação do eter cíclico do radical hidroperóxido alquila e do radical hidroperóxido. Muitas reações têm como produto OH[•] e HO₂[•].



Marinov (1998) citando os estudos de modelagem de Borisov et al e Norton e Dryer, mostra que a pirolise do etanol forma três isômeros e radicais importantes.



Onde X são os radicais OH[•], OH₂[•], CH₃[•] ou os átomos O e H. A presença de etanol na gasolina aumenta a concentração de compostos oxigenados e de radicais no início da combustão.

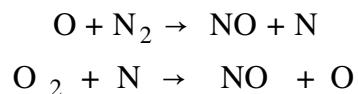
O nitrogênio que forma o óxido nítrico na combustão, que será rota para a formação do óxido nitroso, origina de duas fontes: nitrogênio atmosférico (N_2) do ar de combustão e nitrogênio orgânico no combustível. O N_2 do ar é a fonte a mais importante nos motores de combustão interna, Heywood (1988) estimou que se o combustível contiver uma quantidade significativa de nitrogênio orgânico - acima de 1% em peso (um exemplo é a biomassa), a emissão final de NO pode aumentar entre 10 e 30%. Nos destilados leves petróleo (gasolina, por exemplo), essa percentagem é baixa, em torno de 0,07 – neste caso o nitrogênio orgânico pouco influiu na concentração de NO nos gases de combustão.

Os processos de formação dos óxidos de nitrogênio têm um mecanismo à parte. Deve-se observar, entretanto, que as reações de combustão que produzem estas espécies ocorrem devido ao aumento de temperatura. As interações com os compostos resultantes da combustão explicam os seus processos de destruição. Dessa maneira, os dois processos estão ligados.

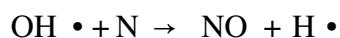
Segundo Kilpinen existem quatro mecanismos propostos para explicar a formação do NO: o de Zeldovich, ou NO térmico, Fenimore, ou “prompt” do NO, a partir da formação do N_2O e pela decomposição dos compostos orgânicos de nitrogênio.

Nos motores combustão interna, utilizando gasolina, as temperaturas típicas situam-se em torno de 2000K. O mecanismo de Zeldovich explica a formação de aproximadamente 95% NO. A contribuição devido ao prompt NO é estimada em menos de 5% e os demais são muito pequenos.

A quebra da tripla ligação do nitrogênio proveniente do ar requer uma energia de ativação extremamente alta, cerca de 921 kJ/mol. Uma molécula do oxigênio (O_2) não é capaz de quebrar esta ligação nas circunstâncias da combustão. Mesmo em altas temperaturas a cinética da reação direta entre o nitrogênio molecular e o oxigênio molecular é demasiadamente lenta. Para explicar a formação do NO, Zeldovich propôs o seguinte mecanismo:



Posteriormente foi acrescentada mais uma reação a essas duas:



Este mecanismo proposto constituído das três reações acima citadas é conhecido como o mecanismo prolongado de Zeldovich. As concentrações de NO correspondem ao equilíbrio em condições da temperatura na saída dos cilindros.

Devido às características das reações de combustão, a formação do NO não alcança o equilíbrio químico. Como a temperatura dos gases queimados cai durante o curso da expansão, as reações que envolvem NO estacionam e sua concentração permanece nos níveis que correspondem ao equilíbrio em condições da exaustão.

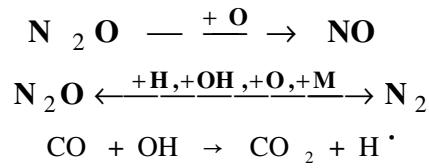
A formação do NO, em motores de combustão interna, é particularmente sensível à temperatura. Abaixo de 1700°C a quantidade formada é muito pequena, porém acima de 2000°C ela é acelerada. Outra particularidade a ser observada é a diferença entre o tempo em que ocorrem as reações de combustão e de formação do NO: 10 segundos. Pode-se reduzir a quantidade de NO formado pela diminuição do tempo de residência dos gases no cilindro do motor.

As reações de combustão nas condições reinante no cilindro, a temperatura adiabática de chama, em um motor de combustão interna, é decisiva na formação do NO e por extensão do NOx e N₂O. A taxa da formação do NO segundo o mecanismo de Zeldovich é fortemente acelerada acima de 2000K e insignificante se a temperatura estiver abaixo de 1700K, donde se conclui que no escapamento dos gases para a atmosfera não há mais formação de NO, tão somente reações com os demais gases.

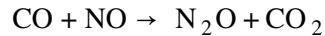
Outro fator que pode aumentar a concentração de NO é a contribuição da pirólise do etanol para a concentração dos radicais OH[•] e HO[•]₂. Preferencialmente eles reagem com o CO reduzindo suas emissões, mas um aumento na concentração deve contribuir também para o aumento de NO.

A redução das emissões do CO, COVs e os seus sucedâneos ocorrem devido à reação com os radicais OH[•] e HO[•]₂ durante todo o curso da combustão. A adição do etanol a gasolina aumenta a concentração desses radicais em altas temperaturas.

Nas condições reinantes no escapamento ocorrem às seguintes reações secundárias.



Esta última reação pode ser um fator para redução das emissões de N₂O. Essa reação impede que:



Dada certa quantidade de NO formado em alta temperatura, pode-se concluir que nas baixas temperaturas as concentrações do N₂O nos gases de saída para a atmosfera estão em uma relação inversa com o NO formado.

Um aumento do teor de álcool anidro na gasolina, não considerando os avanços da tecnologia dos motores, provoca aumento de NOx e redução do CO e HC (vide figura 3). Esse incremento é explicado pelas equações químicas acima citadas.

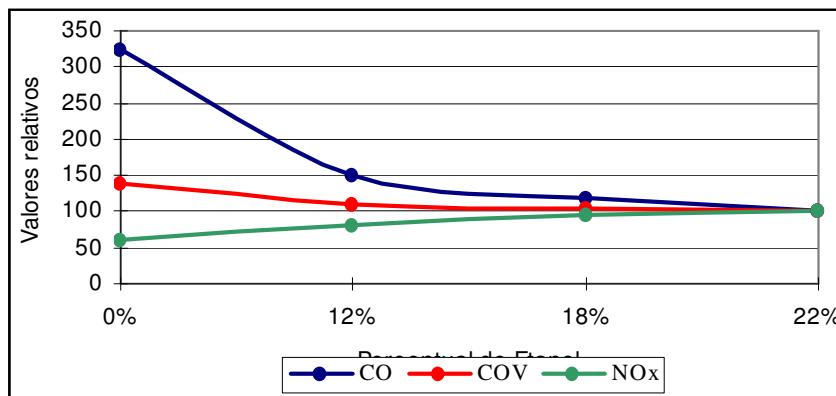


FIGURA 3- VARIAÇÃO RELATIVA NA EMISSÃO DE POLUENTES EM FUNÇÃO DO TEOR DE ALCOOL ANIDRO NA GASOLINA.

Fonte: Cetesb (2000) apud Teixeira

Observação: Para 0% de etanol o valor de CO situa-se entre 200-450.

2.4.2 CARACTERÍSTICAS DOS VEÍCULOS FABRICADOS.

As emissões em veículos novos, medidas em laboratório, dependem apenas de dois fatores: características dos veículos fabricados e combustíveis utilizados. As emissões reais do veículo em uso, porém, variam em função de um grande número de fatores, que não são os

mesmos quando testados em laboratório DeCicco e Thomas (1998) apud Azuaga (2000). O cálculo avalia os seguintes parâmetros: tipo de veículo, idade do veículo e característica da frota circulante.

A obtenção de emissões mais baixas só é possível com o uso de combustíveis com baixo potencial poluidor, emprego de tecnologias avançadas na construção dos veículos, motores com maior eficiência de combustão e dispositivos de controle. Além disso, a compatibilidade entre o motor e o combustível é fundamental para o pleno aproveitamento dos benefícios, tanto na melhoria do desempenho e da manutenção mecânica, quanto no consumo de combustível.

As emissões dos veículos em uso dependem de políticas públicas que melhorem o trânsito da cidade, retirem veículos antigos de circulação e trabalhem na educação dos motoristas, de modo que conduzam os veículos de maneira econômica e efetuem a manutenções necessárias.

O estudo de todas essas variáveis, entretanto, é importante na caracterização das emissões, na medida em que esses fatores atuam paralelamente no sentido da redução ou aumento desses gases. As características dos veículos fabricados dependem de dois fatores. O primeiro é a preferência dos consumidores por um tipo de veículo e outro é a tecnologia automotiva aplicada.

Como exemplo do primeiro fator pode-se citar que em países desenvolvidos, como os Estados Unidos, os consumidores nos momentos de boom econômico têm preferência por veículos maiores e motores mais possantes, aumentando o consumo de combustíveis e a emissão de gases de efeito estufa. Diferentemente dos países ricos, nos de menor poder aquisitivo, como o Brasil a frota constitui-se de veículos mais compactos e motores pouco possantes, poluindo menos.

Tendo em vista o aumento da eficiência dos veículos de forma que emitam menos poluentes, DeCicco e Ross, (1993) apud Azuaga (2000) agrupa as abordagens técnicas na fabricação do veículo em três partes: o motor, a transmissão e a carga (peso do veículo, tamanho e a aerodinâmica). Além destes, pode-se citar os sistemas de controle final.

As reações incompletas de combustão estão relacionadas às emissões de alguns gases de efeito estufa. Como consequência, as mudanças tecnológicas no motor buscaram melhorar a eficiência da reação de combustão sob dois aspectos: aprimorando a mistura ar combustível, por uma melhor dispersão do combustível no ar; e aproximando essa relação para a quantidade estequiométrica prevista nas equações de reação.

Os aperfeiçoamentos mais notáveis nesse sentido foram a troca dos carburadores pelo sistema eletrônico de injeção de combustível, ignição eletrônica mapeada e a adoção de mais de uma válvula por cilindro. As duas primeiras tecnologias como observam DeCicco e Ross, (1993) apud Azuaga (2000) melhoraram a dosagem a ser introduzida na câmara de combustão por meio de sensores de carga, rotação, temperatura e pressão e o terceiro a dispersão do combustível no ar que alimenta o motor. Também contribuíram para redução das emissões o sistema de contenção, com a recirculação dos gases de cárter e do escapamento (não disponível ainda no Brasil), e o controle das emissões evaporativas.

Importante registrar que aperfeiçoamentos foram feitos no motor no sentido de reduzir a fricção entre as peças, com a introdução do Controle Variável de Válvulas, um mecanismo que permite o controle da posição desta de acordo com as condições de operação do veículo e, dessa forma, gerenciar de modo eficiente os processos de indução e exaustão (De Cicco e Ross 1993 apud IPCC 1999).

Os gases de combustão que saem pelo escapamento de um veículo, apesar dos esforços tecnológicos, contêm certa quantidade de gases poluentes. Para eliminá-los a indústria automobilística implantou um conversor no escapamento com a finalidade de promover uma reação química catalítica entre os mesmos. Os catalisadores mais usuais são constituídos de paládio, o ródio ou a platina, denominado por este motivo de “three way”, conforme observa Heywood (1988).

Para reduzir a perda de eficiência mecânica da transmissão, que ocorre quando não há uma sincronia eficiente entre ela e o motor, novas tecnologias foram produzidas, entre elas a tração dianteira, a transmissão automática e o Controle Variável de Torque.

O Controle Variável de Torque permite que o motor opere em uma menor rotação sob uma dada condição de carga e que aumente a rotação quando uma maior potência for necessária, como observam De Cicco e Ross (1993), apud Azuaga (2000).

Segundo Coalition for Vehicle Choice (1998) apud Azuaga (2000), a adoção da tração dianteira nos automóveis elimina o pesado eixo de direção propiciando uma economia de energia pela redução do peso do veículo, mas não é adequado à maioria dos modelos de veículos comerciais leves,

A redução da carga pela diminuição do tamanho dos compartimentos (porta-malas, assentos traseiros etc.) e peso de componentes, através de uma remodelagem cuidadosa de suas partes e o uso de novos materiais, como plástico, alumínio e aços leves, possibilitam a fabricação de veículos mais leves e consequentemente há uma diminuição do consumo de combustível.

Uma aerodinâmica tecnologicamente avançada reduz a carga, pois ela permite uma menor resistência do ar. Isso é possível com a eliminação de ângulos agudos nos painéis laterais, entre o capô e o para brisa. Os modelos de veículos comerciais leves, que requerem espaços abertos, espaços para cargas e determinada altura do chão para rodar fora das estradas limitam o uso dessa tecnologia que é mais aplicada em carros de passageiros.

2.4.3 TECNOLOGIA DOS COMBUSTÍVEIS

Existem limitações nos esforços para eliminar totalmente as emissões de gases de efeito estufa pelos derivados de petróleo, dois fatos impedem que isso ocorra. A existência do carbono na sua composição química necessariamente terá como produtos de combustão CO₂, CH₄ e CO e a temperatura atingida, que depende do poder calorífico do combustível, conduz a formação de NO e por extensão de NO₂ e N₂O. Em ambos os casos pode-se reduzir as emissões a partir do aprimoramento da composição do combustível.

A gasolina A, sem adição de etanol (anexo 3), é constituída basicamente por hidrocarbonetos alifáticos ramificados (Isoparafinas), não ramificados (n-Parafinas) e cílicos (Naftênicos e Aromáticos), além de substâncias que contêm átomos de enxofre, nitrogênio, metais e oxigênio. A tabela 7 mostra a procedência e as propriedades das principais substâncias e misturas utilizadas na formulação da gasolina e os processos para obtenção.

TABELA 7: PRINCIPAIS CONSTITUINTES DA GASOLINA.

Constituintes	Processo de Obtenção	Faixa de ebulação (°C)	Índice de Octano motor
Butano	Destilação e processos de transformação	zero	101
Isopentano	Destilação, processos de transformação, isomerização	27	75
Nafta Alcoilada	Alquilação	40 - 150	90 – 100
Nafta leve de destilação	Destilação	30 - 120	50 – 65
Nafta pesada de destilação	Destilação	90 - 220	40 – 50
Nafta Hidrocraqueada	Hidrocraqueamento	40 - 220	80 – 85
Nafta craqueada cataliticamente	craqueamento catalítico	40 - 220	78 – 80
Nafta Polímera	Polimerização de olefinas	60 - 220	80 – 100
Nafta craqueada termicamente	Coqueamento retardado	30 - 150	70 – 76
Nafta Reformada	Reforma catalítica	40 - 220	80 – 85

Fonte: Petrobras Distribuidora (2007)

A Agência Nacional de Petróleo (ANP) baixou a Resolução N° 6, de 24/02/2005 – publicada no Diário Oficial da União no dia 25/02/2005, estabelece os ensaios a que devem ser submetidos o petróleo e seus derivados utilizados para análise de gasolina automotiva (vide anexo 2) e a especificação da gasolina automotiva utilizada como padrão nos ensaios de consumo de combustível e emissões veiculares visando atender as Resoluções do Conama nº. 315/2002 e nº. 342/2003, dentro do Proconve que prevê reduções de gases poluentes.

A destilação de produtos de petróleo à pressão atmosférica é um dos testes que tem como objetivo avaliar a faixa e ebulação dos óleos e derivados de petróleo para assegurar a correta especificação do produto final e o controle dos processos de refinação. No Brasil, aplicação da destilação ASTM na gasolina obtém uma faixa de 30 a 215°C.

A avaliação da tendência da gasolina se evaporar é feita a partir do ensaio da Pressão de Vapor. Observa-se que quanto maior a temperatura ambiente, maior são as emissões por evaporação, daí a necessidade de especificá-la de acordo com a região em que vai ser empregada e a estação do ano.

Esse ensaio é utilizado, principalmente, para indicar as exigências que devem ser satisfeitas para o transporte e armazenamento do produto, inclusive nos veículos, de modo a evitar acidentes e minimizar as perdas.

Um combustível com uma baixa entalpia de vaporização e pressão de vapor permite uma combustão mais completa; o contrário pode causar vaporização incompleta e um descontrole na relação ar/combustível dificultando o processo de queima.

Atualmente existe uma forte tendência na redução dos parâmetros da volatilidade, entre estes a pressão de vapor e a faixa de destilação da gasolina. Combustíveis com elevada volatilidade favorecem emissões de COVs, tanto na partida a frio como no tanque. Entretanto, existe um mínimo necessário para partida a uma dada temperatura.

Os aromáticos possuem altas entalpias de vaporização e temperatura de ebulação. Essas propriedades limitam o seu emprego porque dificulta a formação de mistura homogênea ar/combustível. Como consequência, tem-se uma queima parcial e a formação de CO e COVs, especialmente na partida a frio.

O etanol também possui uma entalpia de vaporização alta, porém essa propriedade é compensada pela sua baixa temperatura de ebulação, 10° C. Nesse caso não existe a dificuldade de formação de uma mistura ar/combustível como ocorre com os aromáticos.

Um combustível com maior octanagem tem melhor poder de combustão e resiste às altas pressões no interior dos cilindros, sem sofrer detonação e a consequente perda de potência. Os projetistas de motores levam em conta a octanagem para determinar a taxa de compressão, curvas de avanço de ignição e tempo de injeção.

Os aromáticos são quimicamente mais estáveis do que outros compostos insaturados, por isto são mais resistentes que o iso-octano à auto-ignição durante o curso de compressão, porém, como comentado, existem restrições ao seu uso comentadas acima.

O benzeno, índice de octanagem igual a 120, pode ser usado como agente para elevar esse índice nos combustíveis. Aliado ao alto poder calorífico (41840 kJ/kg), é indicado para ser usado nos motores à combustão interna, porém seu alto ponto de solidificação (+5 °C) e a dificuldade de evaporação limitam seu emprego.

As olefínas são desejáveis porque de maneira geral apresentam octanagem elevada, mas existem algumas restrições para algumas delas no uso automobilístico porque podem se unir

com facilidade ao hidrogênio, formando parafina e, por outro lado, já está constatado que a diminuição dos seus teores reduz a formação de compostos orgânicos voláteis. Estes são os motivos pelos quais se limita o seu emprego.

O etanol apresenta uma boa octanagem sem os problemas apresentados pelos aromáticos. Torna-se evidente, desse modo, a necessidade de uma redução do conteúdo de aromáticos através da substituição pelos oxigenados, que conferem o grau de octanagem necessário à gasolina sem elevar as emissões.

Um combustível de maior poder calorífico tem a vantagem de reduzir o consumo de combustível pelo aumento da disponibilidade de energia, porém tem a desvantagem em relação à formação de NO e por extensão NO₂ e N₂O, porque a formação destes compostos depende da temperatura de chama e por extensão do poder calorífico.

Neste caso os aromáticos são os que mais influem nessa formação, porque possuem as maiores temperaturas de combustão, seguida das olefinas e os alcoóis, que possuem as mais baixas.

Atualmente, as gasolinas que saem das refinarias são constituídas de misturas criteriosamente balanceadas de hidrocarbonetos, visando atender aos requisitos de desempenho nos motores e para evitar emissões de poluentes.

Além da composição química da refinaria, deve-se considerar que a adição do etanol, denominada de gasolina C (anexo 3), tem as seguintes vantagens e desvantagens:

- O fato de possuir 11% de oxigênio em massa resulta em uma melhor combustão reduzindo as emissões de gases de efeito estufa indiretos.
- O álcool tem uma desvantagem, seu poder calorífico é mais baixo que o da gasolina, aproximadamente 30%.
- As emissões evaporativas do etanol são maiores que as da gasolina.
- Um índice de octanagem maior, o que permite uma taxa de compressão mais elevada, e que se reflete na potência desenvolvida pelo motor.
- O carbono do álcool é obtido por fotossíntese, portanto não contribui para o efeito estufa.

O carbono retirado da atmosfera pelo processo de fotossíntese e estocado na biomassa servirá de matéria-prima para a produção de biocombustíveis, que por sua vez, serão queimados nos motores emitindo CO₂.

O processo é fechado, cujo resultado líquido é zero em termos das emissões de CO₂, enquanto que a queima de combustível fóssil libera para a atmosfera um carbono estocado ao longo de milhões de anos.

Outra característica do etanol que necessita ser ressaltada é o fato de conter mais oxigênio, o que propicia a formação de hidrocarbonetos oxigenados. Este fato aliado a emissão maior de NOx conduz a uma maior formação do “smog fotoquímico” e, consequentemente, a de ozônio troposférico, que é um gás de efeito estufa de curta duração.

