**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – USP
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA – PPGE
EP-FEA-IEE-IF**

SANDRA MARIA APOLINARIO DOS SANTOS

**PERSPECTIVAS PARA A CONTRIBUIÇÃO DO USO DO ETANOL NO
TRANSPORTE PÚBLICO URBANO, VISANDO À REDUÇÃO DA
POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA - ESTUDO DE CASO: PROJETO BEST**

**SÃO PAULO
2012**

SANDRA MARIA APOLINARIO DOS SANTOS

PERSPECTIVAS PARA A CONTRIBUIÇÃO DO USO DO ETANOL NO TRANSPORTE
PÚBLICO URBANO, VISANDO À REDUÇÃO DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA -
ESTUDO DE CASO: PROJETO BEST

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Energia da Universidade de São Paulo (Escola
Politécnica / Faculdade de Economia e Administração /
Instituto de Eletrotécnica e Energia / Instituto de Física)
para a obtenção do título de Doutor em Energia.

Orientador: Prof. Dr. José Roberto Moreira

Versão Corrigida

(Versão original disponível na Biblioteca da Unidade que aloja o Programa e na Biblioteca de Teses e Dissertações da USP)

SÃO PAULO
2012

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

FICHA CATALOGRÁFICA

Santos, Sandra Maria Apolinario

Perspectivas para a contribuição do uso do etanol no transporte público urbano, visando à redução da poluição atmosférica - estudo de caso: Projeto BEST / Sandra Maria Apolinario dos Santos; orientador José Roberto Moreira. – São Paulo, 2012.

226 f.: il.; 30cm.

Tese (Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Energia) – EP / FEA / IEE / IF da Universidade de São Paulo.

1. Etanol 2. Poluição atmosféricas 3. Transporte público 4. Combustível fóssil I. Título.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA
EP-FEA-IEE-IF

SANDRA MARIA APOLINARIO DOS SANTOS

“Perspectivas para a contribuição do uso do etanol no transporte público urbano, visando à redução da poluição atmosférica - estudo de caso: Projeto Best”

Tese defendida e aprovada pela Comissão Julgadora:

Prof. Dr. José Roberto Moreira – PPGE/USP
Orientador e Presidente da Comissão Julgadora

Prof. Dr. José Goldember – PPGE/USP

Prof^a Dr^a Suzana Kahn Ribeiro – UFRJ

Prof^a Dr^a Suani Teixeira Coelho – PPGE/USP

Prof. Dr. Arnaldo César da Silva Walter - UNICAMP

DEDICATÓRIA

A Deus, por tudo.

AGRADECIMENTO

A Deus, por ter me dado uma família maravilhosa, a base de toda a minha vida.

Ao meu orientador, Prof. José Roberto Moreira, pelo exemplo de vida, honestidade e profissionalismo.

À minha amiga, Sílvia Velázquez, pela ajuda, mesmo quando estive ausente.

À minha família, que me proporcionou base sólida para construir uma vida repleta de felicidade.

Ao meu marido, por sua paciência, por seu incentivo, por cuidar de mim..... por existir.

"Só existem dois dias no ano que nada pode ser feito. Um se chama ontem e o outro se chama amanhã, portanto hoje é o dia certo para amar, acreditar, fazer e principalmente viver."

Dalai Lama

RESUMO

SANTOS, Sandra Maria Apolinario. **Perspectivas para a contribuição do uso do etanol no transporte público urbano, visando à redução da poluição atmosférica - Estudo de caso: Projeto BEST.** 226 f. Tese (Doutorado em Energia) – Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2012.

O óleo diesel é o combustível de maior importância na matriz energética veicular no Brasil, correspondendo a praticamente metade do total do volume de combustível consumido no país, além de ser a opção mundial de combustível para o transporte público urbano. O óleo diesel é um combustível fóssil, não renovável, produzido a partir da destilação fracionada do petróleo. O seu uso está associado a poluição atmosférica local (aquela que impacta a qualidade do ar no local onde o poluente é emitido), a aumentos significativos de admissões hospitalares e à mortalidade por doenças respiratórias e cardiovasculares. O etanol surge como uma perspectiva à substituição de diesel no transporte público. O uso de etanol em ônibus é uma realidade em várias cidades da Suécia, principalmente em Estocolmo, onde a tecnologia de ônibus diesel adaptado para operar com etanol é utilizada desde 1985, com grande sucesso, principalmente do ponto de vista ambiental. Com o objetivo de incentivar o uso do etanol no transporte público urbano, visando à redução da poluição atmosférica nos grandes centros urbanos, foi idealizado o Projeto BEST - BioEtanol para o Transporte Sustentável, incentivado pela União Européia. No Brasil, uma das metas foi comparar o desempenho de uma frota experimental de ônibus movidos a etanol com ônibus movidos exclusivamente a diesel. A tecnologia dos ônibus movido a etanol atende aos padrões de emissão EURO 5, norma em vigor na Europa. Esta tese tem o objetivo de analisar a viabilidade e as perspectivas da substituição do diesel por etanol, no transporte público urbano, considerando os aspectos técnicos, legais, sócio-econômicos e político-ambientais envolvidos no tema, além de avaliar as emissões de aldeídos em veículos diesel, já que as emissões destes poluentes estão associadas, na literatura, somente à utilização de etanol em motores Ciclo Otto.

Palavras chave: Etanol. Substituição de diesel. Transporte público. Emissões atmosféricas.

ABSTRACT

SANTOS, Sandra Maria Apolinario. **Perspectives to the contribution of ethanol utilization in the public urban transport, aiming to reduce air pollution - Case study: BEST Project.** 226 f. Doctorate thesis – Post-graduation program in Energy at Universidade de São Paulo. São Paulo, 2012.

Diesel oil is the fuel with major importance in the automotive energy matrix in Brazil, corresponding to nearly half of the total fuel volume consumed in the country, apart from being a global option fuel for public urban transport. Diesel oil is a fossil fuel, not renewable, produced from fractionated petrol distillation; its use is linked to local air pollution (one that impacts the local air quality where the pollutant is emitted), to significant increases in hospital admissions, and to mortality from respiratory and cardiovascular diseases. Ethanol appears to be a prospect to replace diesel in public transport. Ethanol utilization in buses is a reality in many cities in Sweden, mainly in Stockholm, where the diesel bus technology adapted to operate with ethanol has been utilized with great success since 1985, mainly from the environmental point of view. In order to encourage the use of ethanol in urban public transport, aimed to reduce air pollution in large urban centers, the project BEST– Bioethanol for Sustainable Transport was conceived and encouraged by the European Union. In Brazil, one of the goals was to compare the performance of an experimental fleet of ethanol-powered buses with buses that run exclusively on diesel. The technology of ethanol-powered bus complies with EURO 5 emission standards, the current standard in Europe. This thesis aims to analyze the feasibility and perspectives of replacing diesel with ethanol in the urban public transport, considering technical, legal, socio-economic, political and environmental issues involved in the subject, in addition to evaluate aldehydes emissions in diesel vehicles, since these pollutant emissions are, in the literature, associated only with the use of ethanol in Otto cycle engines.

Key words: Ethanol. Diesel replacement. Public transport. Air emissions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01– Matriz Veicular de Combustíveis no Brasil.....	19
Figura 02 - Evolução das viagens diárias por modo principal na RMSP.....	20
Figura 03 – Custo de produção do etanol para diferentes matérias-primas.....	22
Figura 04 – Balanço de energia de etanol produzido a partir de diferentes matérias-primas...	23
Figura 05 – Emissões de gases de efeito estufa provenientes de etanol de diferentes origens ignorando as emissões devido as mudanças no uso do solo.....	23
Figura 06 – Análise do Ciclo de Vida para o Etanol de cana-de-açúcar com e sem coleta de resíduos e CBI.....	24
Figura 07 – Regiões metropolitanas dos Estados Unidos onde os ônibus foram testados.....	35
Figura 08 - Motor ciclo diesel movido a etanol aditivado.....	41
Figura 09 - Curva de torque e potência do motor a etanol Scania DC9 E02.....	44
Figura 10 - Curva de torque e potência do motor diesel Scania DC9 E02.....	44
Figura 11 – Geometria dos pistões de motores diesel e etanol de mesma potência.....	45
Figura 12 – Efeitos da poluição do ar.....	53
Figura 13 – Comparação entre material particulado (PM 10 e PM 2,5), fio de cabelo e grão de areia.....	60
Figura 14 - Localização das cidades participantes do projeto BEST no mundo.....	65
Figura 15 - Ônibus movido a etanol circulando em Estocolmo.....	66
Figura 16 - Disposição dos tanques de combustível. Circulada encontra-se a micro-câmara de pré-aquecimento.....	68
Figura 17 - Vista detalhada das linhas de alimentação e de retorno de combustível da câmara de pré-aquecimento.....	68
Figura 18 - Vista da câmara de pré-aquecimento com a linha de retorno inutilizada.....	69
Figura 19 - Vista superior de um dos tanques, com o desvio de combustível instalado.....	69
Figura 20 - Monitoramento de pressão e temperatura do combustível (42 °C, 2,71 bar).....	70
Figura 21 – Foto do ônibus movido a etanol em Madri.....	74
Figura 22 – Ônibus a etanol da Scania em Pequim.....	76
Figura 23 – Teste em dinamômetro de chassi, em veículo leve.....	85
Figura 24 – Teste em dinamômetro de motor, em veículo pesado.....	85
Figura 25 – Solução integrada sistema pós-tratamento (motor P7 e diesel com 10 ppm de enxofre).....	88
Figura 26 - Fronteira do Projeto.....	99

Figura 27 – Fórmula geral dos formaldeídos e acetaldeídos.....	110
Figura 28 – Ônibus a etanol Viação Metropolitana.....	126

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Resultado do teste de emissão em dinamômetro (g/milhas).....	37
Tabela 02 - Características gerais do motor ciclo diesel movido a etanol aditivado.....	42
Tabela 03 - Comparação entre o motor movido a etanol aditivado e o motor diesel equivalente.....	43
Tabela 04 - Composição do Etamax D para o Brasil.....	47
Tabela 05 - Especificação do Etamax D comercializado na Suécia.....	47
Tabela 06 – Efeitos dos poluentes sobre a saúde humana.....	50
Tabela 07 – Cenários de redução de material particulado a partir da substituição do diesel por etanol, em frota pesada.....	60
Tabela 08 - Potencial anual de variação da mortalidade mediante cenários de adição de etanol na Região Metropolitana de São Paulo e respectiva valoração econômica.....	62
Tabela 09 – Número de ônibus a etanol em operação pelo projeto BEST.....	72
Tabela 10 – Principais Dificuldades Encontradas no Projeto BEST.....	78
Tabela 11 – Resultados comparativos entre as cidades participantes do projeto BEST.....	80
Tabela 12 – Comparação entre veículos diesel e etanol.....	82
Tabela 13 – Limites de emissões para veículos diesel pesados, em g/kWh, nas diferentes fases do PROCONVE.....	86
Tabela 14 – Emissões comparativas de veículos a etanol e diesel em diferentes configurações.....	92
Tabela 15 - Emissões do motor ciclo diesel movido a etanol aditivado e comparação com as Fases 6 e 7 do PROCONVE.....	94
Tabela 16 - Gases de Efeito Estufa e Seus Potenciais de Aquecimento Global.....	97
Tabela 17 - Dados de entrada - Características da frota de ônibus.....	103
Tabela 18 - Dados de Entrada - Características dos Combustíveis.....	104
Tabela 19 - Cenário 01 (25% da frota de ônibus passa a consumir etanol).....	115
Tabela 20 - Cenário 04 (100% da frota passa a consumir etanol).....	106
Tabela 21 – Potencial de geração de créditos de carbono.....	107
Tabela 22 – Comparação de parâmetros para aldeídos em diferentes combustíveis.....	112
Tabela 23 – Características das Linhas da Viação Metropolitana onde circulam os ônibus a etanol.....	125
Tabela 24 – Percentual de tributos incidentes sobre o etanol hidratado e sobre o diesel.....	130
Tabela 25 – Formação de preços do diesel e etanol ao consumidor.....	130

Tabela 26 – Preços Máximos e Mínimos – Etanol e Diesel.....	131
---	-----

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01 – População residente, por situação de domicílio – Brasil.....	30
Gráfico 02 – Consumo comparativo do primeiro ônibus a etanol x ônibus diesel.....	70
Gráfico 03 – Consumo comparativo do segundo ônibus a etanol x ônibus diesel.....	71
Gráfico 04 – Frota Brasileira por tipo de combustível.....	84
Gráfico 05 – Emissão de aldeído por tipo de combustível.....	109
Gráfico 06 – Evolução do Preço do Açúcar e do Petróleo em Relação ao Etanol.....	133

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
2. EXPERIÊNCIA COM ÔNIBUS MOVIDOS A ETANOL NO MUNDO.....	30
2.1 Experiência de ônibus movido a etanol na Suécia.....	31
2.2 Experiência de ônibus movido a etanol nos Estados Unidos.....	34
2.3 Experiência de ônibus movido a etanol no Brasil.....	38
3. ESTUDO TÉCNICO COMPARATIVO DOS MOTORES DIESEL E DOS MOTORES MOVIDOS E ETANOL.....	40
3.1 Motores Diesel adaptados para operar com etanol.....	41
3.1.1 Taxa de Compressão.....	45
3.1.2 Etanol aditivado – Etamax D.....	46
3.1.2.1 Polietileno Glicol (PEG).....	47
4. EMISSÕES ATMOSFÉRICAS NA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO (RMSP) E OS EFEITOS SOBRE A SAÚDE HUMANA.....	49
5. ESTUDO DE CASO – PROJETO BEST.....	65
5.1 Acompanhamento do funcionamento do ônibus com motor a etanol, comparativamente a ônibus similar movido exclusivamente a diesel.....	67
5.2 A experiência do Projeto BEST nos outros países.....	72
5.2.1 La Spezia – Itália.....	72
5.2.2 Madri – Espanha.....	73
5.2.3 Nanyang – China.....	74
5.2.4 Estocolmo – Suécia.....	76
5.2.5 Rotterdam – Holanda.....	77
5.2.6 Principais resultados da operação com ônibus movidos a etanol.....	79
5.2.7 Principais resultados da manutenção com ônibus movidos a etanol.....	81
5.3 Verificação das emissões do ônibus movido a etanol e estudo comparativo com as emissões de ônibus diesel.....	83
5.3.1 Emissões de ônibus a etanol.....	90
5.3.2 Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE).....	95
5.3.2.1 Avaliação das emissões de gases de efeito estufa pelo ônibus e etanol, a partir de diferentes cenários.....	97
5.3.2.2 O cenário de linha de base.....	97

5.3.2.3 A fronteira do projeto.....	98
5.3.2.4 Potencial de geração de créditos de carbono.....	107
6. EMISSÕES DE ALDEÍDOS EM VEÍCULOS DIESEL.....	109
6.1 Efeito dos aldeídos sobre a saúde humana e o meio ambiente.....	115
6.2 Emissões de aldeídos em motores diesel.....	116
6.3 Efeito da composição do diesel nas emissões de aldeídos.....	117
7. IDENTIFICAÇÃO DAS BARREIRAS ECONÔMICAS QUE EVENTUALMENTE SE INTERPONHAM À VIABILIZAÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO DESSA TECNOLOGIA DE ÔNIBUS DIESEL MOVIDO A ETANOL NO TRANSPORTE PÚBLICO URBANO.....	123
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES.....	138
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	144
APÊNDICE A- Princípio de Funcionamento dos Motores Ciclo Diesel.....	161
APÊNDICE B - Síntese da Legislação Brasileira sobre o Controle de Emissões Atmosféricas Veiculares.....	171
APÊNDICE C - Histórico do projeto BEST e Resultados dos Testes em Campo.....	174
APÊNDICE D - Emissões dos ônibus a diesel.....	203
APÊNDICE E - Os Mercados de Carbono.....	220

1. INTRODUÇÃO

Durante centenas de anos os seres vivos vêm realizando atividades que modificam a composição química da atmosfera. O conceito de poluição atmosférica inclui atividades humanas e/ou atividades naturais que levam à deterioração da qualidade original da atmosfera. Neste trabalho pretende-se discutir algumas dessas mudanças causadas pela ação do homem, chamadas antropogênicas.

A poluição do ar acompanha a humanidade há muitos anos, passando a ser mais notada na época da Revolução Industrial, quando o carvão mineral começou a ser utilizado como fonte de energia em substituição à lenha. A seguir, as inovações tecnológicas, a utilização do petróleo, o maior número de automóveis e outros meios de transporte motorizados, acentuaram ainda mais o problema (VELÁZQUEZ, 2006).

Os impactos das ações antrópicas sobre o meio ambiente assumem grande importância atualmente, face à globalidade dos efeitos da poluição atmosférica na saúde humana e na vida do planeta como um todo, que colocam em risco sua sustentabilidade. Frente a essa realidade, o homem precisa repensar seu conceito de crescimento econômico e sua postura em relação à natureza.

No Brasil e em outros países em desenvolvimento a situação tende a se agravar com a perspectiva do aumento populacional contínuo e, principalmente, pelo aumento do poder aquisitivo individual dessa população; por consequência, o aumento no consumo *per capita*, que leva diretamente ao crescimento da frota de veículos. Segundo Rei (2007), há poucos anos, o principal contribuinte nos impactos ambientais era o setor produtivo. Entretanto, hoje, nas regiões metropolitanas das grandes cidades, a principal contribuição para a piora da qualidade do ar não é de origem industrial, pois mais de 90% é de origem veicular sendo o enxofre o grande responsável pela piora da qualidade do ar. A quantidade de veículos automotores vendidos no Brasil e, em particular, na cidade de São Paulo é muito grande. Ainda, segundo Rei (2007), uma média histórica de 500 mil veículos novos por ano entram em circulação.

Diversos estudos analisam as emissões de poluentes que provocam impactos ambientais, especialmente no ar. Estes estudos se preocupam com o setor de transportes, pois a poluição atmosférica, devido aos efluentes gasosos, é proveniente, em grande parte, da queima de combustíveis fósseis.

No caso dos combustíveis fósseis, de um modo geral, os principais poluentes encontrados nos gases de combustão são os óxidos de enxofre (SO_x), resultantes da queima do enxofre do próprio combustível, os óxidos de nitrogênio (NO_x), resultantes tanto do nitrogênio presente no ar da combustão quanto no próprio combustível e o material particulado (MP)¹ (VERGNHANINI; USHIMA, 1996).

Vale ressaltar, também, a problemática do gás ozônio (O_3), chamado ozônio troposférico, que pelo fato de não ser emitido diretamente pelas fontes, seu controle é complexo, uma vez que deve ser feito por meio de programas de redução de seus precursores, os compostos orgânicos voláteis (COV's) e os NO_x , que em presença da luz solar formam o O_3 na atmosfera (CETESB, 2000).

Os elevados níveis de poluição atmosférica já alcançados em algumas regiões e seus reflexos negativos sobre a saúde e o meio ambiente, somados à crescente industrialização do país e elevação do número de veículos automotores em circulação, com conseqüente aumento do nível de emissões atmosféricas, mostram a urgência de promover a conscientização dos diferentes setores da sociedade para a necessidade da preservação ambiental.

Segundo Saldiva (2009), a poluição atmosférica local (aquela que impacta a qualidade do ar no local onde o poluente é emitido) está associada a aumentos significativos de admissões hospitalares e à mortalidade por doenças respiratórias e cardiovasculares. As crianças, idosos e indivíduos com doenças respiratórias e cardiovasculares, bem como integrantes dos segmentos menos favorecidos do ponto de vista socioeconômico, são os alvos preferenciais da ação dos poluentes. Medidas mais sofisticadas de parâmetros biológicos (parâmetros hematológicos ou medidas funcionais dos sistemas respiratórios e cardiovasculares) indicam que todos os habitantes dos grandes centros urbanos apresentam uma inflamação (pulmonar e sistêmica) subclínica, aumento de pressão arterial, maior risco de arritmias e infarto do miocárdio, que ao longo dos anos levam à redução da expectativa de vida. Por exemplo, estima-se que os níveis atuais de poluição da cidade de São Paulo promovam uma redução de cerca de 1,5 ano de vida devido ao câncer de pulmão e vias aéreas superiores, infarto agudo do miocárdio e arritmias e bronquite crônica e asma. Os custos dos efeitos crônicos da poluição do ar, estimados no valor dos dias de vida perdidos em função dos efeitos acima descritos, são substanciais. No caso da cidade de São Paulo, as estimativas mais conservadoras apontam para valores de US\$ 400 milhões por ano.

¹ O material particulado compõe-se de partículas que ficam suspensas no ar, emitidas na forma de poeira, fumaça, fumo ou névoa (ASSUNÇÃO, 2004).

Entre os efeitos globais da poluição do ar, em todo o planeta, provocados pela queima dos combustíveis está o efeito estufa. “O efeito estufa é um mecanismo natural de aquecimento da atmosfera responsável por manter a temperatura média do planeta em níveis adequados para a existência dos seres vivos (...)” (TASCHETTO, 1997, p. 2), por meio da absorção e da re-emissão de calor por alguns gases, denominados Gases de Efeito Estufa (GEE)².

Dos quinze últimos anos, treze foram os mais quentes da história (WMO, 2011). Mesmo assim, a produção de energia, em grande parte baseada na queima de combustíveis fósseis causadores do efeito estufa, que cresceu quase 6% entre 2009 e 2010 no mundo (IPCC, 2011) e deverá crescer 230% até 2050. O mundo ainda tem 1,3 bilhão de seres humanos desconectados das redes de transmissão de energia elétrica (IEA, 2011) e o atendimento desta demanda energética impulsionará o desenvolvimento, porém ameaçará o clima global (ALMEIDA, 2003).

Segundo Goldemberg (2003, p.173)

“(...) o esgotamento das fontes de energia convencionais não parece ser um problema imediato, porque existem reservas das principais fontes de energia fóssil para, pelo menos, trinta ou quarenta anos. O problema real é a poluição causada pelo seu uso na biosfera terrestre.”

Um dos mais significativos e preocupantes GEE é o CO₂ e suas emissões no Brasil, advindas da utilização de diversos tipos de combustíveis, cresceram muito nos últimos 40 anos, além de que se devem incluir as queimadas e os desmatamentos, o que posiciona o Brasil entre os seis primeiros emissores de GEE (WMO, 2011). Segundo o IPCC, o CO₂, o CH₄ e o N₂O são considerados os principais gases de efeito estufa, sendo que, considerando as emissões provocadas pelo desmatamento, o Brasil ocupa a 4ª posição entre os maiores emissores de GEE.

No caso do setor de transportes, foco deste trabalho, nos combustíveis provenientes da biomassa, as emissões de CO₂ devido à combustão podem ser consideradas praticamente nulas, pois o CO₂ liberado na reação química é reabsorvido no próximo ciclo de vida da planta (fotossíntese). Porém, quando se considera o ciclo completo da biomassa, incluindo o consumo direto e indireto de fósseis, verifica-se a emissão líquida de CO₂, e de outros gases causadores do efeito estufa. A quantidade de CO₂, N₂O e CH₄ lançados à atmosfera é ainda objeto de estudos, mas está claro que há formas de biomassa menos poluentes que outras e técnicas de exploração e uso do solo capazes de garantir emissões totais de GEE bem menores que as geradas pelo uso de combustíveis fósseis (EPA, 2010).

² Taschetto (2001) descreve, com detalhes, o balanço radioativo global na Terra, além dos índices de concentração e função de cada GEE, bem como suas consequências.

Com relação aos combustíveis fósseis, a Petrobrás destinou US\$ 12,6 bilhões em seu plano de negócios, entre 2011 e 2015, para melhorias da qualidade do diesel mais limpo, com menor teor de enxofre (DCI, 2011), fato que Goldemberg (2007) considera de fundamental importância para a preservação do ambiente e proteção da saúde humana, especialmente nas regiões metropolitanas. Entretanto, existe a possibilidade de utilização do etanol, combustível renovável e isento de enxofre, em larga escala, no transporte público urbano.

Os veículos com tecnologia *flex fuel*, cujo início de fabricação foi em 2003, vêm, gradativamente, substituindo a gasolina por etanol. Em 2010, tais veículos representavam cerca de 77% dos veículos vendidos, acumulados desde 2003 até abril de 2010, tem-se 9,6 milhões de veículos *flex* no mercado (ANFAVEA, 2011).

Segundo ANP (2011), tal efeito *flex fuel* provocou um aumento no consumo de etanol, de 2008 para 2009, de 0,81%, sendo que de 2007 para 2008 este aumento foi de 2%, conforme Figura 01 abaixo. Entretanto, há a necessidade de introduzir uma tecnologia que desloque ou substitua o óleo diesel.

Figura 01– Matriz Veicular de Combustíveis no Brasil

Fonte: ANP, 2011.

Nos últimos 40 anos, com o crescimento econômico do país, houve um incremento da posse e uso do automóvel. Conseqüentemente, a população da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) evoluiu sua forma de locomoção pelo meio urbano. A Secretaria de Transportes Metropolitanos do Estado de São Paulo (STMSP) disponibiliza dados sobre o panorama do transporte na RMSP por meio da pesquisa Origem Destino (OD). A Figura 02 apresenta a evolução das viagens diárias por modo principal de locomoção na RMSP.

Figura 02 - Evolução das viagens diárias por modo principal na RMSP.

Fonte: STMSP, 2008.

De acordo com os dados da Figura 02, a maioria dos deslocamentos acontece por meio de transporte coletivo, que vêm crescendo nos últimos 10 anos. Segundo Moreira (2008)³, se os 15.000 ônibus movidos a diesel que circulam na região metropolitana de São Paulo utilizassem etanol como combustível, ambientalmente, é como se existissem somente 3.000 ônibus em circulação.

Neste contexto, apresenta-se, então, o Projeto BEST – BioEtanol para o Transporte Sustentável.

O Projeto BEST é uma iniciativa da União Européia, coordenada pela Prefeitura de Estocolmo, na Suécia. Seu objetivo foi incentivar o uso do etanol, em substituição ao diesel, no transporte público urbano no Brasil e no mundo. Os veículos utilizados nos testes foram monitorados e avaliados para demonstrar a eficiência energética do etanol e, após os resultados, o projeto BEST e a União Européia forneceram recomendações para a formulação de políticas públicas de incentivo à substituição de combustível. O CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa, do IEE – Instituto de Eletrotécnica e Energia, da USP – Universidade de São Paulo, desenvolvem duas metas do projeto.

Além de São Paulo, pioneira nas Américas, outras oito cidades, localizadas na Europa e Ásia, participam do projeto: Estocolmo (Suécia), Madri e País Basco (Espanha),

³ José Roberto Moreira. Centro Nacional de Referência em Biomassa – Cenbio. Informação pessoal. São Paulo. Setembro de 2007.

Rotterdam (Holanda), La Spezia (Itália), Somerset (Inglaterra), Nanyang (China) e Dublin (Irlanda).

Uma das metas brasileiras do projeto BEST foi avaliar o uso do etanol como combustível alternativo ao diesel, em ônibus utilizados para o transporte público, por meio de acompanhamento comparativo do desempenho operacional de frota experimental, tomando como referência ônibus diesel equivalente.

A tecnologia utilizada, motor diesel adaptado para funcionar com etanol, desenvolvida pela empresa Scania sueca, está disponível e tecnicamente aperfeiçoada. Na Suécia circulam mais de 750 ônibus movidos a etanol brasileiro, sendo que, aproximadamente, 400 estão em Estocolmo (UNICA, 2010).

O Brasil possuiu o maior programa comercial de biomassa do mundo, o PROÁLCOOL – Programa Brasileiro do Álcool, que foi lançado em 1975 pelo Governo Federal com o intuito de produzir etanol a partir da cana-de-açúcar para reduzir as importações de petróleo. Desde 2008, o programa de etanol brasileiro passou a ser o segundo maior do mundo, sendo que os Estados Unidos ocupou a primeira posição, com seu programa de etanol de milho.

No Brasil, o etanol é compulsoriamente adicionado à gasolina, em porcentagem definida pelo Governo Federal, que varia de 20 a 25% em volume, em substituição ao chumbo tetraetila e o MTBE – *Methyl tert-butyl ether*, que eram adicionados à gasolina para aumentar sua octanagem. Este combustível é chamado gasohol. Também é largamente usado de forma voluntária nos veículos tipo *flex-fuel* e em veículos movidos exclusivamente a etanol hidratado.

O Brasil é líder no mercado mundial de etanol de cana-de-açúcar, sendo que praticamente 2/3 desse volume é produzido no Estado de São Paulo (UNICA, 2011). O solo e clima favoráveis, além do investimento em pesquisa e desenvolvimento, contribuem para o aumento da produtividade do etanol, reduzindo seus custos de produção.

Comparativamente às outras matérias-primas para a produção do etanol, a cana-de-açúcar no Brasil tem a vantagem de possuir maior produtividade, aproximadamente 8.100 litros por hectare, contra o etanol produzido, por exemplo, a partir de milho, nos EUA, de 3.300 litros por hectare (EPA, 2010). Além disso, os custos de produção do etanol brasileiro são significativamente menores, conforme Figura 03, que mostra que o custo de produção de etanol, em meados de 2005. Os preços são mais elevados nos Estados Unidos e na União Européia e o mais baixo ocorre no Brasil, seguido pela Tailândia.

Figura 03 – Custo de produção do etanol para diferentes matérias-primas

Fonte: FULTON, 2004.

Com relação ao balanço energético, devido à utilização do bagaço de cana-de-açúcar como combustível, no processo de cogeração nas usinas, no caso do etanol de cana-de-açúcar é necessária uma única unidade de energia fóssil para produzir de oito a dez unidades de energia renovável. Já, no caso do etanol de milho, a cada unidade de energia fóssil gasta na produção corresponde, em média, uma unidade de energia renovável (Figura 04).

Figura 04 – Balanço de energia de etanol produzido a partir de diferentes matérias-primas.

Fonte: USDA, 1995.

Quanto às emissões de gases de efeito estufa do etanol produzido a partir da cana-de-açúcar, são muito menores quando comparadas às do etanol proveniente de outras matérias-primas (Figura 05). Vale ressaltar que Figura 05 apresenta as emissões de GEE sem considerar o uso da terra.

Figura 05 – Emissões de gases de efeito estufa provenientes de etanol de diferentes origens ignorando as emissões devido às mudanças no uso do solo.

Fonte: MOREIRA, 2007.

Figura 06 – Análise do Ciclo de Vida para o Etanol de cana-de-açúcar com e sem coleta de resíduos e CBI⁴.

Fonte: EPA, 2010.

A Figura 06 acima apresenta a projeção das emissões de GEE (gCO₂eq/MBtu) comparando a gasolina e a diferentes cenários para o etanol (com e sem coleta de resíduos e com e sem CBI). Percebe-se que as emissões de GEE, comparado as emissões da gasolina, podem ser entre 60 e 90% menores, dependendo do cenário avaliado. É importante ressaltar também que este estudo do EPA leva em consideração diversos aspectos, como a produção do combustível, a mudança do uso do solo (interna e externa ao país), entre outros. Ainda, segundo o relatório do EPA, as informações contidas neste gráfico apresentam 95% de confiança, sendo que os 5% de incerteza devem-se aos tipos de mudança de uso do solo e a magnitude das emissões de gases de efeito estufa.

Portanto, conclui-se que o etanol é uma resposta rápida para reduzir as emissões de gás carbônico (CO₂), pela disponibilidade agrícola, tecnológica e custos compatíveis com os do petróleo. O Brasil tem potencial para reduzir entre 18% e 36% das emissões de poluentes

⁴ CBI - *Caribbean Basin Initiative*. Pelas regras da CBI, pode ser exportado bioetanol nos seguintes casos: a) volumes até 7% do mercado americano sem restrições de origem, ou seja, aceita-se biocombustível apenas processado no país, b) 132 milhões de litros de bioetanol como quota suplementar, que contenha pelo menos 35% de produto local; e c) um volume ilimitado de biocombustível desde que contenha mais de 50% de conteúdo local. As importações de bioetanol pelo mercado norte-americano se situaram em 4,6 bilhões de litros em 2006 e 2007, em sua maior parte (cerca de 75%) realizadas através do CBI e, em menor grau, oriundas diretamente do Brasil, do Canadá e de outros países (Global Biofuels Center, 2008).

com biocombustíveis até 2020, mas deve associar sua expansão a uma postura social e ambiental responsável. Essa atitude pode superar inclusive as barreiras impostas ao etanol brasileiro no exterior (LA ROVERE apud BERNARDES, 2008)⁵.

O estado da Califórnia, nos Estados Unidos, reconheceu a contribuição do etanol brasileiro no combate ao aquecimento global após atualizar seus cálculos sobre a redução de emissões do combustível feito de cana-de-açúcar. Em março de 2009, o Conselho de Qualidade do Ar da Califórnia (CARB, sigla em inglês) aprovou a regulamentação do primeiro Padrão de Combustível de Baixa Emissão de Carbono (ou LCFS, em inglês) do mundo. O LCFS tem o objetivo de promover, a partir de 2011, uma redução na intensidade do carbono de todos os combustíveis usados naquele estado, com a intenção de atingir uma redução de pelo menos 10% até 2020 (CEPA, 2009).

Em seus cálculos, o CARB determinou que a intensidade de carbono da gasolina é de 95 gramas de dióxido de carbono por megajoule (gCO_2/MJ), o que significa que a gasolina precisa reduzir sua intensidade de carbono para 86 gCO_2/MJ até 2020, para atender à nova regulamentação nos próximos anos. Só na Califórnia rodam cerca de 30 milhões de veículos, aproximadamente o mesmo número de veículos em toda a frota brasileira, e o consumo de gasolina soma mais de 60 bilhões de litros por ano (CEPA, 2009).

Nos cálculos originais do CARB, o etanol de cana teria uma intensidade de 27 gCO_2/MJ , além de supostas emissões indiretas de 46 gCO_2/MJ , elevando o total para 73 gCO_2/MJ . Entretanto, os novos dados anunciados pelo CARB permitiram créditos de mais de 15 gCO_2/MJ devido ao uso da bioeletricidade no Brasil (7 gCO_2/MJ), bem como a colheita mecânica (8,2 gCO_2/MJ) da cana, sem uso de fogo, que vem avançando rapidamente no Brasil (CEPA, 2009).

Não se pode deixar de levar em consideração que a expansão do cultivo de terra para a produção de energia, ou qualquer outro uso, torna irreversível a conversão de ecossistemas virgens. O desmatamento, por exemplo, causa a extinção da espécie e de seus habitat, e a perda das funções de um ecossistema. Estudos revelam que a destruição em larga escala das florestas pode afetar o ciclo hidrológico e o clima, reduzindo a precipitação regional e provocando o aumento da temperatura.

No Brasil, a expansão da cana-de-açúcar está limitada pela qualidade do solo, da precipitação pluviométrica e da logística do combustível. A cana-de-açúcar não é uma colheita com particular exigência em termos do solo, adaptando-se razoavelmente aos solos

⁵ LA ROVERE, E. Expansão da bioenergia deve respeitar o meio ambiente e não provocar prejuízos sociais. Brasília, 2008.

de fertilidade média e de porosidade elevada, mais arenosos. Solos mais férteis implicam em uns níveis mais elevados da produtividade e/ou na demanda menor para fertilizantes e produtos corretivos, mas apresentam custo maior. As áreas que necessitam de irrigação são mais problemáticas, devido aos investimentos iniciais e ao custo da energia usada na irrigação. A maioria do solo da região amazônica não é apropriada ao cultivo da cana-de-açúcar por razões não agricultáveis, além do fato do desmatamento indesejável (GOLDEMBERG; COELHO; GUARDABASSI, 2008). Estudos do Instituto de Estudos do Comércio e Negociações Internacionais (Icône), apontam que no Sudeste, por exemplo, entre 2005 e 2008, o pasto foi o grande doador de terras para a expansão da cana-de-açúcar. De 1,7 milhão de hectares sobre os quais a cana avançou - a área total plantada saltou de 3,6 milhões de hectares para 5,3 milhões de hectares no período, sendo que 900 mil hectares foram cedidos pelas pastagens, ante cerca de 600 mil hectares pelas lavouras anuais e apenas 5 mil hectares pelas áreas de mata nativa (ICONE, 2011).

A expansão de plantações de cana-de-açúcar no Brasil, desde o início do PROÁLCOOL, em 1975, até 2007, ocorreu principalmente em áreas já desmatadas (PACCA; MOREIRA, 2009). Uma imagem aérea, de 1962, indicava que menos de 14% da área do estado de São Paulo era coberta por florestas. De acordo com o último inventário da silvicultura, 13,4% da área no Estado de São Paulo é coberta por vegetação nativa (SMA, 2007). Conseqüentemente, a área com cobertura florestal no estado de São Paulo não foi afetada pela expansão da cana-de-açúcar.