2.4.4 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO CONJUNTO MOTOR E COMBUSTÍVEL

A partir do momento em que se começou a produzir carros a álcool em 1986, todo o desenvolvimento de motores com melhores condições de controle de emissões estava concentrado neste tipo de veículo, consequentemente, carro a álcool emitia menos CO e CH₄ que carro a gasolina.

A queda do preço do petróleo proporcionou a retomada da produção de carros a gasolina a partir de 1996. Esses novos veículos concentraram as melhores tecnologias da área automotiva, então a situação se inverteu, ou seja, os carros a etanol passaram a emitir mais CO, NOx e CH₄ que os carros a gasolina. Isto demonstra que o desenvolvimento em tecnologia de motores foi o grande responsável pela redução desse tipo de emissões, e não o tipo de combustível.

Do ponto de vista das emissões do CO₂, a contribuição dos motores a gasolina é mais restrita, limitando os ganhos de eficiência. Assim os carros da década de 80 faziam uma média de 7,5 km por litro enquanto que os modelos mais recentes chegam a fazer uma média de 12 km por litro, reduzindo dessa maneira as emissões.

Analisando as emissões de CO₂ de um carro que roda com uma mistura etanol e gasolina existe um ganho bem maior (em média de 22%) e esse ganho chega aos 100% quando se trata de carros que utilizam somente etanol.

3 METODOLOGIA EMPREGADA.

3.1 TIPOS DE METODOLOGIA.

As estimativas das emissões e remoções dos gases de efeito estufa são calculadas utilizando a metodologia preconizada em “2006 Revised IPCC Guidelines”, que agrupa as atividades produtivas em quatro setores: Energia; Processos Industriais e Uso de Produtos; Agricultura e Mudança no Uso da Terra e Reflorestamento; Resíduos⁷.

Cada setor é subdividido em categorias, no caso da Energia, por exemplo, existem 10 categorias, entre elas a área de transportes, na qual está situado o estudo da presente dissertação. Em cada categoria são avaliadas as emissões de gases de efeito estufa utilizando fatores específicos para cada subcategoria a partir dos dados existentes.

As emissões são estimadas, de um modo geral, dentro de duas metodologias: a “top-down” que calcula as emissões de gases a partir dos dados de produção e consumo de energia obtida no Balanço Energético Nacional, sem detalhamento de como ela é consumida; a “bottom-up” detalha como essa energia é consumida por diferentes categorias, setores da economia, tipos de equipamentos empregados e respectivos rendimentos.

A vantagem da aplicação da metodologia “top-down” é que com o seu uso não são necessárias informações detalhadas a respeito das emissões por categorias, setores da economia, tipos de equipamentos. Além disso, existe disponível uma quantidade de informações sobre suprimento de combustíveis.

No caso da metodologia “bottom-up” são necessárias informações mais precisas que muitas vezes não estão disponíveis. Por outro lado, ela tem a vantagem de permitir a identificação e a quantificação das emissões dos gases de efeito estufa por diferentes categorias, setores da economia e equipamentos, o que facilita o estudo de políticas e projetos para a redução dessas emissões.

⁷ Protocolo de Quioto anexo D (vide anexo 5)

O Potencial de Aquecimento Global, conforme prevê o artigo 5, parágrafo 3º do Protocolo de Quioto, será utilizado para calcular a equivalência em dióxido de carbono de todas emissões por fontes e das remoções por sumidouros dos gases de efeito estufa.

3.2 METODOLOGIA PARA ESTIMAR AS EMISSÕES NO TRANSPORTE RODOVIÁRIO.

As emissões de gases do efeito estufa na área de transporte são estimadas pelas atividades principais, quais sejam: rodoviário, aeroviário, ferroviário e aquático. Neste trabalho aborda-se apenas o primeiro. Os veículos dessa categoria operam com muitos tipos de combustíveis líquidos e gasosos, entre eles a mistura gasolina/álcool. Vale registrar que o etanol puro ou a mistura gasolina/etanol são focos de interesse deste estudo.

O transporte rodoviário inclui todos os tipos de veículos, tais como automóveis, caminhões e ônibus, inclusive aqueles usados na agricultura e na pavimentação de rodovias e outros.

O “2006 Revised IPCC Guidelines” descreve as emissões no transporte rodoviário como aquelas que emitem gases de efeito estufa devido à combustão e às emissões evaporativas.

O objetivo deste trabalho é avaliar as emissões provenientes de veículos leves - que são constituídos das subcategorias dos automóveis e veículos comerciais leves, segundo a classificação do IPCC – tendo, normalmente, uma capacidade de transporte para no máximo 12 pessoas. No Brasil essa subcategoria utiliza como combustível a mistura gasolina/etanol anidro na proporção entre 20% e 25% ou 100% de hidratado.

3.2.1 “TIERS”.

As estimativas das emissões do transporte rodoviário podem ser baseadas em dois tipos de dados independentes: combustível consumido (método “top-down”), que é igual em primeira aproximação ao comercializado; ou distâncias percorridas por tipos de veículo (método “bottom-up”). A equação empregada é:

$$E = \sum A \bullet FE$$

Onde A é a atividade, expressa pelo combustível consumido ou a distância percorrida e FE o fator de emissão. Essa equação será adaptada para cada caso estudado.

A partir dessa equação básica estão disponíveis os roteiros básicos, com a descrição do cálculo das emissões, preparados pelo IPCC que são denominados de: “Tier 1”, “Tier 2” e “Tier 3”, descritos no “2006 Revised IPCC Guidelines”. A escolha do método apropriado para o transporte rodoviário depende dos níveis de desagregação dos dados validados, quais sejam:

- a - tipo de combustível (ou seja, gasolina, diesel e gás natural);
- b - tipo de veículo;
- c - tecnologia de controle de emissões (tais como, não controlado, conversor catalítico etc);
- d - condições de operação (ou seja, urbano ou rural, tipo de via, modo de condução, clima ou outros fatores ambientais).

A escolha entre os métodos é determinada pela existência e qualidade dos dados.

3.2.2 DETERMINAÇÃO DOS FATORES DE EMISSÃO.

O Proconve, num convênio com a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo (Cetesb), determinou os fatores de emissão dos seguintes gases: monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos não queimados (HC), aldeídos (RCHO), óxidos de nitrogênio (NO_x) na exaustão e também os fatores para as emissões evaporativas no caso dos veículos novos. Não são determinados os fatores de emissão para os gases de efeito estufa.

O Fator de Emissão por definição é um valor médio das quantidades emitidas, obtido através de cálculos estatísticos ou medições reais, sendo específico para um dado poluente e típico de um determinado modelo, classe ou frota de veículos. Representa, portanto, o valor da emissão característico da frota total resultante da média ponderada dos Fatores de Emissão para cada modelo-ano e na distribuição da quilometragem rodada por tempo do emprego do veículo sem contar a deterioração pelo uso (MURGEL et al., 1987).

Os valores utilizados para os fatores de emissão para a mistura álcool/gasolina são baseados nos obtidos pela Cetesb/Proconve (vide anexo 1), conforme a norma NBR-6601 - Análise dos Gases de Escapamento de Veículos Rodoviários Automotores Leves a Gasolina. Nesse teste o veículo é submetido, em um dinamômetro, a ensaios que simulam um ciclo considerado como característico para as vias públicas, apresentando as seguintes condições: velocidade média em tráfego urbano de 31,5 km/h; temperatura ambiente de 20 a 30° C; e umidade relativa do ar de 40 a 60%.

3.2.3 EMISSÕES DE CO₂

Para estimar as emissões de CO₂ é utilizado o método “Tier 1” ou “Tier 2” (ambos “top down”). No Revised Guidelines (2006) o IPCC observa que o “Tier 3” (“bottom up”) não é aplicado, por ser mais complicado e não produzir melhores resultados que o “Tier 2”.

As emissões são calculadas a partir do tipo de combustível consumido e por extensão da quantidade de carbono contido nele.

A quantidade consumida é considerada como aproximadamente igual a comercializado. Esse artifício é uma aproximação, dado que não se tem certeza que todo o combustível comercializado foi consumido.

No Brasil as estatísticas sobre a comercialização de combustível são precárias, especialmente porque existem diversos tipos de adulteração, como por exemplo, a adição de solvente (preço menor) na gasolina e água no álcool anidro para vender como hidratado (burlar a cobrança de impostos).

Para as emissões de CO₂, os métodos “Tier 1” e “Tier 2” utilizam a mesma equação, qual seja:

$$ECO_2 = \sum_a [C_a \bullet FE_a] \quad (1)$$

Onde:

ECO₂ são as emissões totais de dióxido de carbono.

a é tipo de combustível (i.e. gasolina, diesel, gás natural etc.)

C é o combustível vendido.

FE fator de emissão.

A diferença entre os métodos situa-se na utilização do fator de emissão, o “Tier 1” utiliza um valor “default” enquanto o “Tier 2” emprega os dados levantados no País.

O valor “default” do fator emissão do CO₂ contabiliza todo carbono no combustível, inclusive aquele emitido como CH₄, CO, COV (não incluído o metano) e material particulado. Seu valor é calculado a partir do conteúdo de carbono do combustível multiplicado por 44/12 (relação entre os pesos moleculares de CO₂ e do carbono).

No “Tier 2”, o cálculo das emissões de CO₂ é feito a partir do fator de emissão obtido nos ensaios. Esse valor leva em conta o montante carbono não oxidado, ou seja, aquele que é emitido na forma de CH₄, CO e COV (não incluído o metano).

3.2.4 EMISSÕES DE CH₄ E N₂O

As estimativas das emissões de CH₄ e N₂O, pelo “Revised Guidelines” do IPCC (2006), exigem mais níveis de desagregação, tais como: tecnologia do veículo, do combustível e das características operacionais. Cumpre notar que os dados para os cálculos nem sempre estão disponíveis.

São utilizados os dados do consumo de combustível desagregado, que deve ser considerado mais preciso do que o comercializado, devido às razões já expostas, e a quilometragem percorrida pelo veículo.

As emissões de CO₂ do etanol não são incluídas no total nacional, mas o mesmo não ocorre com as emissões de CH₄ e N₂O que devem ser calculadas e relatadas.

Três alternativas, descritas abaixo, podem ser usadas para estimar as emissões de CH₄ e N₂O dos veículos rodoviários. A escolha depende dos níveis de desagregação desejada.

O “Tier 1” é menos preciso porque utiliza apenas um nível de desagregação, qual seja, o tipo de combustível:

$$Egas = \sum_a [C_a \bullet FE_a] \quad (2)$$

Onde:

Egas são as emissões totais de CH₄ ou N₂O.

a é tipo de combustível (i.e. gasolina, diesel, gás natural, etc)

C é o combustível vendido.

FE fator de emissão.

As etapas para o cálculo são as seguintes:

- Etapa 1: Determinar o montante de combustível consumido pelo tipo pelo transporte rodoviário usando dados nacionais ou, como alternativa, fontes de dados internacionais, como a IEA.
- Etapa 2: Para cada tipo de combustível, multiplicar o montante do combustível consumido pelo apropriado fator emissão (valor default) do CH₄ e N₂O.
- Etapa 3: As emissões de todos os poluentes por combustível são somadas.

O “Tier 2” leva em consideração o tipo de combustível (a), veículo (b), tecnologia de controle de emissões (c) e adota o combustível comercializado como igual ao consumido. A equação específica para o caso:

$$Egas = \sum_{a,b,c} C_{a,b,c} FE_{a,b,c} \quad (3)$$

Onde:

Egas são as emissões totais de gás considerado.

a é tipo de combustível (i.e. gasolina, diesel, gás natural etc.)

b é o tipo de veículo.

c é a tecnologia de controle de emissões (tais como sem controle, conversor catalítico etc.)

C é o combustível vendido.

FE fator de emissão.

O método “Tier 3” adota D como a distância percorrida e um fator de emissão FE considerando todos os níveis de desagregação. Este método só é recomendado para estimativa de CH₄ e N₂O. A equação específica para o caso:

$$Egás = \sum_{a,b,c,d} [D_{a,b,c,d} FE_{a,b,c,d}] + \sum_{a,b,c,d} P_{a,b,c,d} \quad (4)$$

Onde:

Egas são as emissões totais de gás considerado.

a é tipo de combustível (i.e. gasolina, diesel, gás natural etc.)

b é o tipo de veículo.

c é a tecnologia de controle de emissões (sem controle, conversor catalítico etc.).

d é referente às condições de operação (i.e., urbano ou rural, tipo de rodovia, modo de condução, clima ou outros fatores ambientais).

D é a distância percorrida durante a operação do motor em regime permanente para uma dada atividade da fonte móvel.

FE fator de emissão.

P são as emissões durante a partida a frio (fase de aquecimento).

Observação: A primeira somatória refere-se às emissões durante o funcionamento normal e a segunda refere-se à partida a frio do carro.

As etapas para o cálculo são as seguintes:

- Etapa 1: Determinar o montante de combustível consumido por tipo de combustível usando dados nacionais.
- Etapa 2: Assegurar-se de que os dados do combustível ou quilometragem percorrida pelo veículo estejam distribuídos nas categorias do veículo e do tipo de combustível. Deve ser levado em consideração que, tipicamente, as emissões e a distância percorridas em cada ano variam de acordo com a idade do veículo; os mais velhos tendem a viajar menos, mas podem emitir mais CH₄ por a unidade de atividade.
- Etapa 3: Multiplicar a quantidade de combustível consumida (Tier 2), ou a distância percorrida (Tier 3), por cada tipo de veículo ou de tecnologia de controle, pelo fator apropriado da emissão para esse tipo.
- Etapa 4: Estimar as emissões quando da partida a frio do veículo.
- Etapa 5: As emissões totais do transporte rodoviário serão obtidas somando os dados de todos os tipos de combustível e veículo.

4. AVALIAÇÃO DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEIS PELA FROTA DE VEÍCULOS LEVES.

A metodologia adotada para avaliar as emissões dos gases de efeito estufa proveniente de veículos leves de transporte está contida no “Revised 2006 Guidelines”, do IPCC, e foi comentada no capítulo 3. Entretanto, é necessário adaptar a metodologia às condições existentes no Brasil, ou seja, é preciso caracterizar a frota nacional de veículos, o tipo de combustível (etanol ou gasolina), o consumo de combustíveis e os fatores de emissão.

O estudo teve como fator limitante a falta de dados oficiais disponíveis. A adaptação, portanto, do método “Tier 3”, previsto pelo “Guidelines” do IPCC (vide capítulo 3), mostra-se bastante difícil, devido a falta de dados que são exigidos pelo método. Entre os quais, pode-se citar:

- Informações referentes à frota nacional de veículos leves em circulação do Brasil;
- Fatores de emissão específicos para N₂O, CO₂ e CH₄;
- Distâncias médias percorridas anualmente por esses veículos.

Apesar das limitações foram utilizados os métodos “Tier 1” e “Tier 2” na determinação de CO₂ e “Tier 3” na determinação de N₂O e CH₄.

Pode-se compreender a falta de prioridade para a coleta e a determinação destes dados, a partir do fato de que o Brasil não é obrigado a elaborar um relatório anual das emissões dos gases de efeito estufa, diferentemente do que ocorre com os gases poluentes, NOx, COVs e CO, cuja redução está prevista em lei, tendo, portanto, estudos mais aprofundados e uma vasta literatura à disposição.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA FROTA BRASILEIRA DE VEÍCULOS.

A partir de 1º de janeiro de 1996 entrou em vigor a Resolução do CONAMA nº 15/95 que, em seu Art.1, estabeleceu uma nova classificação dos veículos automotores, conforme descrito a seguir:

O veículo leve de passageiros: veículo automotor com massa total máxima autorizada até 3.856 kg e massa do veículo em ordem de marcha até 2.720kg, projetado para o transporte de até 12 passageiros, ou seus derivados para o transporte de carga, ou seja, nessa categoria incluem-se todos os automóveis (inclui o tipo perua).

Veículo leve comercial: veículo automotor não derivado de veículo leve de passageiros com massa total máxima autorizada até 3.856kg e massa do veículo em ordem de marcha até 2.720kg, projetado para o transporte de carga, ou misto ou seus derivados, ou projetado para o transporte de mais que 12 passageiros, ou ainda com características especiais para uso fora de estrada.

Veículo com características especiais para uso fora de estrada: veículo que possui tração nas quatro rodas e no mínimo quatro das seguintes características calculadas para o veículo com o peso em ordem de marcha, em superfície plana, com as rodas dianteiras paralelas à linha de centro longitudinal do veículo e os pneus inflados com a pressão recomendada pelo fabricante.

Veículo pesado: veículo automotor para o transporte de passageiros e/ou carga, com massa total máxima autorizada maior que 3.856kg ou massa do veículo em ordem de marcha maior que 2.720kg, projetado para o transporte de passageiros e/ou carga.

A frota de veículos leves é também classificada de acordo com a tecnologia empregada no motor: gasolina, álcool e “flex-fuel”, este último trabalha com qualquer mistura entre os dois combustíveis.

4.2 MODELO PARA AVALIAÇÃO DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL PELA FROTA DE VEÍCULOS.

A estimativa de consumo de combustível foi feita com base no tamanho da frota existente (agregação de veículos novos a ela e a aplicação de uma taxa de sucateamento), na distância média anual percorrida e no consumo médio de combustíveis.

A frota é constituída de veículos de diferentes anos de fabricação em circulação em um ano estabelecido (por exemplo, 2005). Não existe, porém, um consenso sobre o período que deve ser utilizado na contabilização da frota total.

Para estimativa do consumo de combustíveis adotou-se o modelo construído por La Rovere et al (2006) para o consumo de álcool, que adaptou o trabalho de Mendes (2004), cujo equacionamento é o seguinte:

$$CT_{c,t} = \sum_{c,i} C_{c,i,t} \quad (5)$$

$$C_{c,i,t} = \sum_{m=initial}^t F_{i,m,t} D_m CM_{c,i,m,t} \quad (6)$$

Onde:

$CT_{c,t}$ – consumo total do combustível c no ano t.

$C_{c,i,t}$ – tipo de combustível consumido em motores.

$F_{i,m,t}$ – frota de veículos do ano de referência i, modelo m e ano de fabricação t.

D_m – distância média percorrida pela frota.

$CM_{c,i,m,t}$ – consumo médio de combustível pela frota de veículos i, modelo m e ano de fabricação t.

i – ano de referência da frota

t – idade do veículo.

O procedimento para o cálculo, neste trabalho, estabelece a seguinte divisão dentro da frota de um determinado ano:

- categoria de veículos - automóveis e comerciais leves;
- tecnologia empregada - veículos com motor a gasolina, etanol e “flex-fuel”;
- idade e ano de fabricação.

No modelo foi feito, então, um novo nível de desagregação, a categoria de veículos, tendo em vista que existe uma diferença de consumo específico e distância média anual percorrida entre os automóveis e veículos comerciais leves. Por conseguinte, as fórmulas descritas são empregadas para as duas categorias, considerando-as separadamente.

O cálculo é feito levando-se em consideração o ano de fabricação e a idade agrupada pela tecnologia empregada dentro de cada categoria. Assim, tem-se, por exemplo, que a frota de automóveis 2005 será constituída por veículos a gasolina, a álcool e “flex-fuel” (flex), do período entre 1966-2005.

O consumo de combustível é calculado dentro de cada tipo de tecnologia empregada, obtendo os consumos de gasolina C (anexo 3) e álcool hidratado.

4.3 CÁLCULO DA FROTA BRASILEIRA DE VEÍCULOS LEVES.

A seguir é realizado um levantamento do tamanho da frota entre 2001 e 2006, de acordo com as diferentes categorias e tipo de combustível utilizado. Escolheu-se a frota deste período porque estão também disponíveis dados das emissões dos países do Anexo I, o que possibilita comparações e conclusões.

O cálculo da frota nacional circulante é efetuada a partir dos seguintes dados: venda de veículos novos, curva de sucateamento e os convertidos para outros tipos de combustíveis.

Na estimativa da frota nacional circulante é preciso considerar três cenários distintos: o primeiro, quando houve um uso maciço de automóveis movidos a álcool devido ao preço da gasolina; o segundo, numa situação inversa; e o terceiro, contemplando as conversões para o gás natural veicular (GNV). Neste caso é necessário avaliar essas conversões e, se for preciso, calculá-las.

4.3.1 METODOLOGIA PARA ESTIMAR A FROTA DE VEÍCULOS LEVES.

O Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa, coordenado pelo Ministério de Ciência e Tecnologia, observa que até 1985 o Ministério dos Transportes, através da Empresa Brasileira de Planejamento e Transportes – GEIPOT, publicava regularmente dados referentes às frotas nacional, estaduais e municipais, calculada a partir da Taxa Rodoviária Única - TRU. Com a extinção da TRU, em 1986, esses dados estatísticos deixaram de ser gerados. Devido a essa limitação, uma nova metodologia foi desenvolvida para estimar a Frota Nacional de Veículos em Circulação.

Considera-se que a contabilidade da frota de veículos licenciados pelo Departamento Nacional de Transito (DENATRAN) está superestimada. Na falta de confiabilidade em relação a esses dados, o cálculo da frota nacional circulante é efetuado a partir da curva de sucateamento, obtida a partir da função Gompertz⁸, a qual é aplicada aos dados da venda de veículos novos, apesar de suas limitações.

⁸ A função criada por Gompertz foi inicialmente formulada para estudar a taxa de mortalidade de pessoas tendo em vista a determinação do valor a ser pago ao seguro de vida.

Na determinação da frota de veículos leves em circulação são considerados os dados de vendas ao mercado interno, publicado pela Associação Nacional de Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA), aos quais é aplicada a curva de sucateamento, a cada um dos anos considerados.

Em relação às vendas de automóveis importados assumiu-se aqui que todos sejam movidos a gasolina. O mesmo, porém, não se pode dizer dos comerciais leves, já que além da gasolina, eles utilizam o diesel.

Para se obter os valores das unidades remanescentes de veículos leves, ano base de 2005, da frota nacional circulante de veículos a álcool e gasolina para cada ano **i** do período de 1965 a 2005 sem considerar o processo de conversão dos veículos, foi adotada a mesma fórmula utilizada por Matos e Correia (1996).

$$\sum_j FNC_{i,j} = \sum_j V_j (1 - S(t)) \quad (7)$$

Onde : FNC_{i,j} é a frota nacional de veículos

V_j é o número de veículos vendidos no ano **j**

S(t) é a curva de sucateamento para veículos de idade **t**

j é o ano de fabricação do veículo

i é o ano considerado para fazer o cálculo da frota

$$t = i - j + 0,5$$

Tomando a frota de um determinado ano (por exemplo, 2005) e a faixa de idade considerada (por exemplo, 1986-2005), os veículos anteriores a 1986 terão o S(t) = 1.

Observa-se que:

- A frota veicular é calculada para o final do ano, o fator S(t) é aplicado, inclusive, nos veículos fabricados no último ano, cuja média de idade é meio ano.
- Na frota real em circulação por combustível deve-se calcular a conversão de álcool ou gasolina para GNV a partir de 1996.

Essa metodologia é a mais usada nos últimos anos, na indústria automobilística e de petróleo, em órgãos governamentais e instituições acadêmicas.

4.3.2 VENDAS DE VEÍCULOS NOVOS

Para os propósitos deste trabalho nos interessa contabilizar somente os dados sobre vendas de veículos novos movidos à gasolina, mistura gasolina/álcool e álcool no período compreendido entre 1966-2005. Estes dados estão disponíveis nos relatórios da Anfavea (2006) encontram-se resumidos nas figuras 4 e 5.

Observa-se na figura que a venda de veículos leves movidos à gasolina teve dois períodos distintos, antes e depois da década de 1980. Nesse intervalo predominaram aqueles movidos a álcool, que cresceram rapidamente e tiveram seu ápice em 1985 para os automóveis (96% das vendas totais) e 1987 para os comerciais leves.

A partir do ano de 2003 começou a venda de veículos leves “Flex”, que tem aumentado significativamente, inclusive ultrapassando a comercialização de automóveis de outros combustíveis no ano de 2005 e empatando com a gasolina no segmento de comerciais leves.

A participação nas vendas dos automóveis a diesel foi insignificante. As vendas ao mercado interno dos comerciais leves são significativas a partir de 1979, chegando a seu ápice no biênio de 1981-1982 e diminuindo repentinamente entre 1995, 1996 e 1997. Para os propósitos deste trabalho, essa frota não será contabilizada no total de veículos comerciais leves.

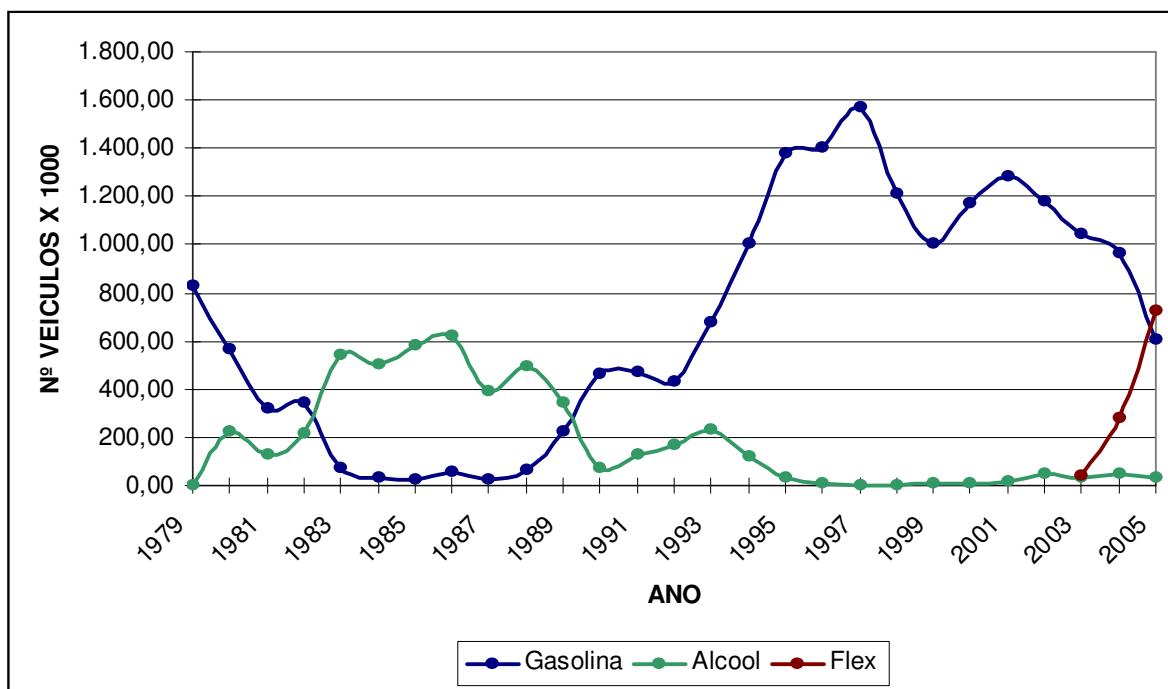


FIGURA 4 – EVOLUÇÃO DAS VENDAS DE AUTOMÓVEIS POR COMBUSTÍVEL
Fonte dos Dados: ANFAVEA (2006)

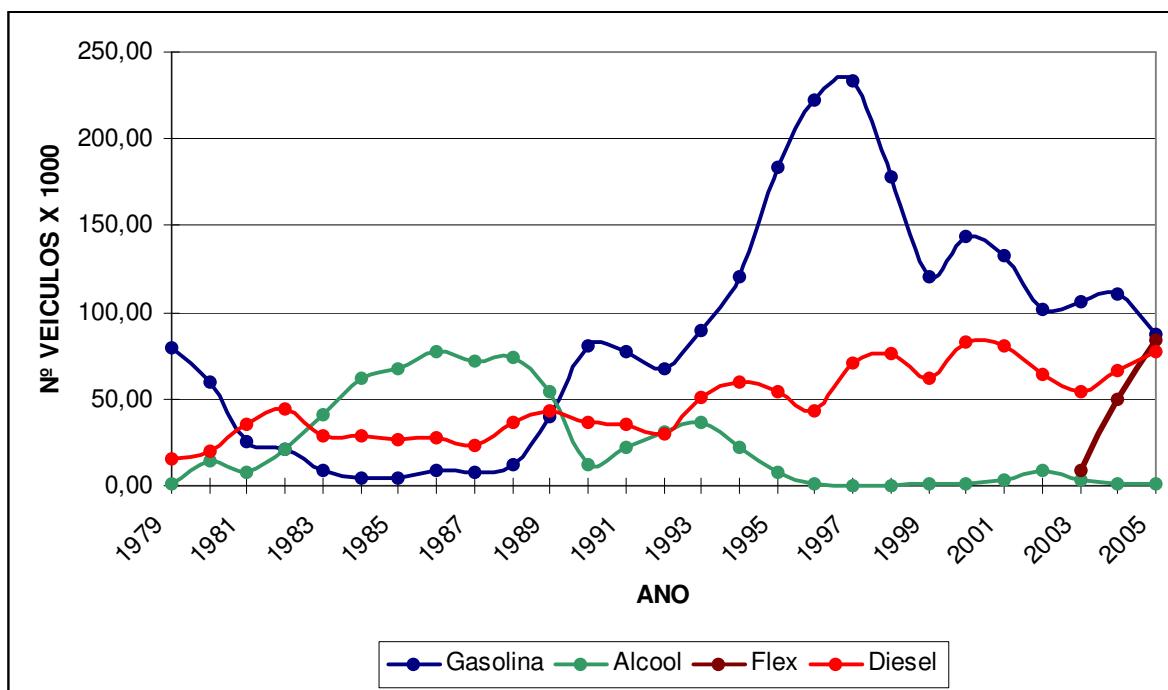


FIGURA 5 – EVOLUÇÃO DAS VENDAS DE COMERCIAIS LEVES POR COMBUSTÍVEL.

Fonte dos Dados: ANFAVEA (2006)

4.3.3 CURVA DE SUCATEAMENTO.

A função de sucateamento utilizada por Matos e Correia (1996) é uma adaptação da função Gompertz para calcular o percentual dos veículos sucatados em função da idade:

$$S(t) = \exp [-\exp (a + b(t))] \quad (8)$$

Onde: $S(t)$ = fração de veículos sucateada na idade t ,
 (t) = idade do veículo

Apresentando os seguintes ajustes para a e b :

	a	B
Automóveis	1,798	-0,137
Comerciais Leves	1,618	-0,141

Os parâmetros a e b foram determinados a partir a pesquisa do IBGE sobre “famílias que possuem automóvel por classes de recebimento mensal familiar no ano de 1987” e publicado em 1988. É esperado que os valores desses parâmetros não reflitam mais a realidade vigente em 2007.

Existe uma idade para a qual $S(t)$ é igual 1. Mas observam-se divergências quanto a esse valor. Para confirmá-lo, fizemos uma pesquisa de vendas de veículos no mês de abril 2007, nos principais anunciantes de veículos usados do país⁹, partindo do pressuposto de que se existe uma frota razoável de veículos em circulação, uma fatia dela estará sendo comercializada.

O número de veículos pesquisados foi de 3.800, distribuídos conforme duas variáveis: percentual de participação dos estados na frota nacional e percentual da participação do fabricante na frota nacional. Foram conferidas ênfases às montadoras mais antigas (Volkswagen, Chevrolet, Ford e Fiat) e aos modelos de carros que estiveram mais tempo de produção (Fusca, Gol, Uno, Chevette etc.).

⁹ Jornais *Folha de S.Paulo*, *Jornal do Brasil*, *O Estado de Minas*, *Gazeta do Povo* (Paraná), *A Tarde* (Bahia), os sites Zap (associação dos jornais *O Globo* e *O Estado de S.Paulo*), Web Motors (vários estados), Vrum (vários estados) e Hagah (Rio Grande do Sul e Santa Catarina).

A pesquisa realizada não encontrou veículos usados anteriores a 1965 sendo anunciados. A distribuição das vendas de veículos por faixa etária é mostrada na tabela 8.

TABELA 8 – DISTRIBUIÇÃO DA VENDA DE VEÍCULOS USADOS POR FAIXA ETÁRIA.

Faixa Etária	Período							
	65-70	71-80	81-90	91-95	96-00	01-02	03-04	05
Participação (%)	0,3%	1,3%	4,0%	11,0%	32,0%	21,0%	22,0%	9,0%

Pode-se constatar, também, que a comercialização de veículos via anúncios anteriores ao ano de 1970 é pouco significativa e entre 1971-1980 pouco vai influir nos resultados.

4.3.4 CONVERSÕES NA FROTA NACIONAL CIRCULANTE.

Três cenários distintos propiciaram os processos de conversão: o primeiro no período de 1979 a 1985, na segunda fase do Proálcool; o segundo entre 1986 a 1995; e o terceiro em 1996, ainda em andamento.

No ano de 1979, ocorreu o que se convencionou chamar de “segundo choque do petróleo”, que exigiu uma aceleração do programa Proálcool através de uma forte intervenção do governo. Uma das medidas foi o lançamento do carro a álcool, cujas vendas começaram neste mesmo ano e atingiram o auge entre 1983-1986, começando a declinar em 1987, segundo dados da ANFAVEA (vide figuras 5 e 6).

O segundo cenário, 1986-1995, é caracterizado por queda dos preços internacionais do petróleo. Neste período, a política energética interna deixou de privilegiar os aspectos estratégicos em benefício dos critérios mercadológicos, o que fez com que as vendas de veículos com motor a gasolina passassem a predominar.

Como contrapartida houve uma redução brusca das vendas de veículos movidos a álcool entre 1986- 1990, com o nível mais baixo sendo atingido em 1990, com 70.250 veículos vendidos. Após uma pequena retomada das vendas, ocorrida entre 1991 e 1993, houve uma redução mais acentuada em função da crise do abastecimento de etanol.

Desprezam-se aqui o número de veículos convertidos de etanol para gasolina e vice-versa, baseados nos seguintes argumentos:

No primeiro cenário, se todos os veículos a gasolina tivessem sido convertidos, hoje, depois de aplicado o cálculo de sucateamento, eles representariam apenas 2,6% da frota; sabe-se, entretanto, que somente uma parcela foi convertida, ou seja, não devemos ter volumes muito representativos.

Espera-se, entretanto, que um percentual maior se encontre sucateado, em função dos materiais que foram utilizados no carro a gasolina, sabidamente não apropriados para o álcool combustível. Por este motivo, consideramos que um cálculo do número de veículos convertidos na frota atual estaria fatalmente superestimado.

No segundo período houve um grande volume de conversão de etanol para gasolina. Considerando a frota atual a álcool, se todos os veículos tivessem sido convertidos hoje eles representariam apenas 0,9% do total.

O volume de carros a álcool convertidos para gasolina ou vice-versa não constitui um número tão expressivo a ponto de afetar a precisão dos resultados, que em si já contém uma incerteza.

O processo de conversão para gás natural começou efetivamente com a autorização para o uso de GNV, concedida pela Portaria MME nº553, em 25/09/92, nas frotas de ônibus e veículos leves, especialmente aqueles de frotas cativas, transporte alternativo e táxis. O governo brasileiro, em 1996, por meio do Decreto Federal 1.787/96, de 15 de janeiro, autorizou o uso de GNV para veículos particulares com o objetivo de estimular as conversões, tendo em vista a necessidade de consumir o gás contratado que vem da Bolívia (ANP, 2003).

A frota a GNV no Brasil passou dos 43 mil veículos, em 1999, para 1.128.000 veículos em 2006, traduzindo uma taxa de crescimento de 205% ao ano. Porém, a crise de fornecimento de gás, devido à situação na Bolívia, reduziu o número de conversões de 216 mil em 2005 para 145 mil em 2006, ou seja, uma queda 67%, o que desacelerou o crescimento da frota.

TABELA 9 - EVOLUÇÃO DA FROTA À GNV NO BRASIL.

	Consumo de GNV	Conversão	Frota
1993	25	1.792	1.792
1994	46	1.892	3.684
1995	39	307	3.991
1996	32	892	4.883
1997	45	4.458	9.341
1998	85	9.400	18.741
1999	145	24.410	43.151
2000	337	44.073	87.224
2001	641	197.527	284.751
2002	983	95.764	380.515
2003	1.329	194.072	574.587
2004	1.580	192.452	767.039
2005	1.934	216336	983.375
2006		145462	1.128.837

Fonte: Folha do GNV (Abr/2003)

Atualizado com dados do Instituto Brasileiro de Petróleo (2007)

A localização de mais da metade da frota brasileira está nos estados do Rio de Janeiro e São Paulo, sendo que a paulista é composta por um número expressivo de ônibus, enquanto que a carioca engloba principalmente táxis e veículos de transporte alternativos (“vans”, por exemplo).

O expressivo número de ônibus da frota paulista deve-se à homologação da Lei nº 10.950, de 24 de janeiro de 1991, da prefeitura de São Paulo, que determinou a conversão ou substituição até o final de 2001.

Segundo os dados apurados, os proprietários que mais convertem seus carros são aqueles que utilizam intensivamente os veículos, especialmente os que têm uso comercial, como os táxis e as “vans” para o transporte alternativo etc. O que ocorre é que nesses casos existe retorno financeiro com a conversão.

4.3.5 FROTA NACIONAL DE VEÍCULOS EM CIRCULAÇÃO.

A partir da aplicação da função Gompertz foram encontrados em circulação para a frota de 2006 cerca de 21.286.130 automóveis, 2.521.682 comerciais leves e cerca de 1.128.837 que utilizam GNV (sem uma estatística que discrimine as categorias a que pertencem), num total de 23,8 milhões de veículos, sem contar com comerciais leves a diesel, ônibus e caminhões que

não são objetos deste estudo. Deve ser observado que os movidos a GNV foram convertidos da frota existente.

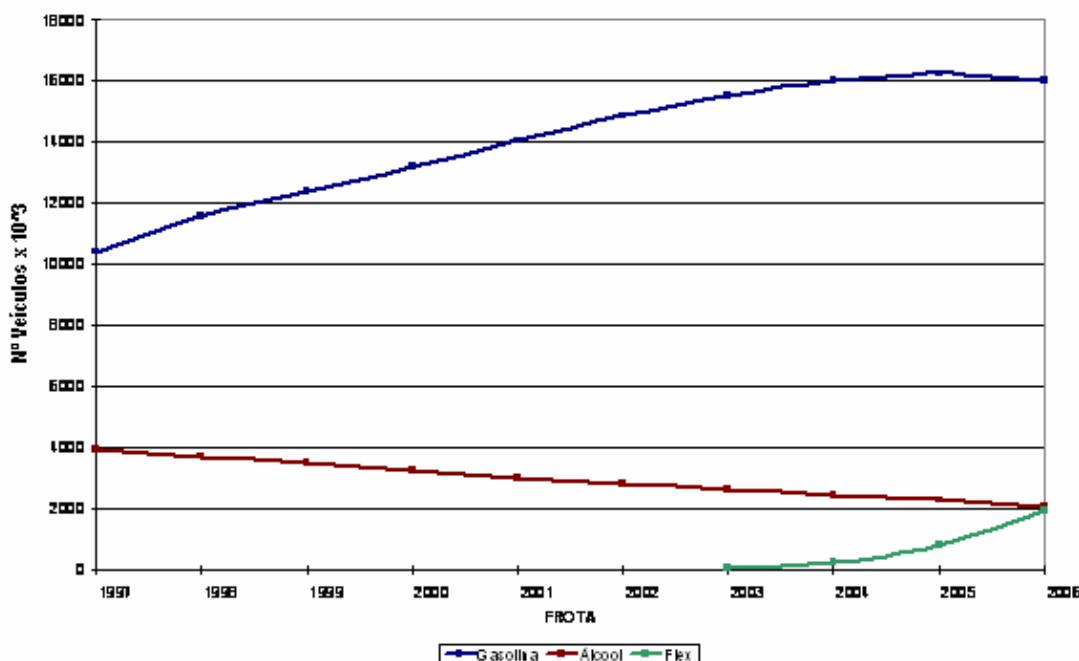


FIGURA 6 – EVOLUÇÃO DA FROTA DE VEÍCULOS POR CATEGORIA NO BRASIL.