Uma situação similar foi observada nos estados do Paraná e de Minas Gerais. Entre novembro 2007 e abril 2008, aproximadamente 92% da mudança do uso do solo foi devida à expansão da cana-de-açúcar que deslocou o milho, a soja, o café, a laranja e o pasto. Entretanto, a maioria da mudança do uso do solo deslocou terra de pastagem, correspondendo a 65% (PACCA; MOREIRA, 2009).

A mudança indireta do uso do solo é, também, importante para discutir sobre a sustentabilidade dos combustíveis. Com base em dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas - IBGE (NASSAR apud PACCA, MOREIRA; 2009)⁶, foi estudado o efeito do uso indireto do solo. Os resultados demonstraram que para cada 1 hectare da expansão da cultura de cana-de-açúcar, todas as outras culturas tiveram expansão de 5,5 hectares e a terra de pastagem diminuiu 5,4 hectares, até o ano de 1992. Portanto, a área nova usada para todas

⁶ NASSAR, A. M. Prospector of the sugar cane expansion in Brazil: impacts on direct and indirect land use changes.

as atividades agrícolas aumentou 0,1 hectare por cada 6,5 ha de expansão na atividade agrícola.

Frente a estes fatos, esta tese se baseia no projeto BEST mencionado, cujo objetivo é analisar a viabilidade e as perspectivas da substituição do diesel por etanol, no transporte público urbano, considerando os aspectos técnicos, legais, sócio-econômicos e político-ambientais envolvidos no tema, além de avaliar as emissões de aldeídos em veículos diesel, já que as emissões deste poluente estão associadas, somente, à utilização de etanol, gasolina e gás natural em motores Ciclo Otto.

Vale ressaltar que, a autora fez parte da equipe técnica que desenvolveu o projeto BEST, participando de todos os testes, levantamento de dados, negociações, bem como os demais temas envolvidos no projeto.

O motor diesel adaptado para funcionar com etanol foi desenvolvido pela empresa Scania sueca, e é de fabricação exclusiva. A adaptação não requer mudanças tecnológicas significativas, porém exigem o uso de um motor especialmente projetado e não permite o “retrofit” simples de um motor convencional, segundo o fabricante. O motor que iniciou os testes no Projeto BEST, em 2007, tem injeção mecânica, taxa de compressão de 1:22 e potência de 230 HP (169 kW) sendo que nos motores diesel convencionais essa taxa é de 1:18 (SENNA, 2007). Portanto, as mudanças envolvem o aumento na taxa de compressão e um sistema de injeção de combustível com maior vazão que o convencional, pois usa-se perto de 1,7 litros de etanol para substituir 1 litro de diesel. Como o bloco dos motores projetados para taxa de compressão de 1:18 não suportariam o aumento significativo da pressão e a bomba de injeção de combustível – uma peça extremamente complexa dos motores diesel – não permite um aumento de fluxo de combustível de 70%, isso explica a impossibilidade econômica de fazer uma adaptação (“retrofit”) nos motores convencionais.

O segundo motor, que entrou em operação em 2010, é um motor de nova geração (198 kW ou 270 HP) e, entre as modificações efetuadas, apresenta taxa de compressão de 1:28, injeção eletrônica e injetores com maior capacidade volumétrica, maior tempo de injeção de combustível, além de emprego de materiais resistentes à corrosão em algumas peças internas, tais como gaxetas, retentores, molas e válvulas. O sistema de transmissão, a carroceria, os freios e o chassi são exatamente os mesmos que os empregados nos veículos a diesel convencionais. Tais adaptações, em ambos os casos, permitem que o motor diesel opere com etanol aditivado.

A originalidade deste trabalho está na análise dos resultados do projeto BEST, no estudo econômico comparativo das tecnologias de ônibus diesel e ônibus diesel movido a

etanol, no levantamento das políticas públicas de incentivos necessárias à implementação dos ônibus a etanol e no estudo sobre as emissões de aldeídos em veículos diesel.

A emissão de aldeídos está associada a problemas ao meio ambiente e a saúde pública, inclusive a incidência de câncer. Além disso, os aldeídos são precursores do ozônio troposférico. Sendo assim, esta tese tem como proposta de originalidade vincular a emissão deste poluente também ao diesel, já que as emissões deste poluente estão associadas, principalmente, aos motores Ciclo Otto, que utilizam etanol, gasolina e gás natural.

A utilização de etanol em veículos pesados reduz a emissão de poluentes como óxidos de enxofre e material particulado, proporcionando subsídios para a formulação de políticas de incentivo à substituição do diesel como principal combustível no transporte público.

Segundo Saldiva et al. (2009), um dos aspectos mais significantes é a utilização na frota cativa de ônibus dos grandes centros urbanos movidas a etanol. Considerando os aspectos de saúde humana, o etanol pode ser uma das alternativas mais eficientes para a obtenção de transporte coletivo de baixa emissão de poluentes. Ainda, segundo Saldiva et al. (2009), há carência de estudos sobre o efeito do uso de biocombustíveis na emissão de veículos pesados, com relação ao comportamento do motor e sistema de filtros para partículas.

Após a apresentação do tema no capítulo de introdução, o segundo capítulo desta tese apresenta o estado da arte da tecnologia dos ônibus movidos a etanol, demonstrando a experiência com estes ônibus no mundo.

O terceiro capítulo traz estudo comparativo dos motores diesel e dos motores movidos a etanol, incluindo as modificações e alterações necessárias em um motor ciclo Diesel para operação com etanol.

O quarto capítulo apresenta os efeitos da poluição atmosférica sobre a saúde humana, bem como a situação atual da qualidade do ar na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). Serão verificados os principais poluentes provenientes das emissões veiculares, principalmente dos veículos diesel, e os efeitos destes poluentes na saúde humana.

No quinto capítulo apresenta-se o estudo de caso no Projeto BEST. Este capítulo apresenta os resultados do projeto BEST no Brasil e no mundo. É dividido em itens que discutem a experiência dos ônibus a etanol, comparativamente a ônibus similar movido exclusivamente a diesel no Brasil; a experiência do projeto em outros países, bem como estudo comparativo das emissões provenientes dos ônibus movidos a diesel e a etanol, inclusive estudo sobre as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE).

Após o estudo de caso, a tese aborda, no capítulo 6 as emissões de aldeídos em veículos diesel. Este capítulo, irá demonstrar a importância e a contribuição dos veículos diesel na emissão de aldeídos até então associados unicamente aos veículos com motores do Ciclo Otto.

O capítulo 7 discute as barreiras que eventualmente se interponham à viabilização da implementação dessa tecnologia no transporte público no Brasil.

E, finalmente, o Capítulo 8 apresenta as conclusões e as contribuições deste trabalho considerando a utilização do etanol no transporte público urbano, abrangendo, inclusive, a necessidade de introdução de políticas públicas de incentivo a esta tecnologia.

2. EXPERIÊNCIA COM ÔNIBUS MOVIDOS A ETANOL NO MUNDO

O crescimento das principais cidades dos países em desenvolvimento tem criado condições adversas à qualidade do ar, semelhante às condições atuais das grandes metrópoles, cuja poluição deve-se, principalmente, às emissões provenientes dos veículos. No Brasil, esta situação não é diferente. O Gráfico 01 abaixo demonstra a evolução da população brasileira, entre 1940 e 2000. Verifica-se, claramente, o aumento da população urbana ao longo dos anos.

Gráfico 01 – População residente, por situação de domicílio - Brasil.

Fonte: IBGE, 2011.

O agravamento da poluição atmosférica, seja recente ou antigo, alimentado por combustíveis, que têm sua qualidade diferenciada dependendo do país ou da região, requer soluções com o mesmo grau de sofisticação tecnológica utilizadas nos países desenvolvidos, caso contrário permanecem os efeitos da contaminação gerada pela aglomeração exagerada da população e do tráfego de veículos (BRANCO, 2006).

No Brasil, providências vêm sendo tomadas no sentido de buscar tecnologias de menor impacto ambiental. Uma das iniciativas para diversificar a matriz energética e substituir parcialmente o diesel foi à produção de biodiesel, que vem sendo parcialmente misturado ao diesel. Entretanto, essa alternativa ainda não pode atender à demanda de combustível no curto prazo (IPCC, 2011). Por outro lado, o etanol carburante, combustível

proveniente da biomassa, renovável e com baixa emissão de poluentes só é largamente utilizado em motores de ignição por centelha, ciclo Otto, pois seu uso em motores ciclo diesel esbarrava em problemas técnicos que o inviabilizavam. Entretanto, a tecnologia dos ônibus diesel foi adaptada para receber o etanol como combustível. Alguns países já têm experiência com veículos pesados diesel operando com etanol e este capítulo apresentará a experiência anterior de ônibus movidos a etanol no mundo, abordando as atividades realizadas.

2.1 Experiência de ônibus movido a etanol na Suécia

A Scania sueca iniciou a pesquisa sobre motores ciclo diesel movidos a etanol aditivado no ano de 1985 e no ano de 1989 foram oficialmente incorporados à frota de ônibus de Estocolmo, pela empresa Transportes de Estocolmo (SL), os primeiros 32 ônibus Scania movidos a etanol aditivado, visando à substituição da frota a diesel que circulava no centro urbano. O objetivo do programa sueco era reduzir a poluição gerada no centro da cidade, onde havia grande concentração de emissão de poluentes. No ano de 2007, cerca de 500 ônibus já circulavam em oito cidades na Suécia, sendo que 400 desses em Estocolmo. (MILJOBILAR; STOCKHOLM, 2007). Hoje, são mais de 600 ônibus circulando na Suécia, que em 2012 espera utilizar mais de 50% de frota de transporte público movida a partir de combustíveis renováveis (UNICA, 2010).

Embora os custos de operação e manutenção fossem superiores aqueles para o equivalente a ônibus diesel, a SL mostrou-se satisfeita com a experiência de usar o etanol em ônibus, e os riscos previstos de maior desgaste no motor revelou-se infundada. Como resultado, a SL decidiu eliminar progressivamente os ônibus a diesel em favor dos ônibus movido a etanol (CADDET, 1997).

Os primeiros veículos utilizados no projeto de demonstração da SL eram do modelo CN 113. Este modelo foi proveniente do modelo diesel 11 l DSI11E, que foram adaptados para operar com etanol, conforme descrição abaixo:

- Aumento da taxa de compressão de 18:1 para 22:1;
- Aumento da capacidade dos bicos injetores;
- Modificação no tempo de injeção;
- Aumento da capacidade da bomba de combustível;
- Alteração das juntas e filtros para materiais resistentes ao etanol.

O combustível utilizado foi 95% etanol de base biológica, produzido a partir de subprodutos florestais, 2% de melhorador de ignição, chamado de Avocet (mais tarde substituído por Beraid), além de denaturantes.

Devido à tendência do etanol em dissolver o óleo lubrificante das superfícies metálicas, foi escolhido o óleo de mamona como lubrificante. Os ônibus eram equipados com um tanque extra de 115 litros, resultando em um volume total de combustível de 395 litros, suficientes para a operação diária. Segundo a Caddet (1997), na prática a capacidade extra de combustível não foi necessária, já que o consumo de etanol, em 24 horas de operação, nunca ultrapassou os 150 litros.

O período de demonstração, um dos maiores já realizados, envolvendo a operação de 32 ônibus pela empresa SL, começou em 1990 e durou 4 anos e cerca de 4.000 quilômetros.

Testes de emissão foram realizados em alguns ônibus demonstrando baixo nível de emissões dos poluentes regulamentados, além de um potencial de redução ainda maior tendo em vista a nova geração de motores Scania que estava por vir.

A comparação das emissões ao longo do tempo (no início e ao final do período de testes) mostrou que as emissões de monóxido de carbono aumentaram com o aumento da quilometragem percorrida. As emissões de óxidos de nitrogênio foram relativamente constantes e não foi percebida qualquer tendência para emissão de hidrocarbonetos (CADDET, 1997).

As emissões não regulamentadas, como os aldeídos, também foram baixas e nunca se mostraram superiores as emissões provenientes do diesel de melhor qualidade (diesel metropolitano, com catalisadores). As emissões de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos também foram baixas, assim como os níveis mutagênicos encontrados nos escapamentos.

Os ônibus movidos a etanol foram usados no tráfego regular no centro de Estocolmo. Motorista e mecânicos tiveram um treinamento para operar e fazer a manutenção nos ônibus. Os motoristas não encontraram nenhum problema operacional, além daqueles já encontrados em veículos diesel.

Um problema específico proveniente da operação dos ônibus movidos a etanol foi o cheiro de ácido acético proveniente dos escapamentos dos veículos, em alguns momentos. Isto era devido à combustão incompleta do etanol que foi convertido em ácido no catalisador e emitido pelo escapamento juntamente com outros gases de exaustão. Além desta situação, a operação com etanol mostrou-se praticamente inodora. O cheiro mostrou-se mais forte durante a aceleração do ônibus parado. Apesar de não ser um risco à saúde, mostrou-se como uma fonte de problema.

Em 1997, o estudo realizado por Caddet (1997), já com 130 ônibus a etanol circulando em Estocolmo, mostrou os seguintes resultados: as emissões de óxido de nitrogênio (NOx) foram a metade das encontradas em 1980; as emissões de dióxido de carbono (CO₂) não foram superiores aos níveis de 1988 e o nível médio de ruído não ultrapassou 77 decibéis.

Com relação à parte econômica, os custos do combustível etanol mostraram-se superiores aos custos de diesel. Em média, durante o ano de 1996, um ônibus movido a etanol operando em Estocolmo teve um custo superior de 95.000 SEK (coroas suecas), ou seja, cerca de U\$ 14.000⁷, em comparação ao ônibus a diesel. Este custo extra foi quase totalmente devido ao maior custo de combustível. No entanto, este custo não reflete os custos ambientais e sócio-econômicos envolvidos no tema.

Durante o período de testes, o custo de operação e manutenção mostrou-se ligeiramente superior aos custos envolvidos na operação de ônibus diesel. Este custo foi derivado da maior frequência de limpeza dos bicos injetores, da substituição das linhas de alta pressão do combustível e dos filtros de combustível e óleo lubrificante da bomba de combustível. O custo de manutenção extra foi cerca de 3.500 SEK (aproximadamente U\$ 520,00). Ao longo dos anos, e com a experiência adquirida, muitos destes problemas foram resolvidos e a manutenção tornou-se mais esparsa.

O motor desenvolvido pela Scania encontra-se na terceira geração de desenvolvimento tecnológico e atende aos limites de emissão veicular europeu EURO 5, regulamentação que vigora no continente europeu desde setembro de 2009 e é certificado como EEV – *Enhanced Environmental Vehicle*, norma ainda mais rígida que a norma EURO 5 e que não possui data prevista para entrar em vigor na Europa (SCANIA, 2007).

As características gerais do ônibus a etanol podem ser apresentadas da seguinte forma: Motor Scania DC9 E02 (Etanol Euro V); capacidade de combustível – 400 litros; carroceria 12m 2+2+2 (12 metros com 3 portas duplas); ar condicionado; padron (não articulado); *Low entry*, piso baixo que facilita embarque e desembarque; sistema de extintor de incêndio na câmara do motor; câmbio automático.

Como resultado da operação dos ônibus a etanol em Estocolmo nos últimos quinze anos, cerca de 140 mil toneladas de dióxido de carbono (CO₂) deixaram de ser emitidas na atmosfera o que equivale às emissões de 5 mil carros de passeio (SCANIA, 2007).

⁷ 1 U\$ = 6,686 SEK (taxa de câmbio referente ao dia 04 de janeiro de 2011).

Atualmente, na Suécia a mistura de etanol é excluída da tributação dos combustíveis, o que equivale a SEK 5.65/litre (aproximadamente R\$ 1,90/litre) ao substituir a gasolina e SEK 4.67/litre (aproximadamente R\$ 1,56/litre) quando substituindo o diesel⁸ o que, para o diesel, corresponde a uma taxa de aproximadamente US\$ 650,00/tonelada de carbono.

Devido às exigências da legislação ambiental sueca, a Scania desenvolveu a tecnologia de motores de ignição com maior compressão e a SEKAB desenvolveu o aditivo. Atualmente, a Suécia utiliza o etanol importado do Brasil. Existem incentivos fiscais por parte do governo, que fazem o etanol ser vendido a 40% do preço do diesel (SENN, 2007).

2.2 Experiência de ônibus movido a etanol nos Estados Unidos

Em 1996, os Estados Unidos iniciou pesquisa com ônibus movido a combustível alternativo. A pesquisa foi feita com cerca de 4% da frota de ônibus americana e realizada pela Associação Americana de Trânsito Público. Dentre os combustíveis alternativos pesquisados tem-se o etanol (E93 e E95), metanol e gás natural comprimido (GNC), gás natural liquefeito (GNL) e mistura de diesel com biodiesel (B20). A pesquisa enfatizou ainda, que outro estudo seria realizado para avaliar os ônibus movidos a GNL, pois estes ainda não eram produzidos. Esta pesquisa não incluiu ônibus elétrico (trólebus).

O *National Renewable Energy Laboratory* (NREL), com financiamento do Departamento de Energia Americano, iniciou programa para avaliar o desempenho, confiabilidade, custos e emissões destes ônibus comparando com as emissões de ônibus diesel (controle). O programa envolveu a coleta de dados de operação e manutenção de mais de 100 veículos em oito agências de trânsito em todo o país. A meta do programa foi ter 10 ônibus de teste de cada combustível alternativo e 10 ônibus controle, que foram divididos entre duas agências, durante 18 meses. A Universidade da Virginia utilizou seus dinamômetros de chassi transportáveis para medir as emissões dos veículos.

A pesquisa ficou dividida da seguinte maneira:

- Houston, Texas: 10 veículos GNL com o motor Detroit Diesel 6V92, com ignição a gás natural;
- Portland, Oregon: oito veículos GNL com motor Detroit Diesel, com ignição a gás natural;
- Miami, Flórida: cinco ônibus a metanol Detroit Diesel 6V92 e cinco ônibus a GNV com motor Cummins L10;

⁸ Informação pessoal, Jonas Ericson, Prefeitura de Estocolmo, 06 de Agosto de 2012.

- New York, New York: cinco ônibus a metanol com motor Detroit Diesel 6V92 e cinco ônibus a GNV com motor Cummins L10;
- Tacoma, Washington: 10 ônibus a GNV com motores Cummins L10;
- Minneapolis/St. Paul, Minnesota: cinco ônibus a etanol com motor Detroit Diesel 6V92;
- Peoria, Illinois: cinco ônibus a etanol com motor Detroit Diesel 6V92;
- St. Louis, Missouri: cinco ônibus operando com 20% de biodiesel com motor Detroit Diesel 6V92.

A Figura 07 ilustra os lugares em que os ônibus foram testados.

Figura 07 – Regiões metropolitanas dos Estados Unidos onde os ônibus foram testados.

Fonte: PAUL NORTON et al., 1996.

A seguir são apresentados os resultados obtidos na pesquisa com os ônibus movidos a etanol, objeto deste trabalho.

Em todos os lugares onde foram testados os veículos a etanol apresentaram, basicamente, os mesmos problemas, principalmente com relação à qualidade do combustível. Isto resultou na maior ocorrência de falhas comparando-se o etanol com o diesel. Foram observadas, também, problemas de parada do motor. Estes problemas foram relacionados à incompatibilidade de materiais presentes no motor com o etanol, além de problemas de injeção de combustível.

Os ônibus a etanol com maior taxa de compressão (mais de 20:1), apresentam problemas com o excesso de peso (de 500 a 700 kg, dependendo da capacidade do tanque de

combustível). Entretanto, os resultados mostraram um bom desempenho, proporcionando consumo de combustível comparável ao diesel, em base de energia equivalente (MOTTA et al, 1996).

Com relação aos custos de operação e manutenção, os ônibus movidos a etanol apresentaram custo cerca de 75% superior aos custos com diesel. No custo de manutenção, a maior contribuição foi devido à constante troca do filtro de combustível. Os filtros de combustível custam, em média, U\$ 105,00 para o etanol, contra U\$ 6,00 para o diesel. A constante troca dos filtros de combustível deve-se à incompatibilidade do material com o etanol. A partir desta constatação, os materiais que compõem os filtros foram trocados e o problema corrigido. Os custos com sistemas elétricos também foram maiores nos ônibus a etanol, devido à maior taxa de substituição de baterias (MOTTA et al., 1996).

O incremento dos custos de capital para os ônibus a etanol, comparado com o diesel, foi de U\$ 20.000,00/ônibus (MOTTA et al., 1996).

A Tabela 01 apresenta uma comparação das emissões, em dinamômetro, dos ônibus movidos a etanol e diesel.

Tabela 01 – Resultado do teste de emissão em dinamômetro (g/milhas)

Cidade	Combustível	Coletor de Material Particulado (somente para diesel)	Número de ônibus	Número de testes	Odômetro (milhas)		MP	NO _x	HC	CO
					Mínimo	Máximo				
Peoria	Etanol	-	5	8	60.000	104.000	0,63	13,4	8,9	37,1
Mineappolis / St. Paul	Etanol	-	5	8	28.000	43.000	0,49	22,0	15,4	41,9
Peoria	Diesel	Não	3	6	89.000	108.000	0,72	25,3	2,7	7,5
		Sim	3	3	58.000	69.000	0,44	-	-	-
Mineappolis / St. Paul	Diesel	Não	5	9	107.000	151.000	1,05	25,3	3,4	9,5
		Não	5	10	43.000	69.000	0,81	26,4	2,1	6,7
		Sim	5	5	26.000	41.000	0,34	-	-	-
Miami	Diesel	Não	4	6	181.000	256.000	2,53	26,7	2,1	16,0

Fonte: MOTTA et al., 1996.

De maneira geral, os ônibus a etanol emitiram material particulado em níveis semelhantes aos ônibus diesel equipados com coletor de MP e em menores níveis quando comparado com os ônibus que não possuem coletor de MP. Apesar da menor emissão de material particulado, os ônibus a etanol necessitaram de maior manutenção e, por essa razão, eram removidos com maior frequência. Vale lembrar que a emissão de material particulado proveniente de motores diesel vem sendo reduzido a fim de atender os limites de emissão da *US Environmental Protection Agency* (EPA).

A maior parte dos ônibus a etanol emitiu níveis inferiores de NOx. Entretanto, apresentaram uma emissão maior de HC e CO, quando comparada as emissões com veículo diesel. A partir daí foram realizados testes, e alguns ônibus a etanol tiveram o conversor catalítico substituído. Estes ajustes resultaram em redução da emissão de CO, em cerca de 85% (de 40 g/milha para 6 g/milha) e redução de 67% de HC (de 11g/milha para 4 g/milha) (MOTTA et al., 1996).

Os ônibus a etanol mostraram-se perfeitamente adaptados para reduzir a emissão de NOx e material particulado, característica extremamente importante visando o atendimento dos rigorosos padrões de emissão nos Estados Unidos.

Os resultados dos testes de emissão em dinamômetro mostraram uma grande variação entre os níveis de emissão dos veículos a etanol, desde as primeiras gerações, comparados com as emissões dos veículos diesel, que têm décadas (e não somente alguns anos) de desenvolvimento como os veículos a etanol.

Os testes demonstraram que os veículos a etanol têm grande potencial para redução das emissões. Entretanto, demonstraram, também, que os níveis de emissões são altamente dependentes da tecnologia do motor e das condições do veículo.

Os testes demonstraram que alguns motores apresentaram altos níveis de emissão de HC e CO. Uma investigação mais detalhada provou que estes motores tiveram problemas com os injetores, catalisadores, válvulas e outros componentes. A correção destes problemas resultou em uma significativa redução das emissões, além de demonstrar a importância da manutenção adequada, bem como a necessidade de uma tecnologia mais robusta (MOTTA et al., 1996).

2.3 Experiência de ônibus movido a etanol no Brasil

Em 1997, em São Paulo, a Scania trouxe dois ônibus a etanol para demonstração no Brasil. Os testes tiveram início no corredor ABD (Santo André – São Bernardo – Diadema), da EMTU, e depois replicados em outras cidades (UNICA, 2011b).

Segundo a UNICA, os testes foram excelentes do ponto de vista ambiental. Entretanto, modestos do ponto de vista econômico. O maior consumo dos ônibus a etanol tornou a operação destes ônibus mais cara e menos competitiva quando comparada à operação com diesel.

Apesar dos testes demonstrarem que os ônibus a etanol não eram economicamente viáveis, eles trouxeram uma visibilidade para uma nova tecnologia, que aperfeiçoada, poderia substituir o diesel.

3. ESTUDO TÉCNICO COMPARATIVO DOS MOTORES DIESEL E DOS MOTORES MOVIDOS A ETANOL

O motor diesel foi criado por Rudolph Diesel, que registrou sua patente em fevereiro de 1897. Inicialmente, foi desenvolvido para trabalhar com óleo vegetal. Posteriormente, foi usado o produto mais abundante proveniente da primeira fase do refino do petróleo bruto, o diesel, que recebeu esse nome em sua homenagem.

Face à sua simplicidade e à enorme aplicação, o motor de pistões movidos à reação óleo-oxigênio rapidamente foi usado nos lugares mais longínquos do planeta, revolucionando o mundo industrial e substituindo os dispendiosos sistemas mecânicos a vapor, que até então movimentavam as locomotivas e o transporte marítimo, por unidades geradoras diesel-elétrica. Entretanto, Rudolph Diesel não conseguia resolver um inconveniente: o motor não atingia rotações elevadas. Sua câmara de combustão exigia que o combustível fosse injetado, na quantidade e momentos certos, através de ar comprimido. Um processo complicado, lento e viável apenas para motores grandes e de baixa rotação. Neste ponto que Robert Bosch dá a sua contribuição decisiva, viabilizando a limitação de combustível dos motores diesel de alta rotação. Em meados de 1923, após os primeiros testes, surgia um sistema de injeção pulverizado a pressão. Era mais compacto, mais leve e capaz de desenvolver maior potência.

Em 1927, a primeira bomba injetora deixa a fábrica, fruto da experiência industrial que Robert Bosch acumulou no desenvolvimento do sistema de ignição do motor ciclo Otto (SERVITEST, 2011).

O motor Diesel é uma máquina que transforma energia química em energia mecânica ou força motriz de acionamento. A energia térmica é conseguida pela queima do óleo diesel, o que se dá dentro de cada cilindro deste motor. Com base em suas aplicações, os motores diesel são classificados em quatro tipos básicos: estacionários, industriais, veiculares e marítimos.

Quando se trata do uso de derivados de petróleo em motores de combustão interna, estão bem estabelecidas as vantagens competitivas dos motores Diesel, para aplicações de maiores potências e de serviço pesado, e a dos motores de ignição por centelha - motores Otto, nas aplicações de menor potência e de uso menos intenso. Tais diferenças se devem principalmente à maior eficiência energética dos motores do ciclo Diesel - digamos 15% em aplicações veiculares, em contraposição ao menor custo de fabricação dos motores do ciclo Otto para a mesma faixa de potência (NIGRO, 2009).

Este capítulo apresenta um estudo com as adaptações necessárias nos motores ciclo Diesel para sua operação com etanol. Os princípios de funcionamento dos motores ciclo diesel encontram-se no APÊNDICE A.

3.1 Motores Diesel adaptados para operar com Etanol

Com relação motores diesel movidos a etanol, sabe-se que a Scania já possui tecnologia desenvolvida e comercialmente disponível.

O motor encontra-se na terceira geração de desenvolvimento tecnológico e atende aos limites de emissão veicular europeu EURO 5, regulamentação que vigora no continente europeu desde setembro de 2009 e é certificado como EEV – *Enhanced Environmental Vehicle*, norma ainda mais rígida que a norma EURO 5 e que não possui data prevista para entrar em vigor na Europa (SCANIA, 2007).

As características gerais do ônibus a etanol podem ser apresentadas da seguinte forma: Motor Scania DC9 E02 (Etanol Euro V); capacidade de combustível – 400 litros; carroceria 12m 2+2+2 (12 metros com 3 portas duplas); ar condicionado; padron (não articulado); *Low entry*, piso baixo que facilita embarque e desembarque; sistema de extintor de incêndio na câmara do motor; câmbio automático.

A tecnologia de motores ciclo diesel adaptados para operar com etanol aditivado (Figura 8) aprimorou-se, está disponível comercialmente, e é divulgada por meio do Projeto BEST- *BioEthanol for Sustainable Transpor* (BEST, 2006).

Figura 8 - Motor ciclo diesel movido a etanol aditivado.

Fonte: SCANIA,2008a

As diferenças encontradas no motor devem-se ao fato do etanol não possuir a propriedade de auto-ignição por compressão, que é o princípio de funcionamento do motor ciclo diesel. Portanto, para que o motor ciclo diesel movido a etanol funcione de maneira satisfatória, além da altíssima taxa de compressão, de 28:1, o combustível também deve ser aditivado em 5% no seu volume com um aditivo promovedor de ignição. O combustível é comercialmente conhecido como E95, em referência ao percentual de etanol em volume, que é de 95 %. A SEKAB sueca é a única empresa fornecedora de E95 para a frota de 600 ônibus a etanol de Estocolmo e para o projeto BEST. Seu combustível E95 é conhecido comercialmente como Etamax D (BEST, 2006).

As empresas SCANIA e SEKAB, ambas de nacionalidade Sueca, desenvolveram seus produtos em conjunto desde 1985 e se completam tecnicamente para o fornecimento de componentes e combustível para os ônibus movidos a etanol aditivado. Algumas características do novo motor são apresentadas na Tabela 02.

Tabela 02 - Características gerais do motor ciclo diesel movido a etanol aditivado.

Motor Scania DC9 E02
Taxa de compressão de 28:1;
5 cilindros;
Potência máxima de 270 hp (198kW) em 1900 rpm;
Torque máximo de 1200 Nm em 1100-1400 rpm;
Injetores individuais de maior vazão – UI (<i>Unit Injectors</i>);
Sistema de injeção eletrônica;
Turbo compressor;
Intercooler ar-ar;
Sistema EGR – <i>Exhaust Gas Recirculation</i> (controle de emissão de NO _x).

Fonte: CENBIO, 2008.

Na Tabela 03, a seguir, é apresentada uma comparação entre o motor diesel convencional e o motor diesel adaptado para operar com etanol.

Tabela 03 - Comparação entre o motor movido a etanol aditivado e o motor diesel equivalente

	Motor Diesel	Motor Diesel Adaptado para Operar com Etanol
Fabricante	Scania	Scania
Motor	DC9 17270	DC9 E02 Euro 5
Combustível	Diesel	Etanol aditivado (E95)
Princípio	Charge-cooled	Charge-cooled
Volume Deslocado	8,9 litros	8,9 litros
Ordem de Disparo	1-2-4-5-3	1-2-4-5-3
Cilindros	5 em linha	5 em linha
Cabeçotes individuais	5	5
Válvulas por cilindro	4	4
Diâmetro x Curso	127 x 140 mm	127 x 140 mm
Taxa de Compressão	17:01	28:01
Controle de Injeção	Scania PDE	Scania PDE
Potência máxima a ver/min.	198 kW a 1800 rmp	198 kW a 1900 rpm
Torque Máximo a ver/min	1250 Nm a 1100-1400 rpm	1200 Nm a 1100-1400 rpm
Capacidade do cárter	37 litros	37 litros

Fonte: SCANIA, 2008b.

A Tabela anterior mostra que o motor ciclo diesel movido a etanol aditivado é muito semelhante ao motor diesel convencional. Ambos possuem a mesma aplicabilidade em veículos para o transporte público urbano. As principais diferenças são o padrão de emissão Euro 5 do motor movido a etanol aditivado contra o padrão de emissão Euro 4 do motor movido a diesel e o aumento da taxa de compressão, de 17:1 nos veículos diesel convencionais para 28:1 nos veículos movidos a diesel. Os motores possuem poucas diferenças na sua configuração mecânica, não necessitando assim de grandes modificações no layout da fábrica para a sua produção em série.

As curvas de torque e de potência do motor ciclo diesel movido a etanol aditivado são muito semelhantes às curvas de um motor movido a diesel equivalente, o que confere boa dirigibilidade ao ônibus movido a etanol, pois o motor desenvolve alto torque em baixas rotações.

As curvas de torques dos motores a etanol e a diesel são mostradas abaixo, nas Figuras 9 e 10, respectivamente.

Figura 9 - Curva de torque e potência do motor a etanol Scania DC9 E02

Fonte: SCANIA, 2008b.

Figura 10 - Curva de torque e potência do motor diesel Scania DC9 E02

Fonte: SCANIA, 2008b.

Verifica-se que as curvas de torque e de potência em função da rotação são muito semelhantes entre os motores diesel e a etanol aditivado, resultando, portanto, a mesma aplicabilidade para os dois motores.

3.1.1 Taxa de Compressão

Sabe-se que, para a mesma taxa de compressão⁹ o Ciclo Otto apresenta melhores rendimentos térmicos quando comparados ao Ciclo Diesel. No entanto, a utilização de altas taxas de compressão em motores ciclo Otto é limitada, normalmente, até uma relação de 9:1, pois a gasolina, que é o combustível usado em motores Otto, tende a se inflamar durante o processo de compressão causando danos ao motor. A auto-inflamação do combustível durante o processo de compressão causa durante o mau funcionamento do motor ciclo Otto e um ruído característico reconhecido como “batida de pino” (MORAN; SHAPIRO, 2002). Conclui-se que com o uso das altas taxas de compressão em motores ciclo diesel, taxas acima de 17:1, pode-se atingir rendimentos térmicos maiores em motores ciclo diesel.

Uma peça interna que se diferencia entre o motor ciclo diesel comum e o movido a etanol modificado são os pistões, que acomodam o volume não deslocado dentro do cilindro, conhecido também como “volume morto” localizados na parte superior do pistão (ALMEIDA, 2001). A Figura 11 faz uma comparação entre os pistões do motor Scania DC9 E02 a etanol e o motor Scania DC9 17 270 a diesel, de potência equivalente, que atingem 270HP em rotações próximas, porém com taxas de compressão diferenciadas, sendo 28:1 para o motor a etanol aditivado e 17:1 para o motor a diesel.

Figura 11 – Geometria dos pistões de motores diesel e etanol de mesma potência

Fonte: MELLO, 2008.

⁹ Uma explicação detalhada sobre Taxa de Compressão encontra-se no APÊNDICE A, que discute o funcionamento dos motores ciclo diesel.

O pistão do motor ciclo diesel movido a etanol aditivado foi geometricamente projetado para acomodar um volume morto menor do que o do motor a diesel convencional para se atingir a alta taxa de compressão do motor de 28:1. Pode-se calcular o volume morto de um motor a partir da capacidade volumétrica interna de cada cilindro (cilindrada), da taxa de compressão e do número de cilindros do motor (ALMEIDA, 2001).

3.1.2 Etanol Aditivado – Etamax D

O etanol possui um baixo número de cetano, em torno de 3, o que impede de ser usado em motores ciclo diesel sem que seja primeiramente aditivado com um ignitor que aumente o seu número de cetano. Na forma aditivada, o etanol passa a ter propriedades de auto-ignição por compressão e, portanto, pode ser utilizado como combustível em motores ciclo diesel.

Normalmente, os aditivos ignitores são compostos de nitratos, peróxidos e nitritos. São exemplos: dinitrato de polietileno glicol, dinitrato de trietileno glicol, dinitrato de etileno glicol. Os melhoradores de número de cetano que apresentaram melhor eficiência nas pesquisas brasileiras, durante a década de 80, foram o dinitrato de trietileno glicol e o dinitrato de polietileno glicol. No entanto, os compostos de nitratos são de difícil manipulação, pois exalam vapores nocivos à saúde humana. A exposição prolongada aos vapores deste tipo de aditivo tem efeito vaso dilatador e pode causar dor de cabeça, náuseas e indisposição (NIGRO¹⁰, 2008). Os aditivos de nova geração não são mais compostos de nitratos e são de manuseio mais fácil e menos nocivo do que os compostos de nitrogênio usados no passado. Entretanto, ainda são necessárias medidas de segurança no manuseio, pois trata-se de uma solução composta de polietileno glicol e etanol, que é altamente inflamável (GREENENERGY, 2000).

O combustível, bem como o motor, também teve a sua fórmula aprimorada desde o início de sua fabricação. A composição do combustível produzido pela SEKAB é apresentada na Tabela 04.

¹⁰ NIGRO, F. E. B. Professor da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Informações pessoal.

Tabela 04 - Composição do Etamax D para o Brasil.

Componente	% em Volume
Etanol hidratado	95%
Ignitor (promovedor de ignição ¹¹)	5%
Isobutanol (denaturante)	
Inibidores de corrosão	
Corante de identificação (vermelho)	

Fonte: SEKAB, 2008.

O aditivo adicionado ao combustível vendido no continente europeu possui em sua composição o MTBE. Entretanto, segundo o fabricante do aditivo (Sekab), o MTBE pode ser substituído por outro derivado do etanol, adequando-se, assim, à legislação brasileira que não permite o uso de MTBE, desde setembro de 1991. O aditivo fornecido pela SEKAB para o projeto BEST no Brasil é composto de derivados de polietileno glicol, que é o promovedor de ignição, isobutanol, corantes e inibidores de corrosão, sem a adição de MTBE.