Os resultados encontrados neste trabalho não diferem muito dos valores do Sindicato Nacional da Indústria de Componentes para Veículos Automotores (Sindipeças 2005) que estimou a frota de veículos totais ciclo Otto em aproximadamente 21 milhões unidades no final de 2004, sendo 17,9 milhões de automóveis, 3,087 milhões de comerciais leves, contra uma estimativa de 21,4 milhões de veículos neste trabalho. A ANFAVEA, em 2005, estimou a frota em 21.282.000 sendo 18.370.000 de automóveis e 2.912.000 outros veículos. Neste ano a estimativa deste trabalho é de 22,5 milhões aproximadamente.

Na análise das emissões por faixa etária dos veículos levou-se em consideração que as emissões veiculares dependem significativamente do ano de fabricação, devido ao uso, ao desgaste de peças e componentes e da legislação ambiental vigente, que vai influir nas alterações tecnológicas. Levando-se em conta essas diferenças de idade e tecnologias é que foram adotadas as faixas etárias.

A classificação por faixa etária para a frota nacional circulante (FNC) foi feita a partir dos dados da ANFAVEA. Para a comercialização a partir das vendas de veículos usados (VVU), vide figuras 7 e 8.

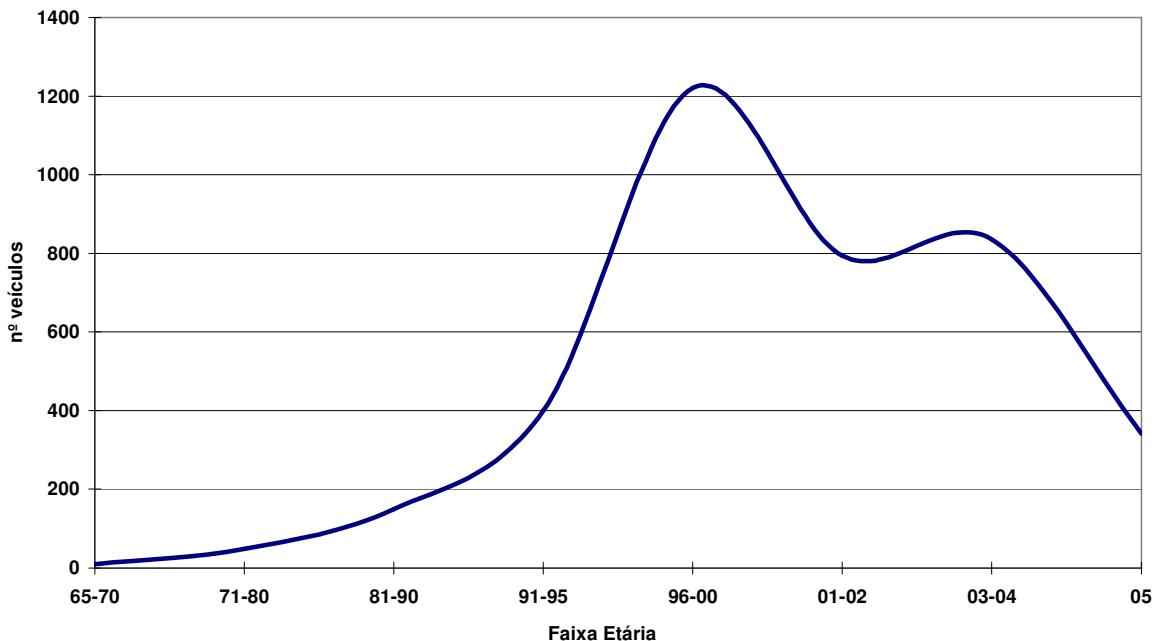


FIGURA 7 – CURVA DE VENDA DE VEÍCULOS USADOS

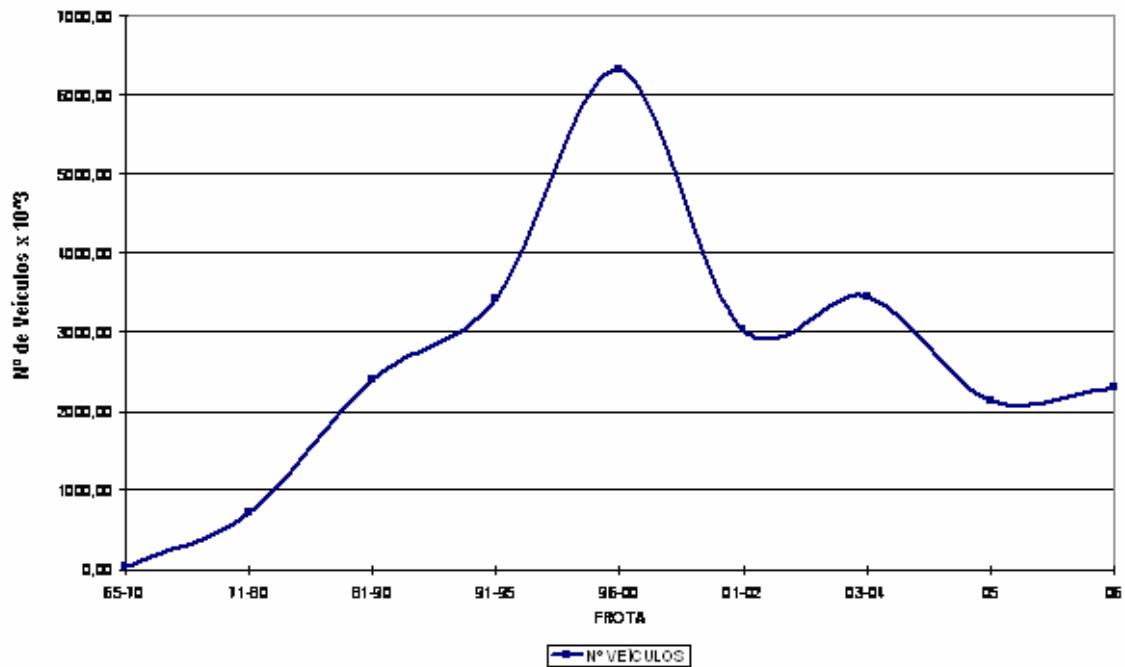


FIGURA 8 – CURVA DA FROTA NACIONAL CIRCULANTE 2006

As conclusões que podem ser tiradas a partir dos dados e das curvas são:

- Existe uma semelhança nas curvas FNC e VVU.
- A curva VVU sugere uma frota mais nova do que aquela calculada pela curva da FNC.

Essa semelhança levanta a possibilidade do cálculo da frota nacional circulante através de uma pesquisa de vendas de veículos usados, entretanto faz-se necessário um estudo sobre a metodologia de cálculo.

4.4 DISTÂNCIA ANUAL PECORRIDA.

A distância média veicular é um parâmetro básico na determinação das emissões de gases de efeito estufa. Entretanto, não existem, para a frota nacional, séries temporais oficiais para essa variável e não existem pesquisas a respeito do assunto que proporcionem uma base para confirmar e melhorar os cálculos existentes, devendo-se adotar um método para a sua estimativa.

Os fatores que mais influenciam na distância média anual percorrida são o tamanho da área urbana e a forma como está organizada. Nas regiões metropolitanas como São Paulo e Rio de Janeiro, com várias cidades interligadas e as zonas (norte, sul, leste e oeste) são tanto residenciais quanto comerciais, é de se esperar que os fluxos de deslocamento não sejam ordenados. O número de pessoas que não trabalha na própria região na qual mora é grande, determinando uma distância média maior do que a de outras regiões metropolitanas.

Quando se compara a distância média anual das regiões metropolitanas com cidades de médio e pequeno portes, estima-se que a distância média anual é bem maior nas primeiras. O mesmo pode-se constatar em relação às cidades de grande atividade agrícola com aquelas de pequena movimentação.

Os veículos mais velhos se localizam nas periferias das grandes cidades ou naquelas de pequeno porte. Este fato ocorre por causa da baixa renda de seus moradores. É de esperar, portanto, um consumo menor e, consequentemente, os veículos percorrem uma quilometragem mais baixa. Essa diversidade de situações dificulta os cálculos da distância média anual no Brasil.

Neste trabalho a distância média foi estimada em função da idade do veículo, do preço e do consumo de combustível. O cálculo da distância média será feito pela equação:

$$D = D_0 * f(\text{idade, preço_do_combustível}) \quad (9)$$

Onde:

D – distância média percorrida (em km /ano) anualmente por um veículo.

D_0 – distância média percorrida (em km /ano) para um automóvel novo.

O valor para a distância D_0 foi obtido pelo método de tentativa e erro utilizando a equação 6.

Para o consumo ($C_{c,i,t}$) foram empregados os dados de 2006 publicados pela Empresa de Pesquisas Energéticas no Balanço Nacional de Energia (BEN) em 2007. A frota foi calculada ($F_{i,m,t}$) com base nos dados da ANFAVEA e o consumo médio ($CM_{c,i,m,t}$) calculado com base nos dados das revistas Autoesporte e Quatro Rodas, publicados entre 1965 e 2006. Os valores encontrados são 25.000 km para os automóveis e 37.500 km para os comerciais leves (o valor de 22.000 km é utilizado atualmente para os veículos em geral).

Esses valores podem estar superestimados devido o cálculo da frota ($F_{i,m,t}$) ter sido feito com parâmetros que não refletem a realidade atual. Os dados disponíveis do consumo médio ($CM_{c,i,m,t}$) são obtidos em condições de teste, quando deveriam ser obtidos nas condições de trânsito, não levando em conta o percentual dos veículos de 1.000 cilindradas na composição da frota e exclusão das motocicletas, por falta de dados.

Deve ser observado que o valor calculado de D_0 para o álcool hidratado é maior do que os veículos a gasolina. Isto pode ser explicado pelo incentivo dado pelo governo aos táxis a etanol, que têm uma intensidade de uso maior.

No período de 1998-2006 estes passaram a ter um percentual maior na frota de álcool do que o percentual de táxi na frota de gasolina.

Cumpre notar que o valor de D_0 é maior nos veículos comerciais leves, pois a intensidade de uso deles é maior que nos automóveis.

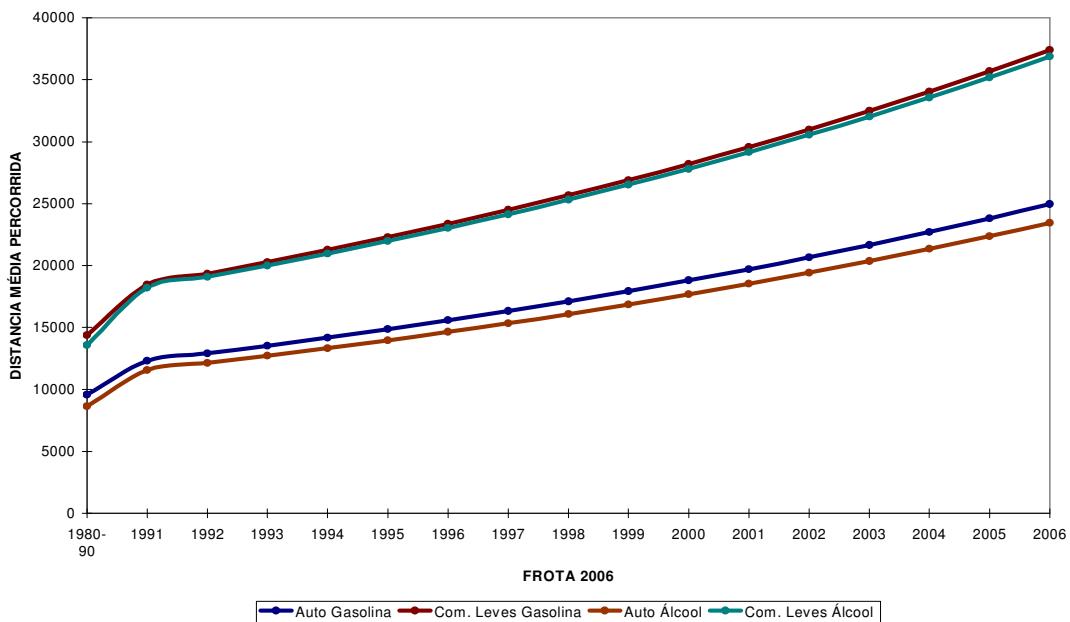


FIGURA 12 – DISTÂNCIA MÉDIA ANUAL DA FROTA.

4.5 CONSUMO MÉDIO ANUAL.

4.5.1 CONSUMO ESPECÍFICO MÉDIO DE COMBUSTÍVEL.

O consumo de veículos varia segundo as condições de tráfego das cidades, composição da frota e a tecnologia empregada em sua construção e a idade do veículo.

Veículos antigos têm um consumo específico maior do que os mais recentes, pois a medida que ficam mais velhos o consumo aumenta em função de problemas no motor.

Não existem dados oficiais a respeito do consumo específico dos automóveis. Os valores utilizados são aqueles medidos em condições de teste. Sabe-se que o consumo nas condições de tráfego são maiores que nas condições de teste.

Os valores do consumo (em km/ℓ), inverso do consumo específico, utilizados pela Petrobrás, revistas especializadas, Quatro Rodas e Autoesporte, variam para os automóveis a gasolina entre 7,3 a 12,5. Para os veículos comerciais leves gasolina, entre 5,2 a 10,3; automóveis a álcool, entre 8,5 e 9,2; e comerciais leves a álcool entre 5,4 e 8,3. Os veículos “flex” utilizando gasolina ou álcool têm o valor máximo das citadas categorias.

Os valores entre 2002 e 2007 da *Autoesporte* estão disponíveis no site em edições anteriores e, o restante, nas revistas. A *Quatro Rodas* só disponibiliza os valores atuais em comparativos entre carros.

O consumo (em km/l) varia conforme a composição da frota de veículos. As mais antigas, do começo da década de 90, eram constituídas basicamente de veículos de 1.300 e 1.600 cilindradas, portanto, um consumo maior do que as frotas posteriores, nas quais predominam veículos de 1.000 cilindradas, mais econômicos.

TABELA 10 – PARTICIPAÇÃO DOS VEÍCULOS DE 1000 CC NO MERCADO DE VEÍCULOS.

	Nacional	Importado	Total	Veículos	%
1990	23013	-	23013	532.791	4,32
1991	67292	7	67299	583.072	11,54
1992	92573	386	92959	577.305	16,10
1993	241964	1547	243511	850.562	28,63
1994	447867	3058	450925	975.697	46,22
1995	595845	6253	602098	1.106.591	54,41
1996	701440	1678	703118	1.245.972	56,43
1997	871873	8246	880119	1.361.106	64,66
1998	702927	45547	748474	967.055	77,40
1999	605635	19810	625445	898.584	69,60
2000	754419	23185	777604	1.075.832	72,28
2001	878260	42129	920389	1.176.557	78,23
2002	801869	18266	820135	1.163.717	70,48
2003	699930	7500	707430	1.082.332	65,36
2004	741562	443	742005	1.263.447	58,73
2005	752203	32	752235	1.325.333	56,76

Fonte: Anfavea (2006)

Porém, pode-se observar que, a partir de 2001, houve uma queda no percentual de veículos de 1.000 cilindradas na frota brasileira, de 78% em 2001 para 56% em 2005 (vide tabela 10), devido ao aumento das vendas de carros com motores mais potentes. Essa queda deve ter influenciado o consumo para cima, mas não existem dados mais precisos para avaliar essa influência.

4.5.2 CONSUMO MÉDIO DE COMBUSTÍVEL.

O equacionamento utilizado para calcular o consumo médio específico (CM) em ℓ/km é o recomendado por La Rovere et al (2006), conforme descrito:

$$CM_{aa,\text{flex},m,t} = \theta_t CE_{gc,mg,m,t} \alpha \mu_{gc,t} \gamma_{m,t} \quad (10)$$

$$CM_{ah,\text{flex},m,t} = CE_{ah,ma,m,t} (1 - \alpha) \mu_{ah,t} \gamma_{m,t} \quad (11)$$

$$CM_{aa,mg,m,t} = \theta_t CE_{gc,mg,m,t} \gamma_{m,t} \quad (12)$$

$$CM_{gc,mg,m,t} = (1 - \theta_t) CE_{gc,mg,m,t} \gamma_{m,t} \quad (13)$$

$$CM_{ah,ma,m,t} = CE_{ah,ma,m,t} \gamma_{m,t} \quad (14)$$

$$CM_{gc,\text{flex},m,t} = (1 - \theta_t) * CE_{gc,m,t} \alpha_t \mu_{gc,t} \gamma_{m,t} \quad (15)$$

Onde:

m é o modelo do veículo.

t é o ano de fabricação do veículo.

$\mu_{gc,t}$ é a perda de eficiência devido a diferença da taxa de compressão da gasolina C no motor flex em relação à taxa exigida.

$\mu_{ah,t}$ é a perda de eficiência devido a diferença da taxa de compressão do etanol no motor flex em relação à taxa exigida.

α é o percentual de etanol na gasolina C.

Θ é a percentagem de etanol na gasolina.

γ é o fator de perda de eficiência acumulado do veículo.

$CM_{aa,\text{flex}}$ é o consumo médio de etanol anidro no motor flex.

$CM_{ah,\text{flex}}$ é o consumo médio de etanol hidratado no motor flex.

$CM_{aa,mg}$ é o consumo médio de etanol anidro no motor a gasolina.

$CM_{gc,mg}$ é o consumo médio de gasolina C no motor a gasolina.

$CM_{ah,ma}$ é o consumo médio de etanol hidratado no motor a etanol.

$CE_{gc,mg}$ é o consumo médio específico de gasolina C no motor a gasolina.

$CE_{ah,ma}$ é o consumo específico médio de etanol hidratado no motor a etanol.

O consumo médio anual (ℓ/km) dos veículos individuais é calculado a partir dos específicos e corrigido pelo fator de perda de eficiência devido ao envelhecimento.

Para os motores “flex”, a eficiência deve ser corrigida em relação aos motores a gasolina ou a álcool devido às diferentes taxas de compressão. Essas variáveis são denominadas de $\mu_{gasool,t}$ e $\mu_{alcool,t}$. Esses valores são dados na tabela 11.

TABELA 11 – VALORES DE μ PARA GASOLINA E O ETANOL.

COMBUSTÍVEL	ANO		
	2003	2004	2005
Gasolina	1,08	1,05	1,05
Etanol	1,05	1,15	1,15

Fonte: Cetesb (2004) apud La Rovere e al (2006)

A equação que calcula o fator acumulado é:

$$\gamma = \sigma^{(t-m+1)} \quad (16)$$

Onde:

γ – fator de perda de eficiência acumulado do veículo.

σ – fator igual a 1,003, representando uma perda anual de eficiência de 0,3% em função do envelhecimento do veículo.

$t-m+1$ é a idade do veículo.

4.6 CONSUMO TOTAL DE COMBUSTÍVEL

O volume total de combustível consumido pela área de transporte rodoviário no Brasil está apresentado na figura 10. Foram feitos os cálculos do consumo de gasolina e álcool hidratado das frotas entre 2001 e 2006 e comparados com os valores de consumo desses combustíveis publicados pelo Balanço Nacional de Energia (BEN), da Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE).

Uma análise comparativa feita pela EPE (2006), em conjunto com Petrobrás, ANP e Ministério da Agricultura (MAPA), mostra que a oferta de combustíveis baseada nos dados de importações e exportações e o consumo de combustíveis das referidas entidades demonstrava que havia uma diferença muito grande que só seria explicável dentro de um quadro de adulteração de combustíveis com a finalidade de burlar a cobrança de impostos.

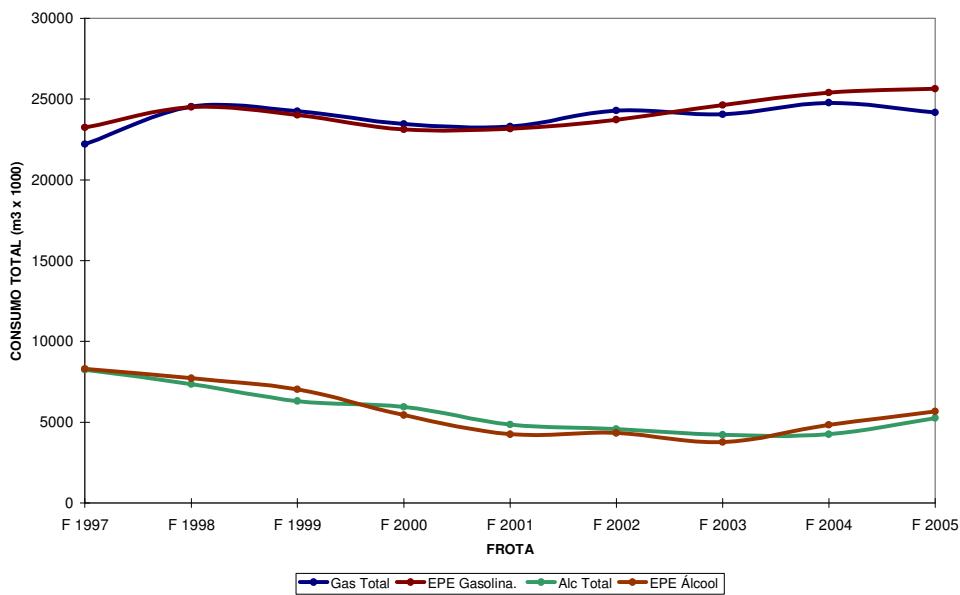


FIGURA 10 – CONSUMO DE COMBUSTÍVEIS.

Observação: Gasolina C, é a soma de álcool anidro mais a gasolina A.

A maioria dos valores históricos do consumo total estimado varia em torno de 3% do consumo publicado pela EPE, vide figura 10, portanto, as previsões da gasolina C podem ser consideradas boas, levando-se em conta as limitações da qualidade dos dados estatísticos.

Os dados do etanol deixam a desejar, pois os valores variam em sua maioria em torno 8% e outros em torno de 13% do consumo publicado pela Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE).

As diferenças existentes entre os dados calculados e os dados observados pela EPE são devidas ao aumento da intensidade do consumo da frota a etanol. A partir de 1998 o governo concedeu incentivos para os taxistas adquirirem este tipo de veículo e, desde então, o percentual de veículos de uso intensivo (táxi) predominou na frota a álcool.

A pesquisa realizada pelo IBOPE Solution, em setembro de 2006, encomendada pela União da Agroindústria Canavieira de São Paulo (UNICA) indica que a frota de táxi tem o dobro da quilometragem de veículo de passageiros normal.

Estima-se que essa intensidade pode durar até o ano de 2009, pois neste ano a frota de táxi terá sido convertida para veículos “flex”. O valor do aumento dessa intensidade situa-se entre o valor da frota normal e o utilizado pela Petrobrás para os Comerciais Leves.

Para o cálculo correto do consumo de gasolina C foi levado em consideração que parte da frota foi convertida para GNV. Na ausência de estatísticas a respeito das conversões realizadas, tanto em relação ao combustível, gasolina ou álcool, quanto em relação à categoria do veículo, automóvel e comercial leve, o consumo de GNV foi subtraído do total de gasolina consumida.

A base para essa decisão foram as estatísticas do Departamento de Trânsito do Rio de Janeiro (DETRAN-RJ) que indica que a quase totalidade das conversões (93%) é da gasolina para o GNV. Uma explicação para esse fato seria que o diferencial entre o preço do GNV e o álcool não propicia um retorno para o valor aplicado na conversão. Deve-se ser observado que a pesquisa IBOPE Solution indica que o estado do Rio de Janeiro é onde apresenta maior incidência de consumo de GNV.

As vendas de carros “flex” são um fenômeno recente, não existem indicativos seguros de quais são os percentuais de gasolina e etanol hidratado utilizados nesses carros. O valor da relação energética etanol/gasolina, publicado pela Volkswagen, vide figura 11, mostra que se o preço do etanol hidratado for menor que 70% do preço da gasolina se deve abastecer com o etanol.

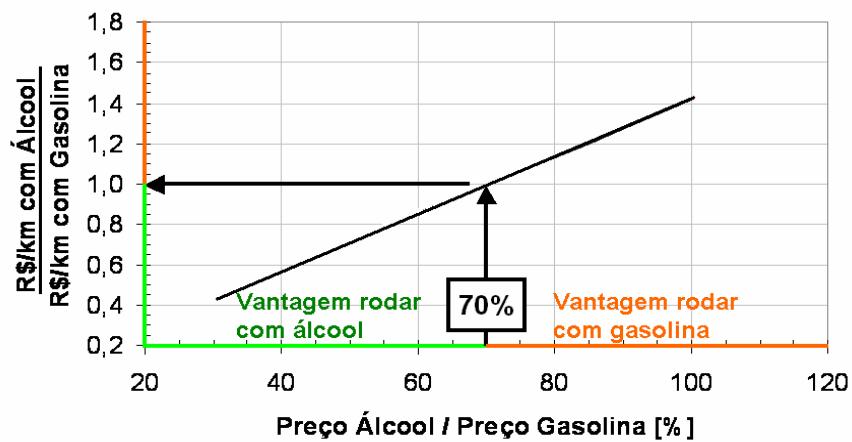


FIGURA 11 – MELHOR RELAÇÃO DE PREÇO ÁLCOOL/GASOLINA NO ABASTECIMENTO DO CARRO.

Fonte: Volkswagen (2007).

É importante lembrar que esses valores são médios. Quando o preço médio nacional do etanol for 70% da gasolina, nos estados produtores, São Paulo, por exemplo, esse valor estará bem abaixo de 70%, viabilizando assim a venda do etanol.

5 EMISSÕES DA FROTA DE VEÍCULOS LEVES.

Estimam-se neste capítulo as emissões de gases de efeito estufa para a frota de veículos leves, entre os anos 2001 e 2006, pelos métodos “Top Down” e “Bottom Up”, utilizando o consumo médio ou distância média anual por tipo de combustível, respectivamente.

A outra variável importante utilizada no cálculo são os fatores de emissão médios de cada combustível que são obtidos via testes laboratoriais e no campo.

5.1 ADAPTAÇÕES DOS MÉTODOS A REALIDADE NACIONAL.

Em ambos os métodos existem problemas para o cálculo das variáveis que devem ser solucionados: o primeiro é a inexistência de dados dos fatores de emissão e o outro é que da frota de motores a gasolina, que é utilizada para o cálculo do consumo médio ou distância média anual, deve ser descontada os veículos que foram convertidos para GNV.

A Cetesb/Proconve não disponibiliza oficialmente os fatores médios de emissão para CO₂, CH₄ e N₂O de veículos leves novos de cada categoria veicular. Serão utilizados fatores publicados por órgãos de pesquisa do Brasil e exterior, ou calculados por fórmulas recomendadas pelo IPCC.

Os fatores de emissão de um veículo aumentam com a idade, faz-se então necessário corrigi-lo aplicando um fator de deterioração.

Segundo Murgel et al.(1987), o Fator de Deterioração corresponde ao desgaste de peças e componentes que afeta as características do motor, aumentando especialmente as emissões de CO e VOC's. O mesmo não ocorre com o NOx visto que nos motores sem sistemas de controle existe uma tendência à diminuição na quantidade emitida desse gás porque com os danos nos anéis dos pistões há uma redução nos picos de temperatura¹⁰ dentro dos cilindros.

Para os gases CO₂, CH₄ e N₂O não existem equações para o cálculo dos Fatores de Deterioração para veículos nacionais, portanto não serão feita essas correções.

¹⁰ A temperatura é uma variável fundamental para formação do NO e por extensão o NOx, (vide Zeldovich apud Kilpinen)

Não existe uma estatística nacional da percentagem quantitativa de cada categoria de veículo e nem o tipo de combustível que foi convertido para GNV. A conclusão que se pode tirar é que todo e qualquer cálculo de emissões pelo método “bottom up” será limitado pela indisponibilidade de dados para a desagregação nos níveis exigidos pelo IPCC.

No método “Top-Down”, que utiliza o consumo médio anual, o desconto é mais simples, admite-se que a frota convertida para etanol hidratado é desprezível, ou seja, toda transformação foi feita para gasolina C. A referência para essa afirmação é a frota do estado do Rio de Janeiro, pois trata-se do maior produtor de GNV e um produtor de etanol de pouca importância. O Departamento de Trânsito, entretanto, registra apenas a conversão de 7% dos veículos entre essas modalidades.

Para o cálculo da gasolina total consumida, faz-se o desconto do GNV equivalente estimado pela equação:

$$V_{\text{gasolina eq}} = \frac{PCS_{\text{GNV}}}{PCS_{\text{gasolina}}} \times V_{\text{GNV}} \quad (17)$$

Onde:

$V_{\text{GASOLINA EQ}}$ é o volume de GNV transformado em gasolina.

V_{GNV} é o volume de GNV.

PCS_{GNV} é o poder calorífico do GNV.

PCS_{GASOLINA} é o poder calorífico da gasolina.

No capítulo 3 viu-se a importância de calcular a emissões pelo método “bottom-up”. Para tanto utiliza-se uma frota equivalente que é a soma das frotas de automóvel e comercial leve e subtraída da frota de GNV multiplicada pela relação entre os fatores de emissão da gasolina e GNV. Matematicamente:

$$F_{EQ} = AT + CL - 1,63 * GNV \quad (18)$$

Onde:

F_{EQ} é a frota equivalente.

AT é a frota de automóveis.

CL é a frota de comerciais leves.

O valor 1,63*GNV é a correção das emissões frota de GNV que é menor do que a gasolina.

5.2 EMISSÕES DE DIÓXIDO DE CARBONO.

5.2.1 EMISSÕES DE CO₂ PELA GASOLINA C - MÉTODO “TOP-DOWN”.

O cálculo das emissões de CO₂ é feito a partir das seguintes fórmulas:

$$E_{CO_2} = E_C * 44 / 12 \quad (19)$$

$$E_C = C_E * F_E * 10^{-3} \quad (20)$$

Onde:

E_{CO2} são as emissões de CO₂.

E_C são as emissões de carbono.

C_E é o consumo de energia em terajoule.

F_E é o fator de emissão de carbono (ton C/TJ).

10⁻³ é o fator de conversão de toneladas de carbono para gigagramas.

A tabela 12 mostra as emissões provenientes da gasolina C no Brasil. Para o cálculo de gasolina C em terajoules utilizou-se o fator do Balanço Energético Nacional (2007) (BEN) onde 1 m³ gera 32,22 gigajoules ou 0,03222 terajoules.

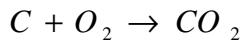
TABELA 12 – EMISSÕES DE CO₂ DA GASOLINA C PARTIR DOS FATORES DE EMISSÃO.

	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Gasolina C (m ³ /ano*1000)	23.344	24.091	23.806	24.498	23.934	23.076
Gasolina (TJ)	752.144	776.212	767.029	789.326	771.153	743.509
Fator emissão (ton C/TJ)	18,9	18,9	18,9	18,9	18,9	18,9
Emissões (Ton C/ano*1000)	14216	14670	14497	14918	14575	14052
Emis Totais CO ₂ (Ton C/ano*1000)	52124	53791	53155	54700	53441	51525

Fonte do fator de emissão: IPCC(2006)

Para efeito de comparação foram calculadas as emissões a partir da composição centesimal da gasolina C produzidas pela Refinaria Gabriel Passos (REGAP) da Petrobrás. A tabela 13 mostra suas características, que não estão disponíveis oficialmente.

Tomando como base o percentual de carbono na gasolina pode-se fazer a seguinte estimativa das emissões de CO₂.



Sabe-se que 12 kg (peso molecular) de carbono reagem com 32 kg de oxigênio gerando 44 kg de dióxido de carbono.

Assim 1 kg de gasolina C, contendo 0,767 kg de carbono (vide tabela 13), gera $44/12 * 0,767$ kg de dióxido de carbono, ou seja, 2,81 kg.

Deve-se alertar que estão incluídos nos cálculos o carbono na forma de monóxido de carbono, metano e compostos voláteis de carbono.

Fazendo os mesmos cálculos para Gasolina A adotando a densidade 0,7495 (vide tabela 13) para conversão de m³/ano para ton/ano, obtém-se $44/12 * 0,843$ que são aproximadamente 3,1 kg.

TABELA 13 - CARACTERÍSTICAS DA GASOLINA PRODUZIDA NA PETROBRAS/REGAP

CARACTERÍSTICAS	Gasolina A	Gasolina A	Gasolina	Gasolina C	Gasolina C
	Comum	Premium	Padrão	Comum	Premium
Álcool Etílico, %vol	Zero	Zero	Zero	20-25	20-25
Densidade, 20/4 °C	0,741	0,7657	0,7473	0,7495	0,7686
Hidrogênio, % massa	13,7	12,3	---	13,6	12,8
Carbono, % massa	84,3	86,3	---	76,7	78,2
Tolueno, % volume	3,31	8,5	2	3,31	7,38
Benzeno, % volume	0,6	1,5	0,98	0,6	1,55
Saturados, % volume	---	46,5	37,8	---	---
Olefinas, % volume	---	16,1	32,7	---	---
Aromáticos,%volume	---	37,4	29,5	---	---

Fonte: Dupin e al. (1998)

TABELA 14 – CÁLCULO DAS EMISSÕES A PARTIR DA COMPOSIÇÃO CENTESIMAL DA GASOLINA C.

	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Gas C (m3/ano x 1000)	23344	24091	23806	24498	23934	23076
Gas C (ton/ano x 1000)	17496	18056	17843	18361	17939	17295
Emissões Totais (Ton CO2/ano x 1000)	49165	50738	50138	51595	50407	48600
Diferença entre as tabelas 12 e 14 (%).	6,0	6,0	6,0	6,0	6	6,0

Comparando-se os métodos, observa-se que o cálculo a partir da composição centesimal é 6% mais baixo do que o valor obtido pelo cálculo a partir dos fatores de emissão do IPCC.

A diferença é esperada na medida em que as emissões calculadas a partir dos valores locais diferem daqueles calculados a partir de valores mais gerais.

A tabela 15 mostra as emissões provenientes do etanol hidratado. Para o cálculo da sua energia em terajoules utilizou-se o fator do BEN (2007) de 1 m³ gerando 21,34 gigajoules ou 0,02134 terajoules. O fator de emissão é de 14,81, conforme IPCC (2006). Para o etanol anidro utilizou-se o fator do BEN (2007) onde 1 m³ gera 22,35 gigajoules ou 0,0223 terajoules.

TABELA 15 – EMISSÕES DE CO₂ PROVENIENTE DO ETANOL HIDRATADO MÉTODO TOP-DOWN.

	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Etanol anidro (m3/ano x 1000)	4949	6143	5832	6125	5984	4615
Etanol anidro (TJ)	110609	137301	130356	136883	133731	103150
Etanol anidro (Ton C/ano*1000)	1638	2033	1931	2027	1981	1528
Emis. Totais CO ₂ ((Ton C/ano*1000)	6006	7456	7079	7433	7262	5601
Etanol hidratado (m ³ /ano*1000)	5247	5533	5358	5993	6827	8316
Etanol hidratado (TJ)	111971	118074	114340	127891	145688	177463
Emissões ((Ton C/ano*1000)	1658	1749	1693	1894	2158	2628
Emis. Totais CO ₂ ((Ton C/ano*1000)	6080	6412	6209	6945	7911	9637
Total	12087	13868	13288	14378	15173	15238

Observação: essas emissões são devidas somente à queima de etanol em motores, não abrangendo toda a cadeia de carbono

Deve-se observar que as emissões são compensadas pela absorção de CO₂ da atmosfera pela cana-de-açúcar, matéria prima para produção de etanol, não serão, portanto, contabilizadas no balanço dos gases de efeito estufa.

5.2.2 EMISSÕES EVITADAS DE CO₂ PELA GASOLINA C - MÉTODO “TOP-DOWN”.

O consumo de etanol pela frota nacional faz com que as emissões de gases de efeito estufa do setor de transporte sejam substancialmente inferiores às que poderiam ser alcançadas se o único combustível utilizado fosse a gasolina pura.

Partindo da observação de que a substituição de carbono de origem fóssil por carbono de biocombustíveis reduz as emissões de CO₂, pode-se estimar a diferença entre aquelas provenientes de uma situação hipotética, onde a frota de veículos consumisse exclusivamente gasolina pura e as correspondentes à situação real, onde a frota é composta de veículos que consomem uma mistura de gasolina/etanol anidro e veículos que demandam álcool hidratado.

Para o cálculo da energia da Gasolina C em terajoules utilizou-se o fator do BEN (2007) de 1 m³ que gera 32,22 gigajoules ou 0,0322 terajoules. O fator de emissão é de 18,9, conforme IPCC (2006).

TABELA 16 – EMISSÕES EVITADAS DE CO₂ A PARTIR DOS FATORES DE EMISSÃO.

	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Consumo Gasolina A pura (m ³ *1000)	23.344	24.091	23.806	24.498	23.934	23.076
Gasolina (TJ)	822.176	848.485	838.447	862.820	842.955	812.737
Emissões Fósseis (Ton C/ano*1000)	15539	16036	15847	16307	15932	15361
Emissões Fósseis CO ₂ (Ton CO ₂ /ano*1000)	56977	58800	58104	59793	58417	56323
Consumo Gasolina A/ etanol (m3/ano x 1000)	18395	17948	17974	18374	17951	18461
Gasolina A / etanol (TJ)	647874	632121	633028	647115	632217	650189
Emissões Fósseis (Ton C/ano*1000)	12245	11947	11964	12230	11949	12289
Emissões CO ₂ (Ton CO ₂ /ano*1000)	44898	43806	43869	44845	43813	45058
Emissões Evitadas (Ton CO ₂ /ano x 1000)	12079	14994	14236	14948	14604	11265

Fonte do fator de emissão: IPCC(2006)

TABELA 17 – EMISSÕES EVITADAS DE CO₂ A PARTIR DA COMPOSIÇÃO CENTESIMAL DA GASOLINA C.

	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Consumo Gasolina A pura (m3/ano x 1000)	23344	24091	23806	24498	23934	23076
Consumo Gasolina A pura (ton/ano x 1000)	17298	17851	17640	18153	17735	17099
Emissões Fósseis (Ton CO ₂ /ano*10 ⁶)	53624	55339	54685	56274	54979	53008
Consumo Gasolina A/ etanol (m3/ano x 1000)	18395	17948	17974	18374	17951	18461
Consumo Gasolina A/ etanol (ton/ano x 1000)	13631	13299	13318	13615	13301	13679
Emissões Fósseis reais (Ton CO ₂ /ano*10 ⁶)	42255	41228	41287	42206	41234	42406
Emissões Evitadas (Ton CO ₂ /ano x 1000)	11368	14112	13398	14069	13745	10602
Diferença entre as tabelas 16 e 17 (%).	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2

Nota: A densidade da gasolina A foi considerada como o valor 0,741 vide tabela 13.

5.2.3 EMISSÕES DE CO₂ PELA GASOLINA C – MÉTODO “BOTTOM-UP”.

Utiliza-se a equação 18, ou seja, admite-se uma frota equivalente, que é a soma da frota de automóveis com a comercial leve e subtraída da frota de GNV, multiplicada pela relação entre os fatores de emissão da gasolina e GNV.

Foram empregados os fatores de emissão de CO₂ (tabela 18) proposto por Álvares (2007) em veículos leves a gasolina C. Na inexistência desses fatores entre os anos 2002-2006, foi utilizado o mesmo do ano de 2001.

TABELA 18 – FATORES DE EMISSÃO DE CO₂ PARA GASOLINA C.

Ano –Modelo.	Fatores de Emissão Total. (kg CO ₂ / km)	Fatores de Emissão (kg CO ₂ / km)
Anterior a 1992	0,175	0,147
92	0,193	0,163
93	0,193	0,163
94	0,193	0,163
95	0,207	0,174
96	0,214	0,180
97	0,217	0,183
98	0,217	0,183
99	0,217	0,183
00	0,217	0,183
01	0,217	0,183

Fonte: Álvares (2007)

TABELA 19 – EMISSÕES DE CO₂ DA GASOLINA C METODO “BOTTOM UP”
(gigagramas de CO₂)

	2001	2002	2003	2004	2005	2006
1980-90	3596	2643	14651	11897	9871	8641
1991	5109	1282	1122	1012	878	754
1992	1569	1443	1272	1155	1008	871
1993	2648	2453	2180	1995	1753	1525
1994	4263	3980	3564	3287	2910	2549
1995	6835	6429	5801	5390	4806	4240
1996	7906	7487	6805	6369	5722	5085
1997	9436	8992	8229	7759	7022	6285
1998	7709	7388	6804	6461	5774	5314
1999	6428	6188	5730	5474	4864	4564
2000	7755	7490	6966	6692	4860	5652
2001	2519	6944	6474	6235	6693	5292
2002		3252	7078	6854	5465	5916
2003			1706	5351	5021	4643
2004				1509	4582	4502
2005					2320	2134
2006						
	65.774	65.973	78.380	77.441	73.548	67.442
Diferença entre as tabelas 12 e 19 (%)	20,8	22,6	47,4	41,6	37,6	30,9

5.2.4 EMISSÕES DE CO₂ PELA PELO ETANOL HIDRATADO – MÉTODO “BOTTOM-UP”.

Utiliza-se a equação 18, ou seja, admite-se uma frota equivalente que é a soma-se a frota de automóveis com a comercial leve e subtraída da frota de GNV multiplicada pela relação entre os fatores de emissão da gasolina e GNV.