A Tabela 05 apresenta a especificação do Etamax D comercializado na Suécia, com MTBE.

Tabela 05 - Especificação do Etamax D comercializado na Suécia

Componente	% Peso
Etanol 95%	92,2
Melhorador de número de cetano	5,0
MTBE	2,3
Isobutanol	0,5
Inibidor de corrosão (ppm)	90
Coloração	Vermelho

Fonte: SEKAB, 2001.

3.1.2.1 Polietileno Glicol (PEG)

O PEG é um polímero sintetizado a partir da reação de polimerização do etileno glicol, que é uma molécula sintetizada a partir do etanol. Apesar da menor eficiência como melhorador de cetano se comparados aos compostos de nitrogênio, o PEG é de manipulação

¹¹ No Brasil, o promovedor de ignição é o polietileno glicol (PEG).

mais fácil e mais segura do que os compostos que contêm nitrogênio em sua fórmula, pois não libera vapores nocivos à saúde humana. Outra vantagem do uso do PEG é a sua propriedade de lubrificação do sistema de injeção de combustível, o que diminui a quantidade de lubrificantes adicionados ao combustível (NIGRO, 2008).

Incolor, inodoro e viscoso, tem um sabor doce, mas é perigoso se ingerido. O PEG é o glicol mais importante comercialmente disponível. Ele é usado como anticongelante e refrigerante, em fluidos hidráulicos, e na fabricação de dinamite e resinas (CHEMINDUSTRIES, 2011). O PEG caracteriza-se como um fluido viscoso de coloração branca opaca, solúvel na maioria dos solventes orgânicos, como benzeno, etanol e clorofórmio, além de ser solúvel em água, porém a solubilidade pode diminuir conforme o aumento do peso molecular. O PEG degrada em temperaturas acima de 310 °C ou por tensões de cisalhamento, podendo reagir quimicamente com os metais alcalinos, metais alcalinos terrosos e cloreto de mercúrio. (CHEMINDUSTRY, 2011).

O PEG apresenta peso molecular de 62,06784 g/mol e fórmula molecular $C_2H_6O_2$. O etanol, ao ser misturado ao PEG, adquire propriedades de auto-ignição por compressão, ou seja, tem aumento no número de cetano.

O aditivo, também conhecido como Beraid, foi fornecido pela SEKAB da Suécia ao projeto BEST, na Cidade de São Paulo, para que fosse posteriormente misturado ao etanol. A decisão teve como objetivo evitar que o etanol, que é um produto facilmente encontrado em território nacional, fosse importado da Suécia. Entretanto, por motivos de segurança, o Beraid somente pode ser transportado já diluído em etanol na proporção de 50% do seu volume (CENBIO, 2008).

4. EMISSÕES ATMOSFÉRICAS NA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO (RMSP) E OS EFEITOS SOBRE A SAÚDE HUMANA

A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) engloba 39 municípios, ocupa um território de 8.051 km², que corresponde a apenas 2% do território do Estado. Abrange a maior parte da Unidade Geográfica de Recursos Hídricos (UGRHI) Alto Tietê. A área urbanizada é de 1.747 km², ou seja, 22% da área total. A densidade demográfica da área urbanizada é da ordem de 100 habitantes/ha¹². A deteriorização da qualidade do ar na RMSP é decorrente das emissões atmosféricas de cerca de 2.000 indústrias de alto potencial poluidor e da frota de veículos, que já ultrapassou 8,4 milhões. De acordo com as estimativas de 2010, as fontes moveis e fixas são responsáveis pela emissão para a atmosfera de cerca de 161 mil t/ano de monóxido de carbono (CO), 35 mil t/ano de hidrocarbonetos (HC), 84 mil t/ano de óxidos de nitrogênio (NOx), 5 mil t/ano de material particulado (MP) e 9 mil t/ano de óxidos de enxofre. Desses totais, os veículos são responsáveis por 97% das emissões de CO, 77% de HC, 82% de NOx, 36% de SOx e 40% de MP. (CETESB, 2011). Este cenário tem levado as concentrações médias de poluentes na atmosfera a níveis críticos, o que é ainda muito agravado nos corredores de veículos diesel em termos de material particulado (BRANCO, 2006).

Responsável por 18% do PIB nacional¹³ (247 bilhões de dólares por ano), São Paulo desloca, diariamente, cerca de 3,2 milhões de pessoas¹⁴ por meio de uma frota de 13.726 ônibus¹⁵, sendo a sua quase totalidade movida a diesel. Estes dados geram preocupação do poder público quanto às emissões de poluentes, provocadas pelo uso do diesel, tão nocivas à saúde da população e ao meio ambiente.

¹² Como referência, a densidade demográfica do Estado de São Paulo é de 1 habitante/ha, no Brasil é 0,2 habitantes/ha e no mundo é de 0,4 habitantes/ha. Fonte: STAUDT, C. P. A região metropolitana de São Paulo, um desafio no combate a poluição do ar. Disponível em : <http://www.drashirleydecampos.com.br/noticias/23201>. Acesso em 10 de julho de 2009.

¹³ Fonte: SEADE. Dados referentes ao ano de 2003. Disponível em: <http://www.seade.gov.br/negocios/snpct-v2.html>. Acesso em janeiro de 2008.

¹⁴ Fonte: Prefeitura de São Paulo. Dados referentes ao ano de 2005. Disponível em: www9.prefeitura.sp.gov.br/sempla/md/mostra_tabela.php?cod_subtema=tra&nome_tab=transportes6&partes=1. Acesso janeiro de 2008.

¹⁵ Fonte: Prefeitura de São Paulo. Dados referentes a 2003. Disponível em: www9.prefeitura.sp.gov.br/sempla/md/mostra_tabela.php?cod_subtema=tra&nome_tab=transportes4&partes=1. Acesso em janeiro de 2008.

Segundo estudo realizado pelo Ministério de Ciência e Tecnologia (2006) as emissões de monóxido de carbono (CO) causadas pelos veículos movidos a diesel, (caminhões, ônibus, comerciais leves), no ano de 1994, foi de 1.276.000 toneladas. Enquanto que as emissões de NOx foram de 1.640.000 toneladas (MCT, 2006).

O óleo diesel é o combustível de maior importância na matriz energética veicular no Brasil, correspondendo a 48,9% do total do volume de combustível consumido no país (ANP, 2008) e a opção mundial de combustível para o transporte público urbano é baseada no óleo diesel, combustível fóssil, não renovável, produzido a partir da destilação fracionada do petróleo.

Os efeitos das emissões provenientes dos combustíveis fósseis sobre a saúde humana são conhecidos e suas consequências têm trazido gastos com a saúde, diminuição da expectativa de vida nos grandes centros, problemas cardiorrespiratórios, entre outros (SCHNEIDER; HILL, 2005 e POPE III; DOCKERY, 2006).

A seguir, é apresentada a Tabela 06 com os principais efeitos de alguns poluentes sobre a saúde humana.

Tabela 06 – Efeitos dos poluentes sobre a saúde humana

Poluente	Principais Fontes	Efeitos Gerais sobre a saúde
Monóxido de Carbono (CO)	Veículos	Liga-se à hemoglobina, substância do sangue que leva o oxigênio às células, diminuindo a oxigenação. Em altas concentrações, em ambiente fechado, pode matar. Efeitos: tonturas, vertigens e alterações do sistema nervoso central.
Dióxido de Enxofre (SO₂)	Indústrias e veículos a diesel	Provoca coriza, catarros e danos irreversíveis aos pulmões. Em alta concentração pode matar. Também afeta plantas e espécies mais sensíveis e contribui para a destruição, por corrosão, do patrimônio histórico.
Ozônio (O₃)	Decorre da ação da luz solar sobre os hidrocarbonetos e óxidos de nitrogênio, resultantes do processo de queima de combustíveis, principalmente por veículos.	Causa envelhecimento precoce e diminui a resistência a infecções. Efeitos: irritação nos olhos, nariz e garganta e muito desconforto.
Material Particulado (MP)	Veículos movidos a diesel, indústrias, desgaste dos pneus e	Agrava quadro alérgico de asma e bronquite. As partículas mais grossas ficam retidas no nariz e na garganta, causando

	freios dos veículos em geral e suspensão de poeiras assentadas.	irritação e infecções gerais. As partículas mais finas chegam aos pulmões, agravando casos de doenças respiratórias ou cardíacas. Pode causar câncer.
Hidrocarbonetos (HC)	Queima incompleta e evaporação dos combustíveis (álcool, gasolina e diesel) e outros produtos voláteis.	São responsáveis pelo aumento da incidência de câncer no pulmão. Efeitos: irritação nos olhos, nariz, pele e aparelho respiratório. Pode provocar desconforto respiratório, diminuição da resistência, infecções e alterações celulares.
Dióxido de Nitrogênio (NO₂)	Processo de combustão em geral e veículos.	Pode provocar desconforto respiratório, diminuição da resistência a infecções e alterações celulares.

Fonte: GOLDEMBERG; LUCON, 2009.

Com relação à dispersão e reações dos poluentes no meio ambiente, há a necessidade de se fazer algumas considerações sobre os tipos de poluentes. Poluentes primários: são aqueles emitidos diretamente pela fonte (pontos de eliminação de efluentes líquidos, chaminés de indústrias, canos de escapamento de automotores, re-suspensão a partir do solo). Poluentes secundários: são os poluentes produzidos no meio ambiente a partir de reações químicas, as quais têm como substrato os poluentes primários. O ozônio e demais componentes da poluição fotoquímica, as partículas de aerossol secundário.

Além disso, tem-se os níveis de abrangência do poluente. Poluentes com efeitos locais: são aqueles que têm a vida média bastante curta afetando, predominantemente, o entorno da sua origem. Poluentes com efeitos em micro-escala: são aqueles possuem vida média de horas ou dias, e que afetam regiões maiores por serem passíveis de transporte por ventos, convecção ou meio aquoso. Poluentes com efeitos em escala regional são aqueles que atingem as suas maiores concentrações a muitos quilômetros do ponto de sua formação. As partículas de aerossol geradas pelas queimadas na Amazônia atingem a região Sudeste de nosso país após alguns dias da sua geração. Desta forma, os poluentes com efeitos em escala regional são aqueles que são formados ou transportados a grandes distâncias da sua origem ou da origem dos seus precursores. Poluentes com efeitos em escala global são geralmente de natureza atmosférica, podendo ser transportados a longas distâncias na troposfera ou atingir a estratosfera por transporte convectivo vertical. Metano e CO₂ são representantes desta categoria de poluentes, e participam das mudanças globais de temperatura. As características físicas da fonte, o tipo de poluente emitido e sua respectiva taxa de emissão (reações que ocorrem na atmosfera, fenômenos de transporte e remoção) são determinantes para a definição das concentrações ambientais dos poluentes (SALDIVA et al., 2009).

Além da concentração, o tempo de permanência do indivíduo junto a uma determinada fonte também deve ser considerado, além do nível de atividade física, co-morbidades¹⁶ que alterem a absorção, metabolismo ou taxa de absorção dos poluentes ambientais e fatores sócio-econômicos que modifiquem as condições de moradia de forma a permitir maior penetração dos poluentes no interior dos domicílios. Porém, os efeitos adversos à saúde frente a uma determinada dose de poluente vão depender de fatores relacionados à suscetibilidade individual, tais como idade, estado nutricional, nível sócio-econômico, doenças pré-existentes e polimorfismos de genes que modulam o efeito adverso dos poluentes ambientais. O tipo de poluente e as características do indivíduo podem manifestar diferentes tipos de efeitos adversos. Alguns são evidenciados de forma aguda (após alguns horas ou dias de exposição) e outros, somente, após longos períodos de exposição, conhecidos como efeitos crônicos (SALDIVA et al., 2009).

Segundo estudo realizado pelo Conselho Regional de Auckland¹⁷ na Nova Zelândia (do inglês, Auckland Regional Council – ARC) (2007), em áreas urbanas as emissões dos veículos diesel levaram a concentrações muito elevadas de monóxido de carbono e dióxido de nitrogênio, além de material particulado que, segundo o estudo, é o pior poluente para a saúde humana, já que o MP permanece em suspensão por até 40 dias. O impacto na saúde do MP é tão significativo em relação a todos os outros poluentes que normalmente só eles são considerado nos efeitos na saúde e nos custos associados à poluição atmosférica. No entanto, os impactos a saúde do dióxido de nitrogênio também são importantes, especialmente para os asmáticos. Segundo o estudo, estima-se que morrem prematuramente 400 pessoas/ano na região de Auckland devido a poluição do ar. A má qualidade do ar na região foi responsável por mais de 750 mil dias por ano de paralisação nas atividades de trabalho, escola, etc. A poluição do ar tem o maior efeito sobre os jovens e idosos e pessoas com doenças cardíacas, doenças respiratórias, asma e bronquite. Os custos associados com a poluição na região de Auckland são estimados em NZ\$ 1.3 bilhão por ano (cerca de R\$ 1,8 bilhão por ano).

Nos Estados Unidos, pesquisas estimam que mais de 60.000 pessoas morrem prematuramente, a cada ano, devido à exposição ao material particulado. As emissões de partículas finas dos motores diesel podem conter mais de 40 poluentes, já enumerados pela EPA, sendo que 15 já foram elencados pela Agência Internacional de Pesquisa sobre o Câncer (da sigla, em inglês, *International Agency for Research on Cancer* - IARC). Além dos já relatados efeitos associados com doenças respiratórias, cardiovasculares e morte, outros

¹⁶ A presença de doença(s), além da doença em estudo, que pode(m) alterar o efeito de interesse no estudo

¹⁷ Auckland é a maior região metropolitana da Nova Zelândia.

estudos documentaram efeitos em lactentes e crianças, como a Síndrome de Morte Súbita Infantil e o desenvolvimento atrasado dos pulmões (SCHNEIDER; HILL, 2005).

A Figura 12 apresenta uma pirâmide que demonstra a frequência de efeitos na saúde da população, associada a impactos crescentes da poluição do ar.

Figura 12 – Efeitos da poluição do ar

Fonte: ARC, 2007.

Devemos ter presente que o controle das emissões veiculares no Brasil é exercido através do Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE, instituído pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, em Portaria Nº 18 de 1985.

Os objetivos do PROCONVE são reduzir os níveis de emissão de poluentes por veículos automotores, visando o atendimento dos Padrões de Qualidade do Ar, especialmente nos centros urbanos; promover o desenvolvimento tecnológico nacional tanto na engenharia automobilística, como também em métodos e equipamentos para ensaios de emissão de

poluentes; criar programas de inspeção e manutenção para veículos automotores em uso; promover a conscientização da população com relação à questão da poluição do ar por veículos automotores; estabelecer condições de avaliação dos resultados alcançados; promover a melhoria das características técnicas postas à disposição da frota nacional de veículos automotores, visando à redução de emissões poluidoras a atmosfera. O PROCONVE estabeleceu, ainda, a obrigatoriedade da Certificação de Conformidade dos motores aos níveis de emissão prescritos.

A Constituição do Brasil garante que "todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações".

Com este intuito, o CONAMA órgão consultivo e deliberativo do Sistema Nacional de Meio Ambiente (SISNAMA), estabelece uma série de resoluções que dispõe sobre a qualidade do ar e meio ambiente. Com base nas informações, do site Despoluir – Programa Ambiental do Transporte (2011), no APÊNDICE B é apresentada uma síntese da legislação brasileira sobre o controle de emissões atmosféricas veiculares.

Além da legislação apresentada no Apêndice B, destaca-se o Decreto nº 7.390, de 9 de dezembro de 2010 que regulamenta os arts. 6º, 11 e 12 da Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009, que institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC, e dá outras providências.

Neste contexto, foi sancionada, em 05 de junho de 2009, a Lei nº 14.933/09, que institui a Política de Mudanças do Clima no Município de São Paulo, conhecida como "Lei das Mudanças Climáticas".

A lei foi aprovada por unanimidade, com uma única alteração: a retirada do artigo 47, referente à regulamentação da circulação dos ônibus fretados pelas ruas da cidade.

A Lei tem como objetivo contribuir para estabilizar as concentrações de gases de efeito estufa em um nível que impeça uma interferência perigosa no sistema climático, em prazo suficiente a permitir aos ecossistemas uma adaptação natural à mudança do clima e a assegurar que a produção de alimentos não seja ameaçada e a permitir que o desenvolvimento econômico prossiga de maneira sustentável (PREFEITURA DE SÃO PAULO, 2009).

As propostas contidas na nova lei estão incluídas no Programa de Metas da Cidade de São Paulo - Agenda 2012, e tem como uma de suas principais ações a redução, até aquele ano, de 30% das emissões antrópicas agregadas oriundas do município (PREFEITURA DE SÃO PAULO, 2009).

A Lei vislumbra, entre outros, que as políticas de mobilidade urbana deverão incorporar medidas para a mitigação dos gases de efeito estufa, bem como de outros poluentes e ruídos, com foco na racionalização e redistribuição da demanda pelo espaço viário, na melhoria da fluidez do tráfego e diminuição dos picos de congestionamento, no uso de combustíveis renováveis,

A Lei vislumbra a redução progressiva do uso de combustíveis fósseis (diesel e gasolina) por parte da frota de ônibus da cidade, a uma proporção de 10% por ano, a começar por 2009, e a utilização em 2018 de combustível renovável, não-fóssil, por todos os ônibus do sistema de transporte público do município.

Em 2009, o Estado de São Paulo aprovou a Política Estadual de Mudanças Climáticas, que prevê redução de 20% das emissões de gás carbônico até o ano de 2020, em todos os setores da economia, além da criação de um Conselho Estadual de Mudanças Climáticas, que terá caráter consultivo, e a permanência da atuação do Fórum Paulista de Mudanças Climáticas.

O maior foco do governo paulista para a redução das emissões será o setor de transporte. A lei prevê, por exemplo, a adoção de metas para a implantação de rede metroferroviária, de corredores de ônibus e de um bilhete único para incentivar o uso do transporte público. Entre as ações do governo para o cumprimento da meta está um plano de transporte sustentável. Certamente, o plano para um transporte sustentável passa pela melhoria da qualidade e substituição do diesel por combustível menos poluente.

O Brasil já possui infra-estrutura de produção e distribuição de etanol que poderia substituir o diesel de maneira mais significativa em um período mais curto, se comparado ao biodiesel (CENBIO, 2009).

Os avanços tecnológicos proporcionaram, na última década, um motor de combustão interna movido a etanol aditivado, cuja aplicabilidade é a mesma de um motor a diesel convencional sendo que, desta forma, a matriz energética poderia ser diversificada com etanol, que é um combustível renovável e menos poluente do que o óleo diesel.

O etanol é um combustível biodegradável, renovável, o que implica em uma significativa contribuição para a redução da emissão de gases responsáveis pelo aquecimento global, também não possui enxofre na sua composição que, ao ser queimado em motores de combustão interna produzem SO_x , responsável pela chuva ácida.

Estudo publicado no *New England Journal of Medicine*, divulgou que a diminuição de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na concentração de partículas finas no diesel foi associada a um aumento de expectativa de vida de $0,61 \pm 0,20$ anos. Multicausalidade e questões de risco concorrentes

tornam difícil quantificar as mudanças na expectativa de vida devido à fatores de risco único, mas esses resultados sugerem que o efeito individual de redução de poluição do ar sobre a expectativa de vida resultam em um aumento global de 15%. (POPE; MAGID; DOCKERY, 2009). Os potenciais efeitos deletérios da poluição atmosférica no sistema respiratório e cardiovascular são alvo de dois estudos publicados, em 2007, pelo *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*. Em um dos estudos, um único dia de exposição à poluição do ar em região urbana foi suficiente para causar a inflamação sistêmica, estresse e alterações no sistema nervoso em pessoas jovens. Dois dos principais poluentes relacionados ao trânsito (ozônio e óxidos de enxofre) foram identificados como os precursores desse efeitos. No outro estudo, após uma hora de exposição a emissões provenientes de motor diesel em marcha lenta foi suficiente para induzir sinais de inflamação sistêmica em voluntários saudáveis do sexo masculino (LINN, 2008).

Como dito anteriormente, pode-se relacionar diferentes efeitos adversos da poluição do ar sobre a saúde humana, alguns deles manifestando-se de forma aguda (horas ou dias após a exposição), enquanto outros são evidenciados somente após longos períodos de exposição (os chamados efeitos crônicos). A Sociedade Americana de Cardiologia (2004) (*American Heart Association*) publicou documento reconhecendo a poluição atmosférica como um dos fatores de risco para o agravamento de doenças cardiovasculares, infarto agudo do miocárdio, insuficiência cardíaca e desenvolvimento de arritmias.

Tantos os efeitos agudos como os efeitos crônicos podem exibir diferentes níveis de gravidade, abrangendo uma gama de efeitos que oscilam do desconforto vago até a morte. Como exemplo, pode-se destacar que com o aumento da poluição do ar, uma grande fração da população apresentará alterações conhecidas ou irritabilidade não específicas. Uma menor proporção dos indivíduos expostos apresentará um aumento de marcadores plasmáticos e pulmonares de inflamação, indicando a presença de inflamação subclínica. Em uma proporção menor, esta inflamação poderá acarretar alterações funcionais, como aumento da pressão arterial, distúrbio do controle autonômico do coração ou queda de indicadores de função pulmonar. Em um nível de gravidade maior, indivíduos que utilizam medicação cronicamente para o controle de doenças respiratórias e cardíacas (asma e hipertensão arterial, por exemplo), necessitarão maior quantidade de medicamento para controlar a sua doença. Haverá aqueles que procurarão o médico para consultas ou, nos casos mais graves, serão internados em pronto-socorros ou hospitais. Finalmente, uma parte dos afetados morrerá no dia ou em poucos dias após, em virtude dos efeitos da poluição a que foram expostos (SALDIVA et al., 2009).

A suscetibilidade dos indivíduos aos poluentes depende de fatores individuais, de moradia e sócio-econômicos. Os fatores individuais incluem, como dito anteriormente, a idade, as morbidades associadas a cada indivíduo (doenças como asma, bronquite, diabetes, doenças cardiovasculares, etc) e as características genéticas.

As condições de moradia afetam a dose recebida de poluentes. Além disso, a localização da moradia também influencia a geração e dispersão de poluentes. Casas localizadas próximas aos corredores de ônibus, por exemplo, recebem uma maior carga de poluentes atmosféricos do que as localizadas mais distantes do perímetro urbano. O tipo de construção também afeta o grau de penetração dos poluentes, como construções mais antigas, com pouca circulação de ar, etc. Vale lembrar que as condições internas também afetam a qualidade do ar como os fogões a lenha.

As condições sócio-econômicas também são parte da suscetibilidade do indivíduo aos poluentes. O acesso a saúde/cuidados hospitalares e acesso à medicação é uma condição considerada, além da maior exposição aos poluentes. Condições de saúde precárias, falta de saneamento, má nutrição, falta de acesso aos serviços médicos e aos medicamentos, além de maior contato com os poluentes por meio de processos industriais menos desenvolvidos, tecnologias menos desenvolvidas, combustíveis com maior concentração de contaminantes, etc. são realidades de países mais pobres. Consequentemente, essa população está mais sujeita aos efeitos nocivos da poluição. Vale lembrar que esses efeitos são válidos para países e para algumas sociedades (SALDIVA et al., 2009).

O etanol, assim como o diesel ou qualquer outro combustível, está associado com emissões atmosféricas que interferem na saúde humana. Essas emissões estão associadas à produção e uso deste combustível. No tocante à produção, a prática da queima da palha da cana-de-açúcar para a colheita vem associada a doenças respiratórias em adultos e crianças, além de doenças cardiovasculares em adultos, caracterizando-se como um importante problema de saúde pública para as populações expostas.

Como consequência, no estado de São Paulo, existe um protocolo que está garantindo a redução progressiva da queima da palha da cana e aumento da colheita mecanizada. Os pontos com declividade, onde a colheita mecanizada fica inviável, serão reflorestados, com consequente aumento da área florestal do estado.

Em comparação com as atividades de produção de combustíveis a partir do petróleo, as emissões advindas da produção do etanol são menores e de menor gravidade (SALDIVA et al., 2007). Com relação às emissões de gases de efeito estufa, o etanol apresenta enormes vantagens quando comparado com os combustíveis derivados de petróleo. As emissões de

CO₂ da combustão podem ser consideradas praticamente nulas, pois o CO₂ liberado na reação química é reabsorvido no próximo ciclo de vida da planta (fotossíntese) (COELHO, 1999). Com relação às emissões devidas à mudanças no uso do solo existem recentes resultados obtidos pelo IPCC mostrando que para práticas agrícolas ambientalmente saudáveis essa contribuição pode ser minimizada ou mesmo ser negativa (o que significa a remoção de CO₂ da atmosfera (IPCC-SREN, 2011). Além disso, estudos do EPA (EPA, 2010) quantificam as emissões totais da produção de etanol de cana-de-açúcar no Brasil como sendo modestos e mesmo muito pequenas, caso se gere bioeletricidade do bagaço de cana. Na União Européia, com a aprovação da Diretiva Européia em Dezembro, 2008, foi introduzida de forma “oficial” uma quantificação do efeito direto da mudança do uso da terra (LUC) na produção de biocombustíveis, considerando a variação dos estoques de carbono (sobre e sob o solo), com uma proposta de cálculo relativamente simples, ainda fortemente apoiada em parâmetros “default” do IPCC (na ausência de dados suficientes e confiáveis para teores de carbono no solo, em muitas regiões) (MEIRA FILHO; MACEDO, 2010). As informações sobre teores de carbono no solo para a cana-de-açúcar trazem valores que não diferem muito dos valores default do IPCC e que indicam que cana colhida sem queima pode aumentar os teores de equilíbrio de carbono no solo, para a maioria das culturas anuais e pastagens (AMARAL, 2008¹⁸ apud MEIRA FILHO; MACEDO, 2010). Considerando os efeitos adversos à saúde, à produção de alimentos e à distribuição dos recursos hídricos¹⁹ provenientes das mudanças climáticas e aquecimento do planeta há de se levar em consideração esta característica dos combustíveis provenientes da biomassa, como o etanol.

A menor toxicidade das emissões dos motores a etanol é atribuída aos tipos de compostos orgânicos emitidos que são, basicamente, etanol (correspondendo a 70%) e aldeídos (correspondendo a 10%, sendo essa fração composta por acetaldeído e formaldeído). Em contrapartida, nos motores a gasolina e diesel, há emissão de uma gama de compostos voláteis e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, com grande potencial tóxico e carcinogênico.

Além da sua toxicidade direta, os COV podem contribuir para a formação de ozônio, um dos poluentes mais associados com efeitos adversos à saúde humana.

¹⁸ AMARAL, W. A. N. et al; Environmental Sustainability of sugar cane ethanol in Brazil, in “Sugar cane ethanol: Contributions to Climate Change Mitigation and the Environment”. Ed Peter Zurbier, Jos van de Vooren; Wageningen Academic Publishers, 2008.

¹⁹ Como parte da má distribuição dos recursos hídricos podemos destacar as secas na região amazônica (ano de 2010) e no extremo sul do país (2010/2011), as crescentes chuvas na região sudeste (verão de 2010 – Angra dos Reis, verão de 2011 – região serrana do Rio de Janeiro), o aumento do nível do mar em alguns lugares da costa litorânea brasileira, etc.

Estudos utilizando inalações controladas, tanto em animais como em seres humanos, indicam que o ozônio tem potencial de provocar efeitos adversos à saúde humana como inflamação do trato respiratório, inflamação pulmonar significativa, reação inflamatória sistêmica, prejuízo as defesas pulmonares, aumento da reatividade brônquica, aumento da produção de substâncias antioxidantes pelo trato respiratório. Alguns fatores modulam a magnitude da resposta ao ozônio, tais como idade, co-morbidade respiratória e fatores genéticos que modulam a síntese de substâncias antioxidantes pelo trato respiratório. As evidências de que níveis ambientais de ozônio estão relacionados com aumento de morbidade na população exposta são consistentes. Já, ao contrário do que ocorre para o material particulado, a relação entre ozônio e mortalidade é menos evidente. No entanto, estudos realizados em várias cidades demonstraram que há efeitos agudos das variações de ozônio e mortalidade da população exposta. Em relação aos efeitos crônicos, a exposição a ozônio tem sido relacionada com redução da função pulmonar em crianças (SOUZA, MACEDO, 2010).

Nota-se que o processo de produção do combustível produz poluentes associados aos danos à saúde. No caso do etanol, a principal emissão na produção esta associada a queima da palha da cana. Entretanto, é necessário incorporar o crescente processo de mecanização da colheita e a consequente diminuição das emissões advindas das queimadas.

Com relação às emissões veiculares, os efeitos do acetaldeído e do formaldeído, com potencial de formação de ozônio, ainda não foram totalmente estudados, representando uma nova demanda face a utilização do etanol como combustível dos veículos leves. Este assunto será abordado com mais detalhes no Capítulo 6.

A utilização do etanol, em substituição ao diesel, em veículos pesados também promoveria alterações no perfil de emissões. Com a utilização do etanol haveria menor emissão de formaldeído e aumento das emissões de acetaldeído (característico do etanol). Entretanto, as emissões de ônibus a etanol são muito inferiores às dos veículos diesel atualmente em uso no Brasil, sendo que a emissão de material particulado fino cairia a praticamente zero. Vale lembrar que o material particulado fino é responsável por muitos efeitos adversos à saúde (SALDIVA et al., 2009).

Saldiva e outros (2007) estimaram a redução de mortes e internações hospitalares esperada pela utilização do etanol frente a 5%, 10%, 15%, 50% e 100% de uso de etanol pela frota de veículos pesados (evitadas pela redução do material particulado fino – PM_{2,5}), conforme apresentado na Tabela 07.

Tabela 07 – Cenários de redução de material particulado a partir da substituição do diesel por etanol, em frota pesada.

% de Substituição de diesel por etanol	Expectativa Ambiental na Concentração do Poluente	Variação Esperada
5	Redução no PM _{2,5} por emissão direta	Até 2%
10	Redução no PM _{2,5} por emissão direta	Até 3%
15	Redução no PM _{2,5} por emissão direta	Até 4%
50	Redução no PM _{2,5} por emissão direta	Até 13%
100	Redução no PM _{2,5} por emissão direta	Até 25%

Fonte: SOUZA, MACEDO; 2010.

As partículas finas, conhecidas como "PM_{2.5}", são partículas com diâmetro inferior a 2,5 microns, menores que a largura de um fio de cabelo humano, tão pequenas que são muitas vezes invisíveis. Eles podem ser depositados no pulmão, onde afetam o sistema respiratório e cardiovascular. As partículas finas agravam as doenças cardiovasculares e proporcionam ataques do coração ao invadir a corrente sanguínea e iniciar uma resposta inflamatória, interrompendo a frequência cardíaca e aumento da coagulação do sangue (SCHNEIDER; HILL, 2005).

A Figura 13 a seguir compara as partículas PM₁₀, PM_{2,5}, um fio de cabelo e um grão de areia.

Figura 13 – Comparação entre material particulado (PM 10 e PM 2,5), fio de cabelo e grão de areia.

Fonte: ARC, 2007.

A composição de partículas finas varia de acordo com o lugar, temporada, condições meteorológicas e as fontes de produção. Partículas finas provenientes de veículos a diesel têm um núcleo de carbono, ligado a mais de 18.000 produtos diferentes provenientes da combustão, que incluem compostos tóxicos como nitroaromáticos, poliaromáticos e hidrocarbonetos alifáticos, além de metais pesados como cromo, cobre e níquel (ARC, 2007).

Os cenários de uso do etanol em substituição ao diesel permitem estimar redução na concentração ambiental de material particulado inalável fino de 2% até 25%, dependendo do cenário de substituição.

Além da estimativa de redução de mortes e internações, existe a necessidade de estimar os custos de saúde pública relacionados aos efeitos da degradação do meio ambiente.

A valoração econômica de recursos naturais é baseada em princípios da economia neoclássica e tem como proposta atribuir valores monetários para as perdas sociais e ambientais decorrentes da degradação do meio ambiente. Assim, a idéia da valoração busca tratar os custos e benefícios sociais prestados pelo meio ambiente como agente econômico (Pearce, 1987).

Segundo Saldiva et al. (2009),

“A forma mais precisa de mensurar o impacto da poluição do ar de uma determinada região é a condução de estudos epidemiológicos, estabelecendo funções dose-resposta, que correlacionam indicadores de morbidade e mortalidade na população susceptível com as concentrações de ar ambiente. Diversos métodos têm sido utilizados em vários estudos para valorar os custos de saúde associados com a poluição ambiental. Esses métodos podem ser agrupados em duas categorias. A primeira inclui os métodos que medem apenas a perda da renda direta (salários perdidos e despesas adicionais) ou método dos gastos defensivos. Essas medidas não incluem as inconveniências, sofrimentos, perdas de lazer e outros impactos não tangíveis aos indivíduos e bem-estar familiar e podem subestimar ou ignorar seriamente os custos de saúde de pessoas que não são membros do mercado de trabalho. Dessa maneira, essa categoria de métodos indica apenas o nível inferior dos custos sociais da poluição e subdimensiona os custos totais para os indivíduos. A segunda categoria de métodos inclui abordagens que tentam capturar a disposição dos indivíduos a pagar para evitar ou reduzir os riscos de morte ou doenças, ou método da valoração de contingente.”

A Tabela 08, indica as mortes potenciais totais anuais a serem evitadas mediante os respectivos cenários de adição de etanol devido às melhorias das concentrações de material

particulado fino e a respectiva valoração dos custos de mortalidade evitados. A valoração das mortes evitadas devido às reduções das concentrações de material particulado fino foi obtida através dos valores médios de anos de vida perdidos devido a concentrações ambiente dos poluentes atmosféricos em São Paulo aplicados aos cenários de potencial de redução de mortalidade com as taxas atuais de expectativa de vida da população, a partir de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (SOUZA, MACEDO, 2010).

A estimativa de morbidade considera apenas os custos associados às internações hospitalares para as doenças e faixas etárias da população mais consistentemente associadas à poluição atmosférica, quais sejam, as internações por doenças respiratórias para as faixas etárias de crianças até quatro anos e adultos acima de 40 anos, e por doenças cardiovasculares apenas para a faixa etária de adultos acima de 40 anos. Assim, essa estimativa pode ser considerada conservadora ao não incluir outros desfechos menos frequentes e as demais faixas etárias, mas enquadra-se ao critério habitualmente utilizado nesse tipo de estimativa.

O benefício, em termos de redução de morbidade, com o uso do etanol em substituição ao diesel, devidamente valorado, é apresentado na Tabela 08, também para cada um dos cenários de substituição da frota (SOUZA, MACEDO; 2010).

Tabela 08 - Potencial anual de variação da mortalidade mediante cenários de adição de etanol na Região Metropolitana de São Paulo e respectiva valoração econômica

% de Substituição de diesel por etanol	Mortalidade Anual	
	Quantidade	U\$ milhão
5	37	6,63
10	75	13,45
15	112	20,08
50	373	66,89
100	745	133,6

Fonte: SOUZA, MACEDO, 2010.

As emissões atmosféricas provenientes da produção e uso dos combustíveis em motores atingem a população localizada no entorno da área produtiva e as regiões metropolitanas, onde a concentração das emissões por conta dos veículos esta localizada. Como visto neste capítulo, os efeitos das emissões na saúde humana são muitos e não são considerados no custo dos combustíveis.

Na comparação das emissões provenientes do etanol e do diesel verifica-se que o etanol apresenta aspectos negativos, principalmente, na colheita devido ao processo de queima da palha da cana. Aspectos como monocultura uso direto e indireto do solo também devem ser considerados. Entretanto, a atual regulamentação do setor sucroalcooleiro e as crescentes exigências do mercado internacional sobre biocombustíveis, vem mudando e melhorando este cenário.

Com relação à utilização de etanol em motores diesel, o etanol possui vantagens em relação aos combustíveis fósseis mais utilizados: gasolina e diesel. São elas:

- Balanço de carbono inferior ao da gasolina e diesel, reduzindo a contribuição das emissão de gases de efeito estufa e, conseqüentemente, para o aquecimento global;
- Baixa emissão de poluentes em frotas de veículos pesados;
- Significativa redução de ozônio troposférico (no caso da substituição de gasolina).

Segundo Saldiva et al. (2009),

“Um dos aspectos mais significantes é a utilização do etanol na frota cativa de ônibus dos grandes centros urbanos. Considerando os aspectos de saúde humana, o etanol pode ser uma alternativa mais eficiente para a obtenção de transporte coletivo de baixa emissão de poluentes.”

Estudos sobre a emissão de aldeídos ainda são necessários, principalmente, levando-se em consideração o crescente uso do etanol em substituição a gasolina, nas últimas três décadas. Entretanto, os indicadores de saúde revelam um cenário favorável à utilização do etanol em substituição à gasolina, como vem ocorrendo na matriz energética veicular e, principalmente, em substituição ao diesel, nas frotas cativas das regiões metropolitanas, tão castigadas pelas emissões atmosféricas desses veículos.

Entretanto, alguns estudos tem mostrado que as emissões de aldeídos (acetaldeído e formaldeído) não estão relacionadas somente aos veículos do ciclo Otto (gasolina, etanol e

gás). A emissão de aldeídos em veículos ciclo Diesel mostra-se importante, considerando o crescimento da frota de veículos a diesel, a toxicidade desses compostos e sua participação como precursores nas reações de formação de gás ozônio na baixa troposfera. A originalidade deste estudo está em demonstrar a importâncias das emissões de aldeídos nos veículos Diesel, que até o momento não são regulamentadas. Para tal, este assunto, será tratado, com detalhes no Capítulo 06 do presente trabalho.

5. ESTUDO DE CASO – PROJETO BEST

A cidade de São Paulo, pioneira no Brasil, participou do projeto BEST – BioEthanol for Sustainable Transport, que foi desenvolvido entre os anos de 2005 e 2009. Uma das metas do projeto BEST foi demonstrar o desempenho e a viabilidade técnico-econômica de ônibus movido a etanol, com a finalidade de encontrar alternativas para a redução do consumo de combustíveis fósseis e, conseqüentemente, das emissões de gases poluentes provenientes do setor de transporte

Esta iniciativa se apresentou como uma alternativa para diminuir a poluição das regiões metropolitanas, onde, inicialmente, a tecnologia foi testada e demonstrada. A missão do projeto BEST foi incentivar o uso do etanol, em substituição à gasolina e ao diesel, no Brasil e no mundo, além de, ao final, dar recomendações para a formulação de políticas públicas que permitam implementar as tecnologias avaliadas.

Outras sete cidades, localizadas na Europa e na Ásia (Figura 14), além da cidade de São Paulo, na América, demonstraram a tecnologia sendo que Estocolmo, na Suécia, possui uma frota significativa de veículos deste tipo operando comercialmente e tornou-se referência mundial no uso de etanol em sua frota de ônibus urbanos.

Figura 14- Localização das cidades participantes do projeto BEST no mundo.

Como resultado da operação dos ônibus a etanol em Estocolmo (Figura 15) nos últimos quinze anos, cerca de 140 mil toneladas de dióxido de carbono (CO₂) deixaram de ser emitidas na atmosfera. Anualmente, a redução de emissão de CO₂ desses ônibus equivale ao emitido por 5 mil carros de passeio²⁰.

Figura 15 - Ônibus movido a etanol circulando em Estocolmo.

No Brasil, o projeto BEST foi coordenado pelo Cenbio - Centro Nacional de Referência em Biomassa, do Instituto de Eletrotécnica e Energia - IEE, da Universidade de São Paulo – USP, que foi convidado pela empresa Renewable Energies - WIP, com base em Munique, na Alemanha, para elaborar uma proposta de projeto em conjunto e encaminhar ao coordenador geral do grupo proponente, que é a Prefeitura de Estocolmo.

No projeto BEST, o Cenbio teve a responsabilidade de desenvolver duas metas. Uma delas foi operar ônibus com motor diesel, de fabricação da Scania sueca, movido a partir de etanol aditivado, semelhante aos operados na Suécia em uma frota de centenas de ônibus, há vinte anos. A outra meta foi responsável por avaliar o desempenho, consumo e emissão de poluentes em veículos híbridos modelo Prius, fabricados pela Toyota do Japão, movidos com motores ciclo Otto, a partir de gasolina brasileira (20 a 25% de etanol).

O histórico do Projeto BEST e os principais resultados dos testes são apresentados no APÊNDICE C.

²⁰ Fonte: **Scania vai testar ônibus movido a álcool em São Paulo.** Disponível em: http://www.scania.com.br/sobre_scania/press_releases/05_press_releases/onibus_movido_a_alcool.asp. Acesso em maio de 2007.

5.1 Acompanhamento do funcionamento do ônibus com motor a etanol, comparativamente a ônibus similar movido exclusivamente a diesel.

Conforme descrito no APÊNDICE C, o acompanhamento do funcionamento do ônibus a etanol teve início após o lançamento no corredor Jabaquara-São Mateus. Entretanto, mesmo com a operação no corredor da EMTU ocorrendo de maneira reduzida percebeu-se que o veículo passou a apresentar paradas repentinas do motor em marcha lenta. Notou-se que tal problema manifestava-se frequentemente em dias mais quentes, quando a temperatura ambiente atingia 26°C ou mais e no final de longos declives do trajeto. O problema foi comunicado aos técnicos da Scania e o veículo foi retirado de operação dia 12/02/2008, sendo encaminhado à Scania para avaliação.

Em análise mais detalhada, os técnicos constataram condições anormais de temperatura e pressão na linha de combustível, sendo elas: 58°C a temperatura na linha de combustível de alimentação do motor e a pressão da mesma estava muito abaixo das condições normais, sendo que quando atingia o valor de 0,5 bar causava a parada do motor. A pressão normal da bomba de combustível deveria ser de aproximadamente 3 bar, podendo apresentar pequenas variações.

O projeto original do sistema de alimentação, que foi desenvolvido na Suécia, país cujo clima temperado apresenta temperaturas muito baixas, previa o pré-aquecimento do combustível antes de chegar ao motor, para aumentar a eficiência energética. Para o combustível ser pré-aquecido, foi instalada uma micro-câmara de pré-aquecimento na saída do tanque de combustível, (Figuras 16 e 17) que reutilizava a energia térmica da linha de combustível de retorno do tanque para o motor.

Figura 16 - Disposição dos tanques de combustível. Circulada encontra-se a micro-câmara de pré-aquecimento.

Fonte: CENBIO, 2008.

Figura 17 - Vista detalhada das linhas de alimentação e de retorno de combustível da câmara de pré-aquecimento.

Fonte: CENBIO, 2008.

Suspeitando de um aquecimento excessivo da linha de alimentação, em um país de clima tropical como o Brasil, os engenheiros da Scania providenciaram um desvio da linha de retorno do motor diretamente para o tanque, conforme apresentado nas figuras abaixo. A

partir de então, não haveria mais transferência de calor entre a linha de retorno e a linha de alimentação de combustível do motor.

Figura 18 - Vista da câmara de pré-aquecimento com a linha de retorno inutilizada.

Fonte: CENBIO, 2008.

Figura 19 - Vista superior de um dos tanques, com o desvio de combustível instalado.

Fonte: CENBIO, 2008.

Após as modificações, novos dados foram coletados: 42°C de temperatura e 2,71 bar de pressão na linha de alimentação de combustível do motor. Estas são condições normais de operação, cuja leitura foi feita por meio de um software, como mostra a Figura 20.

Figura 20 - Monitoramento de pressão e temperatura do combustível (42 °C, 2,71 bar).

Fonte: CENBIO, 2008.

O problema de paradas repentinas do motor foi solucionado a partir dessas providências. Durante os testes simulados realizados, com galões de água não, foram constatadas mais paradas do motor nas mesmas condições que antes geravam o problema.

Com base nos dados de consumo obtidos a partir dos testes em campo, foram feitos os gráficos apresentados abaixo (Gráficos 02 e 03), que comparam os consumos médios mensais entre o veículo diesel e etanol, do primeiro e segundo ônibus, respectivamente.

Gráfico 02 – Consumo comparativo do primeiro ônibus a etanol x ônibus diesel

Gráfico 03 – Consumo comparativo do segundo ônibus a etanol x ônibus diesel

Pelo Gráfico 02 fica evidente que as alterações na caixa de engrenagem e no ar condicionado, ocorridas a partir de Agosto de 2010, proporcionaram melhoria do consumo do ônibus a etanol, chegando, pela primeira vez, em um consumo superior a 1 km/l.

Comparativamente, percebe-se que os dois ônibus tiveram comportamentos semelhantes, apresentando consumo médio de 0,9 km/l, mesmo considerando que os ônibus são de gerações diferentes. Os dois ônibus a etanol apresentaram, em média, consumo 60% superior ao consumo dos veículos diesel. Considerando o poder calorífico inferior (PCI) do óleo diesel é de 10.810 kcal/kg e do álcool hidratado é de 6.523 kcal/kg e que as densidades medidas do óleo diesel e do etanol anidro são de 0,8559 g/cm³ e 0,802 g/cm³, respectivamente, tem-se que o poder calorífico do óleo diesel é de 9.252 kcal/l e do etanol é de 5.231 kcal/l (SHELL, 1991²¹ apud KOIKE; BEM; PASSARINI, 2003), justifica-se o consumo inferior do etanol em torno de 60%. Possíveis melhorias no motor e no veículo podem aumentar o desempenho do ônibus a etanol, mas não podem superar a barreira do conteúdo energético contido em cada combustível. Cabem, portanto, benefícios econômicos e fiscais que comparem o custo do quilômetro rodado dos dois veículos, tendo em vista as vantagens ambientais dos veículos a etanol. Este assunto será discutido com mais detalhes no Capítulo 07.

²¹ SHELL. **Informações técnicas de lubrificantes Shell**. 1991. p. 174.

5.2 A experiência do Projeto BEST nos outros países

Ônibus a etanol foram demonstrados em cinco locais: Estocolmo, La Spezia, Madrid, Nanyang e São Paulo. Foram utilizados 138 ônibus. Rotterdam não foi capaz de cumprir as metas dentro do prazo do projeto.

Abaixo a Tabela 9 mostra informações sobre o número de ônibus que foram introduzidos nestas cidades.

Tabela 9 – Número de ônibus a etanol em operação pelo projeto BEST

Cidade / País	Número de ônibus	Data de Início
La Spezia / Itália	3	Janeiro de 2007
Madrid / Espanha	5	Abril de 2007
Estocolmo / Suécia	127 ²²	Fevereiro de 2006
Naniang / China	1	Dezembro de 2007
	1	Janeiro de 2008
São Paulo / Brasil	1	Janeiro de 2008
	1	Julho de 2010

Fonte: BIRATH, 2010.

A seguir é apresentada a experiência do projeto nas cidades participantes.

5.2.1 La Spezia – Itália

A cidade de La Spezia, na Itália, está localizada na costa oeste italiana, não muito longe do Milão. A cidade tem 100.000 habitantes, mas a região inteira de La Spezia é composta por 300.000 pessoas.

Cerca de 250 mil viagens são feitas diariamente na cidade, sendo 30% de transportes públicos, e 45% em veículos particulares. Os principais problemas ambientais e de tráfego estão relacionados com um número crescente de veículos, o congestionamento nas principais vias, o ruído e as emissões provenientes do tráfego. Em La Spezia há uma frequência baixa de uso de bicicletas, além de problemas com a qualidade do ar, devido à alta concentração de NOx e partículas na atmosfera. Os ônibus da frota são operados e de propriedade da empresa de ônibus local ATC.

²² Nem todos os ônibus que entraram em operação em Estocolmo fizeram parte do Projeto BEST, com o financiamento da União Européia.

Em janeiro de 2007, os três ônibus Scania bioetanol começaram a operar na parte oriental de La Spezia. No primeiro ano, o ônibus circularam em linhas periféricas, dentro da fronteira urbana do município, chegando a algumas cidades vizinhas de La Spezia, como a Região de Toscana nas proximidades (município de Carrara).

Durante o segundo ano, eles continuaram sendo utilizados em linhas periféricas, em particular na linha chamada de "SA", que liga La Spezia ao Município de Sarzana, onde a bomba de abastecimento da ATC estava localizado. Todas as linhas eram bem extensas e sua rota essencialmente plana.

A primeira estação de abastecimento foi construída antes do ônibus começar a operar em janeiro de 2007. A estação foi instalada no interior do depósito de ATC em Sarzana. O combustível foi comprado da SEKAB, como recomendado pela Scania.

Antes do início do projeto a ATC forneceu informações aos motoristas e a população em geral, sobre o projeto e sobre os benefícios do uso do etanol como combustível em ônibus. A Scania ministrou um curso para os mecânicos da ATC, já que estes eram os primeiros ônibus a etanol a entrarem em operação na Itália. Os motoristas foram treinados durante alguns dias e a ATC forneceu a eles informações técnicas sobre o projeto BEST e os objetivos da ATC no projeto. Isso porque, a ATC viu que os motoristas representavam um importante contato com os passageiros. A ATC forneceu, também, um caderno de notas para o registro dos defeitos e qualidades do veículo.

5.2.2 Madri – Espanha

A cidade de Madri tem uma população de aproximadamente 3,2 milhões de habitantes, sendo o principal centro urbano da região metropolitana, com cerca de 5,5 milhões de habitantes. A cidade tem grandes desafios relacionados à qualidade do ar e aumento das emissões de CO₂ provenientes do transporte urbano. Apesar de importantes esforços feitos nos últimos anos visando a melhoria no transporte público e privado, os veículos continuam representando uma percentagem muito grande na comutação feita na cidade. Isto tem consequentes impactos sobre a qualidade do ar e sobre a poluição sonora.

No BEST, a Empresa Municipal de Transportes (EMT) decidiu participar com cinco ônibus movidos a etanol e instalar um posto de combustível, a partir de recursos próprios, sem financiamento da União Européia.

Os cinco ônibus foram comprados no início de 2007 e começaram a operação em abril de 2007. A linha 75, que foi especialmente atribuída a estes ônibus, passa pelo centro da

cidade de Madri, a fim de avaliar a opinião de um grande número de passageiros. O monitoramento dos quilômetros rodados e consumo de combustível foi realizado.

Figura 21 – Foto do ônibus movido a etanol em Madri.

Fonte: BIRATH, 2010.

A central de abastecimento para estes ônibus tinha capacidade de 15.000 litros e o consumo foi de aproximadamente 1.000 litros/dia.

Todos os motoristas e mecânicos foram treinados pela Scania.

5.2.3 Nanyang – China

A cidade de Nanyang está localizada no sudoeste da província de Henan, na China. Há 10,65 milhões de habitantes na região de Nanyang. Antes de BEST, o bioetanol foi utilizado na cidade na mistura com a gasolina, E10, mas não como combustível de ônibus. Durante o projeto BEST, a significativa diferença entre o custo do ônibus Scania e os ônibus chineses impossibilitou a importação do ônibus produzido pela Scania para Nanyang. Sendo assim, a cidade de Nanyang iniciou um diálogo com a empresa Auto Dongfeng. A companhia cooperou e entregou o primeiro ônibus movido a etanol Dongfeng para Nanyang, em dezembro de 2007. Um segundo ônibus foi entregue, em março de 2008. O custo de cada ônibus foi cerca de € 1.000 a mais do que o equivalente chinês a diesel.

O primeiro ônibus a etanol adquirido em Nanyang tem o motor a gasolina (Ciclo Otto) EQ 6100-1 e usa etanol hidratado (E100). A partida é realizada com gasolina e depois muda-se para a alimentação com etanol.

O segundo ônibus comprado da Dongfeng (modelo EQ6100-1) foi fabricado para operar com gás natural e, posteriormente, utilizou bioetanol anidro (E100). O segundo ônibus foi entregue em março de 2008 e era do mesmo tamanho que o primeiro ônibus, mas equipado com um ar condicionado.

O ônibus tem dois controle ECU²³ (Unidade de Controle Eletrônico) e sistemas de injeção de combustível, um para o bioetanol e outro para o gás. O motorista pode escolher facilmente o sistema de combustível através de um botão interruptor.

Os ônibus com dois tanques, desenvolvidos pela empresa chinesa Dongfeng, foram testados pelo projeto BEST. Estes ônibus podem opera com gasolina ou etanol hidratado (E100), uma inovação dentro do projeto BEST. Um dos ônibus usa um motor a gasolina modificado e o outro usa um motor a gás natural modificado. O ônibus tem dois outros controles ECU e sistemas de injeção de combustível, um para o bioetanol, o outro para a gasolina. O motorista pode escolher o sistema de combustível por um botão interruptor. O ônibus a bioetanol produzido pela Dongfeng teve um custo de cerca de 10.000 RMB (€ 1.000) a mais, em comparação ao ônibus a gasolina convencionais e têm a mesma disponibilidade como ônibus convencionais. A manutenção é realizada a cada 10.000 km a um custo de cerca de 1.500 RMB (€ 150). Os dois ônibus em operação em Nanyang foram usados na frota da Tianguan Grupo, uma usina de bioetanol. Eles transportam os funcionários de casa ao trabalho, operando em uma rota de 15 quilômetros das comunidades residenciais até a usina localizada no subúrbio de Nanyang. Os ônibus algumas vezes eram utilizados para transportar os visitantes do aeroporto a estação ferroviária.

Tendo em vista que Nanyang não pode comprar ônibus a etanol fabricado pela Scania, a Scania forneceu, para demonstração, um ônibus e etanol para operação em Pequim durante os Jogos Olímpicos de 2008.

²³ECU é um controle de retroalimentação do circuito, monitora as saídas e entradas de um sistema para ter seu um controle efetivo, gerenciando as emissões e o consumo de combustível do motor .

Figura 22 – Ônibus a etanol da Scania em Pequim.

Fonte: BIRATH, 2010.

Nanyang forneceu o bioetanol combustível e tinha a responsabilidade de misturá-lo com o melhorador de ignição. O ED95 foi transportado por caminhão de Nanyang até Pequim. O logo do projeto foi impresso no ônibus e dentro do ônibus haviam informações sobre o bioetanol e o ônibus. A Scania forneceu dados sobre o ônibus e realizou pesquisas com os motoristas, mecânicos e passageiros.

A empresa Dongfeng deu curso de formação para os motoristas. Apenas os motoristas treinados estavam autorizados a conduzir o ônibus. Dois mecânicos da Dongfeng ficaram em Nanyang para fornecer assistência técnica e manutenção durante o primeiro mês de operação.

5.2.4 Estocolmo – Suécia

A cidade de Estocolmo tem 740 mil habitantes, mas a área metropolitana é constituída por 1,8 milhões pessoas. Aproximadamente 6,7 milhões de viagens são feitas dentro da cidade a cada dia, 60% por transporte público e 25% por veículos particulares. Na horário de pico, 73% das viagens são feitas por transportes públicos na cidade. A qualidade do ar em alguns bairros da cidade é um problema ambiental significativo e relacionado com o problema de tráfego.

O número total de ônibus no sistema de transporte público em Estocolmo é de 2014 veículos. Os ônibus a etanol do projeto BEST operam nos arredores de Estocolmo, nas áreas Huddinge / Botkyrka e Söderort. Os ônibus são operados pela empresas Swebus e Busslink.

Todos os ônibus são usados diariamente no sistema de transporte público em Estocolmo. Os operadores são responsáveis pela compra do combustível. Ambas empresas, Swebus e Busslink, compraram o ED95 da Sekab. O preço do combustível não é conhecida pela SL (empresa responsável pelo transporte público em Estocolmo). O imposto sobre os veículos para ônibus bioetanol é de 23 €/ano contra 2600 €/ano para os ônibus a diesel (BIRATH, 2010).

Estações de abastecimento foram construídas em cinco diferentes locais.

5.2.5 Rotterdam - Holanda

Cerca de 1,1 milhão de pessoas vivem na região de Rotterdam. A indústria contribui significativamente com os problemas de qualidade do ar e emissões de gases de efeito estufa. Estes problemas são reforçados pela geografia da região, que fica no centro industrial da Europa. Rotterdam tem planos ambiciosos para reduzir a emissão de CO₂ em 50% antes de 2025, por meio do uso do calor proveniente da incineração do lixo industrial, captura e sequestro de carbono e uso combustíveis limpos. O projeto BEST teve o objetivo de contribuir com as metas ambientais e a introdução de biocombustíveis na Holanda.

A cidade de Rotterdam teve como objetivo introduzir 3 veículos movidos a bioetanol como parte do projeto BEST. Um estudo de viabilidade realizado identificou que as políticas locais exigem que os veículos movidos a combustível fóssil devem atender ao padrão Euro 5. Entretanto, não haviam metas para o combustíveis renováveis

Além disso, a frota de ônibus local foi privatizada, tornando mais difícil o interesse e investimentos em ônibus movidos a combustível renovável. Havia também obstáculos a nível nacional. Não havia incentivos fiscais para biocombustíveis na Holanda, o uso de gás natural e GLP são estimulados por meio de baixos impostos e há uma dedução fiscal para a utilização de filtros de partículas. A presença desses obstáculos tornaram impossível introduzir o ônibus bioetanol na cidade de Rotterdam, dentro do prazo do projeto BEST (BITATH, 2010).

A Tabela 10 a seguir apresenta as principais dificuldades encontradas pelos países participantes dos projeto BEST.

Tabela 10 – Principais Dificuldades Encontradas no Projeto BEST

Cidade e País	Dificuldades	Solução Encontrada
La Spezia - Itália	<ol style="list-style-type: none"> 1. Não havia legislação ou regulamentação aplicável para a construção de um posto de etanol; 2. A operadora local não tinha permissão para importar, manusear e armazenar o etanol; 3. Os impostos para o etanol são os mesmos que para o diesel. Entretanto, devido ao menor conteúdo energético do biocombustível, a tributação acaba sendo maior. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Implementação de nova regulamentação para postos de abastecimento de biocombustíveis; 2. Concedida licença para a operadora e classificação aduaneira para o produto (a fim de estabelecer os impostos incidentes); 3. Solicitação de subsídios fiscais para o etanol. Entretanto, nem sempre foi concedido.
Madri – Espanha	<ol style="list-style-type: none"> 1. Impostos incidentes sobre o etanol. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Reclassificação do etanol como combustível, pois era classificado como produto médico e possuía uma tributação característica. Após a reclassificação do etanol como combustível ele passou a ter isenção de impostos.
Nanyang – China	<ol style="list-style-type: none"> 1. Não havia regulamentação para o etanol aditivado; 2. Não havia regulamentação e normas de segurança para os postos de abastecimento; 3. Não havia ônibus comerciais na China e o alto preço do ônibus fornecido pela Scania; 4. Altas tarifas de importação para 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Desenvolvimento de nova tecnologia que não exige a mistura de aditivo ao etanol; 2. Etanol era transportado por dutos a partir do ponto de produção; 3. Produção de ônibus a etanol por fabricante chinês; 4. Não houve mais a

	o ônibus e para o aditivo.	necessidade de importação do ônibus e do aditivo.
--	----------------------------	---

Fonte: Adaptado, pela autora, de BIRATH, 2010.

5.2.6 Principais resultados da operação com os ônibus movidos a etanol

O consumo de combustível por quilômetro rodado foi monitorada por três ônibus em cada local (exceto quando haviam menos ônibus). A necessidade de manutenção e os custos foram acompanhados e comparados com ônibus a diesel. A intenção era comparar ônibus bioetanol com o mesmo tipo de ônibus Scania com motores diesel, mas isto foi possível somente em São Paulo. Em todos os outros locais foi impossível encontrar ônibus Scania diesel compatíveis com os veículos a etanol. Em Estocolmo, por exemplo, não há mais investimentos em ônibus a diesel, com 12 metros. La Spezia não possui ônibus Scania a diesel.

Os ônibus testados utilizaram etanol proveniente da cana-de-açúcar. Os ônibus Dongfeng (China) utilizaram etanol (E100) produzido na China e a matéria-prima utilizada na produção do etanol não foi divulgada (BIRATH, 2010).

A partir dos dados levantados, verificou-se que o consumo de combustível varia consideravelmente com o tipo de tráfego. O consumo de combustível dos ônibus que operavam no tráfego pesados, como Madri, e em rotas acidentadas, como São Paulo, foi entre 0,97 e 1,32 litros/km. O ônibus Scania que operou no tráfego suburbano, como em La Spezia e em Estocolmo, tinham consumo entre 1,35-1,69 km/l. As taxas de consumo de combustível também variaram de acordo com o modelo/construção dos ônibus. Os ônibus em Estocolmo, La Spezia e Pequim eram todos Scania. Os veículos em Madrid e São Paulo tinham o chassi fornecido pela Scania e a carroçaria local. Já nos ônibus menores, como os produzidos pela Dongfeng, que utilizavam etanol (E100), o consumo foi de 2.13 km/l. Nas quatro cidades que utilizaram ônibus Scania, o consumo de combustível foi muito maior em rotas urbanas e acidentadas.

A Tabela 11 apresenta os principais resultados encontrados nas cidades que participaram do projeto BEST.

Tabela 11 – Resultados comparativos entre as cidades participantes do projeto BEST

Tipo de Ônibus	Local	Número de ônibus inclusos na coleta de dados	Distância Total Percorrida (km)	Total de combustível utilizado (litros)	Consumo (km/litro)	Observação
Ônibus Scania (chassi e carroceria)	Estocolmo	3	238.965	175.948	1,35	Operação fora do centro da cidade
	La Spezia	3	400.000	237.000	1,69	
	Pequim	1	5.725	3.862	1,49	
Chassi Scania e carroceria local	Madri	5	392.332	380.147	1,03	Cidade plana e tráfego intenso
	São Paulo	1 ¹	12.244	17.100	0,75	Topografia acidentada e tráfego intenso.
Ônibus Dongfeng (E100)	Nanyang	2	40.600	19.053	2,13	Ônibus Dongfeng (motor Otto). Dezenove assentos menor do que o ônibus Scania.

¹ Quando este relatório foi gerado o segundo ônibus ainda não havia entrado em circulação na cidade de São Paulo.

Por meio da Tabela 11 acima percebe-se o maior consumo do ônibus foi em São Paulo e o menor consumo em Nanyang, na China.

O menor consumo em Nanyang é algo totalmente improvável, pois trata-se um motor ciclo Otto que apresenta menor eficiência quando comparado a um motor diesel. Os relatórios do projeto BEST não justificam este menor consumo. Uma das possíveis causas seria o menor tamanho do ônibus, já que ele tem dezenove assentos a menos que o ônibus Scania. Com tamanho menor, apresenta uma capacidade de carga bem menor, resultando em menor consumo.

Já São Paulo apresentou o maior consumo, quando comparado com as outras cidades. Um dos fatores que justificam este alto consumo foi que estes dados foram resultado dos primeiros meses de operação do ônibus, antes das modificações na caixa de engrenagem e no ar condicionado terem sido efetuadas. Além disso, o trajeto do ônibus era bastante acidentado, com grandes aclives e declives, que interferem no consumo do veículo.

Um outro fator que deve ser considerado na cidade de São Paulo é o modo de operação dos veículos. Sabe-se que em grandes cidades do Brasil, como São Paulo, o estilo de condução dos motoristas de ônibus deve ser levado em consideração. Culturalmente, os motoristas apresentam um modo particular de dirigir, que não preza pelo baixo consumo do ônibus.

Em uma pesquisa realizada pelo Grupo Metropolitana de Transportes²⁴, empresa de transportes metropolitanos que atua em São Paulo e Recife, que comparou o consumo de ônibus em São Paulo dirigidos por mulheres e homens, em um mesmo trajeto, observou-se os veículos conduzidos por mulheres apresentavam um consumo muito melhor que os veículos conduzidos por homens. Este foi um dos motivos que levou a empresa a dar prioridade para as contratações de motoristas mulheres.

5.2.7 Principais resultados da manutenção com os ônibus movidos a etanol

A experiência com ônibus a etanol em Estocolmo e nas cidades participantes do projeto BEST demonstraram que os veículos a etanol requerem manutenção a cada 10 mil km, contra 20.000 km nos veículos diesel. O plano de manutenção programada prevê a mudança de óleo de motor e do filtro de óleo. Além disso, notou-se a necessidade de troca do injetor a cada 60.000 km devido ao poder de corrosão do etanol.

²⁴ Informação pessoal, Nígeia Chaves, Presidente da Viação Metropolitana, em maio de 2011, na ocasião da entrega dos primeiros ônibus a etanol.

Em Madri, foi relatada uma experiência positiva dos ônibus a etanol comparados com outros veículos da frota (gás, diesel e biodiesel). Os veículos a etanol quebraram menos que os outros, mostrando-se mais confiáveis.

Nos locais muito frios, como Estocolmo, foi relatado problemas com a partida do veículo. Na China, os veículos apresentaram a mesma frequência de manutenção dos veículos convencionais.

Resumidamente e de maneira geral, os veículos movidos a etanol da Scania apresentaram um custo de O&M cerca de 10% maior do que nos veículos diesel. Isto deu-se, principalmente, a maior frequência de manutenção e a tributação incidente sobre o etanol. Entretanto, a experiência do projeto BEST demonstrou que os custos de O&M são diferentes de local para local.

A comparação com veículos diesel só foi possível em São Paulo e La Spezia (ônibus diesel Iveco e Bredamenarini) e a Tabela 12 é apresentada abaixo.

Tabela 12 – Comparação entre veículos diesel e etanol

Local	Etanol	Diesel	Diferença de Energia	Observações
	km/litro de etanol	km/litro de diesel		
La Spezia	1,69	2,33	19,92%	Comparado com ônibus diesel Bredamenarini e Iveco.
São Paulo	0,75	1,43	86,71%	Comparado com ônibus Scania a diesel.

Fonte: Adaptado, pela autora, de BIRATH, 2010.

Apesar da comparação entre os veículos a etanol e a diesel estarem prejudicadas devido a falta de parâmetros para a correta correlação dos resultados, verificou-se que uma série de fatores pode influenciar o resultado como o número de passageiros transportados, o estilo de condução de cada motorista, o volume de tráfego, as diferenças nas rotas, entre outros. Uma comparação real e confiável, provavelmente, só seria feita em um local de teste onde as condições sejam exatamente iguais.

5.3 Verificação das emissões do ônibus movido a etanol e estudo comparativo com as emissões de ônibus diesel.

Os poluentes atmosféricos são provenientes de fontes fixas (principalmente as indústrias) e fontes móveis (caminhões, ônibus, automóveis, etc).

O Estado de São Paulo enfrenta uma situação preocupante por deter cerca de 40% da frota automotiva do país. Segundo dados da Companhia de Processamento de Dados do Estado de São Paulo (PRODESP, 2009), a frota motorizada no Estado de São Paulo, em dezembro de 2007, era de aproximadamente 16,9 milhões de veículos. A frota da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) representa cerca de 8,5 milhões de veículos. A frota de veículos do ciclo Diesel (caminhões, ônibus, micro-ônibus, caminhonetes e vans), no Estado de São Paulo, é composta por 1,077 milhão de veículos e na RMSP por 457,6 mil veículos.

A tecnologia de veículos *flex fuel*, lançada no ano de 2003, exclusivamente no Brasil, vem gradativamente substituindo a gasolina brasileira, pelo etanol hidratado (E100). Segundo ANP (2009), a venda de veículos *flex fuel* provocou uma redução no consumo de gasolina no Brasil, de 2007 para 2008, em aproximadamente 2%. Além disso, a tecnologia de motores diesel adaptados para operar com etanol, desenvolvida pela Scania, surgiu como uma alternativa para substituição do óleo diesel utilizado em veículos pesados, fazendo com que haja menor dependência deste combustível não renovável e importado.

Os dados de qualidade do ar do estado de São Paulo são monitorados continuamente por meio das estações automáticas de monitoramento da CETESB, que apresentam também a sua classificação, baseada no cálculo de um índice de qualidade do ar, que é uma ferramenta matemática desenvolvida para simplificar o processo de divulgação da qualidade do ar (CETESB, 2011).

Segundo Relatório de Qualidade do ar no Estado de São Paulo, publicado pela CETESB, 2010, os resultados obtidos a partir da rede de monitoramento da qualidade do ar refletem as variações na matriz de emissões de poluentes, tais como modificações na frota de veículos, alterações no tráfego, mudanças de combustível, alterações no parque industrial, implementação de tecnologias mais limpas, etc e refletem, também, as condições meteorológicas observadas no ano.

Como dito anteriormente, a emissão de poluentes dos veículos automotores, em especial de veículos do ciclo diesel, contribui para a contínua deterioração da qualidade do ar, o que afeta a qualidade ambiental, contribuindo com o aumento de doenças, especialmente

nos centros urbanos. Faz-se necessária a implementação de medidas para a efetiva redução destas emissões por parte do governo, nos âmbitos federal, estadual e municipal.

Neste sentido, o PROCONVE estabeleceu um cronograma de redução gradual da emissão de poluentes para veículos leves (automóveis) e para veículos pesados (ônibus e caminhões). Pelo PROCONVE, os veículos automotores são divididos em veículos leves, até 3.856 kg de Peso Bruto Total (PBT) e veículos pesados, acima de 3.856 kg PBT. Os procedimentos para medição da poluição dos veículos leves e pesados são diferentes, conseqüentemente, os limites de emissões para veículos leves e pesados são também diferentes. Entretanto, os limites aplicados para cada categoria são os mesmos, para qualquer combustível.

O Gráfico 04 abaixo exemplifica como está dividida a frota de veículos brasileira, no ano de 2008, por tipo de combustível.

Gráfico 04 – Frota Brasileira por tipo de combustível

Fonte: JOSEPH JR., 2009.

Os procedimentos de medição dos poluentes, como dito anteriormente, apresentam diferenças. Para os veículos leves, o teste é realizado com o veículo completo em dinamômetro de chassi, baseado no método americano (*FTP-75 Federal Test Procedures*, método utilizado para certificar as emissões de veículos leves nos Estados Unidos). No Brasil,

é similar a norma NBR-6601). Já para os veículos pesados, o testes é realizado somente no motor em dinamômetro, baseado no procedimento europeu (método europeu para certificar as emissões de veículos pesados). As Figuras 23 e 24 abaixo, ilustram os testes realizados em veículos leves e pesados, respectivamente.

Figura 23 – Teste em dinamômetro de chassi, em veículo leve.

Fonte: JOSEPH JR., 2009.

Figura 24 – Teste em dinamômetro de motor, em veículo pesado.

Fonte: JOSEPH JR., 2009.

A Tabela 13 apresenta os limites de emissões para veículos diesel pesados, em g/kWh, nas diferentes fases do PROCONVE.

Tabela 13 – Limites de emissões para veículos diesel pesados, em g/kWh, nas diferentes fases do PROCONVE.

PROCONVE	EURO	CO	HC	NOx	MP	Vigência	Norma (CONAMA)	Teor de Enxofre
Fase I (P1)	Sem Especificação	14,00*	3,50*	18,00*	-	1989 a 1993	Res. 18/86	-
Fase II (P2)	Euro 0	11,20	2,45	14,40	0,60	1994 a 1995	Res. 83/93	3.000 a 10.000 ppm
Fase III (P3)	Euro 1	4,90	1,23	9,00	0,40 ou 0,70 ¹	1996 a 1999	Res. 08/93	3.000 a 10.000 ppm
Fase IV (P4)	Euro 2	4,00	1,10	7,00	0,15	2000 a 2005	Res. 08/93	3.000 a 10.000 ppm
Fase V (P5)	Euro 3	2,10	0,66	5,00	0,10 ou 0,13 ²	2006 a 2008	Res. 315/02	500 a 2.000 ppm
Fase VI (P6)	Euro 4	1,50	0,46	3,50	0,02	2009 a 2012 ³	Res. 315/02	50 ppm
Fase VII (P7)	Euro 5	1,50	0,46	2,00	0,02	A partir de 2012	Res. 403/08	10 ppm

Notas:

* não foram exigidos legalmente;

¹ 0,70 para motores até 85 kW e 0,40 para motores com mais de 85 kW;² motores com cilindrada unitária inferior a 0,75dm³ e rotação à potencia nominal superior a 3.000 RPM;³ não entrou em vigor na data prevista.

Fonte: PROCONVE, 2010.

A Fase 6 (P6) do Proconve, prevista para entrar em vigor em 2009, não entrou em vigor na data prevista. Especialista da área automobilística afirmam que a Resolução 315/02 só determinou o limite máximo de poluente e não especificou o combustível. Somente em 2007, a ANP regulamentou os limites de enxofre para o óleo diesel.

Entretanto, segundo a Lei nº 8.723, de 1993, os órgãos responsáveis pela política energética e controle são obrigados a fornecer combustíveis comerciais, a partir da data de implantação dos limites fixados por esta lei e de referência para testes de homologação, certificação e desenvolvimento, com antecedência mínima de trinta e seis meses do início de sua comercialização. Ou seja, o combustível deveria estar disponível para testes a partir de 2006, anteriormente a especificação do combustível realizada pela ANP, em 2007. Houve uma grande defasagem entre a publicação da Resolução CONAMA, em 2002, e a regulamentação do diesel pela ANP, em 2007. A especificação do combustível deveria ter sido realizada no início, paralela a Resolução do CONAMA, em 2002.

A indústria automobilística alegou que não houve tempo para cumprir o prazo, porque a definição das especificações do óleo diesel foi feita no final de 2007 e os veículos modelo 2009 são comercializados a partir do segundo semestre de 2008, portanto, o tempo não foi suficiente.