Foram utilizados os fatores de emissão de CO₂ (tabelas 20) proposto por Álvares (2007) em veículos leves a etanol hidratado. Na inexistência desses fatores entre os anos 2002-2006, foi utilizado o mesmo do ano de 2001.

TABELA 20 – FATORES DE EMISSÃO DE CO₂ PARA O ETANOL HIDRATADO

Ano –Modelo.	Fatores de Emissão Total. (kg CO ₂ / km)
Anterior a 1992	0,174
92	0,166
93	0,166
94	0,166
95	0,165
96	0,173
97	0,175
98	0,175
99	0,175
00	0,175
01	0,175

Fonte: Álvares (2007)

TABELA 21 – EMISSÕES DE CO₂ DO ETANOL HIDRATADO MÉTODO “BOTTOM UP”.

Emissões (Gigagramas)	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Automóvel	6.245	6.748	6.522	6.813	6069	4632
Comercial Leve	1127	1067	968	853	772	629
Automóvel Flex	0	0	35	359	1.133	3.582
Comercial Leve Flex	0	0	12	101	247	1466
Total	7372	7814	7536	8126	8221	10310
Diferença entre as tabelas 15 e 21 (%).	63	77	76	77	84	48

5.3EMISSÕES DE METANO E ÓXIDO NITROSO

Utiliza-se a equação 18, ou seja, admite-se uma frota equivalente que é a soma da a frota de automóveis com a comercial leve e subtraída da frota de GNV multiplicada pela relação entre os fatores de emissão da gasolina e GNV.

5.3.1 EMISSÕES DE CH₄ PELA GASOLINA C – MÉTODO “BOTTOM-UP”.

Não existem, também, fatores de emissão CH₄ para a frota nacional. Aqui se adotou o mesmo método que foi aplicado no Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões de Gases de Efeito Estufa.

Parte-se do princípio que os hidrocarbonetos totais (HC) constituem-se da soma de metano (CH₄) e de compostos orgânicos voláteis não metânicos (COVNM).

As emissões evaporativas também são constituídas de COVNM, que é obtida pela seguinte equação:

$$COVNM = HC - CH_4 + Emis._{Evap.} \quad (21)$$

Para o CH₄ foi estimado um fator de emissão que mantivesse a relação entre o CH₄ e o NMVOC que consta do IPCC (1997) no volume 3 pg.1.81, tabela 1-36.

$$CH_4 / NMCOV = 0,0132 \quad (22)$$

5.3.2 EMISSÕES DE CH₄ PELO ETANOL HIDRATADO – MÉTODO “BOTTOM-UP”.

Para as emissões de CH₄ do etanol hidratado existem fatores de emissão para a frota nacional para método “bottom-up”, tabela 23, publicado pelos Revised Guidelines (2006) do IPCC. Para veículos mais novos foram atribuídos os valores menores da faixa, enquanto que para os mais antigos, os valores mais altos da faixa.

TABELA 22 - EMISSÕES DE CH₄ PROVENIENTE DA GASOLINA C NO BRASIL - METODO “BOTTOM UP” (gigagramas de CO₂)

ANO	2001	2002	2003	2004	2005	2006
1961-80	4287	3665	2933	2346	1922	1665
1980-90	6248	5458	4448	3612	2997	2623
1991	286	261	228	206	179	154
1992	215	197	174	158	138	119
1993	308	285	253	232	204	177
1994	466	436	390	360	318	279
1995	697	656	592	550	490	433
1996	585	554	504	471	424	376
1997	574	547	501	472	427	382
1998	380	364	335	318	284	262
1999	309	297	275	263	234	219
2000	344	333	309	297	216	251
2001	104	287	268	258	277	219
2002		135	293	284	226	245
2003			71	221	208	192
2004				62	190	186
2005					96	88
2006						
	14.804	13.476	11.574	10.111	8.829	7.849

TABELA 23 - FATORES EMISSÃO PARA CH₄ DO ETANOL HIDRATADO.

	CH ₄ (em mg/km)	
	Carros*	Caminhões **
Default	18	260
Mínimo	13	77
Máximo	84	880
Default ¹	27 - 45	

FONTE: * Cestesb (2004&2005) e **Usepa (2004b) apud 2006, Revised Guidelines IPCC.

TABELA 24 - EMISSÕES CH₄ PELO ETANOL HIDRATADO

Emissões (ton)	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Automóvel	1.594	1.707	1.629	1.676	1.466	1.107
Comercial Leve	285	267	239	209	188	152
Automóvel Flex	-	-	6	60	185	569
Comercial Leve Flex	-	-	2	17	40	105
Total	1.879	1.974	1.876	1.961	1.879	1.933

5.3.3 EMISSÕES DE N₂O PELA GASOLINA C – MÉTODO “BOTTOM-UP”.

Na maioria dos países não são feitas análises para detectar as emissões de N₂O em veículos leves, em contraste com o número de medidas que são executadas para análise de gases poluentes (por exemplo, CO, NO_x e HC). As emissões de N₂O não são reguladas na maioria de países, observa-se também que o pequeno número de medidas executadas em sistemas onde existe conversão catalítica.

A frota nacional não possui fatores de emissão para o N₂O. Para a estimativa dessas emissões foram utilizados os fatores de emissão do modelo Copert IV, publicado no Revised Guidelines (2006) do IPCC para veículos europeus a gasolina, já que os mesmos são constantes em mg/km para diferentes tecnologias. As mesmas considerações foram feitas no Primeiro Inventário Brasileiro de Gases de Efeito Estufa.

**TABELA 25 – FATORES DE EMISSÃO DO N₂O PARA GASOLINA EUROPÉIA
- (Modelo Copert IV) em mg/km**

Classe Tecnológica	Urbano		Rural	Rodovia
	P. Frio	F. Normal		
	Pré - Euro	10	10	6,5
Automóveis	Euro 1	38	22	17
	Euro 2	24	11	4,5
	Euro 3	12	3	2,0
	Euro 4	6	2	0,8
	Pré - Euro	10	10	6,5
Comerciais	Euro 1	122	52	52
Leves	Euro 2	62	22	22
	Euro 3	36	5,0	5,0
	Euro 4	16	2,0	2,0

Fonte: IPCC (2006)

Para o cálculo das emissões dos modelos mais antigos podem ser utilizados os fatores de emissão do pré-Euro (antes de 1990) e Euro I (1991-1993), para os modelos mais recentes os fatores de emissão Euro 2 (1994-2000) e Euro 3 (2001-2006).

Os avanços tecnológicos aplicados no motor dos veículos propiciam um menor tempo de residência dos gases, possibilitando a queda nos valores de NO formado, por extensão de N₂O e NO₂.

**TABELA 26 - EMISSÕES N₂O PELA GASOLINA C.
- em gigagramas (Gg)**

	2001	2002	2003	2004	2005	2006
1961-80	141	121	97	77	63	55
1980-90	206	180	147	119	99	86
1991	297	271	237	214	186	159
1992	301	277	244	221	193	167
1993	508	470	418	382	336	292
1994	364	340	305	281	249	218
1995	545	512	462	430	383	338
1996	610	577	525	491	441	392
1997	717	684	626	590	534	478
1998	586	562	517	491	439	404
1999	489	471	436	416	370	347
2000	590	570	530	509	370	430
2001	46	128	119	115	123	98
2002		60	130	126	101	109
2003			31	99	93	86
2004				28	84	83
2005					43	39
2006						
	5.400	5.222	4. 283	4.590	4.106	3.771

5.3.4 EMISSÕES DE N₂O PELO ETANOL HIDRATADO – MÉTODO “BOTTOM-UP”.

Para as emissões de N₂O do etanol hidratado existem fatores de emissão para a frota nacional para método “bottom-up”, publicado pelos “Revised Guidelines” (2006) do IPCC, tabela 27.

As emissões de N₂O dependem da temperatura adiabática de chama e do tempo de residência. Os modelos mais recentes, os veículos fabricados entre 2001 e 2006, são menos poluentes porque a tecnologia reduziu o tempo de residência. Para os modelos anteriores ao ano 2001, à medida que vão envelhecendo existe menos formação de NO, por extensão NO₂ e N₂O, porque a existência de folgas nos cilindros reduz a temperatura.

TABELA 27 - FATORES EMISSÃO PARA N₂O DO ETANOL HIDRATADO.

	N₂O (em mg/km)	
	Carros*	Caminhões**
Default	Nd	41
Mínimo	Nd	13
Máximo	Nd	123
Default ¹	12 – 47	

Fonte: * Cestesb (2004&2005) e **Usepa (2004b) apud 2006, Revised Guidelines IPCC.

Foi adotado o valor “default” da tabela, distribuindo a faixa de valores da seguinte forma: para os modelos entre 2001 e 2006 foram aplicados os valores altos da tabela e para os veículos mais antigos foram aplicados os valores mais baixos da tabela.

TABELA 28 - EMISSÕES N₂O PELO ETANOL HIDRATADO

Emissões (ton)	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Automóvel	1.685	1.791	1.690	1.713	1.474	1.101
Comercial Leve	299	276	244	212	189	152
Automóvel Flex	-	-	6	60	185	569
Comercial Leve Flex	-	-	1	10	22	54
Total	1.984	2.068	1.942	1.995	1.870	1.876

5.4 RESUMO DAS EMISSÕES de CO₂, CH₄ e N₂O.

A análise do período que vai de 2001 a 2006 mostra que as emissões de CO₂ e N₂O da gasolina C acompanham o consumo, enquanto que as emissões de CH₄ caem ano a ano.

TABELA 29 – RESUMO DAS EMISSÕES (em gigagramas de CO₂ Equivalente)

Emissões (Gg CO ₂ eq.)	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Emissões CO ₂ da Gasolina C Método “Top down”	52.124	53.791	53.155	54.700	53.441	51.525
Emissões CO ₂ da Gasolina C Método “Bottom up”	65.774	65.973	78.380	77.441	73.548	67.442
Emissões CH ₄ Gasolina C Método “Bottom up”	340	310	266	233	203	181
Emissões N ₂ O Gasolina C Método “Bottom up”	1.674	1.619	1.495	1.423	1.273	1.169
Emissões CO ₂ do Etanol Hidratado Método “Top down”	12087	13868	13288	14378	15173	15238
Emissões CO ₂ do Etanol Hidratado Método “Bottom up”	7372	7814	7536	8126	8221	10310
Emissões CH ₄ do Etanol Hidratado Método “Bottom up”	43	45	43	45	43	44
Emissões N ₂ O do Etanol Hidratado Método “Bottom up”	615	641	602	618	580	581

Embora partindo de um mesmo consumo nacional, pode-se constatar que os valores encontrados pelo método “Bottom-up” são superiores ao encontrado pelo “Top-down” os valores variam entre 20,8% a 47,4%, (tabela 29). Teoricamente eles deveriam ser inferiores,

tendo em conta que no último método (“top down”) as emissões de CH₄, CO e o carbono particulado são contabilizados como CO₂.

Para o etanol hidratado, a comparação entre os valores encontrados para as emissões pelos dois métodos, (vide tabela 29), permite constatar também que os valores encontrados pelo método “Bottom-Up” variam entre 48% e 84% a mais que os encontrados pelo método “Top Down”.

Em ambos os casos, as diferenças de valores entre os métodos “Bottom-up” e “Top-down” se situam principalmente nos níveis de desagregação obtidos; não possível separar o consumo de GNV, gasolina, etanol por categorias de veículos. Deve-se considerar, também, que os dados estatísticos nacionais, frota de veículos e o consumo específico médio têm provavelmente erros razoáveis com relação aos valores reais.

O CO₂ teve incremento nas suas emissões entre 2001 e 2002, reflexos, ainda, da crise do abastecimento de etanol que reduziu o volume de produção dos veículos da categoria para aproximadamente 500 unidades. Os aumentos não foram maiores devido às dificuldades econômicas pela qual o país passou no período.

Com a redução da frota de etanol hidratado, podia-se esperar maiores aumentos das emissões de CO₂ fóssil, porém isso não ocorreu devido à mudança na estrutura da frota (ver Tabela 5), a conversão de motores a gasolina para GNV incentivada pelo governo atingiu volumes consideráveis, especialmente entre os veículos que são utilizados intensamente, taxis e comerciais leves.

Embora tenha havido uma redução drástica na produção de motor a etanol hidratado, os valores das emissões de CO₂ continuam com um pequeno incremento. São dois os motivos para a ocorrência desse aumento: o envelhecimento da frota e os incentivos dados pelo governo os donos de taxis para adquirir veículos da categoria. Estes são utilizados intensivamente aumentando o consumo de combustível.

A introdução do motor “flex” em 2003 mudou o perfil da frota brasileira. A partir de 2004 observa-se uma queda das emissões, devido a um maior consumo de etanol hidratado e uma redução do consumo de gasolina C.

Os valores das emissões de CH₄ para a gasolina C estão consistentes com a evolução dos motores, embora o consumo tenha aumentado no período, há uma pequena redução nas emissões. Os resultados obtidos estão de acordo com a queda observada pela Cetesb nos valores dos fatores de emissão de hidrocarbonetos, vide figura 12, da qual o metano faz parte.

Observa-se, também, que a queda nos fatores e por extensão no montante de emissões de CH₄ e CO, contribuem para um pequeno aumento de CO₂.

Os valores das emissões de CH₄ para o etanol hidratado mantém-se praticamente constante embora o consumo tenha sofrido variações no período. A evolução dos motores contribuiu para uma redução, os resultados obtidos estão de acordo com a queda observada pela Cetesb nos valores dos fatores de emissão de hidrocarbonetos, vide figura 12, da qual o metano faz parte.

Os valores das emissões de N₂O da gasolina C (tabela 29) para período entre 2001 e 2006 diminuem de maneira significativa, enquanto que para o etanol hidratado têm um pequeno incremento no período entre 2001 e 2002, porém a partir de 2004 sofre uma redução significativa.

Uma explicação para esse fato é o envelhecimento das frotas de gasolina C e etanol hidratado, cuja fabricação foi reduzida ou descontinuada com a entrada do veículo “flex”. Este tem menor emissão devida à evolução dos motores. Observa-se que os valores a partir de 2004 acompanham a queda dos fatores de emissão do NOx, figura 14.

Os motivos para queda das emissões são uma legislação mais exigente que para ser cumprida necessitou de avanços tecnológicos aplicados nos motores e combustíveis.

Ressaltam-se, também, as incertezas associadas ao processo de cálculo das emissões de CH₄ e N₂O que são muito altas.

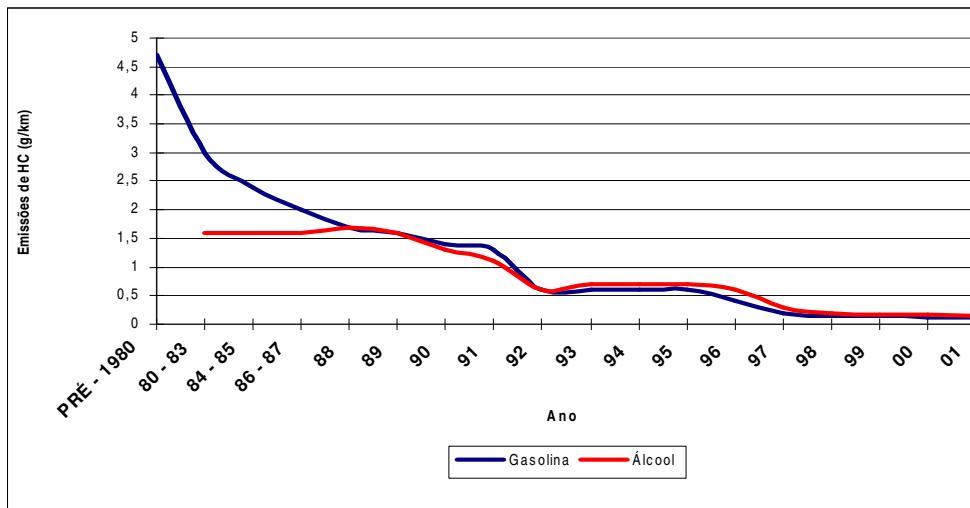


FIGURA 12 – VARIAÇÃO DOS FATORES DE EMISSÃO DOS HC.
Fonte: Proconve/Cetesb (2007)

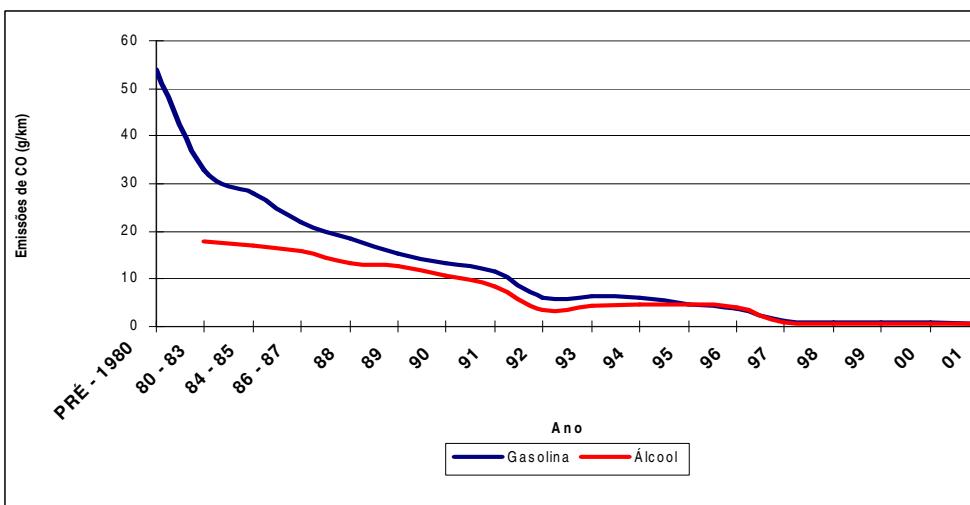


FIGURA 13 – VARIAÇÃO DOS FATORES DE EMISSÃO DO CO.
Fonte: Proconve/Cetesb (2007)

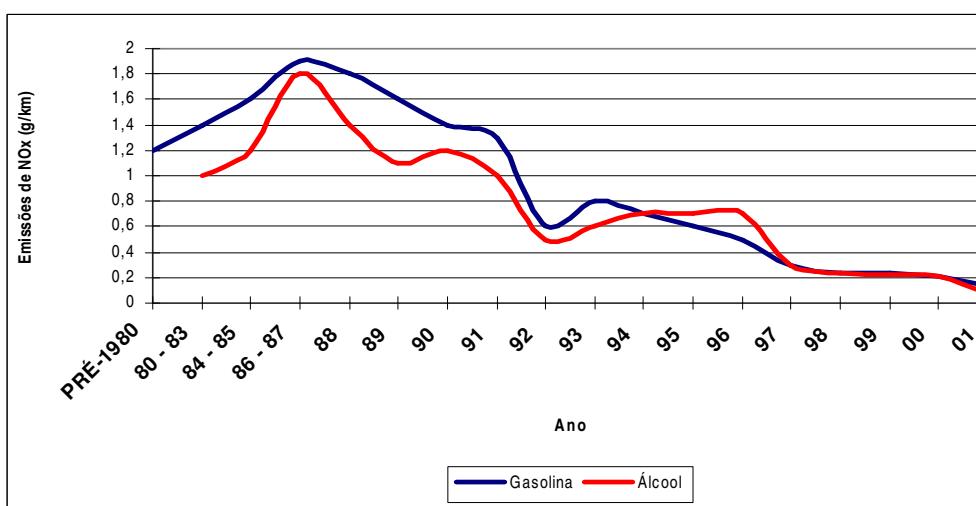


FIGURA 14 – VARIAÇÃO DOS FATORES DE EMISSÃO DO NOx.
Fonte: Proconve/Cetesb (2007)

5.5 COMPARAÇÃO COM OS RESULTADOS OBTIDOS PELO PRIMEIRO INVENTÁRIO BRASILEIRO POR FONTES MÓVEIS.

A comparação entre as emissões calculadas por esta dissertação e as do Primeiro inventário Brasileiro é apresentada na tabela 30.