Toda esta dificuldade, na ocasião, levou ao Termo de Ajustamento de Conduta - TAC, celebrado entre MPF, estado de São Paulo, IBAMA, ANP, Petrobrás, Fabricantes de Veículos, Fabricantes de Motores e CETESB, com o objetivo de estabelecer as obrigações de cada parte com relação as emissões atmosféricas que seriam evitadas com a comercialização de motores e de veículos leves comerciais e pesados a óleo diesel adequados aos limites estabelecidos na Resolução CONAMA 315/2002.

Decorrente do TAC, o Instituto de Energia e Meio Ambiente fez um inventário sobre qual foi o impacto ambiental do não cumprimento da resolução nº 315. O prejuízo ambiental é de 51 mil toneladas no período de 2009 a 2040, quanto ao material particulado. Já com relação a NOx, o prejuízo ambiental previsto é de 155 mil toneladas no período de 2009 a 2013, e o ganho ambiental de 9 milhões de toneladas no período de 2014 a 2040.

Para se compensar o prejuízo ambiental, foi instituída a substituição gradual a partir de 2009, por diesel S1800²⁵ até 2014. E em especial ao diesel metropolitano, deverá passar de 500 a

²⁵ Combustíveis com teor de enxofre, máximo, de 1800 mg/kg, ou seja, 1800 ppm.

50 ppm de enxofre, para frotas de ônibus urbanos. A mitigação também deverá incluir programas de avaliação e de regulação gratuita para frotas de veículos a diesel, patrocínio do programa de fiscalização da fumaça preta da Cetesb no estado de São Paulo, entre outros.

Para compensar o atraso na entrada em vigor da Fase 6, o CONAMA promulgou a Fase 7 (P7), para entrar em vigor a partir de janeiro de 2012, e a Resolução nº 415/2009 (L6²⁶), a partir de 01 de janeiro de 2013, com maiores restrições.

Para a implementação da Fase 7 nos motores diesel, além das mudanças no combustível, serão necessárias modificações na tecnologia a fim de receber este combustível e respeitar os padrões de emissão impostos pela regulamentação.

As tecnologias atuais, implementadas para corresponder a Fase 5 do CONAMA, o foco é na injeção de alta pressão controlada eletronicamente. Já para a Fase 7, a tecnologia terá foco em sistemas de pós-tratamento como Filtro de Material Particulado, do inglês *Diesel Particulate Filter* (DPF), em conjunto com o Sistema de Recirculação dos Gases de Escape, do inglês *Exhaust Gas Recirculation* (EGR) ou Catalisadores de Redução Seletiva com uso de uréia, do inglês *Selective Catalytic Reduction* (SCR), o ARLA 32 – Agente Redutor Líquido Automotivo. A combinação entre as tecnologias será determinada pelo fabricante. A Figura 25 a seguir ilustra uma solução integrada de um sistema de pós-tratamento.

Figura 25 – Solução integrada sistema pós-tratamento (motor P7 e diesel com 10 ppm de enxofre).

Fonte: LADEIRA, 2011.

²⁶ Para automóveis e veículos comerciais leves do ciclo Otto.

A necessidade de utilização de uréia nos motores traz um novo desafio de com relação à distribuição deste produto (logística), preço e oferta.

Os postos de combustível deverão ter um novo tanque para a venda da uréia. Além disso, acredita-se em um problema de oferta e demanda deste produto, já que no Brasil existem somente dois produtores, a Vale Fertilizantes e a Petrobrás. Com a possibilidade de aumento da demanda existe a possibilidade de importação deste produto. Tendo em vista estas dificuldades, o IBAMA assinou, em outubro de 2010, um Termo de Cooperação Técnica com o INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial) a fim de regulamentar a produção, comercialização e uso do ARLA 32, acompanhar a fiscalização e emitir o selo INMETRO/IBAMA.

Visando que todas as novas adaptações no motor e no combustível sejam cumpridas o Artigo 2º da Resolução 403/08 estabelece que a obrigatoriedade de incorporação de dispositivos ou sistemas para autodiagnose (OBD), das funções de gerenciamento do motor que exerçam influência sobre as emissões de poluentes do ar, dotados de indicadores de falhas ao motorista e de recursos que reduzam a potência do motor em caso de falhas que persistam por mais de dois dias consecutivos, para todos os veículos pesados. Um dos objetivos deste sistema chamado de OBD, do inglês *on board diagnostic*, é gerenciar o sistema a fim de evitar a emissão de poluentes, como por exemplo, por falta de uréia.

Uma das críticas enfrentadas por este novo sistema será a necessidade de uma logística diferenciada para caminhões com diferentes anos de fabricação. Os postos de gasolina, por exemplo, terão que ter pelo menos duas bombas de diesel, uma com diesel de 500 ppm (P5) e outra com o diesel de 10 ppm (P7), já que espera-se que os preços destes dois produtos sejam diferentes, além da bomba de uréia. Além disso, os veículos novos, com a tecnologia desenvolvida para atender a P7 e o diesel com menor teor de enxofre deve custar cerca de 15 a 20% mais (VENTURA, 2009). Diante disso, o motor diesel adaptado para operar com etanol, mesmo possuindo preço superior aos motores atuais, que aceitam diesel com alto teor de enxofre, apresentam uma vantagem competitiva em relação aos novos motores que atendem a P7.

Entretanto, não se pode deixar de considerar os benefícios ambientais e de saúde pública pertinentes a estas modificações, que nunca são contabilizados.

Distante de todas as preocupações com relação à nova regulamentação do PROCONVE, os ônibus a diesel adaptados para operar com etanol aparecem como uma solução. A nova geração destes veículos, desenvolvido pela Scania, encontra-se na terceira fase de desenvolvimento tecnológico e atende aos limites de emissão veicular europeu EURO 5, regulamentação que vigora no continente europeu desde setembro de 2009 e é certificado como EEV – *Enhanced Environmental Vehicle*, norma ainda mais rígida que a norma EURO 5 (SCANIA, 2007).

Além disso, o etanol é um combustível biodegradável, renovável, o que implica uma significativa contribuição para a redução da emissão de gases responsáveis pelo aquecimento global, também não possui enxofre na sua composição. Ou seja, a tecnologia desenvolvida pela Scania, que utiliza etanol em motores diesel, já atenderia a Resolução CONAMA 403/08.

Entretanto, faz-se necessária uma avaliação das emissões deste ônibus a etanol comparando-os com veículos diesel tradicionais.

Como nem o Projeto BEST, nem o novo projeto financiado pelo CNPq, realizaram testes de emissão, para a avaliação comparativa de emissões de ônibus movidos a diesel e a etanol, serão utilizados dados obtidos de literatura para uma comparação entre as tecnologias.

Para os veículos diesel serão utilizados dados de emissão provenientes do 1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários, publicado em 2011, pelo Departamento de Mudanças Climáticas da Secretaria de Mudanças Climáticas e Qualidade Ambiental do Ministério do Meio Ambiente e apresentados no APÊNDICE D.

Já para os ônibus diesel movidos a etanol, será utilizado o ensaio realizado em 13/09/2007, no laboratório RDW, na Holanda.

5.3.1 Emissões dos ônibus a etanol

Como dito anteriormente, nem o Projeto BEST, nem o novo projeto financiado pelo CNPq, realizaram teste de emissão, para a avaliação comparativa de emissões de ônibus movidos a diesel e a etanol. Então, serão utilizados dados obtidos de estudos realizados em outras localidades do projeto BEST para comparação das emissões entre os dois veículos.

As emissões de veículos movidos a álcool tem sido um tópico importante na Suécia, desde a década de 1970. Naquela época, era vista como uma medida para reduzir as emissões

primárias de veículos leves movidos a gasolina. As crises do petróleo em 1973 e 1977 também incentivam a utilização do etanol. Mais tarde, em 1980, surgiu o interesse em substituir metanol por etanol, a Scania desenvolveu pela primeira vez para o Brasil, veículos pesados movidos a etanol por meio de motor a ignição por compressão, e mais tarde para a Suécia. A Volvo, na década de 1980, desenvolveu um tipo de motor em que o óleo diesel era utilizado na partida e como uma fonte de ignição.

Em alguns lugares na Suécia, ônibus e caminhões a etanol foram introduzidos, como medida para reduzir as emissões nas cidades e este foi o argumento para a introdução de um combustível mais limpo. No entanto, hoje há outros fatores que incentivam a utilização do etanol, como a necessidade de uma redução de gases de efeito estufa e a necessidade de encontrar novas fontes de energia em substituição aos combustíveis fósseis cuja perspectiva é de escassez no futuro.

Como a Suécia tem um histórico de longo prazo do uso de etanol como combustível para veículos pesados e o desempenho de emissões dos motores e veículos tem sido realizado por meio de vários estudos desde os anos 80, alguns dos dados gerados são apresentados nesta seção.

Os dados estão concentrados para o ônibus e motores para ônibus, já que não há produção de caminhões a etanol hoje.

Inicialmente, ao estudar os dados da medição das emissões nos motores pesados e etanol, deve ser ressaltado que os dados foram gerados a partir da primeira geração de motores, que são basicamente os motores pesados a diesel convertidos para etanol a partir de maior taxa de compressão. Mais recentemente, seu sistema de combustão e, em particular, o equipamento de injeção, foi substituído por equipamentos mais modernos. Além disso, a versão utilizada nestes testes não foi equipada com todo o controle eletrônico da bomba de injeção.

Dados ponderados de emissões são regulamentados e compilados na Tabela 14 abaixo. Deve-se notar que HC, CO, NO_x, NO₂ e NO são apresentados em g/kWh, enquanto MP é apresentado em em mg/kWh e CO₂ é em kg/kWh.

Tabela 14 – Emissões comparativas de veículos a etanol e diesel em diferentes configurações.

Configuração do Motor	HC	NOx	CO	MP	NO ₂	NO	CO ₂
	(g/kWh)	(g/kWh)	(g/kWh)	(mg/kWh)	(g/kWh)	(g/kWh)	kg/kWh
Motor Scania DC904 operando com óleo diesel	0,72	6,72	0,58	12,58	0,46	6,25	0,750
Motor Scania DC904 equipado com sistema DNOx ¹ operando com óleo diesel	0,14	4,52	0,05	0,08	1,47	3,06	0,774
Motor Scania DSI9E01 operando com etanol	0,53	3,48	2,07	1,35	0,39	3,10	0,726
Motor Scania DSI9E01 acoplado com catalisador operando com etanol	0,14	3,40	0,02	1,04	1,04	2,35	0,729
Motor Scania DSI9E01 equipado com sistema DNOx operando com etanol	0,15	2,54	0,04	0,45	0,87	1,67	0,748

Nota: ¹ Sistema utilizado em motores diesel para controlar a emissão de NOx.

Fonte: REHNLUND et al., 2007.

Com base nos valores apresentados pode-se concluir:

- Para o motor a diesel, o sistema DNOx teve um claro efeito positivo sobre as emissões exceto para NO₂, que aumentou por um fator de cerca de 3,2 (a partir de 0,46 g/kWh a 1,47 g/kWh e também para o CO₂ que aumentou de 0,750 para kg/kWh 0,774 kg/kWh;
- Para o motor Scania operando com etanol as emissão de CO aumentaram de 2,07 g/kWh que foi um valor consideravelmente maior que a operação com diesel. O valor não está completamente incorreto, mas algum erro pode ter ocorrido, já que o valor encontrado está muito acima do esperado;

- Para os motores movidos a etanol, o catalisador representa um importante item na diminuição das emissões, principalmente de HC e CO. Ele também teve efeito positivo sobre a emissão de MP, mas nenhum impacto significativo sobre NO_x;
- A utilização do sistema DNOx sobre as emissões apresenta o mesmo comportamento e a mesma magnitude em motores a etanol e diesel, exceto para MP onde o sistema DNOx em motores a etanol foi menos eficiente.

Um outro estudo, porém confidencial²⁷, foi realizado para a cidade de Londres. Quando comparados os veículos convencionais diesel Euro 3 equipado com regenerador de MP e veículos a etanol, obteve-se os seguintes resultados: diminuição de 40% nas emissões de óxido de nitrogênio (NO_x), diminuição de 45% nos níveis de monóxido de carbono (CO) 45% e 6,7% menos dióxido de carbono (CO₂). O estudo, porém, não levou em consideração o ciclo completo do carbono nas emissões dos veículos a etanol. Foram consideradas somente as emissões no escapamento.

Um outro teste foi realizado pela Scania, em setembro de 2007, no laboratório RTW, na Holanda, já com o motor de nova geração e os resultados serão apresentados na Tabela 15 a seguir, junto com os padrões de emissão do PROCONVE, para comparação.

²⁷ Informação pessoal, Jonas Ericson, Prefeitura de Estocolmo, 22 de Setembro de 2011.

Tabela 15 - Emissões do motor ciclo diesel movido a etanol aditivado e comparação com as Fases 6 e 7 do PROCONVE.

Valores de Emissão	CO (g/kWh)	HC (g/kWh)	NO_x (g/kWh)	MP (g/kWh)
Motor Scania DSI9E01 operando com etanol	2,07	0,53	3,48	0,00135
Motor Scania DSI9E01 acoplado com catalisador pós-tratamento de gases operando com etanol	0,02	0,14	3,40	0.00104
Motor Scania DSI9E01 equipado com sistema DNOx operando com etanol	0,04	0,15	2,54	0,00045
Motor etanol da nova geração (DC9 E02 Euro5)	0,00	0,05	1,70	0,01
PROCONVE P-6	1,50	0,46	3,50	0,02
PROCONVE P-7	1,50	0,46	2,00	0,02

A partir da Tabela 15 acima é possível perceber que a nova geração do motor Scania atende e supera os limites da Fase 7 do PROCONVE. Também é importante ressaltar que o desenvolvimento e o aperfeiçoamento dos motores Scania foram essenciais para o atendimento das metas, já que as gerações mais antigas do motor não atenderiam aos limites de emissão de NO_x.

Com base no teste realizado no laboratório da Holanda, o motor diesel adaptado para operar com etanol aditivado foi homologado no Brasil pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), pois mostrou-se perfeitamente aplicável à realidade

brasileira já que suas emissões estão bem abaixo dos limites impostos pelo Programa de Controle de poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE).

No Brasil, em janeiro de 2008, a CETESB emitiu uma avaliação técnica com base na Resolução do CONAMA utilizada na época - Res. nº 315/02 (Fase 6) e, portanto, foi declarado que o motor atende aos limites de emissão estabelecidos por esta resolução, o que significa EURO 4. No entanto, o motor emite um valor muito inferior para o limite de EURO 4. Entretanto, a CETESB não pode homologar isso, pois não existia legislação brasileira para EURO 5, na ocasião. Com esses padrões de rigidez, estima-se uma redução de 90% de material particulado e 62% de NOx lançado na atmosfera. Além disso, ele não terá emissão de enxofre (S), que compõe SOx, responsável pela chuva ácida.

Os resultados do ensaio do motor, comparados aos limites estabelecidos no PROCONVE, mostram que os valores de emissão do motor ciclo diesel movido a etanol aditivado são bem menores do que os limites impostos pelas fases P-6 e P-7 do PROCONVE.

Com estes resultados é possível perceber que os ônibus diesel adaptados para operar com etanol, desde 2007, já estavam desenvolvidos, emitindo menos do que os padrões regulamentados pela Fase 7 do PROCONVE.

A partir da comparação, mostrada na Tabela 15, verifica-se que a tecnologia de veículos diesel adaptado para operar com etanol, está perfeitamente adaptada para atender aos mais rigorosos padrões de emissão, que entrarão em vigor no Brasil a partir de 2012. É importante ressaltar que o motor a etanol não precisa de nenhuma adaptação como EGR ou uréia para atender aos padrões. As adaptações no motor já são de fábrica e ele facilmente atende aos limites estabelecidos pelo Fase 7 do PROCONVE. Entretanto, é necessário destacar que para tal é preciso haver disponibilidade do etanol aditivado e, portanto, será necessário uma logística de distribuição deste combustível presente em todo o território nacional.

5.3.2 Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE)

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (do inglês IPCC) define mudança climática como "qualquer mudança no clima ao longo do tempo, quer devido à variabilidade natural ou como resultado da atividade humana."

O IPCC concluiu que as mudanças climáticas são suscetíveis de impactar e aumentar a vulnerabilidade dos ecossistemas, recursos hídricos, segurança alimentar, assentamentos, sociedade, e saúde humana. Uma variedade de problemas nacionais de segurança humana tem sido articulada, como resultado dessas pressões.

Cientistas apontam para as temperaturas médias recordes (NATIONAL CLIMATE CHANGE, 2011), e para o aumento de eventos climáticos extremos, os chamados de bizarrices do clima.

Ao contrário da poluição do ar local, tais como o *smog* causado pela emissão de poluentes regulados (SO_x e NO_x , ozônio e material particulado), as mudanças climáticas são consideradas um problema ambiental global.

O Protocolo de Quioto reconhece seis gases de efeito estufa: CO_2 , CH_4 , N_2O , PFCs, HFCs e SF_6 . Outras famílias de GEE, como os clorofluorcarbonetos (CFCs), hidroclorofluorcarbonetos (HCFCs), e alguns outros gases, que também são substâncias que destroem o ozônio, são considerados pelo Protocolo de Montreal e, portanto, não são incluídos no conjunto de Quioto.

O Potencial de Aquecimento Global é uma medida de como uma determinada quantidade de gás do efeito estufa (GEE) contribui para o aquecimento global. Também é comumente identificado apenas pela sigla GWP - *Global Warming Potential*, em referência ao nome em inglês. O GWP é uma medida relativa que compara o gás em questão com a mesma quantidade de dióxido de carbono (cujo potencial é definido como 1). O Potencial de Aquecimento Global é calculado sobre um intervalo de tempo específico e este valor deve ser declarado para a comparação. O uso do GWP permite que as reduções de emissões de metano, óxido nitroso e outros compostos de alto GWP sejam denominados em "dióxido de carbono equivalente". O equivalente em dióxido de carbono, ou CO_2 equivalente, ou ainda CO_2e , é a unidade de moeda de carbono, subsídios e compensações discutidas no restante deste relatório.

A Tabela 16 a seguir apresenta a relação dos seis gases de efeito estufas considerados pelo IPCC e seus respectivos potenciais de aquecimento global.

Tabela 16 - Gases de Efeito Estufa e Seus Potenciais de Aquecimento Global

<u>Gás</u>	<u>Potencial de Aquecimento Global (do inglês GWP)</u>	<u>Fontes Típicas</u>
CO ₂	1	Combustão fóssil, Mudança no uso da terra, desmatamento e produção de cimento.
CH ₄	21 (25)	Agricultura (produção de arroz), aterros de lixo, manejo de animais e minas de carvão.
N ₂ O	310 (298)	Produção e aplicação de fertilizantes e esgotos.
PFCs	CF ₄ : 6,500 (7,390) C ₂ F ₆ : 9,200 (12,200)	Produção de alumínio
HFCs	HFC-23: 11,700 (14,800)	Refrigerantes
SF ₆	23,900 (22,800)	Transformadores elétricos, produção de magnésio

Notas: ¹ O primeiro número apresentado corresponde aos valores reconhecidos pelo Protocolo de Quioto, e são baseados no Segundo Relatório de Avaliação do IPCC (SAR, 1995). Os valores entre parênteses são os valores mais recentes baseados no Quarto Relatório de Avaliação do IPCC (AR4, 2007).

Fonte: IPCC, 2007.

Uma descrição do mercado de carbono regulado e voluntário é apresentada no APÊNDICE E.

5.3.2.1 Avaliação das emissões de gases de efeito estufa pelo ônibus a etanol, a partir de diferentes cenários.

Atualmente grandes quantidades de CO₂ são emitidas para a atmosfera a partir da queima de combustíveis fósseis, inclusive por ônibus utilizados no transporte urbano. Portanto, a atividade de projeto proposta objetiva a redução de emissões de gases de efeito estufa através da substituição do combustível fóssil por etanol produzido a partir de cana de açúcar.

Segundo Silva (2009), o uso de diesel representa em média 63% do consumo energético e 31% das emissões totais de gases de efeito estufa da cadeia produtiva do etanol derivado da cana de açúcar produzido e usado no Brasil, desconsiderando o crédito da eletricidade excedente na cadeia produtiva e as emissões devido à mudanças do uso da terra.

5.3.2.2 O Cenário de Linha de Base

Conforme as regras do MDL, uma atividade de projeto deve primeiramente definir um cenário de linha de base que, segundo o Glossário de Termos do MDL (UNFCCC, 2009), é o

cenário que representa as emissões antropogênicas de fontes de gases de efeito estufa (GEE) que ocorreriam na ausência da atividade de projeto proposta, consistente com todas as leis e regulamentações existentes.

Neste caso do transporte público urbano, o cenário de linha de base mais plausível consiste na continuação de consumo de combustível predominantemente fóssil (95% de diesel + 5% de biodiesel – B5) para o transporte urbano na cidade de São Paulo. Sendo assim, as emissões de linha de base são calculadas de acordo com o volume de diesel consumido para o transporte urbano por ano.

5.3.2.3 A Fronteira do Projeto

Para avaliar os impactos de tal substituição nas emissões de CO₂, em primeiro lugar, é necessário definir quais as fontes de GEEs devem ser consideradas pela fronteira do projeto e é necessário considerar, portanto, todos os processos que possam causar impacto nas emissões de gases efeito estufa (GEE) e então determinar quais deles são considerados dentro da fronteira e quais deles podem ser considerados como emissões fugitivas, ou seja, fora da fronteira.

Neste caso, é necessário considerar as emissões decorrentes do plantio e colheita da cana de açúcar (incluindo as emissões decorrentes de eventuais mudanças de uso do solo), emissões decorrentes da produção de etanol, e por fim as emissões decorrentes da queima de tal combustível pelos ônibus. Concluindo, a Figura 26 a seguir ilustra a fronteira proposta para o projeto em questão.

Figura 26 - Fronteira do Projeto

De acordo com as regras do MDL, as atividades de projeto devem aplicar uma metodologia aprovada ou propor uma nova metodologia sob o processo de aprovação no MDL. Neste caso, não existem metodologias aprovadas pelo Conselho Executivo do MDL (CE-MDL) que se apliquem integralmente ao projeto proposto. Portanto, utilizou-se como Guia de Cálculo as Fórmulas previstas pelo GHG Protocol e IPCC, conforme segue:

Fórmulas e Métodos de Cálculo

- Emissões de Linha de Base decorrentes do consumo de diesel

Para cálculo das emissões de GEE decorrentes da combustão de diesel (B5) foi preciso primeiramente estimar o volume de combustível consumido por tipo de ônibus, conforme segue:

$$Fuel_Use = Distance \times Fuel_Economy_Factor$$

Onde:

Fuel use = volume de combustível consumido no ano

Distance = distância média percorrida por tipo de ônibus

Fuel economy factor = consumo médio de combustível por tipo de ônibus em litro/km

Após ter estimado o volume de combustível consumido no ano, utilizou-se a forma de cálculo indicada pelas Orientações do IPCC, de acordo com o método *Tier 1*, conforme segue:

$$Emission = \sum_a [Fuel_a \times EF_a]$$

Onde:

Emission = emissões em kg

EF_a = fator de emissão (kg/TJ)

Fuel_a = combustível tipo a (neste caso biodiesel B5)

Observações:

1) O cálculo das emissões de CO₂ é feito por meio da multiplicação de consumo de combustível estimado com um fator de emissão padrão de CO₂

2) O fator de emissão considera todo o carbono presente no combustível que é emitido como CO₂, exceto a fração inoxidável que permanece como poeira, material particulado. Segundo IPCC, qualquer carbono derivado de biomassa não deve ser incluído na estimativa, para evitar dupla contagem.

3) Apesar do diesel consumido no cenário atual possuir uma porcentagem de biodiesel (B5 neste caso), para fins de obtenção de Crédito de Carbono sob o MDL, não se considerou a emissão de biodiesel presente no diesel, atualmente consumido pela frota de ônibus de São Paulo. Essa premissa é conservadora e foi definida com base na metodologia de MDL aprovada AM0090 “*Modal shift in transportation of cargo from road transportation to water or rail transportation*”, que se aplica a projetos que objetivam a mudança de modal de transporte (rodovia para hidrovia ou ferrovia).

- Emissões de Projeto decorrentes do Consumo de Etanol:

Para determinação do volume de etanol a ser consumo, serão considerados alguns cenários de substituição da frota diesel. São eles:

- Cenário 1 – 25% de substituição da frota de veículos diesel por etanol;
- Cenário 2 - 50% de substituição da frota de veículos diesel por etanol;
- Cenário 3 - 75% de substituição da frota de veículos diesel por etanol;
- Cenário 4 - 100% de substituição da frota de veículos diesel por etanol.

As emissões de projeto são calculadas de forma análoga as emissões de linha de base (ou cenário de referência). A única diferença é o uso do fator de emissão que agora passa a ser o fator de emissão do etanol que será consumido em cada um dos cenários considerados (25%, 50%, 75% e 100% de substituição da frota para uso de etanol).

Neste caso, é preciso considerar que apesar do etanol ser produzido a partir de biomassa plantada (ou seja, 100% biogênico), existem grandes discussões a nível mundial, se realmente o fator de emissão deste combustível pode ser considerado nulo, pois, é preciso considerar as emissões decorrentes do plantio da cana-de-açúcar (emissões decorrentes de mudança do uso do solo, emissões decorrentes do uso de fertilizantes e emissões decorrentes do consumo de combustível fóssil por maquinários utilizados no plantio, colheita e produção de etanol).

Sendo assim, fatores de emissão que consideram o ciclo de vida do etanol foram levantados da literatura, e o fator proposto pela Agência de Proteção ao Meio Ambiente - EPA dos EUA foi escolhido (EPA, 2010).

- Emissões de Projeto decorrentes do Consumo de Diesel:

As emissões de projeto decorrentes do consumo de diesel são calculadas de forma idêntica as emissões de linha de base (ou cenário de referência).

Com relação ao aditivo, a partir de cálculos da Oxiteno (fabricante do aditivo no Brasil),

obteve-se que o fator de emissão do aditivo é de aproximadamente 136,576 kg CO₂/tonelada de etanol aditivado, ou seja, 0,136 tCO₂/t combustível. Da mesma maneira que na linha de base, nas emissões de projeto, adota-se uma abordagem conservadora. Ou seja, como a emissão do aditivo (0,136 tCO₂/t combustível) é inferior a do etanol (1,255 tCO₂/t combustível), não serão consideradas as emissões associadas a queima do aditivo, somente ao etanol.

Premissas de Cálculo:

1. Foram considerados quatro cenários para a substituição de diesel por etanol a ser consumido pela frota atual de ônibus de São Paulo (substituição de 25, 50, 75 e 100%);
2. Apesar do diesel consumido no cenário atual possuir uma porcentagem de biodiesel (B5 neste caso), para fins de obtenção de Crédito de Carbono sob o MDL, não se considerou a emissão de biodiesel presente no diesel atualmente consumido pela frota de ônibus de São Paulo. Essa premissa é conservadora e foi definida com base na metodologia de MDL aprovada AM0090, que se aplica a projetos que objetivam a mudança de modal de transporte (rodovia para hidrovía ou ferrovia).
3. Para cálculo das emissões de projeto, considerou-se o ciclo de vida do etanol, considerando assim todas as emissões envolvidas no processo de produção de tal combustível (desde o plantio de cana de açúcar até sua produção nas usinas).
4. Neste momento, não foi considerada nenhuma taxa de crescimento para a frota de ônibus de São Paulo ao longo dos anos considerados no período para obtenção de créditos de carbono, já que não há previsão de aumento da frota, e sim de investimentos em infraestrutura com o objetivo de aumentar a velocidade média dos corredores.
5. Para cálculo do fator de emissão de etanol (considerando o ciclo de vida), baseado no estudo da EPA, considerou-se que o mesmo é 61% menor que o fator de emissão da gasolina.

- Dados de Entrada:

As tabelas a seguir apresentam os dados de entrada utilizados para estimativa das reduções de emissões para cada um dos cenários considerados.

Tabela 17 - Dados de entrada - Características da frota de ônibus

Características da frota de ônibus SP – Diesel					
Sistema	Tipo de ônibus	Parâmetro	Valor	Unidade	Fonte
Estrutural (Concessão)	Básico	Quantidade	4.900	Unid	SPTrans
		Quilometragem média percorrida por dia	200	km/dia	SPTrans
		Consumo médio de diesel	0,455	l/km	SPTrans
		Consumo médio de etanol litros por km	0,736	l/km	SPTrans
	Biarticulados	Quantidade	200	Unid	SPTrans
		Quilometragem média percorrida por dia	200	km	SPTrans
		Consumo médio de diesel	0,909	l/km	SPTrans
		Consumo médio de etanol litros por km	1,473	l/km	SPTrans
	Articulados	Quantidade	900	Unid	SPTrans
		Quilometragem média percorrida por dia	200	km	SPTrans
		Consumo médio de diesel	0,667	l/km	SPTrans
		Consumo médio de etanol litros por km	1,080	l/km	SPTrans
	Ônibus Padron	Quantidade	2.000	Unid	SPTrans
		Quilometragem média percorrida por dia	200	km	SPTrans
		Consumo médio de diesel	0,556	l/km	SPTrans
		Consumo médio de etanol litros por km	0,900	l/km	SPTrans
Local (Permissão)	Microônibus	Quantidade	4.000	Unid	SPTrans
		Quilometragem média percorrida por dia	200	km/dia	SPTrans
		Consumo médio de diesel	0,313	l/km	SPTrans
		Consumo médio de etanol litros por km	0,506	l/km	SPTrans
	Midio-ônibus	Quantidade	200	Unid	SPTrans
		Quilometragem média percorrida por dia	200	km/dia	SPTrans
		Consumo médio de diesel	0,357	l/km	SPTrans
		Consumo médio de etanol litros por km	0,579	l/km	SPTrans
	Básico	Quantidade	1.800	Unid	SPTrans
		Quilometragem média percorrida por dia	200	km/dia	SPTrans
		Consumo médio de diesel	0,455	l/km	SPTrans
		Consumo médio de etanol litros por km	0,736	l/km	SPTrans

Tabela 18 - Dados de Entrada - Características dos Combustíveis

Características do Combustível Consumido				
Combustível	Parâmetro	Valor	Unidade	Fonte
Diesel	Densidade do diesel	0,850	kg/l	Petrobras
	Poder calorífico inferior	43,000	GJ/ton	IPCC
	Fator de Emissão de GEE (diesel)	0,0741	tCO ₂ /GJ	IPCC
Biodiesel (fração biogênica)	Fator de Emissão de GEE considerado	0,0000	tCO ₂ eq/GJ	IPCC
Etanol	Densidade do etanol	0,802	kg/l	Petrobras
	Poder calorífico inferior	21.867	MJ/ton	Shell
	Fator de Emissão de GEE	0,0423	tCO ₂ /GJ	EPA

A seguir são apresentados os resultados das estimativas de reduções de Emissões para cada um dos cenários considerados:

Tabela 19 - Cenário 01 (25% da frota de ônibus passa a consumir etanol)

Ano	<u>Linha de Base</u>		<u>Projeto</u>				<u>Reduções de Emissões</u>
	Consumo de Diesel com Biodiesel B5 (litros/ano)	Emissões de Linha de Base (tCO₂/ano)	Consumo de Etanol (litros/dia)	Consumo de Etanol (litros/ano)	Consumo de Diesel com Biodiesel B5 (litros/ano)	Emissões de Projeto (tCO₂/ano)	Reduções de Emissões (tCO₂/ano)
2011	456.966.306	1.175.746	507.045	185.071.354	342.724.729	1.019.032	156.714
2012	456.966.306	1.175.746	507.045	185.071.354	342.724.729	1.019.032	156.714
2013	456.966.306	1.175.746	507.045	185.071.354	342.724.729	1.019.032	156.714
2014	456.966.306	1.175.746	507.045	185.071.354	342.724.729	1.019.032	156.714
2015	456.966.306	1.175.746	507.045	185.071.354	342.724.729	1.019.032	156.714
2016	456.966.306	1.175.746	507.045	185.071.354	342.724.729	1.019.032	156.714
2017	456.966.306	1.175.746	507.045	185.071.354	342.724.729	1.019.032	156.714
2018	456.966.306	1.175.746	507.045	185.071.354	342.724.729	1.019.032	156.714
2019	456.966.306	1.175.746	507.045	185.071.354	342.724.729	1.019.032	156.714
2020	456.966.306	1.175.746	507.045	185.071.354	342.724.729	1.019.032	156.714
Total	4.569.663.059	11.757.456	5.070.448	1.850.713.539	3.427.247.294	10.190.318	1,567.139

O Cenário 02 (50% de substituição da frota de ônibus diesel por etanol) apresenta Redução de Emissões de 3.134.278 tCO₂/ano, ou seja, o dobro do resultado apresentado no Cenário 1. Assim como o Cenário 03 (75% substituição da frota de ônibus diesel por etanol) apresenta redução de emissão de 4.701.416 tCO₂/ano. Os resultados para o Cenário 04 (100% de substituição da frota de ônibus diesel por etanol), que representa 4 vezes o Cenário 1, é apresentado na Tabela 20, abaixo.

Tabela 20 - Cenário 04 (100% da frota passa a consumir etanol)

Ano	<u>Linha de Base</u>		<u>Projeto</u>			<u>Reduções de Emissões</u>
	Consumo de Diesel com Biodiesel B5 (litros/ano)	Emissões de Linha de Base (tCO2/ano)	Consumo de Etanol (litros/ano)	Consumo de Diesel com Biodiesel B5 (litros/ano)	Emissões de Projeto (tCO2/ano)	Reduções de Emissões (tCO2/ano)
2011	456.966.306	1.175.746	740.285.416	0	548.890	626.856
2012	456.966.306	1.175.746	740.285.416	0	548.890	626.856
2013	456.966.306	1.175.746	740.285.416	0	548.890	626.856
2014	456.966.306	1.175.746	740.285.416	0	548.890	626.856
2015	456.966.306	1.175.746	740.285.416	0	548.890	626.856
2016	456.966.306	1.175.746	740.285.416	0	548.890	626.856
2017	456.966.306	1.175.746	740.285.416	0	548.890	626.856
2018	456.966.306	1.175.746	740.285.416	0	548.890	626.856
2019	456.966.306	1.175.746	740.285.416	0	548.890	626.856
2020	456.966.306	1.175.746	740.285.416	0	548.890	626.856
Total	4.569.663.059	11.757.456	7.402.854.156	0	5.48.901	6.268.555

5.3.2.4 Potencial de geração de créditos de carbono

O Projeto de Substituição de Combustível (Diesel para Etanol) da Frota de Ônibus de São Paulo apresenta um bom potencial para geração de créditos de carbono durante um período creditício fixo de 10 anos, o que o classifica como um projeto MDL de grande escala e com bom potencial para geração de RCEs.

A tabela abaixo apresenta o potencial de geração de créditos para cada um dos cenários considerados:

Tabela 21 – Potencial de geração de créditos de carbono

Cenário	Descrição do Cenário	Potencial de Redução de Emissões (tCO₂/ano)	Potencial de Receita a ser gerada pelos Créditos de Carbono (Euro/ano)²⁸
01	25% da frota de ônibus passa a consumir etanol	156.714	€ 940.284/ano
02	50% da frota de ônibus passa a consumir etanol	313.428	€ 1.880.568/ano
03	75% da frota de ônibus passa a consumir etanol	470.142	€ 2.820.852/ano
04	100% da frota de ônibus passa a consumir etanol	626.856	€ 3.761.136ano

Conclui-se então que o projeto de MDL é bastante interessante sob o ponto de vista de geração de créditos de carbono e financeiro.

Aplicabilidade de Metodologias e Cronologia para desenvolvimento do Projeto sob o MDL

Conforme mencionado anteriormente, todo projeto de MDL deve utilizar uma metodologia previamente aprovada pelo Painel de Metodologias e pelo Conselho Executivo do MDL. Neste caso, atualmente não existem metodologias aprovadas que se aplicam ao projeto em questão. Portanto, seria necessário desenvolver uma nova metodologia, a qual deve ser submetida ao Painel de Metodologias do MDL para análise e posterior aprovação.

²⁸ Considerou-se uma média das últimas cotações para uma RCE de em torno de 6 euros/tCO₂.

O processo de desenvolvimento e aprovação de novas metodologias é bastante complexo e costuma levar bastante tempo (em torno de 12 meses). Sendo assim, mesmo que o projeto proposto possua boas chances de registro sob o MDL, é preciso considerar também que a duração estimada para desenvolvimento e registro de um projeto de MDL é bastante longa (em torno de 18 meses após a aprovação da metodologia a ser utilizada).

Com a prorrogação do Protocolo de Quioto, de 2013 a 2020, resultado da COP 17 que ocorreu em Durban, na África do Sul, em dezembro de 2011, o tempo necessário para o desenvolvimento da metodologia e registro do projeto (em média, de 30 meses para desenvolvimento de metodologia e registro do projeto) deixam de ser um risco. Entretanto, ainda resta definição das regras para este período, o que gera grandes incerteza neste mercado. Uma das principais incertezas é a informação de que a Europa pós-2012 não pretende mais comprar créditos dos BRIC (Brasil, Índia e China) que, atualmente são os países do Anexo 3 com mais projetos e potencial de geração de CERs.