No período entre 1994 e 2001, o consumo médio de Gasolina C teve um aumento de 53,4% enquanto que o etanol hidratado uma redução de 96,5%, BEN (2007).

TABELA 30 – COMPARAÇÃO COM AS EMISSÕES CALCULADAS PELO PRIMEIRO INVENTÁRIO BRASILEIRO POR FONTES MÓVEIS (EM GIGAGRAMAS).

Emissões Calculadas pelo Primeiro Inventário

ANO	GASOLINA C			ETANOL			EMISSÕES EVITADAS
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	
1990	15258	6,8	0,82	11213	1,6	0,34	13248
1991	16907	6,9	0,88	11495	1,7	0,35	14063
1992	17590	6,3	0,89	10537	1,5	0,32	13843
1993	19235	5,9	0,95	10870	1,5	0,33	14643
1994	21940	5,7	1,04	11048	1,4	0,34	15905

Emissões Calculadas por esta Dissertação

2001	52124	14,8	5,4	12087	1,9	2,0	11368
2002	53791	13,5	5,2	13868	2,0	2,1	14112
2003	53155	11,6	4,8	13288	1,9	1,9	13398
2004	54700	10,1	4,6	14378	2,0	2,0	14069
2005	53441	8,8	4,1	15173	1,9	1,9	13745
2006	51525	7,8	3,8	15238	1,9	1,9	10602

Aumento Verificado no Período 1994-2001

(%)	137,6	159,6	419,2	9,4	35,7	488,2	-28,5
-----	-------	-------	-------	-----	------	-------	-------

Considerando-se o período de 1994 a 2001 pode-se observar que o incremento das emissões de CO₂, CH₄ e N₂O pela queima de gasolina C foram respectivamente 137,6%, 159,6% e 440% enquanto que o etanol hidratado de 9,4%, 3,5 e 488,2.

Os valores de emissões de CO₂ e CH₄ tanto para gasolina como para o etanol estão consistentes com os acontecimentos registrados no período quando houve uma queda nas vendas

veículos a etanol hidratado, por conta da crise de abastecimento, permanecendo a frota praticamente estacionada; e um aumento dos veículos a gasolina.

Quanto ao N₂O os valores das emissões para a gasolina estão consistentes, porém para o etanol deveriam ter sofrido uma redução no período para estar de acordo com o modelo teórico.

As emissões evitadas caíram no período de 1994 a 2001 de 15.905 Gg/ano para 11.318 Gg/ano, uma redução de 28,5%. Essa redução está de acordo com a redução do consumo de etanol hidratado.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.

Os objetivos estabelecidos para este trabalho foram fazer uma avaliação das emissões de gases de efeito estufa (CO_2 , N_2O e CH_4), proveniente dos veículos automotores leves, quando se adiciona etanol no combustível e analisar criticamente a adaptação da metodologia estabelecida pelo IPCC para as condições nacionais. Não foi analisada, portanto, a metodologia e o equacionamento publicado pelo IPCC.

A seguir são apresentados os principais resultados.

Para calcular a soma total das emissões dos gases de efeito estufa multiplica-se o potencial de aquecimento global (vide capítulo 2.1.2) pela quantidade de gás emitida. As emissões por veículos leves no Brasil estão totalizadas na figura 15.

As emissões de gases de efeito estufa tiveram uma oscilação no período de 2001 a 2006. Essa oscilação se deve aos seguintes fatores:

- A mudança na estrutura da frota, que se constitui cada vez menos de carros movidos a etanol, passando de 37% em 2001 para 35% em 2004, seguido do lançamento do veículo “flex”, que consome etanol e que em 2006 representou em 20% da frota.
- O crescimento da frota de veículos.
- A melhoria na eficiência do veículo nacional, que ao aumentar a eficiência reduz as emissões relacionadas à queima incompleta, ou seja, redução das emissões de CH_4 .
- Redução das emissões de N_2O pelas melhorias tecnológicas do motor.
- Dificuldades na economia brasileira entre 2001 e 2002, seguida de aumento na atividade produtiva a partir de 2003.

Entre 2001 e 2002 houve uma redução na venda de veículos, os movidos a gasolina, por exemplo, caíram de 1.412.420 para 1.283.963, Anfavea (2007) devido a uma queda na atividade econômica.

O consumo dos combustíveis teve um pequeno incremento, BEN (2007). O aumento de etanol ocorreu devido à mudança no percentual da mistura.

A partir de 2003 com entrada do veículo “flex” o cenário muda com a retomada do consumo de etanol hidratado, que manteve a preferência do consumidor devido aos seus preços mais baixos.

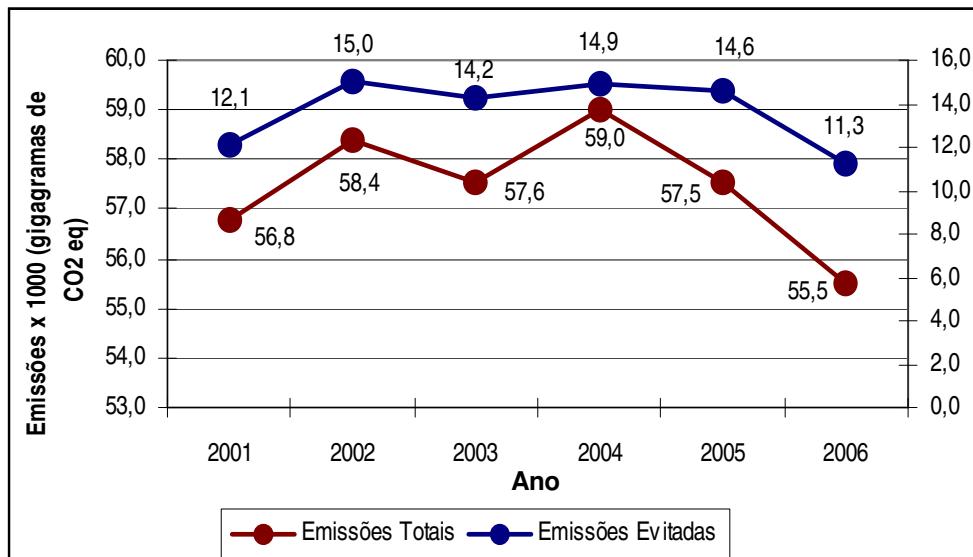


FIGURA 15 – EMISSÕES EVITADAS E TOTAIS DE GASES DE EFEITO ESTUFA

Observa-se que no período houve, também, um aumento da frota devido a aumento da atividade econômica e por extensão da demanda de combustíveis, porém houve um aumento relativamente pequeno nas emissões.

As emissões totais no período de 2003 a 2006 expressas em gigagramas de CO₂ equivalente, mostram uma tendência de queda, vide figura 15, estando em concordância com o consumo de gasolina que no período teve uma queda de 1,0%, enquanto que o etanol hidratado um aumento de 55,2%.

As emissões evitadas aumentaram no período 2001 e 2002 de aproximadamente 12.100 para 15.000 Gg/ano um incremento de 24%. Ele é o resultado do aumento dos percentuais de etanol anidro na gasolina de 20% para 25 (vide figura 2).

Entre 2003 e 2005 elas oscilaram, para cair em 2006, nesse período ela acompanham as reduções e aumentos dos percentuais de etanol anidro na gasolina.

Na metodologia para determinação da frota nacional de veículos e na qualidade dos dados estatísticos existentes foram observadas as seguintes deficiências.

A equação de Gompertz é empregada na determinação do sucateamento da frota nacional baseada na idade do veículo. Não existem, porém, estudos que demonstrem sintonia entre os dados de sucateamento e aqueles referentes a acidentes com perda total. Observa-se, por exemplo, que um veículo que tenha menos de um ano de idade não deve ser sucateado, a não ser por um acidente por perda total, entretanto a utilização prevê um certo número de veículos deve ser retirado da frota nessa idade.

Deve-se considerar, também, que os valores dos coeficientes a e b para cálculo da frota de veículos (equação 8) estão defasados, pois foram calculados com base no PNAD de 1988, portanto há 20 anos atrás. Esses valores não puderam ser atualizados porque da citada data até 2007 não houve outra pesquisa do IBGE.

A solução para esses problemas seria retomar a metodologia do antigo Grupo de Estudos para a Integração da Política de Transportes - Geipot e numa ação coordenada entre o Departamento Nacional de Trânsito e Departamentos Estaduais recadastrar a frota nacional. Quando for feito devem-se anotar os dados da quilometragem percorrida pelos veículos e com essa base de dados será possível calcular a distância média percorrida após uma análise.

Os dados estatísticos existentes no que diz respeito às vendas de gasolina publicada pela ANP não são confiáveis, para o etanol são um pouco piores, haja vista que o mercado está mais sujeito a adulteração. Foram utilizados os dados do Balanço Energético Nacional da EPE (2007).

Com entrada do motor “flex” será necessário uma estatística mais rigorosa a respeito do consumo, pois somente dessa maneira é possível determinar as emissões através do método “Top Down”. A determinação pelo método “Bottom Up” necessita de desenvolvimento, haja visto que não é possível desagregar a frota por tipo de combustível.

A distância média anual é um dado incerto, pois não existem pesquisas a respeito dessa variável que proporcione uma base para confirmar e melhorar os nossos cálculos. Estudos devem ser feitos a respeito do assunto, entre eles à distância percorrida por veículos novos, por veículos de uso intensivo, a influência do preço do combustível e da renda da população na distância percorrida.

Deve ser observado que a distância média percorrida pelos veículos leves, anualmente, foi calculada por tentativa e erro de forma que o consumo observado fosse bastante próximo ao calculado. O valor obtido não leva em conta as motocicletas.

Os consumos específicos obtidos em condições de teste e de tráfego são diferentes. Existe, portanto, necessidade de ensaios para fazer uma determinação mais precisa dessa variável nos veículos no Brasil.

As estatísticas a respeito das motocicletas no Brasil ainda são precárias em todos os aspectos acima citados, mas sabe-se que a frota destas cresceu muito nestes últimos anos e deve contribuir de maneira significativa para o consumo de gasolina C e emissões de gases de efeito estufa.

Não existe uma base de dados estatísticos confiáveis dos fatores de emissões do CO₂, CH₄ e N₂O para gasolina C e etanol hidratado, tanto para o cálculo das emissões pela metodologia “top-down” quanto pela “bottom up”.

Existe, portanto, a necessidade de muitos estudos para obtenção de dados estatísticos e do desenvolvimento de métodos apropriados a fim de aperfeiçoar o atual modelo de cálculo das emissões brasileiras.

Embora com as limitações discutidas nos parágrafos anteriores, as análises das emissões totais, apresentadas nos capítulos 5.4, 5.5 e 5.6, demonstram que a introdução do etanol na matriz energética influiu decisivamente nas emissões dos gases de efeito estufa.

BIBLIOGRAFIA

Agência Nacional de Petróleo. Resolução Nº 6, DE 24/02/2005 – publicada no Diário Oficial da União no dia 25/02/2005. Disponível em:

[http://200.179.25.133/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2005/fevereiro/ranp%206%20-%202005.xml?f=templates\\$fn=default.htm&sync=1&vid=anp:10.1048/enu](http://200.179.25.133/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2005/fevereiro/ranp%206%20-%202005.xml?f=templates$fn=default.htm&sync=1&vid=anp:10.1048/enu). Acesso em: 01 set 2007.

Agência Nacional de Petróleo. **Gás Natural Veicular Mercado em Expansão.** Decreto Federal 1.787/96, 12 de janeiro de 96. Disponível em:

http://www.anp.gov.br/doc/gas/nota_tec_023.PDF. Acesso em: 01 set 2007.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. Norma NBR - 6601

Allen, Paul (Org.). **Air Quality Impacts of the Use of Ethanol in California Reformulated Gasoline.** California Environmental Protection Agency AIR RESOURCES BOARD Planning and Technical Support Division. State of Califórnia Novembro 1999. Disponível em: <<http://www.arb.ca.gov/cbg/regact/ethanol/ethfate.htm>>.acesso em: 01 set 2006.

Álvares Jr., Olimpio M.; Linke, Renato R. A. **Metodologia Simplificada de Cálculos das Emissões de Gases do Efeito Estufa de Frotas de Veículo no Brasil.** www.ambiente.sp.gov.br/proclima/PDF/inventario_efeitoestufa.pdf Acesso 25 Setembro 2007

Associação Nacional de Fabricantes de Veículos Automotivos (ANFAVEA). *Anuário Estatístico da Indústria Automobilística*, ANFAVEA, SP.

Azuaga, Denise. **Danos Ambientais Causados por Veículos Leves no Brasil.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro 2000. Disponível em: <http://www.ppe.ufrj.br/ppe/production/tesis/dazuaga.pdf>. Acesso: 27 agosto 2007

BiodieselBR. PróAlcool - Programa Brasileiro de Álcool . **Disponível em:**

<http://www.biodieselbr.com/proalcool/pro-alcool.htm> Acesso 15 Novembro 2007

Conama. Resolução Nº 018, de 6 de maio de 1986. Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE.

Conama. Resolução Nº 007, de 31 de agosto de 1993. Estabelece padrões de emissão para veículos em circulação do motor do ciclo Otto.

Conama. Resolução Nº 018, de 13 de dezembro de 1995. Institui os Programas de Inspeção e Manutenção para Veículos Automotores em Uso - I/M.

Conama (1997). Resolução Nº 226, de 20 de agosto de 1997. Confirma os limites para a Fase IV, conforme prevista na Resolução CONAMA nº 8, de 31 de agosto de 1993.

Conama (2002). Resolução No 315 de 29 de outubro de 2002 - Dispõe sobre a nova etapa do Programa de Controle de Emissões Veiculares-PROCONVE, Brasília.

Conama (2004). Resolução Nº 354 DE 13 DE dezembro 2004 - Dispõe sobre os requisitos para adoção de sistemas de diagnóstico de bordo

Curran,, H. J.; Chen J.-S.; Litzinger, T. A. **The Lean Oxidation of Iso-Octane at Elevated Pressures**. Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA 94551. Disponível em: <http://www.llnl.gov/tid/lof/documents/pdf/235217.pdf> acesso em: 01 set 2006.

Curran,, H.J.ET AL. **A Comprehensive Modeling Study of n-Heptane Oxidation**. Lawrence Livermore National Laboratory. Disponível em: <<http://www.llnl.gov/tid/nc7/.pdf>> acesso em: 01 set 2006.

Curran, H. J.et al. **Comprehensive Oxidation of Automotive Primary Reference Fuels at Elevated Pressures**. Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA 94551. United States of America. Disponível em: <<http://www.cms.llnl.gov/combustion/lof/documents/pdf/235217.pdf>> acesso em: 01 set 2006.

Dupin, Eduardo E. V. et al. **Gasolina**. Universidade Federal de Minas Gerais
<http://www.demec.ufmg.br/disciplinas/ema003/liquidos/gasolina/gasolina.htm>.

Editora Abril. **Revista Quatro Rodas, comparativos entre carros.** disponível em:
<http://quatrorodas.abril.com.br/QR2/carros/comparativos/>. Acesso 10 Novembro 2007.

Editora Globo. **Revista Auto Esporte, edições anteriores,** disponível em:
<http://revistaautoesporte.globo.com/Autoesporte/0,6993,1684,00.html> Acesso em: 20 novembro 2007.

Emep / Corinar. **Inventory Guidebook.** Disponível em:
www.reports.eea.europa.eu/EMEPCORINAIR4 acesso 20 out 2006.

Empresa de Pesquisas Energéticas. **Balanço Energético Nacional 2007.** Disponível em:
<https://ben.epe.gov.br/>.

Empresa de Pesquisas Energéticas. **Estudos Específicos sobre o Abastecimento de Petróleo, Gás e Derivados.** Base de dados históricos sobre o consumo nacional de GLP, gasolina, diesel e álcool combustível, para as diversas regiões geográficas. Rio de Janeiro, 27 jul. 2006. Não disponível para consultas.

Energy Information Administration Office of Integrated Analysis and Forecasting U.S. Department of Energy. **International Energy Outlook 2004.** Washington, 2004. Disponível em: <<http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/index.html>>. Acesso em: 30 maio 2004.

Energy Information Administration Office of Integrated Analysis and Forecasting U.S. Department of Energy. **International Energy Outlook 2005.** Washington, 2005. Disponível em: <<http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/index.html>>.: 05 ago 2005.

Environmental Protect Agency. *Mobile Source Emission Factors*, Ann Arbor Laboratory, EPA, USA.

Gonçalves, C. E. A. **Estudo da produção de óxido nitroso em cultivo de feijão (*phaseolus vulgaris*).** São José dos Campos: INPE, 2002. 89p. – (INPE-12142-TDI/968). <http://mtc-16.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/jeferson/2005/01.25.09.56/doc/publicacao.pdf>

Goldemberg, José. **Energia, Meio Ambiente & Desenvolvimento.** São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2001.

Grosjean, D. (1997) **Atmospheric Chemistry of Alcohols**, *Journal of Brazilian Chemical Society*, **8**: 433-442.

Heywood, John B. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. Singapore: McGraw Hill Book Co. 1988.

Instituo Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). **Programa de controle da poluição do ar por veículos automotores – Proconve** - 2 ed. - Brasília: IBAMA, 1998. 181 p. Disponível em: <<https://www.ibama.gov.br/proconve/login.php>> acesso em: 22 fev 2006.

International Energy Agency. **Key World Energy Statistics 2004**. Paris-França. Disponível em: <<http://www.iea.org>>. acesso em: 07 dez 2004

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 1995: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 1995: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Albritton D.L., Meira Filho L.G., B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, and K. Maskell, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom UK.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 1999. **Methodological and Technological issues in Technology Transfer. Contribution of Working Group III to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Metz, Bert, Davidson, Ogunlade R., Martens, Jan-Willem, Rooijen Sascha N. M. van e McGrory, Laura Van Wie (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom UK.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2001: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the*

Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2006. **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 1996. **1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, JT Houghton, LG Meira Filho, B Lim, K Treanton, I Mamaty, Y Bonduki, DJ Griggs and BA Callender (Eds). Cambridge University Press, Cambridge.

Jeremy Legget e al. Aquecimento Global - Relatório Greenpeace, Editor responsável Legget, Jereemy; tradução Alexandre Lissovsky – Rio de Janeiro: Editora da fundação Getulio Vargas, 1992.

Kaiser, Jan; Suntharalingam, Parvadha. The Stratospheric Sink of N₂O – the impact upon climate change. University of East Anglia, fevereiro de 2008. Disponível em:

http://www.nitrousoxide.org/launch/jan_kaiser_parvadha_suntharalingam.pps#267,1,Dr_Jan_Kaiser_Dr_Parvadha_Suntharalingam

Kilpinen, Pia. **NOx Emission Formation in Marine Diesel Engines – towards a quantitative understanding.** Disponível em: http://wartsila.com/Wartsila/docs/en/ship_power/media_publications/marine_news/2003_2/nox_emissionFormation.pdf acesso em: 12 set 2006

La Rovere, Emilio L., e al. Cenários de Demanda de Combustíveis Motores Ciclo Otto e Abatimento de CO₂ devido à Produção e o Uso do Álcool no Brasil.

www.servicos.capes.gov.br/arquivos/avaliacao/estudos/dados1/2006/31001017/045/2006_045_31001017102P5_Prod_Bib.pdf. Acesso 20 Julho 2007.

Marinov, Nick M. A Detailed Chemical Kinetic Model for High Temperature Ethanol Oxidation. Disponível em: http://www.cmls.llnl.gov/data/docs/science_and_technology/chemistry/combustion/ethanol_paper.pdf. Acesso em: 10 de agosto 2008.

Ministério de Ciência e Tecnologia. Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima - Um Guia do Processo da Mudança do Clima. Disponível em:
<http://ftp.mct.gov.br/clima/convencao/newguia.htm> . Acesso agosto de 2008.