Sendo assim, conclui-se que não haveria tempo hábil para desenvolver e atingir registro do projeto proposto sob o MDL ainda dentro do primeiro período de compromisso do Protocolo de Quito. Entretanto, acredita-se que o projeto poderia gerar créditos de carbono para serem comercializados no mercado voluntário.

Uma grande discussão, já iniciada pelo Projeto BEST, é a respeito do beneficiário dos créditos de carbono. Alguns consideram que eles deveriam ser da Prefeitura (que é responsável pelo transporte coletivo), outros consideram que elas deveriam ser de entidades como a UNICA (que tem o interesse em incentivar a utilização do etanol) e ainda existem linhas de pensamento que elas deveriam ir para o fabricante da tecnologia, no caso, a Scania, que desenvolveu tecnologia que permitiu a utilização de etanol em motores ciclo diesel. Entretanto, a linha mais aceita e mais coerente, na opinião da autora, é que a receita gerada pelos créditos fique com a operadora de ônibus que é a responsável pelo investimento de compra dos ônibus e pelos custos operacionais. A receita com os créditos de carbono pode ser uma importante fonte de recursos, que direcionada ao operador da frota de ônibus, ajudaria a equiparar os custos de operação e manutenção dos veículos diesel e etanol. Entretanto, considerando o valor gerado com os créditos de carbono e a quantidade de diesel substituída por etanol, tem-se uma receita de aproximadamente R\$ 0,016/litro de etanol. Esta receita gerada pelos créditos de carbono, apesar de ser importante, não é suficiente para viabilizar a diferença entre o custo de operação e manutenção das duas tecnologias.

6. EMISSÃO DE ALDEÍDOS EM VEÍCULOS DIESEL

A emissão de aldeídos é, tradicionalmente, associada aos motores ciclo Otto, em particular ao etanol. A Resolução CONAMA nº 315 escabele o limite de emissão de 0,03 g/km para os motores ciclo Otto, com exceção dos motores a gás natural. Ou seja, o limite de emissão para aldeídos está associado aos motores a etanol, gasolina e gás natural. Este fato é facilmente verificado por meio do Gráfico 05 abaixo, proveniente do Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas, já citado no APÊNDICE D, que vincula as emissões de aldeídos ao etanol, a gasolina e ao gás natural, somente. Entretanto, dentro das emissões de componentes gasosos por motores diesel, os aldeídos são importante, pois constituem uma fração das emissões gasosas deste combustível (EPA, 1999).

Gráfico 05 – Emissão de aldeído por tipo de combustível

Fonte: MMA, 2011.

O aumento dos níveis de aldeídos (acetaldeído e formaldeído) na atmosfera tem sido, portanto, atribuídos à utilização de etanol como combustível. Por outro lado, o formaldeído é o aldeído mais característico das emissões veiculares quando da utilização de petróleo e seus derivados, notadamente o óleo diesel (SALDIVA, et al., 2009). O formaldeído totaliza a maioria das emissões de aldeídos, de 65 a 80%, com o acetaldeído sendo o segundo mais abundante nas emissões de veículos diesel (EPA, 1999). A Figura 27 apresenta a fórmula geral dos formaldeídos e acetaldeídos. Neste ponto, é importante que se faça uma análise mais

detalhada do comportamento e toxicidade dos aldeídos atmosféricos, tanto sob o prisma da sua toxicidade direta, como também quanto ao seu potencial de formação de ozônio (SALDIVA et al., 2009).

Figura 27 – Fórmula geral dos formaldeídos e acetadeídos

Fonte: KUMAR et al., 2011

Os aldeídos são substâncias orgânicas altamente reativas, que contêm um grupo carbonil (ligação dupla entre átomos de carbono e oxigênio), que possuem alta afinidade com lípidos, proteínas e DNA (ácido desoxirribonucleico) (COMEAP, 2000). Os aldeídos podem ser divididos em 3 classes, com base na sua estrutura e reatividade com substratos orgânicos (COMEAP, 2000):

- **Aldeídos simples ou saturados:** o metabolismo destes aldeídos ocorre pela oxidação a seus ácidos carboxílicos (por meio de aldeído-desidrogenases) ou através da redução a álcool desidrogenase. Ligações com grupos tiol (composto organossulfurado que contém um grupo -SH, designado por grupo tiol), bem como ligações com diversas proteínas, incluindo aquelas que constituem o DNA, também ocorrem e explicam o potencial carcinogênico destes aldeídos. Os aldeídos de interesse deste estudo – formaldeído e acetaldeído – são representantes desta categoria de aldeídos;
- **Aldeídos α,β -insaturados** (acroleína, por exemplo): estes aldeídos ligam-se a substratos como a glutatona²⁹ ou cisteína³⁰, sendo oxidados após estas ligações. Assim como no caso anterior, esta classe de aldeídos pode se ligar a grupos amino do DNA, podendo levar ao desenvolvimento de mutações;

²⁹ Antioxidante hidrossolúvel mais importante nos sistemas vivos, reconhecido como o tiol não proteico. Geralmente, encontra-se no fígado.

³⁰ É um dos aminoácidos codificados pelo código genético, sendo portanto um dos componentes das proteínas dos seres vivos.

- **Aldeídos halogenados ou modificados** (benzoaldeído): o metabolismo destes aldeídos irá depender da natureza do seu grupo funcional, podendo ser oxidados (benzoaldeído, furfural, malodialdeído, por exemplo), enquanto outros são predominantemente conjugados a glutatona, cisteína ou serina³¹.

Nos ambientes externos das grandes cidades, as diferentes classes de aldeídos acima descritas são produzidas pelas emissões veiculares, queima de biomassa ou a partir de reações fotoquímicas. Nos ambientes urbanos, a emissão de aldeídos é o resultado da oxidação incompleta do combustível veicular, como a gasolina, gasohol, etanol, gás natural ou diesel (MARTINS, ANDRADE, 2008), sendo que os principais precursores são os hidrocarbonetos, álcoois, éteres e compostos aromáticos, submetidos à ação do ozônio ou radicais HO, HO₂ e NO₃ (SOUZA, MACEDO; 2010).

Os aldeídos são responsáveis por irritação nos olhos e no trato respiratório superior. No Reino Unido não há padrões de emissão de aldeídos, nem qualquer valor-limite definido pela Diretiva da Comunidade Européia sobre qualidade do ar (COMEAP, 2000). A Organização Mundial de Saúde inclui limites, somente, para o formaldeído, não outros aldeídos, limitando a exposição de 86,5 ppb para 30 minutos de exposição. A Diretriz de Qualidade do Ar para a Europa estabelece uma concentração média de 100 mg/m³ em 30 minutos. Esta diretriz é projetada para evitar irritações nos olhos, nariz e garganta e sintomas respiratórios como tosse e catarro.

Na cidade de São Paulo, carbonilas emitidas pelos veículos predominam no período da manhã, havendo maior participação de processos fotoquímicos no período vespertino. Em geral de manhã a concentração de acetaldeído é maior que a de formaldeído, e esse comportamento se inverte à tarde, após os processos fotoquímicos. O levantamento detalhado da literatura médica não revelou a existência de estudos de base populacional, relacionando concentrações ambientais de formaldeído ou acetaldeído sobre indicadores de morbidade ou mortalidade (SOUZA, MACEDO; 2010).

Não existem informações precisas sobre o efeito dos aldeídos sobre a saúde humana. Isso porque a transposição dos dados dos estudos ocupacionais para o contexto ambiental apresenta divergências, já que há diferenças significativas da escala de concentração dos aldeídos no ambiente de estudo, que tende a ser muito maior na área do ambiente de trabalho.

³¹ Aminoácido primário (codificados pelo código genético), não essencial, sendo um dos componentes das proteínas dos seres vivos.

Além disso, a suscetibilidade das populações expostas na área ocupacional é muito menos frequentes nos indivíduos com asma grave, idosos, crianças ou portadores de doenças graves do sistema cardiovascular, que são aqueles que mais apresentam efeitos adversos quando expostos aos níveis ambientais de poluentes atmosféricos (SOUZA, MACEDO; 2010).

Além da sua toxicidade direta, os aldeídos atmosféricos podem contribuir para a formação de ozônio, um dos poluentes mais reconhecidamente associados com efeitos adversos à saúde humana. As equações gerais simplificadas que regulam a fotoquímica atmosférica podem ser resumidas da seguinte forma (SALDIVA, et al.; 2009 e KUMAR et al., 2011):

O NO_2 é dissociado pela ação de raios ultravioleta formando NO e oxigênio atômico;

O átomo de oxigênio combina-se com uma molécula de oxigênio formando ozônio;

O ozônio é decomposto pela reação com o NO, formando NO_2 e uma molécula de oxigênio;

O processo descrito nas reações 1 a 3 é fotoestacionário, ou seja, o balanço da produção de ozônio é próximo da nulidade. No entanto, a atmosfera das grandes cidades favorece a perturbação do ciclo fotoestacionário, permitindo a geração de significativas quantidades de ozônio, como bem atestam as medidas ambientais realizadas em nossos centros urbanos. A reação de NO com peróxidos é a maior causa de desequilíbrio fotoquímico, como demonstrado na reação 4;

Os peróxidos atmosféricos são formados pela oxidação de diversos composto orgânicos, como demonstrado nas equações que se seguem, que ilustram os possíveis desfechos da oxidação de um alceno;

- (5) $\text{RCHCHR} + \text{O} \rightarrow \text{RCH}_2\cdot + \text{RCO}\cdot$ (geração de radicais livres)
- (6) $\text{RCH}_2\cdot + \text{O}_2 \rightarrow \text{RCH}_2\text{O}_2$ (geração de peróxidos)
- (7) $\text{RCH}_2\text{O}\cdot + \text{O}_2 \rightarrow \text{RCHO} + \text{HO}_2\cdot$ (geração de aldeídos)
- (8) $\text{RCH}_2\text{O}_2\cdot + \text{NO}_2 \rightarrow \text{RCH}_2\text{O}_2\text{NO}_2$ (geração de nitratos orgânicos)

O conjunto das reações acima descritas exemplifica algumas das possibilidades pelas quais os compostos orgânicos voláteis (COVs), como os aldeídos, podem ser gerados ou interferem no equilíbrio fotoquímico estacionário, ensejando a formação de ozônio. O processo pode ser resumido da seguinte forma. Na ausência de COVs, a quantidade de ozônio formado na troposfera é muito baixa. A presença de COVs pode consumir NO ou converter NO a NO₂, fazendo com que a possibilidade de formação de ozônio seja real, de acordo com as fórmulas gerais abaixo expostas.

- (9) $\text{COV} + \text{OH}\cdot \rightarrow \text{RO}_2\cdot + \text{produtos intermediários}$
- (10) $\text{RO}_2\cdot + \text{NO} \rightarrow \text{NO}_2 + \text{radicais livres}$
- (11) $\text{radicais} \rightarrow \text{OH}\cdot + \text{produtos intermediários}$

Nas condições acima expostas o processo de formação de ozônio é dependente da quantidade de COVs disponível na troposfera, bem como da quantidade de radicais OH ou outras espécies químicas com as quais os COVs podem interagir. A influência dos COVs sobre a formação de ozônio depende da quantidade de NO_x disponível. Se os níveis de NO_x são suficientemente altos, a quantidade de COVs é o fator limitante para a formação de ozônio. Nestas condições, quando as concentrações de NO_x são elevadas, os NO_x inibem a formação de ozônio dado o fato de que a reação de OH com NO₂ limita a formação de espécies reativas na atmosfera. Por outro lado, quando as concentrações de NO_x são baixas, a formação de ozônio é dependente da disponibilidade de NO_x, fazendo com que o aumento da concentração de NO_x aumente a taxa de formação de ozônio.

Essas equações explicam a sequência de formação do ozônio. Entretanto à noite e na proximidade de grandes fontes de NO (por exemplo em uma via de muito tráfego), as

concentrações de ozônio são reduzidas através de processos de remoção do O_3 pela reação com o NO (equação 3).

Durante o dia essa reação é em geral balanceada pela fotólise do NO_2 (equação 1). Entretanto na proximidade de grandes emissões de NO o resultado líquido é a conversão de O_3 a NO_2 . Nas proximidades dessas fontes, o ozônio é consumido e pode se tornar elevado à medida que a pluma se move com o vento (envelhecimento da pluma). Como a noite não há a fotólise do NO_2 , a (equação 3) leva a remoção do ozônio.

A classificação entre regimes com saturação de NO_x e sensível ao NO_x (NO_x -limitante) é determinada pela química dos radicais hidroxila (OH) e hidroperoxila (HO_2) e radicais peroxila orgânicos de forma RO_2 .

A atmosfera no regime sensível ao NO_x (NO_x -limitante) ocorre quando peróxidos e ácidos carboxílicos representam o sorvedouro dominante do radical. Neste caso, as concentrações ambientais de HO_2 (hidroperoxila) e RO_2 serão determinadas pelo balanço entre as fontes de radical e as reações de formação dos peróxidos e ácidos carboxílicos.

Como a taxa de formação do peróxido é quadrática no HO_2 , as concentrações ambientais do HO_2 e RO_2 apresentam pequena variação como resposta a variações no NO_x e COV (SALDIVA, et al.; 2009). A taxa de formação do ozônio é determinada pela reação do HO_2 e RO_2 com o NO. Em regiões poluídas a taxa de formação do ozônio em geral é pouco afetada por variações no COV. Em áreas remotas a taxa de formação do ozônio também aumenta com o aumento de concentração do COV.

Os regimes saturados de NO_x (COV-limitante) ocorrem quando ácido nítrico representa os sorvedouros de radicais dominantes. Neste caso, as concentrações ambientais de OH serão determinadas pelo balanço entre as fontes de radicais e a reação do OH com o NO_2 . Como a taxa de formação de ácido nítrico aumenta com o NO_2 , o OH ambiente decresce com o aumento do NO_2 . A taxa de formação do ozônio é determinada pela taxa de reação do COV e CO com OH. Essa taxa aumenta com o aumento do COV e decresce com o aumento do NO_x .

A divisão entre regimes sensíveis ao NO_x (NO_x -limitante) ou ao COV (COV-limitante) está intimamente relacionada com a razão entre a soma dos COV com o NO_2 , considerando que as somas são ponderadas pela reatividade dos COV.

A razão das fontes de radicais para a taxa de formação do ácido nítrico é proporcional à razão entre todos os COV (ponderados pela reatividade com OH) e a quantidade de NO_2 .

Quando essa razão é alta, os peróxidos se tornam o sorvedouro dominante dos radicais e as condições são sensíveis ao NOx. Quando essa razão é baixa, o ácido nítrico se torna o sorvedouro dominante do radical e as condições são de saturação do NOx. A fotólise do ozônio é a maior fonte do radical hidroxila (OH) na troposfera de regiões remotas, de forma que um aumento do O₃ vai produzir mais OH, resultando em um decréscimo nos tempos de vida de muitas espécies traços, como o metano e os hidroclorofluorcarbonos (HCFC), que são espécies de grande importância para processos físicos-químicos na estratosfera (SALDIVA et al., 2009).

6.1 Efeitos dos aldeídos sobre a saúde humana e o meio ambiente

Segundo Saldiva, 2009 a maior parte do conhecimentos sobre a ação dos formaldeídos e acetaldeídos sobre a saúde humana vêm da área ocupacional ou de um contexto de ambientes externos.

Ainda, segundo Kumar 2011, os efeitos dos vapores de aldeídos sobre a saúde humana incluem irritação nos olhos, garganta, nariz e asma. Estudos indicam que irritações sensoriais foram detectadas pela exposição de 0,6-1,2 mg/m³ (0,5-1,0 ppm) de formaldeído, e 90 mg/m³ (50 ppm) de acetaldeído. Segundo Kumar, 2011 estes são níveis elevados, mais do que geralmente é encontrado em concentrações atmosféricas.

O formaldeído é classificado como um provável carcinogênico humano pela Agência Internacional de Pesquisa sobre Câncer (*International Agency for Research on Cancer- IARC*) e pela Agência de Proteção Ambiental americana (*Environmental Protection Agency – EPA*). Estudos realizados por estas agências têm sugerido uma relação causal associada aos altos níveis de exposição com o desenvolvimento de câncer de nasofaringe, enquanto bioensaios de inalação em ratos mostraram incidência significativa de tumores do aparelho respiratório nasal epitélio em níveis de exposição $\geq 6,9$ mg/m³ (5,6 ppm), com alta incidência de tumor em exposições mais elevadas ≥ 12 mg/m³ (10 ppm).

Além dos efeitos carcinogênicos associados à exposição de humanos com formaldeídos e acetaldeídos, eles estão associadas a alta tendência de formação de ozônio, como já relatado na introdução deste capítulo.

6.2 Emissão de aldeídos em motores diesel

Estudos sobre emissões de aldeídos em motores de combustão interna têm sido realizadas desde 1930. Os veículos comercializados atualmente utilizam catalisadores que reduzem sua emissão pelo escape (AMARAL, 2000).

A emissão de aldeídos em motores Otto é conhecida e controlada, já que possui legislação aplicável. Entretanto, estudos da CETESB demonstram que veículos comerciais com motores diesel de cerca de 3 litros de cilindrada apresentam emissão de aldeídos de 22 a 160 mg/km (BRANCO, 2004).

Ainda, segundo o artigo publicado na *American Chemical Science Journal*, testes padronizados foram realizados em quatro veículos diesel comerciais leves, usando um dinamômetro e procedimento de teste FTP-75³². Os poluentes foram analisados por cromatografia líquida de alta performance. Os resultados mostraram que a emissão de acetaldeído variou de 5,9 a 45,4 mg/km e a de formaldeído variou de 16,5 a 115,2 mg/km. As emissões totais médias de aldeídos foram de 58,7 mg/km, variando de 22,4 a 160,6 mg/km. A proporção se manteve constante, próxima de 74% de formaldeído e 26% de acetaldeído. Vale lembrar que as normas de trabalho esclarecem que em proporções iguais o acetaldeído é muito mais danoso à saúde humana do que o formaldeído (SALDIVA et al., 2009).

Outro estudo, realizado na Suécia por Eric Larsson (1986), teve o objetivo de demonstrar a viabilidade técnica do uso do etanol em substituição ao diesel em motores Diesel. Para tal, quatro ônibus equipados com motores diesel Scania 11 litros, otimizado para operar com etanol, foram testados, além de dois caminhões equipados com motor Volvo com injeção e alimentação turbo. O programa incluiu análise de emissões e dos lubrificantes. Para os ônibus o combustível era composto por: 84% de etanol, 8% de promotor de ignição, 3% de desnaturante, 4% de água, além de aditivos, inibidores de corrosão e detergente. Já nos caminhões o combustível utilizado era composto por 92% de etanol, 3% de desnaturante, 4% de água, 0,5% de aditivo com menor acidez, além de inibidores de corrosão e detergente.

Foram evidentes as reduções de CO, hidrocarbonetos e material particulado, tanto nos ônibus como nos caminhões a etanol. Além disso, as emissões de aldeídos em veículos a etanol equipados com conversores catalíticos não foram diferentes das emissões verificadas em

³² Procedimento padrão utilizado para certificar emissões de veículos leves nos Estados Unidos.

veículos diesel, demonstrando assim que as emissões de aldeídos em veículos diesel não podem ser negligenciadas (LARSSON, 1986).

Em outro estudo realizado (NORD, 2005), as emissões de aldeídos foram mais elevadas em veículos a etanol. Entretanto, verificou-se também que ao utilizar o catalisador em combinação com o motor a etanol, os níveis de acroleína, formaldeído e acetaldeído foram reduzidos em 48%, 71% e 75%, respectivamente. Além disso, o uso de catalisador oxidativo propiciou reduções de acroleína, formaldeído e acetaldeído ainda mais significativas, diminuindo 56%, 87% e 95%, respectivamente. Estes estudos demonstram que as emissões de aldeídos em veículos diesel movidos a etanol tendem a aumentar. Entretanto, o uso de catalisadores propicia redução significativa desta emissões tornando-as similares as emissões de aldeídos verificadas em veículos diesel.

Os autores do artigo (KUMAR et al., 2011) ainda comparam a emissão de aldeídos dos veículos a diesel com as emissões reais dos veículos de ignição, ou com o limite previsto para os veículos do ciclo Otto na legislação brasileira e a consideram importante e significativa.

6.3 Efeito da composição do diesel nas emissões de aldeídos

Estudo realizado por Weitmann et al. (1998) relacionou os efeitos da composição do diesel sobre as emissões de aldeídos. O estudo foi realizado com base em testes em um motor Volkswagen, 4 cilindros, com aspiração natural, turbo e as emissões de aldeídos foram mensuradas a partir do método MTBH³³ em ciclos FTP³⁴.

A principal conclusão foi que com o aumento do número de cetano no combustível, as emissões de aldeídos diminuem, ou seja, o número de cetano está diretamente relacionado com a densidade do combustível e com o conteúdo de aromáticos.

Um outro importante fator a ser avaliado é a mistura de biodiesel no diesel. No Brasil, esta mistura é compulsória em 5% (B5) em volume, desde 2010, como parte da Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005. A mistura de biodiesel no diesel é uma realidade e seus efeitos sobre as emissões atmosféricas também precisam ser avaliados.

³³ MTBH é um método espectrofotométrico

³⁴ Teste dinâmico descrito na norma NBR 6601, que utiliza o percurso urbano segundo o procedimento de testes federal americano FTP, padrão brasileiro para avaliação de emissões gasosas de veículos de passeio e veículos comerciais leves.

Para tal, Kumar (2011) relata experimento realizado com motores diesel pesados abastecidos com diferentes misturas de biodiesel, em volume, de 2% (B2), 5% (B5), 10% (B10) e 20% (B20). Os testes foram realizados utilizando um motor diesel de 6 cilindros, típico das frotas de ônibus no Brasil, em condições de estado estacionário em 1000, 1500 e 2000 rpm. Os resultados referentes aos três modos de operação demonstraram redução das emissões de benzaldeídos de 3,4% para B2, 5,3% para B5, 5,7% para B10 e 6,9% para B20. Entretanto, todos os outros grupos de carbonil mostraram um aumento significativo de 2,6, 7,3, 17,6 e 35,5% para os formaldeídos, 1,4, 2,5, 5,4, e 15,8% para acetaldeídos, 2,1, 5,4, 11,1 e 22% para acroleína e acetona, 0,8, 2,7, 4,6 e 10% para propionaldeídos e 3,3, 7,8, 16 e 26% para butiraldeído.

Ainda, segundo Kumar, um outro experimento em motores diesel turbo com injeção direta e alimentado por biodiesel puro (B100) foi realizado. Os resultados indicaram quase o triplo das emissões de carbonila quando comparado com as emissões de diesel. As emissões ponderadas de carbonil foram de 90,8 mg/kWh enquanto que no mesmo ensaio com diesel foram de 30,7 mg/kWh. O formaldeído foi o composto mais abundante encontrado no grupo de carbonil, tanto para o biodiesel como para o diesel, 46,2% e 62,7% respectivamente, seguido por acetaldeído, acroleína e acetona, para os dois combustíveis. As emissões de carbonil em testes com B20 e B100 foram de 8% e 32%, maiores que o diesel.

A maior emissão de aldeídos devido ao uso do biodiesel também é comprovada por Morita et al. (2010), que relata a tendência no aumento das emissões de aldeídos quando se utiliza o biodiesel como alternativa ao diesel. Os autores afirmam que pode haver condições de combustão de biodiesel em que a emissão de aldeídos pode atingir níveis entre 5 a 10 vezes maiores que os obtidos em combustão de diesel.

Segundo Krahll et al. (1996). Os aldeídos contribuem com mais de 40% do potencial de formação de ozônio e, portanto, merecem atenção. Portanto, existe uma necessidade considerável de pesquisa na área de aldeídos, alcenos e alcinos, principalmente quando considerado o uso de biodiesel em regiões metropolitanas.

Em contraste com as inúmeras informações existentes sobre as emissões regulamentadas como monóxido de carbono, material particulado, óxidos de enxofre, etc, informações sobre aldeídos são bastante limitadas. Além de aldeídos, casos isolados também relataram emissões de benzeno e seus derivados, que precisam ser avaliadas (COUTRIM, CARVALHO, ARCURI, 2000; FERREIRA DA COSTA; BARROSO DA COSTA, 2002; DASCH, WILLIAMS, 2011).

Diante deste contexto, a Resolução 403, de 11 de novembro de 2008, do CONAMA, que dispõe sobre a nova fase de exigência do PROCONVE para veículos pesados novos (Fase P-7), estabeleceu, no Capítulo I – Dos Limites Máximos para Emissão de Veículos Pesados Novos, em seu parágrafo 3º, que os fabricantes e importadores de motores do ciclo Diesel ou de veículos a Diesel destinados ao mercado nacional devem apresentar ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis-IBAMA, até 31 de dezembro de 2012, relatório de valores típicos das emissões de dióxido de carbono e de aldeídos totais, bem como do consumo específico de combustível, medidos nos ensaios de Ciclo de Regime Transiente (ETC) e Ciclo de Regime Constante (ESC)³⁵ e expressos em g/kWh. O págrafo 1º estabelece que são aceitos como valores típicos os resultados de ensaios obtidos em motores representativos de um ou mais modelos de motores em produção, cujos critérios utilizados para a obtenção e conclusão dos resultados devem ser definidos, justificados e apresentados por seu fabricante. Já o parágrafo 2º estabelece que as emissões de aldeídos totais (CHO) devem ser medidas conforme procedimento a ser determinado, até 31 de dezembro de 2010, pelo IBAMA.

Em contato com o IBAMA, nenhuma informação oficial sobre o estabelecimento do limite de emissões para aldeídos totais foi dada. Acredita-se que este procedimento ainda não foi determinado, já que não há nenhuma informação disponível.

Apesar da nova fase do PROCONVE considerar a emissão de aldeídos nos veículos pesados usando diesel, não são estabelecidos limites de emissão ficando, portanto, a cargo do fabricante a apresentação de valores típicos e o enquadramento de seu motor nos valores apresentados.

Esta abordagem aos aldeídos, apesar de ser um avanço, pois até então não eram consideradas as emissões deste poluente por veículos diesel, ainda é frágil e pouco agressiva.

As emissões de aldeídos, tanto em veículos a diesel como a etanol, são importantes e não podem ser negligenciadas, principalmente considerando seus efeitos adversos na saúde humana.

Legislação específica para este poluente é necessária caso haja a implementação de uma frota de veículos diesel movidos a etanol. Entretanto, faz-se necessário também uma legislação que incorpore limite de emissão para a frota de veículos a diesel, tendo em vista que as emissões de aldeídos provenientes deste combustível são expressivas. Além disso, a

³⁵ Ensaios realizados em motor pesados, em dinamômetro, para serem utilizados em futuras certificações de emissões.

mistura do biodiesel ao diesel aumenta consideravelmente as emissões de aldeídos. Tendo em vista que no Brasil esta mistura é compulsória, as emissões deste poluente não podem ser negligenciadas. A Tabela 22 abaixo traz a síntese dos dados apresentados sobre aldeídos, em motores diesel, inclusive considerando o biodiesel, e em motores a etanol.

Tabela 22 – Comparação de parâmetros para aldeídos em diferentes combustíveis

Parâmetro	Motores Movidos Exclusivamente a Diesel	Motores Diesel Operando com Mistura de Diesel e Biodiesel	Motores Diesel Operando com Etanol	Motores Ciclo Otto
Emissões de Aldeídos	Variação de 22 a 160 mg/km	Maior tendência ao aumento das emissões de aldeídos quando se utiliza biodiesel (em qualquer proporção), atingindo níveis 5 a 10 vezes superiores aos obtidos no diesel.	Emissões similares ao diesel, a partir da utilização de catalisadores - Variação de 22 a 160 mg/km	30 mg/km ¹
Legislação para Controle da Emissão	Não há ²	Não há	Não há	Resolução nº 315 do Conama
Melhorias identificadas para redução das emissões de aldeídos	Aumento do número de cetano do diesel	Não identificada	Uso de catalisadores oxidativos	Catalisadores, otimização da geometria da câmara de combustão e dos bicos, entre outros.

Notas: ¹ Limite de emissão estabelecido pela Resolução nº 315 do Conama.

² Resolução CONAMA 403 estabelece, somente, a apresentação de valores típicos de emissões, expressos em g/kWh.

Por tudo que foi exposto neste capítulo, percebe-se que a emissão de aldeídos em veículos diesel é importante e precisa ser considerada, sendo que, as emissões de aldeídos são agravadas em decorrência da mistura de biodiesel ao diesel. É necessário, portanto, o estabelecimento de limite de emissão para essas substâncias, assim como foi realizado com os veículos de ignição por centelha. Nestes veículos a utilização de conversores catalíticos para a redução da emissão de aldeídos já uma realidade consolidada.

Estabelecer limites de emissão para essas substâncias nos veículos a diesel é extremamente necessário levando em consideração o aumento da frota dos veículos diesel, a recente obrigatoriedade da mistura de biodiesel ao diesel, além da sua participação na formação de ozônio troposférico.

Apesar da escassez de informações, tudo indica que o uso de etanol em motores diesel não trará aumento nas emissões de aldeídos, comparados com as emissões de biodiesel, já em

uso comercial no país. Além disso, caso normas exijam níveis muito baixos de emissão desses compostos, há tecnologias para serem utilizadas.

7. IDENTIFICAÇÃO DAS BARREIRAS ECONÔMICAS QUE EVENTUALMENTE SE INTERPONHAM À VIABILIZAÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO DA TECNOLOGIA DE ÔNIBUS DIESEL MOVIDO A ETANOL NO TRANSPORTE PÚBLICO URBANO

Para promover efetivamente a introdução de ônibus a etanol no Brasil, especialmente em regiões metropolitanas, é necessário que haja envolvimento ativo dos atores envolvidos, incluindo fabricantes dos veículos, e produtores e distribuidores do combustível.

A Scania é, atualmente, a única fabricante dos motores diesel movidos a etanol aditivado. Assim, seu engajamento é essencial para consolidar a introdução dessa tecnologia no Brasil. Os parceiros brasileiros do BEST discutiram com a Scania a possibilidade de produção do motor no Brasil para evitar custos de importação, bem como para diminuir os custos de produção.

A Scania, no final do ano de 2010, aprovou os investimentos para a linha de produção dos motores a etanol no Brasil. Atualmente, a Scania possui uma linha de produção dos motores, em sua fábrica, em São Bernardo do Campo/SP.

Os novos veículos produzidos pela Scania, possuem financiamentos pelo FINAME - Financiamento de Máquinas e Equipamentos³⁶, em 108 meses. A partir da implementação da linha de produção dos motores diesel movidos a etanol, foi possível, em parceria com a Prefeitura de São Paulo e com a Unica, vender as primeiras unidades destes veículos.

A primeira empresa a adquirir os veículos a etanol foi a VIM – Viação Metropolitana. O Grupo Metropolitana é formado por empresas de transporte urbano de passageiros e de empresas que desenvolvem soluções de tecnologia aplicada ao transporte. São elas a Metropolitana Pernambuco, Metropolitana São Paulo, CRT - Cidade do Recife Transportes, e a Cittati Tecnologia³⁷.

A Metropolitana adquiriu 50 ônibus, inclusive com contrato de manutenção, que vão circular na zona sul da cidade de São Paulo. Como parte da compra dos primeiros veículos a etanol, no dia 25 de novembro de 2010, foi assinado o Protocolo de Intenções e teve a participação das Secretarias Municipais de Transportes (SMT) e do Verde e do Meio Ambiente (SVMA), da UNICA e da empresa Scania, que vai produzir os ônibus; Viação

³⁶ Financiamento, por intermédio de instituições financeiras credenciadas, para produção e aquisição de máquinas e equipamentos novos, de fabricação nacional, credenciados no BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social.

³⁷ Disponível em <http://www.grupometropolitana.com.br/>.

Metropolitana, que será a operadora; e Cosan, que vai fornecer o etanol aditivado a ser utilizado pelos veículos. As primeiras 20 unidades foram entregues em junho de 2010 e, atualmente, os ônibus encontram-se em operação nas linhas Jardim Luso – Terminal Bandeira, Jardim Miriam – Terminal Princesa Isabel e Jardim Miriam – Vila Gomes. Como parte do acordo estabelecido, a Unica garante até junho de 2013 que o preço do etanol aditivado fornecido à concessionária corresponda até 70% do preço médio do óleo diesel praticado no mês anterior e a prefeitura forneceu subsídio para frota a etanol com recurso das multas ao veículos reprovados na inspeção veicular ambiental.

Após a nova licitação (2013 – 2022), a empresa que ganhar a licitação na área que hoje é operada pela Metropolitana, será obrigada a comprar os ônibus a etanol. Esses 50 ônibus representam 15% da frota da Metropolitana, que é de 250 ônibus, e, portanto a empresa sairá na frente, de acordo com a expectativa da nova licitação.

Abaixo a Tabela 23 apresenta as principais características das linhas de ônibus por onde circulam os ônibus a etanol.

Tabela 23 – Características das Linhas da Viação Metropolitana onde circulam os ônibus a etanol.

Linha	6358-10	509M-10	577T-10
Roteiro	Jd Luso-T Bandeira	Jd Miriam-T Princ Isabel	Jd Miriam–V Gomes
Frota total	13	15	40
Frota etanol	9	9	30
Principais Corredores	Av. Cupecê	Av. Cupecê	Av. Cupecê
	Av. Ver José Diniz	Av. Ver José Diniz	Av. Jabaquara
	Av. Ibirapuera	Av. Ibirapuera	Av. Paulista
	Av. Nove de Julho	Av. Vinte e Três de Maio	Av. Rebouças
Km /mês (percorrida pela frota operando nesta linha)	80.402	98.707	202.998
IPK¹	3,07	3,00	3,93
Rendimento médio diesel	2,34	2,16	2,00
Rendimento médio etanol	(48%) 1,208	(45%) 1,200	(52%) 0,960

Notas: ¹ número médio de passageiros por quilômetro.

Fonte: METROPOLITANA, 2011.

A alteração na caixa de câmbio ainda não foi implementada na Viação Metropolitana e seu resultado pode representar uma importante melhoria no desempenho do ônibus a etanol, como aconteceu nos testes do projeto BEST.

Figura 28 – Ônibus a etanol Viação Metropolitana

Fonte: METROPOLITANA, 2011.

A SPTrans instituiu um símbolo para a identificação dos ônibus. A partir de 2011 toda a frota do Município de São Paulo que utilizar combustíveis limpos e renováveis receberá a logomarca “ECOFROTA” para que seja diferenciada da frota que utiliza o diesel convencional.

Após venda das primeiras 50 unidades à Viação Metropolitana, a Viação Tupi também adquiriu 10 unidades. A Tupi Transportes é uma empresa que está no mercado desde 1960 e tem 240 ônibus. As novas unidades de veículos a etanol adquiridas pela Tupi serão entregues em Janeiro de 2012.

Além da produção do motor no Brasil, houve um grande esforço na produção do aditivo. Inicialmente, a SEKAB era a única fabricante do aditivo utilizado nos ônibus. Sua participação no BEST foi essencial, considerando a utilização de seu aditivo na Suécia. Para o desenvolvimento em larga escala dos motores diesel movidos a etanol no Brasil, é importante estabelecer a produção do aditivo no Brasil. Muitas indústrias químicas se interessaram pela produção do aditivo e ele foi desenvolvido e, atualmente, é produzido pela Oxiten, empresa do grupo Ultrapar. O aditivo produzido pela Oxiten foi testado em parceria com a Scania e possui aprovação da fabricante dos motores. A Oxiten afirma ter condições de suprir o mercado nacional e a partir de 2012 passou a ter condições de fornecer o aditivo para continuidade do Projeto BEST.

O engajamento dos distribuidores de combustível é necessário, pois são os responsáveis pelo processo de mistura do etanol e aditivo. A logística para distribuição do

ED95 não é diferente da logística existente e sua distribuição no Brasil pode ser desempenhada com a mesma infraestrutura utilizada para a distribuição do etanol.

Devido à legislação municipal de São Paulo, Lei nº 13.241, publicada em 12 de dezembro de 2001, as operadoras de ônibus contratadas pela concessionária SPTrans para operar frotas de ônibus são obrigadas a renovar sua frota cativa, periodicamente (os ônibus não devem ser mais velhos do que 3 anos e 10 meses). Entretanto, as operadoras contratadas pela concessionária EMTU devem obedecer regulamentações menos rigorosas, pois o limite de operação é de 10 anos e a frota média de ônibus de cada operadora não pode ser mais velha do que 6 anos.

A fase inicial de introdução de ônibus a etanol começou na RMSP, onde as operadoras são obrigadas a adquirir apenas veículos novos e colocá-los em operação e, enquanto isso, a logística do etanol aditivado precisa ser expandida em direção a municipalidades menores para onde os veículos usados são vendidos. Assim, o mercado secundário de veículos usados poderá ser estabelecido. Muitas economias destas municipalidades são fortemente baseadas na produção de cana-de-açúcar e etanol e, assim, as operadoras de ônibus do interior do Estado de São Paulo não se oporão à implementação de ônibus a etanol em menores municípios, caso a logística do ED95 seja assegurada.

A utilização destes veículos em escala comercial demonstra que não há barreiras técnicas que se interponham a utilização desta tecnologia no Brasil. Entretanto, apesar do desenvolvimento da tecnologia no Brasil, bem como do aditivo em território nacional, ainda existem barreiras econômicas que não favorecem a implementação desta tecnologia em larga escala.

Uma das principais barreiras para a implementação dos ônibus a etanol no Brasil é o custo envolvido na operação e manutenção dos veículos. No Brasil, o transporte público é gerenciado pelas autoridades públicas (estaduais e municipais) e operado por empresas privadas, que buscam a maximização de lucros. Assim, se a aquisição, operação e manutenção de ônibus a etanol forem mais caras comparadas aos veículos movidos exclusivamente a diesel, não haverá aceitação desses ônibus, independente dos seus benefícios ambientais. E, durante o desenvolvimento do Projeto BEST no Brasil, constatou-se que os custos não são equivalentes. Portanto, o desenvolvimento de ônibus movidos a etanol requer a formulação de políticas públicas para reduzir os custos para os operadores, para implementação em larga escala dos ônibus a etanol devido à economia de escala.

Desde janeiro de 2002, vigora no Brasil o regime de liberdade de preços dos combustíveis. Não há qualquer tipo de tabelamento, valores máximos e mínimos, nem

necessidade de autorização prévia da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) para reajustes dos preços dos combustíveis.

Assim, em um mercado livre, como o de combustíveis no Brasil, os tributos são decisivos na formação de preços. A opção entre combustíveis é essencial para reduzir os preços e aumentar as opções entre os consumidores. Este mercado foi amplamente desenvolvido com a introdução dos veículos *flex fuel* no mercado brasileiro, onde o consumidor faz a opção de escolha do combustível não só no momento da compra do veículo, mas durante todo o ano, no momento do abastecimento.

Para discussão das barreiras econômicas, foi realizado um levantamento de todos os impostos incidentes sobre o etanol hidratado e o diesel, para comparação.

Os tributos atualmente incidentes sobre os combustíveis no Brasil são (CAVALCANTI, 2011):

- Imposto de Importação, quando aplicável;
- Imposto sobre operações relativas à Circulação de Mercadoria e sobre Prestação de Serviço de Transporte Interestadual e Intermunicipal e de Comunicação (ICMS);
- Contribuição para o Programa de Integração Social do Trabalho e de Formação do Patrimônio do Serviço Público (PIS/PASEP);
- Contribuição Social para o Financiamento da Seguridade Social (COFINS);
- Contribuição de Intervenção do Domínio Econômico (CIDE).

O Imposto de Importação é um tributo de competência federal, cuja base de cálculo é o preço CIF³⁸ de importação. Atualmente, a alíquota é zero nas importações de óleo diesel.

O ICMS é de competência estadual e as alíquotas de ICMS incidentes sobre o óleo diesel, variam de 12% a 17% conforme o estado da federação. O ICMS incide sobre as atividades de refino, distribuição e revenda. O ICMS é o Imposto sobre Valor Agregado (IVA) ou *Value-Added Tax* (VAT), como é conhecido internacionalmente. Nas operações de exportação, não há incidência de ICMS sobre petróleo e derivados. Sobre as operações interestaduais de comercialização de petróleo e combustíveis dele derivados, não há incidência de ICMS, conforme disposto na Constituição Federal de 1988, em seu art. 155, § 2º, inciso X, alínea “b”. Essa imunidade não visa reduzir a carga tributária nesses tipos de

³⁸ CIF é a abreviatura das expressões inglesas “Cost, Insurance and Freight” que significam “Custo, Seguro e Frete”. O preço CIF inclui no preço da mercadoria vendida, as despesas com seguro e frete até o local de destino

operação, mas garantir que a integralidade do ICMS seja recolhida ao Estado consumidor dos derivados. A não-incidência do imposto refere-se ao Estado de origem. Logo, atravessando a divisa, o ICMS é devido ao Estado de destino.

O PIS e o COFINS são contribuições sociais que incidem sobre o combustível e foram criadas para internalizar custos sociais. Atualmente, o PIS e o COFINS têm a incidência cascata sobre o etanol, já que ocorre ao longo da cadeia de produção e comercialização.

A Cide-combustíveis é uma contribuição incidente sobre a importação e a comercialização de combustíveis fósseis e portanto incide sobre o óleo diesel. Inicialmente a CIDE possuía dedução do imposto pago de PIS e COFINS. A incidência é monofásica sobre o volume comercializado pelo produtor. Atualmente, a importação e a comercialização de óleo diesel e suas correntes são tributadas conforme estabelecido pelo Decreto nº 6.875, de 8 de junho de 2009. A alíquota específica da Cide-combustíveis é R\$ 0,070 por litro de óleo diesel. Não há incidência de CIDE sobre o etanol.

Os tributos incidentes ao etanol normalmente são comparáveis aos tributos da gasolina, já que o etanol é um substituto direto deste combustível. Entretanto, neste trabalho, será realizada comparação entre os tributos incidentes sobre o etanol e sobre o diesel.

A Tabela 24 apresenta os tributos incidentes sobre o etanol hidratado e sobre o diesel. Nela verifica-se que no ano de 2009 os tributos representaram cerca de 26,8% do preço final do etanol na bomba. No entanto, o estado de São Paulo apresenta uma alíquota de 21,9% de tributos, devido a política de renúncia fiscal realizada pelo estado (ICMS). Já os outros estados do Brasil apresentam média de alíquota em torno de 35,3%.

Tabela 24 – Percentual de tributos incidentes sobre o etanol hidratado e sobre o diesel

Combustível	ICMS (%)	PIS e COFINS (%)	CIDE (R\$/l)	Total Tributos (%)
Etanol	15,7 médio (variação entre 12 e 25%)	11,1	0,0	26,8
Diesel	12-17	4,21 (PIS) e 19,42 (COFINS)	0,07	23,4

Fonte: Elaborado pela autora a partir de informações de Cavalcanti, 2011 e Confederação Nacional do Transporte, 2011.

Apesar do etanol possuir mais incidência tarifária que o diesel, a Tabela 25 mostra, em detalhe, a composição do preço de um litro de óleo diesel e de etanol comercializado pelos postos de combustíveis.

Tabela 25 – Formação de preços do diesel e etanol ao consumidor

Parcela	Óleo Diesel (R\$/litro)	Etanol (R\$/litro)
PIS + COFINS + CIDE	0,209	0,120
ICMS	0,272 ¹	0,170
Custo do biodiesel ²	0,105	-
Petrobras / Usinas de cana	1,102	1,08
Distribuição e revenda ³	0,332	0,274
Preço ao Consumidor	2,020	1,644

Nota: ¹ A alíquota de ICMS média considerada foi de 13%.

² Desde 01 de janeiro de 2010, passou a ser obrigatório a mistura de 5% de biodiesel em todo o diesel comercializado no Brasil. Este percentual, representa em média 5% do custo total do diesel (LIMA, 2009).

³ Considerada a mesma margem na distribuição e revenda, para o óleo diesel e para o etanol, de 20%.

Mesmo levando em consideração que o preço final do etanol é cerca de 20% menor que o diesel, precisamos levar em conta que o etanol tem menor conteúdo energético que o diesel, além do custo do aditivo necessário para utilização do etanol em motores diesel adaptados.

O Brasil é um país com dimensões continentais e, portanto, os preços dos produtos variam de acordo com a região devido, principalmente, aos custos de transporte e logística. Os combustíveis não fogem a esta regra. Sendo assim para o estudo comparativo do etanol

aditivado com o diesel serão levados em consideração os preços máximos e mínimos do etanol e do diesel, disponibilizados pela ANP.

Tabela 26 – Preços Máximos e Mínimos – Etanol e Diesel

Preços (R\$)	Etanol	Diesel
Mínimo	1,499	1,749
Máximo	3,099	2,790

Fonte: ANP, 2011.

Apesar da produção do aditivo no Brasil representar uma importante fonte de redução de custos, inicialmente, será considerado o preço do aditivo fabricado pela Sekab, na Suécia. Posteriormente, para efeito comparativo, será considerado preço de produção do aditivo no Brasil.

Para o aditivo fabricado pela Sekab, o preço de venda na Suécia é de 18,2 SEK (coroas suecas)/kg. Entretanto, considerando os custos de importação o preço praticamente dobra, chegando a cerca de 36,00 SEK/kg, ou seja, US\$ 6,05/kg³⁹. Considerando a densidade do aditivo de 1 kg/l, temos o aditivo a US\$ 5,22/litro⁴⁰, ou seja, R\$ 13,61/litro (conversão de Dólar para Real realizada a partir de dados da época da compra do combustível pelo projeto BEST). Considerando que o etanol aditivado é composto por 95% de etanol e 5% de aditivo (porcentagens em volume), temos uma adição de R\$0,68/litro de etanol para aditivar o etanol, e possibilitar o seu uso em motores diesel. Considerando os preços mínimos e máximos de etanol, temos:

$$P_{\text{etanol aditivado}} (\text{R\$}) = 95\% * P_{\text{etanol}} + 5\% * P_{\text{aditivo}}$$

$$P_{\text{etanol aditivado mínimo}} = 0,95 * 1,499 + 0,05 * 13,61 = \mathbf{2,105 \text{ R\$/litro}}$$

$$P_{\text{etanol aditivado máximo}} = 0,95 * 3,099 + 0,05 * 13,61 = \mathbf{3,625 \text{ R\$/litro}}$$

Considerando, ainda, que o etanol só possuiu 60% do conteúdo energético contido no diesel, para comparação destes combustíveis ainda precisamos multiplicar o preço do etanol por 1,6. Sendo assim, teremos:

$$P_{\text{etanol aditivado mínimo}} = 2,105 * 1,6 = \mathbf{3,705 \text{ R\$/litro}}$$

$$P_{\text{etanol aditivado máximo}} = 3,625 * 1,6 = \mathbf{5,799 \text{ R\$/litro}}$$

³⁹ 1 SEK equivale a 0,168 USD (cotação média referente à março de 2008).

⁴⁰ 1 USD equivale a 2,25 R\$ (cotação média referente à outubro/novembro de 2008).

Portanto, comparando o preço do diesel ao etanol aditivado, inclusive considerando o conteúdo energético dos combustíveis, temos que o custo mínimo do etanol aditivado é cerca de 47% superior ao custo do diesel. Isto torna o custo do etanol aditivado muito superior ao custo do diesel, tornando o seu uso pelas operadoras de ônibus praticamente inviável. Esta diferença de preços diminuiu sensivelmente a partir da fabricação do aditivo no Brasil, pela Oxitenó.

A Oxitenó garantiu a preço do aditivo por R\$ 0,51/litro de etanol, para as primeiras unidades dos veículos, sendo que a partir de 200 unidades de veículos diesel movidos a etanol o preço já cairia para R\$ 0,31/litro de etanol. A partir desta novas perspectivas, os preço do etanol aditivado ficaram:

Considerando as primeiras unidades de veículos diesel movidos a etanol:

$$P_{\text{etanol aditivado mínimo}} = (0,95 * 1,499 + 0,51) * 1,6 = \mathbf{3,094 \text{ R\$/litro}}$$

$$P_{\text{etanol aditivado máximo}} = (0,95 * 3,099 + 0,51) * 1,6 = \mathbf{5,526 \text{ R\$/litro}}$$

E, considerando que a diminuição do preço do aditivo a partir de 200 unidades de veículos diesel movidos a etanol, teríamos:

$$P_{\text{etanol aditivado mínimo}} = (0,95 * 1,499 + 0,31) * 1,6 = \mathbf{2,774 \text{ R\$/litro}}$$

$$P_{\text{etanol aditivado máximo}} = (0,95 * 3,099 + 0,31) * 1,6 = \mathbf{5,302 \text{ R\$/litro}}$$

Verifica-se que a fabricação do aditivo no Brasil constituiu um importante fator de redução do custo do combustível. Considerando que, atualmente, existem 60 ônibus em circulação na cidade de São Paulo (50 unidades da Viação Metropolitana e 10 unidades da Viação Tupi) e que a Metropolitana possui interesse de comprar outras 150 unidades (a Viação Metropolitana tem financiamento aprovado pelo FINAME para compra de 200 unidades de veículos diesel movidos a etanol), o preço do aditivo de R\$ 0,31 para cada litro de etanol representa uma perspectiva clara e possível de ser realizada a curto prazo.

Um outro incentivo que poderia ser considerado para equalizar ainda mais os custos do etanol aditivado e do diesel é a receita com os créditos de carbono obtidas a partir da utilização do etanol no transporte público, em substituição ao diesel. Para calcular os benefícios provenientes dos créditos de carbono, conforme mencionado anteriormente, temos o valor de R\$ 0,016/litro de etanol:

$$P_{\text{mínimo etanol aditivado}} = 2,774 - 0,016 = \text{R\$ 2,758/litro}$$

$$P_{\text{máximo etanol aditivado}} = 5,302 - 0,016 = \text{R\$ 5,286/litro}$$

Estes valores mostram que em algumas regiões, onde o etanol tem preço mínimo, o preço do etanol aditivado R\$ 2,758 é menor que o preço máximo do diesel (R\$ 2,79), quando se consideram os créditos de carbono associado à redução de emissão de CO₂ do diesel. É importante observar que o etanol apresenta variação sazonal de preço e na safra pode ter seu preço reduzido. Dados históricos demonstram que a variação do preço na entressafra pode chegar em 0,10 ou 0,15 R\$/l. Esta redução também contribui significativamente com a redução do preço do etanol aditivado.

Vale ressaltar que, atualmente, o preço do etanol no mercado brasileiro está alto, mesmo considerando o período de safra. Este fato deve-se a problemas climáticos e, principalmente, ao alto preço do açúcar no mercado internacional, que tem levado os usineiros a produzirem açúcar para exportação, em detrimento do etanol.

O Gráfico 06 abaixo mostra a evolução de preços do açúcar e do petróleo, em relação ao etanol. Percebe-se que ao longo dos anos o preço do açúcar vem aumentando, mas que sofre picos no preço e depois cai e que a tendência do etanol acompanha o açúcar.

Gráfico 06 – Evolução do Preço do Açúcar e do Petróleo em Relação ao Etanol.

Fonte: ALMEIDA; VIEGAS, 2011.

O Brasil e a Índia são os países mais importantes do mundo no segmento de produção de cana-de-açúcar, representando quase 60% da produção mundial. A safra de cana-de-açúcar

da Índia (2011/2012) deve ser excelente, devido às chuvas na região. A produção de açúcar na Índia deve saltar de 18,8 milhões de toneladas para 25,5 milhões de toneladas na próxima safra, o que fará o país passar de importador para exportador (RIVERAS, 2010). Com as exportações provenientes da Índia, que é o segundo maior produtor e consumidores de açúcar no mundo, o preço do açúcar no mercado internacional deve cair e, com isso, a tendência de aumento de produção de etanol na próxima safra e consequente queda nos preços. Com o decaimento do preço do etanol, a análise comparativa de preços entre etanol e diesel tende a torna-se mais favorável ao etanol.

Além disso, é importante observar que os postos de gasolina aplicam um sobre preço de R\$ 0,15 por litro de diesel vendido para sua remuneração pelo serviço prestado. Ao vender etanol aditivado, o posto vai vender 60% mais combustível e, dessa forma, para manter o mesmo ganho de R\$ 0,15 por litro, bastaria ganhar $R\$ 0,15 / 1,60 \rightarrow R\$ 0,09/\text{litro}$, o que implica em uma redução para o preço mínimo de R\$ 2,723 para R\$ 2,633, inferior ao preço máximo da venda do diesel.

No último leilão de biodiesel, atualmente o principal substituto para o diesel, realizado em novembro de 2011 pela ANP, o preço do litro do combustível chegou a aproximadamente R\$ 2,10. Este valor, praticamente, equipara o valor do diesel e do biodiesel. Entretanto, é preciso levar em consideração a isenção de impostos incidentes sobre a cadeia produtiva deste combustível.

O biodiesel possui isenção de IPI (Imposto sobre Produto Industrializado), além de redução de 50% no Imposto de Renda para as empresas que o produzirem, conforme Projeto de Lei 3600/04, aprovado em 2005, além de isenção de PIS e COFINS para as usinas produtoras, conforme Artigo 47 da Lei 12.564, sancionada em dezembro de 2011.

O setor de biodiesel no Brasil, que em sua maior parte produz o combustível a partir de óleo de soja, vem reivindicando a mudança do marco regulatório para que a mistura biodiesel adicionada ao diesel fóssil seja aumentada de 5% (porcentagem atual) para 7% em 2012, chegando a 10% em 2014 e em 20% em 2020.

Apesar do mercado de biodiesel estar aquecido, a questão é identificar como ficará a política de isenção de impostos e incentivos fiscais diante do novo cenário. Caso a política de isenção de impostos do biodiesel fosse replicada ao etanol, o seu preço seria competitivo ao diesel e ele seria, também, um combustível competitivo economicamente, já que socialmente e ambientalmente apresenta grandes vantagens.

Apesar de todos os argumentos apresentados, o etanol aditivado ainda apresenta um preço superior ao diesel, sendo necessária a implantação de políticas públicas para incentivas

a utilização deste combustível considerando, principalmente, as melhorias na qualidade do ar e na saúde pública decorrentes da utilização do etanol.

Uma das ações possíveis seria a diminuição do ICMS para o etanol, como acontece em alguns estados como São Paulo. A alíquota de ICMS para o etanol varia entre 12 e 25% nos estados brasileiros, o que demonstra a discrepância entre os diferentes estados da nação. Uma uniformização das alíquotas de ICMS para 12% em todo o país poderia diminuir, consideravelmente, o preço do etanol aditivado, diminuindo a diferença entre os preço mínimo e máximo encontrado nas diferentes regiões do país. Entretanto, talvez, esta seja a política mais difícil de ser colocada em prática, pois haveria a necessidade de alteração da legislação de todos os estados da nação para equiparação do ICMS.

Deve-se considerar que a infraestrutura de distribuição de diesel é muito mais antiga e de melhor qualidade que a infraestrutura de distribuição do etanol. Sabe-se que boa parte das bases de distribuição dos combustíveis fósseis, principalmente gasolina e diesel, está fundamentada na utilização de ferrovias e dutos, modais mais adequados para transferências de grandes volumes, principalmente nas regiões sul e sudeste do Brasil e em parte da região Nordeste. Ainda há a necessidade de expansão destes modais para o Centro-Oeste e Norte do País para a realização de transferências entre bases ou entre refinarias-bases. Com essa infraestrutura de distribuição do diesel disponível e instalada, as vantagens competitivas de distribuição do diesel sobre o etanol são evidentes, já que a distribuição do etanol é realizada, majoritariamente, por transporte rodoviário, que é mais caro e ineficiente. Entretanto, um novo projeto vem sendo desenvolvido com o objetivo de construir dutos para o transporte de etanol na região sudeste e centro-oeste. Este novo investimento está sendo desenvolvido por grandes empresas nos setores de petróleo e gás, construção civil, sucroalcooleiro, entre outros. A perspectiva é que até 2020 este sistema esteja operante⁴¹. Com isso há tendência de queda nos preços de distribuição do etanol, que devem influenciar fortemente o preço final do etanol, tanto no mercado interno como para exportação. Enquanto esta infraestrutura não está operante, há a necessidade de comparação de preços máximo e mínimo do diesel e do etanol, pois existe uma grande diferença competitiva entre eles.

À medida que a demanda por recursos não renováveis (como o petróleo) aumenta, diminuem as reservas de suprimentos relativamente baratos, mais acessíveis, diminuindo o potencial de fornecimento de combustível aos preços atuais. Consequentemente, os conflitos comerciais e choques de preços tendem a aumentar. Uma elevação no custo do barril de

⁴¹ Informação pessoal, Wanderley Feliciano Filho (Logum Logística S.A.), novembro de 2011.

petróleo de US\$ 95,00/barril (preço de julho de 2012) para algo em torno de US\$ 130,00/barril (valor já alcançado em passado recente), desde que a política de preços implementada no Brasil reflita o real preço do combustível, já implicaria em grande vantagem competitiva do etanol frente ao diesel.

Desde 2005, o governo brasileiro tem mantido fixo o preço que a Petrobras recebe da distribuidora. O que a empresa tem ganhado é com a redução do imposto que o consumidor pagaria e que está sendo cada vez menor. O imposto que era de 25% do preço em 2002, diminuiu para 2,7% em 2012, para compensar a alta do petróleo no mercado internacional. Este tem sido o subsídio utilizado pelo governo ao combustível fóssil, principalmente gasolina e diesel, e a forma de não praticar o preço real destes combustíveis ao consumidor. Segundo especialistas da área econômica, esta política tem o objetivo principal de segurar a inflação. Com isso, a Petrobras aumentou, em 2011 e 2012, mais de 350% o volume de gasolina importada nos últimos dez anos anteriores a 2011.

Uma ação de política imediata para introduzir uma sinalização do real preço do combustível ao consumidor já seria suficiente para tornar o etanol competitivo ao diesel, em veículos para o transporte urbano.

Além disso, a introdução de política referente às emissões evitadas de gás de efeito estufa por tonelada métrica de carbono equivalente induziria ao aumento dos combustíveis fósseis e, conseqüentemente, a implementação da biomassa como alternativa, além de outras tecnologias de energia renovável. Especialistas⁴² estimam que o valor de US\$ 40,00 /tonelada de CO₂ seria suficientes para viabilizar muitas tecnologias, inclusive a de ônibus movido a etanol.

Deve-se considerar também os efeitos do uso de combustíveis fósseis sobre a saúde humana. Considerando os gastos levantados com a saúde pública de US\$ 400 milhões/ano, ou seja R\$ 800 milhões/ano (estimativas conservadoras) e considerando que o custo do etanol por quilômetro rodado é cerca de R\$ 3,00, enquanto o do diesel é R\$ 2,00 teríamos que o gasto com saúde pública, só na região metropolitana de São Paulo, seria suficiente para cobrir 800 milhões de litros (considerando que a diferença entre os dois combustíveis é de R\$ 1,00/litro). Como um ônibus a etanol gasta, em média 200 litros de combustível por dia a mais que o equivalente a diesel (cerca de R\$ 60.000,00/ano), teríamos a possibilidade de

⁴² José Roberto Moreira, estudo realizado para o seminário Fapesp Bioenergy Reseach Program – Bioen. Outubro de 2012.

colocar em operação cerca de 10.000 ônibus, somente considerando as estimativas com os gastos em saúde pública.

A política de equiparação dos preços internacionais de combustíveis ao consumidor final, bem como a implementação de política de relativas à intensidade de carbono presente nos combustíveis seriam essenciais a equiparação dos preços das tecnologias apresentadas.

Neste capítulo foram apresentadas algumas possibilidades e sugestões para igualar os preços do etanol e do diesel. Entretanto, sabe-se que outras ações podem ser tomadas pelo poder público a fim de incentivar a utilização do etanol para, futuramente, usufruir dos seus benefícios ambientais e sociais.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

O meio ambiente e a qualidade de vida da sociedade não tem sido o foco no desenvolvimento no Brasil. Este cenário não é diferente no setor de transporte. Os níveis de emissão do setor de transporte no Brasil são administrados pelo PROCONVE que, há cerca de duas décadas, tem trazido melhorias ambientais. Entretanto, ainda existem graves problemas relacionados à poluição atmosférica, principalmente, em áreas urbanizadas no Brasil.

O público brasileiro tem consciência do etanol como combustível para transporte devido ao PROÁLCOOL. Entretanto, atualmente, o uso do etanol como combustível no Brasil é limitado ao setor de veículos de passeio, devido à tecnologia *flex fuel*, e há pouca consciência das oportunidades de substituição do diesel usado em veículos pesados como caminhões e ônibus.

A partir de 1º de janeiro de 2012, todos os novos motores a diesel devem se enquadrar à nova legislação de emissão de poluentes, PROCONVE P-7- Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores, instituído pelo Conama (Conselho Nacional do Meio Ambiente), equivalente ao Euro 5, já em vigor na Europa e em outros países do mundo. O objetivo da norma visa diminuir de maneira significativa as emissões dos veículos a diesel. O Programa também aprovou uma resolução que antecipa a obrigatoriedade do diesel S-50 (50 partes por milhão de enxofre), para tornar eficiente os motores Euro 5 e reduzir em 90% as emissões. Caso seja utilizado o diesel com maior teor de enxofre, como o S500, S 1800 ou S2000, o sistema avisa que há algo errado com o veículo. As montadoras estão se preparando para atender a esta nova fase do programa brasileiro de controle ao meio ambiente, ao trazer para o País sistemas utilizados atualmente na Europa. Uma dessas tecnologias é o SCR (Selective Catalytic Seletiva), quando o gás emitido pelo veículo passa por um tratamento antes de sair pelo escapamento. Para o funcionamento desta tecnologia será utilizado o aditivo Arla 32, que se submetido à alta temperatura do escapamento transforma-se em amônia e passa por um processo até transformar-se em nitrogênio e vapor de água, substâncias que não poluem o ambiente. Outro sistema que poderá ser adotado é o EGR (Exhaust Gas Recirculation), que consiste na recirculação dos gases liberado pelo escapamento, controlando os óxidos de nitrogênio por meio da concentração de oxigênio na câmara de combustão e da absorção do calor. A expectativa é que com este tipo de sistema apenas 2% do gás seja liberado ao meio ambiente. Para atender a nova norma, os veículos deverão também estar equipados com o (Diagnóstico de Bordo), no qual a função é monitorar constantemente os

sinais relacionados às emissões de poluentes e indicar ao motorista eventuais falhas que afetam as emissões. Vale lembrar que os veículos que foram fabricados até 31 de dezembro de 2011 não precisam se adequar à norma. Há também previsão de aumento do preço dos veículos, entre 10% e 15%.

A tecnologia disponível para aperfeiçoamento dos motores Diesel, certamente, permitirá atingir os limites estabelecidos pela Fase-P7 do PROCONVE, mas para tanto serão necessárias implementações de melhorias técnicas no atual combustível Diesel, principalmente no tocante ao teor de Enxofre, as características de destilação, ao número de cetano e ao controle da presença de aromáticos e poliaromáticos.

Diferentes caminhos e alternativas técnicas são passíveis de utilização. Caberá ao fabricante de motor a responsabilidade de adequá-las de forma confiável. Entretanto, a experiência iniciada na Suécia, do uso do etanol em motores diesel, trouxe uma nova perspectiva de melhoria da qualidade do ar, principalmente para as regiões metropolitanas, além do cumprimento dos limites de emissão estabelecidos.

O desenvolvimento deste motor a etanol, pela Scania, em paralelo ao aprimoramento do aditivo, essencial para o uso de etanol em motores ciclo diesel, viabilizou o uso deste combustível em motores pesados.

Os resultados dos testes do motor diesel movido a etanol, Scania DC9 E02, mostram que suas emissões não só atendem como superam os limites impostos pelo PROCONVE fase P-7, que é o padrão mais rigoroso de emissões no Brasil para motores de veículos pesados e é equivalente ao padrão de emissão Euro 5, que no Brasil recentemente entrou em vigor.

A utilização do etanol em veículos pesados vai ao encontro da Lei de Mudanças Climáticas do Município de São Paulo, que prevê a substituição de toda frota de ônibus da cidade, até 2017, por ônibus que utilizem combustíveis renováveis (10% a.a.) sendo que, atualmente, o ônibus movido a etanol é a única tecnologia desenvolvida e aperfeiçoada que pode atender à Lei no curto prazo.

Há, também, a Lei de Política Estadual de Mudanças Climáticas, que prevê redução de 20% das emissões de CO₂ até 2020.

No Brasil, morrem anualmente 12,9 mil pessoas e na Cidade de São Paulo o número de óbitos decorrentes da poluição do ar chega a 3.500 por ano. Segundo estudos realizados por especialistas da área de saúde pública, o custo do ar poluído das cidades equivale a cerca de US\$ 400 milhões por ano, valor calculado levando-se em consideração os anos

potencialmente produtivos das vidas perdidas, em decorrência da poluição do ar, somando-se o custo da convivência com as doenças crônicas que diminuem a capacidade de trabalho, e que incluem os gastos públicos com o tratamento delas.

A poluição atmosférica local (aquela que impacta a qualidade do ar no local onde o poluente é emitido) está associada aos aumentos significativos de admissões hospitalares e à mortalidade por doenças respiratórias e cardiovasculares. Crianças, idosos e indivíduos com doenças respiratórias e cardiovasculares, bem como integrantes dos segmentos menos favorecidos do ponto de vista socioeconômico são os mais afetados pela poluição do ar que, ao longo dos anos, levam à redução da expectativa de vida. Ou seja, a consequência imediata da exposição da população à poluição do ar é a deterioração da saúde pública, que é observada nos centros urbanos.

O Projeto BEST realizou diversas atividades de disseminação e informação pública para aumentar a conscientização da população, em especial os passageiros, e também das equipes de manutenção mecânica e motoristas que deixaram claro seu apoio à tecnologia. As campanhas futuras de conscientização pública precisam focar os benefícios ambientais e de saúde oferecidos pelos ônibus movidos a etanol, por meio da redução de emissões de poluentes e, então, criar um forte apoio para esta nova tecnologia. Entretanto, a utilização do etanol aditivado como combustível para os veículos pesados ainda precisa de incentivo, como mostrado neste trabalho. A operação com etanol ainda é mais onerosa que a operação com veículos diesel. Como o tema saúde não está inscrito nas resoluções sobre poluição ambiental e na política de formação de preços dos combustíveis, o que é uma lacuna considerável, ainda há a necessidade de incentivos financeiros para a viabilização desta tecnologia.

A desoneração do etanol faz-se necessária tendo em vista que é um “combustível social”, pois gera empregos no campo, na cidade e contribui com a melhoria da qualidade do ar. Esta foi a política adotada na Suécia, país onde a experiência com ônibus a etanol foi pioneira e é largamente aplicada. Lá, o etanol é isento de tributos, enquanto o diesel, combustível mais poluente e não renovável, é pesadamente tributado.

A fabricação do aditivo no Brasil já diminuiu os custos do etanol aditivado, mas ainda não é suficiente para igualar os custos de operação entre o etanol e o diesel.

Outra ação possível seria a redução, ou até mesmo a extinção do PIS e COFINS para o etanol. Desde julho de 2000, a alíquota de PIS e COFINS incidente sobre a revenda do álcool para fins carburantes, ou seja quando adicionado a gasolina, para os distribuidores é zero

(RECEITA FEDERAL, 2011). Esta política de zerar a alíquota também poderia ser aplicada ao etanol hidratado aditivado, já que ele vai substituir o diesel no transporte público, trazendo grandes benefícios sociais à saúde da população e a qualidade do ar. Além disso, como mencionado anteriormente, estas alíquotas tem incidência cascata sobre a cadeia de produção e comercialização do etanol.

A política de equiparação dos preços internacionais de combustíveis fósseis ao consumidor final, bem como a implementação de política de relativas à intensidade de carbono presente nos combustíveis seriam essenciais a equiparação dos preços das tecnologias apresentadas. Além disso, deve-se considerar a incorporação dos gastos com a saúde pública na política de preços dos combustíveis.

Outro importante ponto é o aumento do preço dos novos veículos a diesel. Antes os motores a etanol apresentavam um custo superior ao do diesel. Entretanto, a nova tecnologia de veículos diesel para receber o combustível S-50 torna o preço destes veículos mais caros e, portanto, competitivo com os preços dos veículos a etanol. Este aumento no preço dos veículos diesel vai ao encontro da criação do Fundo Clima, nos termos da Lei nº 12.114, que com o objetivo de apoiar projetos que contribuam para a redução das emissões de GEE e de poluentes locais no transporte coletivo urbano de passageiros, propiciou o apoio financeiro do BNDES, a partir da redução da taxa de juros de 6,9% a.a. (para micro, pequenas e médias empresas) e para 7, 4% a.a. (para médias-grandes e grandes empresas), para o financiamento de ônibus movidos a etanol. O valor total financiado será de 90% e o prazo de carência varia de 12 a 36 meses.

Levando em consideração que a produção do etanol gera milhares de empregos na zona rural, além dos benefícios na qualidade do ar, principalmente das regiões metropolitanas, a desoneração da cadeia produtiva mostra-se justa e viável.

Em suma, a implementação dos ônibus movidos a etanol no Brasil deve ser fortemente incentivada devido ao potencial significativo em contribuir com a redução de emissão de poluentes locais e GEE's, bem como a melhoria na qualidade do ar e na saúde. Entretanto, a sustentabilidade ambiental e social da produção e uso do etanol no Brasil precisa ser assegurada, e é também essencial que seja criado um mecanismo de incentivo para a utilização do etanol em ônibus, como o já existente para biodiesel.

A aquisição de ônibus a etanol pode ser incentivada por meio do mercado de créditos de carbono a partir da substituição de óleo diesel por etanol combustível. Entretanto, a

solicitação dos créditos só é possível se não existir obrigação para a introdução de veículos a etanol no sistema de transporte brasileiro. Infelizmente, essa possibilidade ainda não está clara, pois não há uma metodologia aprovada até o momento para tal iniciativa.

Outro importante ponto levantado neste trabalho foi com relação às emissões de aldeídos, que são reconhecidamente associadas a utilização de motores ciclo Otto, em especial ao etanol. Entretanto, dentro das emissões de componentes gasosos por motores diesel, os aldeídos também são importante, pois constituem uma fração das emissões gasosas deste combustível. Como mencionado anteriormente, os aldeídos são responsáveis por irritação nos olhos e no trato respiratório superior, além de serem compostos carcinogênicos.

Além da sua toxicidade direta, os aldeídos atmosféricos podem contribuir para a formação de ozônio, um dos poluentes reconhecidamente associados com efeitos adversos à saúde humana. Atualmente, a emissão de aldeídos em veículos diesel são comparadas a emissão reais de aldeídos em veículos de ignição e com o limite previsto para os veículos do ciclo Otto na legislação brasileira e devem ser consideradas importante e significativa.

Ainda com relação à emissão de aldeídos um outro importante fator a ser avaliado é a mistura de biodiesel no diesel. No Brasil, esta mistura é compulsória em 5% (B5) em volume, desde 2010. A mistura de biodiesel no diesel é uma realidade e seus efeitos sobre as emissões atmosféricas também precisam ser avaliados. A maior emissão de aldeídos devido ao uso do biodiesel é comprovada. Existem condições de combustão de biodiesel em que a emissão de aldeídos pode atingir níveis entre 5 a 10 vezes maiores que os obtidos em combustão de diesel.

Os aldeídos contribuem com mais de 40% do potencial de formação de ozônio e, portanto, merecem atenção. Portanto, existe uma necessidade considerável de pesquisa na área de aldeídos, alcenos e alcinos, principalmente quando considerado o uso de biodiesel em regiões metropolitanas.

No Brasil, o PROCONVE já considera a emissão de aldeídos nos veículos pesados usando diesel, mas não são estabelecidos limites de emissão ficando, portanto, a cargo do fabricante a apresentação de valores típicos e o enquadramento de seu motor nos valores apresentados.

Estabelecer limites de emissão os aldeídos, tanto para veículos a diesel, como a etanol, é imperativo à luz do crescimento da frota de veículos, a mistura de biodiesel ao diesel, a toxicidade desses compostos, e sua participação como precursores nas reações de formação do ozônio troposférico.

São Paulo é a primeira cidade do Brasil a possuir uma frota de ônibus a etanol. Este esforço só foi realizado devido ao desenvolvimento do Projeto BEST e ao envolvimento dos pesquisadores no tema, que incentivaram empresas como Scania, Unica, operadoras de ônibus, entre outras a trazer esta tecnologia para o Brasil, aperfeiçoá-las às condições locais e demonstrá-la. Incentivos ainda são necessários. Entretanto, o envolvimento do poder público e das empresas já viabilizou a operação desta tecnologia, tão promissora ambientalmente. Agora, cabe às autoridades a criação de políticas públicas que incentivem esta tecnologia em larga escala e que considerem a população e a saúde pública como prioridade no desenvolvimento de um país socialmente justo, ambientalmente sustentável e economicamente viável, como já prevê o tripé da responsabilidade social da legislação brasileira.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

ABRANCHES, S. **Emissões globais de gases de efeito estufa cresceram em 2010.**

Disponível em: <http://www.ecopolitica.com.br/2011/11/09/emissoes-de-gases-estufa-cresceram-em-todo-o-mundo-em-2010/> Acesso em 02 de janeiro de 2012.