Mattos, João A.B. Correia, Eduardo L,1996. **Uma Nova Estimativa da Frota de Veículos Automotivos no Brasil**, VII Congresso Brasileiro de Energia, Anais, pág.1267-1277, RJ.

Mattos, Laura B. Rego de. **A Importância do Setor de Transportes na Emissão de Gases do Efeito Estufa – O Caso do Município do Rio de Janeiro** [Rio de Janeiro] 2001 XIX, 179 p. (COPPE/UFRJ, M.Sc., Planejamento Energético, 2001) Tese - Universidade Federal do Rio.

Macdonald, G.J. **The Greenhouse Effect and Climate Change** (documento apresentado à Comissão de Obras Públicas e Meio Ambiente do Senado dos EUA, 28 de jan. 1987).

Mendes, Francisco Eduardo. Avaliação de Programas de Controle de Poluição Atmosférica por Veículos Leves no Brasil [Rio de Janeiro] 2004 X, 179 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, D.Sc.,

Ministério de Ciência e Tecnologia. **Primeiro Inventário Brasileiro Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa**. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/clima>> acesso: 10 dez 2004.

Murgel, E.M. et. al. **Inventário da Emissão Veicular - Metodologia de Cálculo**. In: Revista Engenharia Sanitária, v.26.3, São Paulo, julho/setembro1987.

Muharam, Yuswan. Modelling of the Oxidation and Combustion of Large Hydrocarbons Using an Automatic Generation of Mechanisms. Dissertação de Mestrado, Universidade de Heidelberg publicado18 novembro 2005.

Paciornik, Newton (Org.). **Emissões de Gases de Efeito Estufa por Fontes Móveis, no Setor Energético**. Ministério da Ciência e Tecnologia. Disponível: <<http://www.mct.gov.br/clima>> Acesso em: 10 dez 2004.

Petrobras Distribuidora. Composição da Gasolina. Portal BR. Disponível em:
http://www.br.com.br/portalbr/calandra.nsf#http://www.br.com.br/portalbr/calandra.nsf/CVview_postospetro/03?OpenDocument. Acesso em: 10 out 2007.

Portal Fator Brasil Falta de catalisador produz sérios danos à saúde. Disponível em:

<http://web.infomoney.com.br/templates/news/view.asp?codigo=850820&path=/suasfinancas/carros/seguranca/>. Acesso em: 06/11/2007.

Presidência da República - Subchefia para Assuntos Jurídicos. LEI N° 8.723, DE 28 DE OUTUBRO DE 1993. Disponível em: <http://www.ann.gov.br/legislacao/Regulacao/suerg/Lei8723-93.pdf>.

Proconve / Cetesb. Fatores de Emissão. Departamento de Tecnologia de Emissões de Veículos. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/Ar/emissoes/proconve3.asp>.

Ramanathan, V. **The Greenhouse Theory of Climate Change: a test by an inadvertent global experiment.** Science, 15 Apr. 1988.

Senado Federal, Subsecretaria de Informações. DECRETO N° 76.593, DE 14.11.1975 - DOU 14.11.1975. Disponível em: <http://www6.senado.gov.br/legislacao /ListaPublicacoes.action?id=123069>.

Senado Federal, Subsecretaria de Informações. DECRETO N° 80.762, DE 18.11.1977 - DOU 21.11.1977. Disponível em: <http://www6.senado.gov.br/legislacao /ListaPublicacoes.action?id=209547>.

Senado Federal, Subsecretaria de Informações. DECRETO N° 83.700, DE 5.7.1979 - DOU 5.7.1979. Disponível em: <http://www6.senado.gov.br/legislac ao/ ListaPublicacoes. action?id=212185>.

Teixeira, Elba Calesso; Feltes, Sabrina; Santana, Eduardo R. R. **Estudo das Emissões de Fontes Móveis na Região Metropolitana de Porto Alegre, Rio Grande do Sul.**

United Nations Framework Convention on Climate Change. **Convenção sobre Mudança do Clima** - Editado e traduzido pelo Ministério da Ciência e Tecnologia. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/clima/convencao/Default.htm>> 27 ago 2002

United Nations Framework Convention on Climate Change. **Protocolo de Quioto** – Editado e traduzido pelo Ministério da Ciência e Tecnologia. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/clima/quioto/Default.htm>> Acesso: 27 jul 2002.

United Nations Framework Convention on Climate Change. Estimation of emissions from road transport. Twentieth session, Bonn, 16–25 June 2004. www.ert.net/pubs/transport.pdf Acesso: 20 out 2007

United Nations Framework Convention on Climate Change. National greenhouse gas inventory data for the period 1990–2004 and status of reporting Twenty-fifth session, Nairobi, 6–14 November 2006. Relatório FCC SBI / 2006/26. 19 de Outubro 2006. Disponível em: <http://unfccc.int/resource/docs/2006/sbi/eng/26.pdf>.

United Nations Framework Convention on Climate Change. Synthesis and Assessment Report on the Greenhouse Gas Inventories Submitted in 2006. Relatório FCC SBI / 2006. 28 Junho de 2007. <http://unfccc.int/resource/webdocs/sai/2006.pdf>.

United Nations Framework Convention on Climate Change Synthesis and Assessment Report on the Greenhouse Gas Inventories Submitted in 2007. Relatório FCC SBI / 2007. de Dezembro de 2007. <http://unfccc.int/resource/webdocs/sai/2007.pdf>.

Consultative Group of Experts on National Communications from Parties not included in Annex I to the Convention (CGE). **Handbook on Energy sector Fuel Combustion.**

Unica / Ibope Solutions. Projeto Flex. Setembro de 2006. Disponível em: http://www.portalunica.com.br/portalunica/files/referencia_publicacoes_relatoriostecnicos-9-arquivo.ppt

United States Environmental Protection Agency – EPA. **Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-1999**, Washington D.C. Abril, 1999. Disponível em: <<http://www.epa.gov/globalwarming/inventory>>. Acesso: 27 ago 2002

Westbrook, Charles K. al al. The Internal Combustion at Work. Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore United States of America. Disponível em: <<http://www.llnl.gov/str/Westbrook.html>>. Acesso em: 09 de agosto 2008.

Volkswagen do Brasil. **Engº de Powertrain.**

ANEXOS

ANEXO 1 - FATORES MÉDIOS DE EMISSÃO DE VEÍCULOS LEVES NOVOS.

Ano Modelo	Combustível	CO (g/km)	HC (g/km)	NOx (g/km)	RCHO (g/km)	Emissão Evaporativa de Combustível (g/teste)
PRÉ - 1980	Gasolina	54,0	4,7	1,2	0,05	nd
1980 - 1983	Gasolina C	33,0	3,0	1,4	0,05	nd
	Álcool	18,0	1,6	1,0	0,16	nd
1984 - 1985	Gasolina C	28,0	2,4	1,6	0,05	23
	Álcool	16,9	1,6	1,2	0,18	10
1986 - 1987	Gasolina C	22,0	2,0	1,9	0,04	23
	Álcool	16,0	1,6	1,8	0,11	10
1988	Gasolina C	18,5	1,7	1,8	0,04	23
	Álcool	13,3	1,7	1,4	0,11	10
1989	Gasolina C	15,2 (-46%)	1,6 (-33%)	1,6 (0%)	0,040 (-20%)	23,0 (0%)
	Álcool	12,8 (-24%)	1,6 (0%)	1,1 (-8%)	0,110 (-39%)	10,0 (0%)
1990	Gasolina C	13,3 (-53%)	1,4 (-42%)	1,4 (-13%)	0,040 (-20%)	2,7 (-88%)
	Álcool	10,8 (-36%)	1,3 (-19%)	1,2 (0%)	0,110 (-39%)	1,8 (-82%)
1991	Gasolina C	11,5 (-59%)	1,3 (-46%)	1,3 (-19%)	0,040 (-20%)	2,7 (-88%)
	Álcool	8,4 (-50%)	1,1 (-31%)	1,0 (-17%)	0,110 (-39%)	1,8 (-82%)
1992	Gasolina C	6,2 (-78%)	0,6 (-75%)	0,6 (-63%)	0,013 (-74%)	2,0 (-91%)
	Álcool	3,6 (-79%)	0,6 (-63%)	0,5 (-58%)	0,035 (-81%)	0,9 (-91%)
1993	Gasolina C	6,3 (-77%)	0,6 (-75%)	0,8 (-50%)	0,022 (-56%)	1,7 (-93%)
	Álcool	4,2 (-75%)	0,7 (-56%)	0,6 (-50%)	0,040 (-78%)	1,1 (-89%)
1994	Gasolina C	6,0 (-79%)	0,6 (-75%)	0,7 (-56%)	0,036 (-28%)	1,6 (-93%)
	Álcool	4,6 (-73%)	0,7 (-56%)	0,7 (-42%)	0,042 (-77%)	0,9 (-91%)
1995	Gasolina C	4,7 (-83%)	0,6 (-75%)	0,6 (-62%)	0,025 (-50%)	1,6 (-93%)
	Álcool	4,6 (-73%)	0,7 (-56%)	0,7 (-42%)	0,042 (-77%)	0,9 (-91%)
1996	Gasolina C	3,8 (-86%)	0,4 (-83%)	0,5 (-69%)	0,019 (-62%)	1,2 (-95%)
	Álcool	3,9 (-77%)	0,6 (-63%)	0,7 (-42%)	0,040 (-78%)	0,8 (-92%)
1997	Gasolina C	1,2 (-96%)	0,2 (-92%)	0,3 (-81%)	0,007 (-86%)	1,0 (-96%)
	Álcool	0,9 (-95%)	0,3 (-84%)	0,3 (-75%)	0,012 (-93%)	1,1 (-82%)
1998	Gasolina C	0,79 (-97%)	0,14 (-94%)	0,23 (-86%)	0,004 (-92%)	0,81 (-96%)
	Álcool	0,67 (-96%)	0,19 (-88%)	0,24 (-80%)	0,014 (-92%)	1,33 (-87%)
1999	Gasolina C	0,74 (-97%)	0,14 (-94%)	0,23 (-86%)	0,004 (-92%)	0,79 (-96%)
	Álcool	0,60 (-96%)	0,17 (-88%)	0,22 (-80%)	0,013 (-92%)	1,64 (-84%)
2000	Gasolina C	0,73 (-97%)	0,13 (-95%)	0,21 (-87%)	0,004 (-92%)	0,73 (-97%)
	Álcool	0,63 (-96%)	0,18 (-89%)	0,21 (-83%)	0,014 (-92%)	1,35 (-87%)
2001	Gasolina C	0,48 (-98%)	0,11 (-95%)	0,14 (-91%)	0,004 (-92%)	0,68 (-97%)
	Álcool	0,66 (-96%)	0,15 (-91%)	0,08 (-93%)	0,017 (-91%)	1,31 (-87%)

Fonte: Proconve/Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (2007)

1 - médias ponderadas de cada ano-modelo pelo volume de produção.

nd - não disponível.

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

Gasolina C - 78% gasolina + 22% álcool anidro (v/v).

RCHO - formaldeído + acetaldeído.

ANEXO 2 - ALGUNS MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DA GASOLINA.

MÉTODO		TÍTULO
MB 457	ASTM D 2699	Combustível - Determinação das características antidetonantes - Índice de Octano - Método Motor
ABNT NBR 9619	ASTM D 86	Produtos de Petróleo - Determinação das propriedades de destilação
ABNT NBR 13992		Gasolina Automotiva - Determinação do teor de álcool etílico anidro combustível AEAC
ABNT NBR 14149	ASTM D 4953	Gasolina e misturas de gasolina com produtos oxigenados - Determinação da pressão de vapor - Método seco
ABNT NBR 14156	ASTM D 5191	Produtos de Petróleo - Determinação da pressão de vapor - Mini Método
ABNT NBR 14932	ASTM D 1319	Produtos líquidos de petróleo - Determinação dos tipos de hidrocarbonetos pelo indicador de absorção por fluorescência

Fonte. Agencia Nacional de Petróleo (ANP), janeiro de 2005

ANEXO 3 - ALGUMAS ESPECIFICAÇÕES DA GASOLINA PADRÃO PARA ENSAIOS DE CONSUMO E EMISSÕES

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	LIMITES		MÉTODOS	
		Gasolina A	Gasolina C	ABNT	ASTM D
Teor de Álcool Etílico Anidro Combustível - AEAC (1)	% volume	zero	22 (1)	NBR 13992	
Destilação	°C			NBR 9619	86
PIE (Ponto Inicial de Ebulação)	-	30,0 a 40,0°C	-		
10% vol., evaporados	-	45,0 a 60,0°C	-		
50% vol., evaporados	-	90,0 a 110,0°C	-		
90 % vol., evaporados	-	160,0 a 190,0°C	-		
PFE (Ponto Final de Ebulação)	-	195,0 a 215,0°C	-		
Nº de Octano Motor - MON	-	-	82,0 a 85,0	MB 457	2700
Nº de Octano Pesquisa - RON	-	-	93,0 a 98,0		2699
Pressão de vapor a 37,8°C,	kPa	-	54,0 a 64,0	NBR 14149	4953
				-	5190
				NBR 14156	5191
				-	5482
Goma atual lavada, máx.	mg/100 mL	5,0	5,0	NBR 14525	381
Período de indução a 100°C, mín.	min	-	1000	NBR 14478	525
Hidrocarbonetos:				NBR 14932	1319
Aromáticos, máx. (2)	% vol.	51,3	40,0		
Olefínicos, máx. (2)	% vol.	25,7	20,0		

Fonte: Agencia Nacional de Petróleo (ANP) janeiro de 2005

(1) AEAC deverá estar em conformidade com a especificação do Álcool Padrão para ensaios de consumo e emissões estabelecido pela legislação em vigor.

(2) Alternativamente é permitida a determinação dos hidrocarbonetos aromáticos e olefínicos por cromatografia gasosa. Em caso de desacordo entre resultados prevalecerão os valores determinados pelos ensaios NBR 14932 e D 1319.

ANEXO 4 – REAÇÕES CHAVES DE COMBUSTÃO.

Reações Chaves de Combustão a Altas Temperaturas.

Reações Chaves	Equações
Decomposição unimolecular alcanos Extração do átomo H do alcanos.	$RH \rightarrow R\bullet + R\bullet$ $RH \rightarrow R\bullet + H\bullet$ $RH + X \rightarrow R\bullet + XH$ Onde X representa radicais ativos H, O, OH, HO ₂ e CH ₃ .
Decomposição do radical alquila	$R\bullet$ (radical alquila pesado) $\rightarrow R'$ (alceno) + H
Isomerização do radical alquila	$R\bullet \rightarrow R'$ (alcenos leves) + $R\bullet$. (radical alquila leve)
Oxidação do radical alquila para alceno	$R1\bullet \rightarrow R2\bullet$. $R\bullet + O_2 \rightarrow R'$ (alceno) + radical peróxido de alquila HO ₂ .
Decomposição do alcenos	R' (alceno) $\rightarrow R''$ (alilico) + $R\bullet$ (radical alquila leve) R' (alceno) + X $\rightarrow R''$ (alilico) + XH
Extração do átomo H vinílico	R' (alceno) + X $\rightarrow R''$ (vinílico) + XH
Extração do átomo H alkyllic	R' (alceno) + X \rightarrow alkenyl R'' + XH
Adição do átomo H a dupla ligação	R' (alceno) + H $\rightarrow R\bullet$ (radical alquila)
Adição do radical CH ₃ a dupla ligação	R' (alceno) + CH ₃ $\rightarrow R\bullet$ (radical alquila)
Adição do átomo O a dupla ligação	$R'(alceno) + O \rightarrow$ Cetil radical + $R\bullet$ (radical alquila leve).
Adição do radical OH a dupla ligação	$R'(alceno) + O \rightarrow$ aldeido or cetona + $R\bullet$ (radical alquila).
Adição do radical HO ₂ a dupla ligação	$R'(alceno) + HO_2 \rightarrow R'OOH$ (radical hidroperoxido alquila).
Reação de deslocamento do H e dissociação	$R'(alceno) \rightarrow R'$ (alcenos leves) + R' (alcenos leves).
Isomerização do radical alkenyl	alkenyl $R'' \rightarrow$ allylic R'' .
Decomposição do radical alilico	allylic $R'' \rightarrow$ dieno.
Decomposição do radical vinílico	Composto vinílico $R'' \rightarrow$ dieno or alcino.
Decomposição do radical alkenyl	Alkenyl $R'' \rightarrow$ dieno + $R\bullet$ (radical alquila leve) Alkenyl $R'' \rightarrow R'$ alceno leve + smaller alkenyl R'' .

Fonte: Muharam (2005)

Reações Chaves de Combustão a Baixas Temperaturas.

Reações Chaves	Equações
Adição do radical alquila ao oxigênio molecular	$R\bullet + O_2 \leftrightarrow RO_2\bullet.$ (peróxido de alquila)
Isomerização do radical peróxido de alquila	$RO_2\bullet \leftrightarrow R'OOH\bullet.$
Extração do átomo H do alcanos pelo radical peróxido de alquila	$RO_2\bullet + RH \rightarrow ROOH + R'.$
Reação do radical peróxido de alquila com HO_2	$RO_2\bullet + HO_2 \rightarrow ROOH + O_2.$
Reação do radical peróxido de alquila com H_2O_2	$RO_2\bullet + H_2O_2 \rightarrow ROOH + HO_2.$
Cisão Homolítica O-O do hidroperóxidos	$ROOH \rightarrow RO\bullet + OH.$
Decomposição do radical alcóxi	$RO\bullet \rightarrow$ aldeido ou cetona + radical leve $R\bullet.$
Adição do radical hidroperóxido de alquila ao oxigênio molecular	$R'OOH\bullet + O_2 \leftrightarrow OOR'OOH\bullet.$
Cisão β do radical hidroperóxido aquila formado pela isomerização (1,4)	$R'OOH\bullet \rightarrow$ alceno + $HO_2,$ $R'OOH\bullet \rightarrow$ hidroperoxialceno + $R\bullet$ alceno leve $R'OOH\bullet \rightarrow$ alceno leve + $R'OOH\bullet$ leve $R'OOH\bullet \rightarrow$ hidroperoxialceno + $R\bullet.$ leve
Cisão homolítica C-C do radical hidroperóxido alquila formado pela isomerização (1,5)	$R'OOH\bullet \rightarrow$ alceno leve + $R'OOH\bullet$ leve
Cisão homolítica C-C do radical hidroperóxido alquila formada pela isomerização (1,6) e (1,7)	$R'OOH\bullet \rightarrow$ hidroperoxialceno + $R\bullet$ leve.
Cisão homolítica O-O do radical hidroperóxido alquila com o radical site at a carbon atom linked to oxygen atom	$R'OOH\bullet \rightarrow$ aldeido ou cetona + OH.
Oxidação do radical hidroperóxido alquila	$R'OOH\bullet + O_2 \rightarrow$ hidroperoxialceno + $HO_2.$
Formação do eter cílico do radical hidroperóxido alquila	$R'OOH\bullet \rightarrow$ éter cílico + OH.
Isomerização do radical peróxido hidroperóxido alquila	$OOR'OOH\bullet \leftrightarrow HOOR''OOH$
Cisão homolítica O-O do radical dihidroperóxido alquila	$HOOR''OOH \rightarrow O=R''OOH + OH.$
Formação do radical hidroperóxido éter cílico a partir do dihidroperóxido	$HOOR''OOH \rightarrow$ hidroperoxi éter cílico + OH.
Decomposição do cetohidroperóxido	$O=R''OOH \rightarrow O=R''O\bullet + OH.$
Decomposição do $O=R''O\bullet$	$O=R''O\bullet \rightarrow$ aldeído + radical ketyl
Extração do átomo H do éter cílico	eter cílico + X \rightarrow radical. ketyl + XH, Onde X é um radical ativo. hp cyclic ether \rightarrow adeído ou cetona + ketyl radical + OH.
Decomposição do hidroperóxido éter cílico.	Aldeído ou cetona + X \rightarrow ketyl radical + XH.
Extração do átomo H do aldeído ou cetona	Radical cetil \rightarrow alcenal ou alcenona + $R\bullet$ leve.
Decomposição do radical cetil	Radical cetil \rightarrow radical cetil leve + $R'\bullet$ leve.

Fonte: Muharam (2005)