AHLVIK, P. J. E. **Swedish Experiences from Low Emission City Buses: Impact on Health and Environment.** 7th DEER Workshop, 2001.

ALMEIDA, F. **O mundo dos negócios e o meio ambiente no século 21.** In TRIGUEIRO, André (Coord.). **Meio Ambiente no século 21.** Rio de Janeiro: Sextane, 2003.

ALMEIDA, E.; VIEGAS, T. **Crise de oferta no mercado do etanol: conjuntural ou estrutural?** Blog Infopetro Grupo de Economia da Energia. Maio de 2011. Disponível em <http://infopetro.wordpress.com/2011/05/30/crise-de-oferta-no-mercado-do-etanol-conjuntural-ou-estrutural/> Acesso em 04 de janeiro de 2012.

ALMEIDA, S. C. A. **Máquinas Térmicas.** Apostila de motores de Combustão Interna, 2001. Disponível em: http://mecanica.scire.coppe.ufrj.br/utl/b2evolution/media/silvio/apmotoresMCI05_01.pdf.

AMARAL, R. A. **Influência de Parâmetros Geométricos e de Funcionamento do Motor nas Emissões de Aldeídos por um Veículo a Álcool.** Dissertação (mestrado). Engenharia Mecânica da PUC Minas. Março 2000.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO – ANP. **Seminário de Avaliação do Mercado de Combustíveis 1º Semestre de 2008.** Disponível em www.anp.gov.br/doc/palestras/Avaliação%20do%20mercado%202008%20I.ppt Acesso em outubro de 2008.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO – ANP. **Sistema de levantamento de preços 2011.** Disponível em http://www.anp.gov.br/preco/prc/Resumo_Quatro_Combustiveis.asp acesso em 12/10/2011. Acesso em outubro de 2008.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO – ANP. **Anuário estatístico 2011**. Disponível em <http://www.anp.gov.br/?pg=57890>

ARBEX, M. A.; MARTINS, L. C.; OLIVEIRA, R. C.; PEREIRA, L. A. A.; ARBEX, F. F.; CANÇADO, J. E. D.; SALDIVA, P. H. N. ; BRAGA, A. L. F. **Air Pollution from Biomass Burning and Asthma Hospital Admissions in a Sugar Cane Plantation Area in Brazil**. Journal of Epidemiology and Community Health, v. 61, p. 395-400, 2007.

ARC – Auckland Regional Council. **Health Effects of Air Pollution**. Junho, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS - ABVE. **1.700 ônibus elétricos híbridos em Nova York - A opção da cidade é por veículos mais eficientes e bem menos poluentes no transporte público**. Dezembro de 2007. Disponível em <http://www.abve.org.br/destaques/destaque169.shtml>. Acesso em 05 de novembro de 2009.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES - ANFAVEA. **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira – 2011**.

ASSUNÇÃO, J. V. **Controle Ambiental do Ar**. In: Curso de Gestão Ambiental. São Paulo: Manole, 2004. Cap. 4, p. 101-154.

BENTO, P. **Etamax D – Combustível para Motor Diesel a partir de Etanol**. Primeiro Workshop Scania - Ônibus Movido a Etanol. São Paulo, 01 de outubro de 2007.

BERNARDES, J. **Expansão da bioenergia deve respeitar meio ambiente e não provocar prejuízos sociais**. Disponível em: http://www.abdi.com.br/abdi_redesign/publicacao/engine.wsp?tmp.area=244&tmp.texto=1518. Acesso em 04 de março de 2008.

BIRATH, K. **The BEST experiences with bioethanol buses - BEST WP2 Buses Final Report**. Estocolmo. Março de 2010. Disponível em www.best-europe.org. Acesso em 11 de dezembro de 2010.

BRAGA, A. L. F.; PEREIRA, L. A. A.; PROCÓPIO M.; ANDRÉ, P. A.; SALDIVA, P. H. N. **Association Between Air Pollution and Respiratory and Cardiovascular Diseases in Itabira, Minas Gerais, State, Brazil**. Cadernos de Saúde Pública (FIOCRUZ), v. 23, p. S570-S578, 2007.

BRAIN, M. **Como funcionam os motores a diesel**. Disponível em <http://carros.hsw.uol.com.br/diesel.htm>. Acesso em 10 de janeiro de 2011.

BRANCO, G. M. **Redução das emissões do transporte público através de melhores tecnologias e combustíveis**. Biannual Conference and Exhibit of the Clean Air Initiative for Latin American Cities. São Paulo – SP, 24-27 de julho de 2006.

_____. 2011. **Motores diesel: ecológicos ou poluidores?** Setembro de 2004. Disponível em http://www.ecoinforme.com.br/main_noticia.asp?id_noticia=197&id_tipo_noticia=25&id_secao=88. Acesso em 02 Novembro de 2011.

CADDET – Renewable Energy (IEA/OECD). **Ethanol-powered Buses Reduce Vehicle Emissions in Stockholm**. Technical Brochure n.62. 1997.

CÂMARA, I.G. **Problema ou Solução?**. In: TRIGUEIRO, André (coord.) Meio Ambiente no Século 21. Rio de Janeiro, 2003.

CANÇADO, J. E. D.; SALDIVA, P. H. N.; PEREIRA, L. A. A.; LARA, L. B. L. S.; ARTAXO, P.; MARTINELLI, L. A ; ARBEX, M. A.; ZANOBETT, A.; BRAGA, A. L. F. **The Impact of Sugar Cane-Burning Emissions on the Respiratory System of Children and the Elderly**. Environmental Health Perspectives, v. 114, n. 5, p. 725-729, 2006.

CAVALCANTI, M. C. B. **Tributação Relativa Etanol-Gasolina no Brasil: Competitividade dos Combustíveis, Arrecadação do Estado e Internalização de Custo de Carbono**. Tese de Doutorado. COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Março de 2011.

CENBIO - Centro Nacional de Referência em Biomassa (CENBIO). **Projeto Ônibus Híbridos - Primeiro Relatório Técnico**. Março de 2005.

_____(2006). **Projeto Expansão de Cana no Estado de São Paulo**. SMA: Secretaria do Meio Ambiente. São Paulo, 2006.

_____(2008). **2º Relatório do Projeto BEST**. Agosto de 2008.

_____(2009). **3º Relatório do Projeto BEST**. Fevereiro de 2009.

_____(2010). **1º Relatório Projeto BEST para o CNPq**. Setembro de 2010.

_____(2011a). **2º Relatório Projeto BEST para o CNPq**. Janeiro de 2011.

_____(2011b). **3º Relatório Projeto BEST para o CNPq**. Maio de 2011.

CENBIO/USP; UN DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS. (Org.). **Brazil: A Country Profile on Sustainable Energy Development**. Viena: The Agency, 2006, v. , p. 241-245.

CENTRO TECNOLOGIA CANAVIEIRA – CTC. **Poder Calorífico Inferior – PCI (2011)**.

Disponível em:

http://www.ctcanavieira.com.br/site/index.php?option=com_content&view=article&id=378&Itemid=1332. Acesso em 08 de maio de 2011.

CEPA – California Environmental Protection Agency. **Detailed California – Modified GREET Pathways for Brazilian Sugarcane Ethanol: Average Brazilian Ethanol, with Mechanized Harvesting and Electricity Co-product Credit, with Electricity Co-product Credit**. July, 2009.

CHEMINDUSTRY. **Polyethylene Glycol**. 2011.

Disponível em <http://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/summary/summary.cgi?cid=174#Subinfo>

COELHO, S. T. **Mecanismos para implementação da cogeração de eletricidade a partir de biomassa. Um modelo para o estado de São Paulo.** São Paulo, 1999. Tese (Doutorado) - Programa Interunidades de pós-graduação em Energia da Universidade de São Paulo.

COELHO, S. T.; BOLOGNINI, M. F.; PALETTA, C. E.; GUARDABASSI, P. **Evaluation of Externalities in Sugarcane-Origin Cogeneration Process in Brazil.** In: First Conference on Biomass for Energy and Industry, 2000, Sevilla.

COELHO, S. T.; PALETTA, C. E.; FREITAS, M. A. V. **Medidas Mitigatórias para Redução de Gases Efeito Estufa na Geração Termelétrica no Brasil.** 1a. ed. Brasília: ANEEL-Dupligráfica Editora, 2000.

COMMITTEE ON THE MEDICAL EFFECTS OF AIR POLLUTANTS – COMEAP. **Effects on Health of Aldehydes in Ambient Air.** 2000.

COMPANHIA DE PROCESSAMENTO DE DADOS DO ESTADO DE SÃO PAULO – PRODESP. <http://www.prodesp.sp.gov.br/>. Acesso em Julho de 2009.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL – CETESB. **Ozônio Troposférico na Região Metropolitana da Cidade de São Paulo. Proposta para Controle.** Relatório Final do Grupo de Trabalho (coord. Cláudio Darwin Alonso). São Paulo, 2000.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL – CETESB. **Relatório de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo.** São Paulo, 2010.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL – CETESB. **Relatório de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo.** 234p. São Paulo, 2011.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE, 2011. Disponível em http://www.cnt.org.br/Imagens%20CNT/PDFs%20CNT/Economia%20em%20foco/ECONOMIA%20EM%20FOCO%2024_05_2011.pdf

COUTRIM, M. X.; CARVALHO, L. R. F.; ARCURI, A. S. A. **Avaliação dos métodos analíticos para a determinação de metabólitos do benzeno como potenciais**

biomarcadores de exposição humana ao benzeno no ar. Química Nova, Volume 23. Outubro de 2000.

DASCH, J. M., WILLIAMS, R. L. **Benzene Exhaust Emissions from In-use General Motor Vehicles.** Environmental Science Technology, pp 853-857. Maio de 1991. Disponível em <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es00017a003> Acesso em 31 de maio de 2012.

DESPOLUIR – Programa Ambiental do Transporte. **Legislação.** Disponível em <http://www.cntdespoluir.org.br/Lists/Contedos/DispForm.aspx?ID=25>. Acesso em 14 de janeiro de 2011.

DIÁRIO COMÉRCIO INDÚSTRIA E SERVIÇO – DCI. **Investimento da Petrobras em diesel "limpo" é de US\$ 12 bi.** Disponível em [http://www.dci.com.br/Investimento-da-Petrobras-em-diesel-limpo-e-de-US\\$-12-bi-1-400835.html](http://www.dci.com.br/Investimento-da-Petrobras-em-diesel-limpo-e-de-US$-12-bi-1-400835.html) Acesso em 15 Dezembro de 2011.

EIA – Energy Information Administration. Disponível em: http://tonto.eia.doe.gov/dnav/pet/pet_pri_top.asp

EMBRAPA – Disponível em: www.embrapa.br. Acesso em novembro de 2007.

EMPRESA METROPOLITANA DE TRANSPORTES URBANOS – EMTU. **Estudo topográfico.** 2005.

EMPRESA METROPOLITANA DE TRANSPORTES URBANOS – EMTU. **Ônibus movido a hidrogênio. Veículo do futuro.** Disponível em: [www.emtu.sp.go.br/Notícias e Releases](http://www.emtu.sp.go.br/Noticias_e_Releases).

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Renewable Fuel Standard Program (RFS2) Regulatory Impact Analysis.** Assessment and Standards Division Office of Transportation and Air Quality U.S. Environmental Protection Agency. February 2010.

FERREIRA DA COSTA, M. A.; BARROSO DA COSTA, M. F. **Benzeno: uma questão de saúde pública.** Disponível em

<http://www.uff.br/toxicologiaclinica/Toxicologia%20do%20Benzeno.pdf> Acesso em 31 de maio de 2012.

FOREST TRENDS. **Back to the Future State of the Voluntary Carbon Markets 2011**. Disponível em http://www.forest-trends.org/documents/files/doc_2828.pdf. Acesso em 15 Outubro de 2011.

FULTON, L. **Recent biofuels assessments and two new scenarios**. Paper apresentado no IEA Seminar Assessing the Biofuels Option. Paris, 2004.

GERARQUE, E. A. **Perigo no ar. Apesar dos avanços nos últimos 20 anos, a poluição atmosférica continua a ser um problema grave de saúde pública em São Paulo**. Scientific American Brasil. Novembro de 2006.

GLOBAL BIOFUELS CENTER. **Ethanol, Biodiesel, Renewable Diesel Fiscal Policies**. 2008. Disponível em <http://www.globalbiofuelscenter.com/>

GOLDEMBERG, J. **Energia Meio Ambiente e Desenvolvimento**. 2. ed. São Paulo: Edusp - Editora da Universidade de São Paulo, 2003. 227 p.

_____. 2003b. **O caminho até Joanesburgo**. In: TRIGUEIRO, André (Coord.). Meio Ambiente no Século 21. Rio de Janeiro: Sextane, 2003. p 172-181

GOLDEMBERG, J. **Poluição Local e Regional**. Cadernos Fecomercio nº 34. São Paulo. Setembro, 2007.

GOLDEMBERG, J. **Developing countries and climate change**. In: Dr. Andrea Baranzini; Prof. Beat Bürgenmeier. (Org.). International Journal of Global Environmental Issues. 3/4 ed. UK: Inderscience Enterprises Ltd., 2002, v. 2, p. 170-180.

_____. 2002b. **Perspectivas, no campo da energia, de médio e longo prazo para o Brasil**. Energia Novos Cenários: Universalização do acesso, uso racional e fontes alternativas para o futuro. 1 ed. Salvador: Fundação Luís Fernando Guimarães, 2002, v. 1, p. 151-161.

GOLDEMBERG, J.; COELHO, S. T.; GUARDABASSI, P. **The sustainability of ethanol production from sugarcane.** Energy Policy, Volume 36, Issue 6, June 2008, Pages 2086-2097.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Impactos ambientais de projetos energéticos.** Aula ministrada no curso de Gestão Ambiental e Negócios no Setor Energético (IEE/USP). São Paulo, março de 2009.

GOLDEMBERG, J.; MOREIRA, J. R.; SCHAEFFER, R.; ABDALLA, K. ; ROGNER, H. H.; LANGLOIS, L. ; VERA, I. **Conclusions and Lessons Learned.** In: IAEA; COPPE/ UFRJ;

GRANET, I. **Termodinâmica e Energia Térmica.** Editora LCT. Nova Iorque, 1975.

GREENENERGY. **Material Savety Data Sheet.** Commission Decision 2000/352/EC. Londres, 2000. Disponível em: www.greenenergy.com/products/MSDS/E95.pdf Acesso em 5 de setembro de 2008.

IEA – International Energy Agency. **Energia para Todos, Financiar o Acesso para os Pobres.** Outubro de 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Características da População.** 2011. Disponível em http://www.ibge.gov.br/home/pesquisa/pesquisa_google.shtm?cx=001166883472422164311%3Azkjemxce8sc&cof=FORID%3A9&ie=ISO-8859-1&q=opula%E7%E3o+rural+e+urbana&sa=Pesquisar&siteurl=www.ibge.gov.br%2Fhome%2F Acesso em 02 de janeiro de 2012.

INSTITUTO DE ESTUDOS DO COMÉRCIO E NEGOCIAÇÕES INTERNACIONAIS – ICONE. **Sai o pasto degradado, entra lavoura.** Disponível em <http://www.iconebrasil.org.br/pt/?actA=7&areaID=5&secaoID=7&artigoID=2301> Acesso em 05 de setembro de 2012.

JOSEPH JR., H. **New Advances on Flex Fuel Technology.** Ethanol Summit. São Paulo, 2009.

KOIKE, G. H. A.; BEM, A. J. D.; PASSARINI, L. C. **Utilização de etanol em motores ciclo diesel**. Fundação para o Incremento da Pesquisa e do Aperfeiçoamento Industrial – FIPAI, 2003. Disponível em [http://www.fipai.org.br/Minerva%2003\(02\)%2002.pdf](http://www.fipai.org.br/Minerva%2003(02)%2002.pdf) Acesso em 03 de janeiro de 2012.

KRAHLL, J., MUNACKL, A., BAHADIR, M., SCHUMACHER, L., ELSER, N. **Survey about Biodiesel Exhaust Emissions and their Environmental Effects**. 1996. Disponível em http://www.biodiesel.org/resources/reportsdatabase/reports/gen/19950101_GEN-217.pdf. Acesso em 13 de outubro de 2011.

KUMAR, S.; NAYEK, M.; KUMAR, A.; TANDON, A.; MONDAL, P.; VIJAY, P.; BHANGALE, U. D.; TYAGI, D. **Aldehyde, Ketone and Methane Emissions from Motor Vehicle Exhaust: A Critical Review**. American Chemical Science Journal, 2011.

LADEIRA, V. **Seminário da Câmara de Meio Ambiente da Fetranportes**. Vitória, Maio de 2011. Disponível em http://www.fetransportes.org.br/phocadownload/cartinhaseguias/Apres_P7_%202011.pdf Acesso em 10 de janeiro de 2012.

LARSSON, E. **Use of ethanol in diesel engines**. VII International Symposium on Alcohol Fuels. Outubro de 1986. Disponível em http://books.google.com.br/books?id=1J_0eOMZg4wC&pg=RA3-PT9&lpg=RA3-PT9&dq=aldehyde+emission+from+diesel+engines+ethanol+sweden&source=bl&ots=Yy5Q_Qiyzg-&sig=EkL4uWAQdZA-fOKbsqcSKJSFAiw&hl=pt-BR&sa=X&ei=Sb1nT6PWEImggwFL16naCQ&sqi=2&ved=0CHkQ6AEwCA#v=onepage&q=aldehyde%20emission%20from%20diesel%20engines%20ethanol%20sweden&f=false Acesso em 22 de Abril de 2012.

LASCALA, T. L.S. **Externalidades da substituição do diesel pelo etanol no transporte público urbano da região metropolitana de São Paulo**. 2011. Tese (Doutorado em Ciências) - Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011

LEAL, G. **Inovações Automotivas e a Necessidade de Novos Combustíveis.**

DaimlerChrysler do Brasil Ltda - Desenvolvimento de Motores. Outubro de 2008. Disponível em <http://pt.scribd.com/doc/6697599/4-MotoresEmissoes-e-Imissoes> Acesso em fevereiro de 2011.

LIMA, P. C. R. **Os Tributos e os Preços do Óleo Diesel Praticados pela Petrobras Depois da Liberação do Mercado.** Disponível em:

http://bd.camara.gov.br/bd/bitstream/handle/bdcamara/4824/tributos_precos_lima.pdf?sequence=1 Acesso em 20 de novembro de 2011.

LINN, W. S. **Research Update: Health Effects of Ambient Air Pollution.** California Thoracic Society – American Lung Association of California, 2008. Disponível em:

<http://www.thoracic.org/chapters/thoracic-society-chapters/ca/publications/resources/eoh/resrch-update-heEffects-ap.pdf>. Acesso em 17 de janeiro de 2011.

LITORALBUS. **Rio de Janeiro teve ônibus elétrico nos anos 20.** 19 de outubro de 2009. Disponível em: <http://litoralbus.blogspot.com/2009/10/rio-de-janeiro-teve-onibus-eletrico-nos.html>. Acesso em 03 de novembro de 2009.

LORA, B. A.; MONTEIRO, M. B.; ASSUNÇÃO, V.; FRIGERIO, R. **Levantamento Georreferenciado da Expansão da Cultura de Cana-de-açúcar no Estado de São Paulo.** São Paulo, dezembro de 2006.

MACEDO, I.C., SEABRA, J. E. A., SILVA J. E. A. R. **Greenhouse gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020.** Biomass and Bioenergy, 2008

MARTINOT, E. **Renewables Global Status Report.** Disponível em:

http://www.martinot.info/RE2007_Global_Status_Report.pdf . Acesso em janeiro de 2009.

MARTINS, L., D., ANDRADE, M., F. **Ozone formation potentials of volatile organic compounds and sensitivity to their emission in the megacity of São Paulo, Brasil.** Water, Air and Soil Pollution; v. 195. 2008.

MEIRA FILHO, L. G.; MACEDO, I. C. **Etanol e Mudança do Clima: A Contribuição para a PNMC e as metas para o Pós-Kyoto**. 2010. Esalque. Dezembro de 2010.

MELLO, E. H. **Ônibus movido a etanol: um estudo de caso**. São Paulo, 2008. Trabalho de Graduação. Universidade Presbiteriana Mackenzie.

METROPOLITANA, 2011. **Metropolitana Verde – ônibus a etanol**. Apresentação realizada por Nieve Chaves, na FETRANSPORT. Julho de 2011.

MILJOBILAR. STOCKHOLM. Site da prefeitura de Estocolmo. **Frequently Asked Questions**. 2007. Disponível em:
http://cenbio.iee.usp.br/download/projetos/Frequently_blad_low.pdf

MINISTÉRIO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA - MCT. **Relatório de Referência Emissões de Gases de Efeito Estufa por Fontes Móveis, no Setor Energético**. Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento – Coordenação Geral de Mudanças Globais de Clima. Brasília, 2006.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. **1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários**. Departamento de Mudanças Climáticas da Secretaria de Mudanças Climáticas e Qualidade Ambiental do Ministério do Meio Ambiente. 2011.

MORAN, M. J. SHAPIRO, H. N. **Princípios da Termodinâmica para Engenharia**. 4ª edição, Editora LTC, Rio de Janeiro, RJ, 2002.

MOREIRA, J. R. **Alcohols - Its Use, Energy And Economics. A Brazilian Outlook. Resources - Management and Optimization**, v. 1, n. 3, p. 231-279, 1981.

MOREIRA, J. R. **The Alcohol Program in Brazil**. Energy Policy, v. 27, p. 229-245, 1999.

MOREIRA, J. R. **Questões Sócio-Econômicas Relacionadas ao Etanol**. Primeiro Workshop Scania - Ônibus Movido a Etanol. São Paulo, 01 de outubro de 2007.

MOREIRA, J. R.; GOLDEMBERG, J.; COELHO, S. T.; BRAUMBECK, O.; CORTEZ, L. A. B.; HOFFMANN, R. ; MACEDO, I. C. ; PALETTA, C. E. M. ; PRETZ, R. ; WALTER, A. C. S. . **Geração de Energia a Partir de Biomassa (exceto resíduos do lixo e óleos vegetais)**. In: Maurício Tiomno Tolmasquin. (Org.). Fontes Renováveis de Energia no Brasil. Rio de Janeiro: Interciência, 2003, v. , p. 1-92.

MOREIRA, J. R.; TOTH, F. **Introduction. Brazil: A Country Profile on Sustainable Energy Development**. Vienna: The Agency, 2006, v., p. 1-16.

MORITA, A. K. M., CRNKOVIC, P. M. PAGLIUSO, J. D. HIRAI, E.. **Estudo comparativo das emissões de aldeídos na combustão de diesel e biodiesel em motores de combustão interna**. Sociedade Brasileira de Química – SBQ. 32ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química.

MOTTA, R.; NOTON, P. R. M., KELLY, K.; BATTELLE, K. C.; SCHUMACKER, L., CLARK, N. **Alternative fuel: Transit Bus - Final Results from the National Renewable Energy Laboratory Vehicle Evaluation Program**. Produced for the U.S. Department of Energy (DOE) by the National Renewable Energy Laboratory (NREL), a U.S. DOE National Laboratory. Outubro de 1996.

NATIONAL CLIMATE CHANGE , 2011. Disponível em <http://www.globalchange.gov/publications/reports/scientific-assessments/us-impacts/full-report/national-climate-change>. Acesso em Março de 2011.

NIGRO, F. E. B. **Etanol: nova opção para substituição de diesel**. Revista Opiniões 021-37, 2009. Disponível em <http://www.revistaopinioes.com.br/aa/materia.php?id=619>

NILSOLOF, N., ERKKILS, K., LAPPI, M., OKONEN, M. **Transit bus study: comparasion of emissions from diesel and natural gas buses**. Research Report. VTT Process. Outubro de 2004. Disponível em <http://www.vtt.fi/inf/pdf/jurelinkit/VTTNylund.pdf>. Acesso em 04 Dezembro de 2011.

NORD, K. **Particles and Unregulated Emissions from CI Engines Subjected to Emission**

Control. Division of Chemistry Department of Chemical Engineering and Geosciences Lulea University of Technology, Sweden. Tese de Doutorado, maio de 2005. Disponível em <http://epubl.ltu.se/1402-1544/2005/09/LTU-DT-0509-SE.pdf> Acesso em 22 de abril de 2012.

PACCA, S.; MOREIRA, J. R. **Historical carbon budget of the ethanol program.** Energy Policy, Volume 37, Issue 11, November 2009, Pages 4863-4873.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS - IPCC. **Direct Global Warming Potentials.** 2007. Disponível em http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch2s2-10-2.html

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS - IPCC. **Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation.** Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1075 pp. 2011.

PEARCE, D. **Foundations of an ecological economics.** Ecological Modelling, 1987.

PEREIRA, J. C. **Motores e Geradores – Princípios de Funcionamento, instalação, operação e manutenção de grupos diesel geradores.** Desenvolvimento de Motores DaimlerChrysler do Brasil Ltda. Disponível em http://www.joseclaudio.eng.br/grupos_geradores_1.html. Acesso em 11 de janeiro de 2011.

PIRES-NETO, R. C.; SALDIVA, P. H. N. ; DOLHNIKOFF, Marisa . **Efeitos da Poluição Atmosférica no Epitélio Respiratório das Vias Aéreas Superiores.** Effects of Air Pollution on the Upper Airways Respiratory Epithelium.. RBM. Revista Brasileira de Medicina (Rio de Janeiro), v. 2, p. 3-9, 2007.

POPE III, C. A.; DOCKERY, D. W. **Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect.** Air & Waste Manage Association, 2006. Disponível em <http://secure.awma.org/JOURNAL/pdfs/2006/6/2006criticalreview.pdf>

POPE III, C. A.; MAJID, E.; DOCKERY, D. W. **Fine-Particulate Air Pollution and Life Expectancy in the United States.** The New England Journal of Medicine – Special Article. January, 2009.

PREFEITURA DE SÃO PAULO. Disponível em:

http://portal.prefeitura.sp.gov.br/noticias/sec/rel_internacionais/2009/06/0007. Acesso em 29 de junho de 2009.

RECEITA FEDERAL. **Portal Tributário**. Disponível em

http://www.portaltributario.com.br/guia/pis_combustiveis.html. Acesso em 16 outubro de 2011.

REHNLUND, B.; EGEBACK, K.E.; RYDÉN, C.; AHLVIK, P. **BIO-Scopes - Heavy-duty ethanol engines**. Fevereiro de 2007. Disponível em

<http://ec.europa.eu/energy/renewables/biofuels/doc/standard/lot2.pdf>

REI, F. **Poluição Local e Regional**. Cadernos Fecomercio nº 34. São Paulo. Setembro, 2007.

RIVERAS, I. **Índia prevê nova boa safra de cana em 2011/12**. Outubro de 2010. Disponível em <http://oglobo.globo.com/economia/india-preve-nova-boa-safra-de-cana-em-201112-2935387> Acesso em 04 de janeiro de 2012.

ROCHA, T. M. **Aquecimento Global e o Mercado de Carbono: Uma Aplicação do Modelo CERT** (Tese de Doutorado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queirós, Universidade de São Paulo. Piracicaba. São Paulo, 2003.

SALDIVA, P. **Transporte, Sustentabilidade e Cidadania**. Boletim DNA Brasil, 2007. Disponível em www.dnabrasil.org.br. Acesso em 04 de março de 2008.

SALDIVA, P.; ANDRADE, M. F.; MIRAGLIA, S. G. E. K.; ANDRÉ, P. A. **Etanol e Saúde Humana – Uma abordagem a partir das emissões atmosféricas**. Novembro de 2009.

SANTOS, M. A.; MATAI, P. H. L. S. **Aspectos técnicos e ambientais relativos ao uso de biodiesel em motores de combustão**. Revista de Gestão Integrada em Saúde do Trabalho e Meio Ambiente – Interfacehs, 2006.

SÃO PAULO TRANSPORTES S.A. - SPTRANS. **Relatório de teste do ônibus Scania movido a etanol**. Dezembro de 1997.

SCANIA. **Scania vai testar ônibus movido a álcool em São Paulo.** Disponível em:

http://www.scania.com.br/sobre_scania/press_releases/05_press_releases/onibus_movido_a_a_lcool.asp Acesso em maio de 2007.

_____. 2008a. **Scania Extending Heavy-Duty Ethanol Engine Technology to Trucks.**

Disponível em: <http://www.greencarcongress.com/2008/04/scania-extendin.html>

_____. 2008b. **Engine Diagrams.** Site da Scania Inglesa. Disponível em

<http://www.scania.co.uk/Launch2007/enginediagrams.asp> Acesso em 10 de abril de 2008.

SCHNEIDER, C. G.; HILL, L. B. **Diesel and Health in America: The Lingering Threat.**

Clean Air Task Force. February, 2005.

SECRETARIA DE TRANSPORTES METROPOLITANOS DO ESTADO DE SÃO PAULO

– STMSP. Disponível em www.stm.gov.br. Acesso em 30 de novembro de 2008.

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE –SMA - Instituto Florestal do Estado de São Paulo.

Inventário Florestal da Vegetação Natural do Estado de São Paulo. São Paulo, 2007.

SEKAB (2008a). **Bioethanol for heavy vehicles** (2001). Disponível em

<http://www.sekab.com>. Acesso em 17 de março de 2008.

_____. 2008b. **Svensk Etanolkemi AB – Etamax D Composition.** Acesso em março de

2008. Disponível em: <http://www.miljobilar.stockholm.se>

SENNA, H. **Ônibus a Etanol – Apresentação do Motor.** Primeiro Workshop Scania -

Ônibus Movido a Etanol. São Paulo, 01 de outubro de 2007.

SEVITEST **Injeção Diesel. História do Motor Diesel.** Disponível em

http://www.serviteste.com.br/hist_diesel1.htm. Acesso em 11 de janeiro de 2011.

SILVA, C. R. U. **Balço de energia e das emissões de gases de efeito estufa da cadeia produtiva do etanol Brasileira**. Dissertação de Mestrado, UNICAMP – Universidade de Campinas, 2009.

SISTEMA DE TRANSPORTES METRA - METROPOLITANA. **Operacional - Linhas**. Disponível em http://www.metro.com.br/Operacional_Linhas.php Acesso em 30 de agosto de 2008.

SOUZA, E. L. L.; MACEDO, I. C. coord e org. **Etanol e Bioeletricidade. A cana-de-açúcar no futuro da matriz energética**. UNICA – União da Indústria de Cana-de-açúcar. São Paulo, 2010.

SZWARC, A. **Potencial Energético do Etanol e suas Vantagens Ambientais**. Aula ministrada no curso de Especialização em Gestão Ambiental e Negócios no Setor Energético. Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo, 25 de setembro de 2007.

TASCHETTO, A. S. **O Impacto dos gases estufa nas variáveis de superfície ar-mar através de um modelo acoplado de circulação geral**. (Dissertação de Mestrado). Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. 14º COBEM – Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica. Bauru, 1997.

UNICA - União da Indústria de Cana de Açúcar. **Ônibus a etanol – Uma solução para o Estado de São Paulo**. Novembro de 2010.

_____(2011a) **Produção de etanol no Brasil**. Disponível em: <http://www.unica.com.br/dadosCotacao/estatistica/>. Acesso em 17 de janeiro de 2011.

_____(2011b) **Ônibus a etanol – Uma solução para o Estado de São Paulo**. Disponível em: <http://www.globalchange.gov/publications/reports/scientific-assessments/us-impacts/full-report/national-climate-change>. Acesso em 04 de janeiro de 2012.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE - UNFCCC. **Glossary of CDM term – 2009**. Disponível em http://cdm.unfccc.int/Reference/Guidclarif/glos_CDM.pdf

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE - USDA. **Estimating the Net Energy Balance of Corn Ethanol**. Relatório de Shapouri, H., Duffield, J.A., Graboski, M.S. U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service, Office of Energy. Agricultural Economic Report No. 721. July, 1995. Disponível em: <http://www.ers.usda.gov/publications/aer721/AER721.PDF>, acesso em Setembro de 2012.

VELÁZQUEZ, S. M. S. G. **Perspectivas para a Geração de Excedentes de Energia Elétrica no Segmento de Papel e Celulose com a Utilização de Sistemas de Gaseificação/turbina a gás**. 2006. 261p. Tese (Doutorado em Energia) – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, 2006.

VENTURA, L. M. **Emissões de Veículos a Diesel – Ações para Atendimento aos Novos Limites do Proconve Fase 7**. Outubro 2009.

VERGNAHNINI, R; USHIMA, A. H. **Formação de Poluentes em Processos Industriais de Combustão** (mimeografado). Curso de “Uso de Energia na Indústria: Racionalização e Otimização”. IPT - Instituto de Pesquisa Tecnológica. São Paulo, 1996.

WEITMANN, K., MENRAD, H., REDERS, K., HUTCHESON, R.C. (1988). **Diesel Fuel Quality Effects on Exhaust Emissions**, SAE paper, 881649.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION - WMO. **Global Framework for Climate Services (GFCS): Climate Information for Sustainable Development**. Durban, South Africa. December 2011.

ZENO, R. **Definindo Os Mercados Primário E Secundário**. Artigonal – Diretório de Artigos Gratuítos. Julho de 2008. Disponível em <http://www.artigonal.com/investimentos-artigos/definindo-os-mercados-primario-e-secundario-483417.html> Acesso em 03 de janeiro de 2012.

APÊNDICE A - Princípio de Funcionamento dos Motores Ciclo Diesel

1. Motores Ciclo Diesel

Os motores ciclo diesel também são conhecidos como motores de ignição por compressão. No ciclo diesel o ar é previamente comprimido até que atinja temperatura e pressão suficientes para que o combustível, que é injetado no final do tempo de compressão, se inflame por auto-ignição. O motor ciclo diesel não necessita de alguns dispositivos elétricos presentes nos motores ciclo Otto, tais como velas de ignição, alternadores, distribuidor e cabos de vela (GRANET, 1975). Os sistemas que constituem os motores diesel são sistema de admissão de ar, sistema de combustível (incluindo sistema de injeção de combustível), sistema de lubrificação, sistema de arrefecimento, sistema de exaustão e sistema de partida.

O fato de que somente o ar é comprimido no ciclo de compressão permite que no motor de ciclo diesel seja utilizada uma relação de compressão muito maior do que a utilizada em motores de ciclo Otto. Define-se taxa de compressão como a razão entre o volume interno do cilindro com o pistão no ponto morto inferior (PMI), e o volume interno do cilindro com o pistão no ponto morto superior (PMS).

Segundo Granet (1975), os motores ciclo diesel, bem como os motores ciclo Otto, são motores de combustão interna de quatro ciclos (quatro tempos). O funcionamento do ciclo diesel se processa da seguinte maneira:

No **primeiro tempo**, com o pistão em movimento descendente, dá-se a admissão, que se verifica por aspiração apenas do ar (nos motores ciclo Otto a aspiração é da mistura ar-combustível). Nos motores diesel mais modernos uma ventoinha empurra a carga de ar para o cilindro, a turbocompressão.

No **segundo tempo** ocorre a compressão com o pistão em movimento ascendente. Pouco antes de o pistão completar o curso, há a injeção do combustível e ocorre a auto-ignição.

No **terceiro tempo**, com o pistão em movimento descendente, tem-se a queima completa do combustível com a expansão dos gases e transferência de energia para o pistão.

No **quarto tempo** o pistão em movimento ascendente empurra os gases de escape para atmosfera.

Durante os quatro tempos (duas rotações) transmitiu-se trabalho ao pistão uma única vez. Para fazer com que as válvulas de admissão e escoamento funcionem corretamente,

abrindo e fechando as passagens nos momentos exatos, o eixo de cames gira meia rotação do motor, completando uma volta a cada ciclo de quatro tempos (PEREIRA, 2011).

A seguir, a Figura 01 apresenta um desenho esquemático do funcionamento de um motor diesel quatro tempos.

Figura 01 – Esquema motor diesel quatro tempos

Fonte: PEREIRA, 1999.

O motor a diesel não tem vela, ele aspira o ar e o comprime, e então injeta o combustível diretamente na câmara de combustão (injeção direta). É o calor do ar comprimido que inflama o combustível num motor a diesel.

Em um motor a diesel o injetor é o componente mais complexo e pode ser colocado em diversos lugares. O injetor tem que ser capaz de suportar a temperatura e a pressão dentro do cilindro e ainda passar o combustível como uma fina névoa. Fazer a mistura circular no cilindro de maneira uniformemente distribuída também é um problema, de modo que alguns motores a diesel utilizam válvulas de admissão especiais, câmaras de pré-combustão ou outros dispositivos que produzam um turbilhão de ar na câmara de combustão ou, de alguma forma, melhorem o processo de ignição e combustão (BRAIN, 2011).

Uma variante dos motores diesel quatro tempos é o motor diesel dois tempos. Neste motor, o ciclo motor abrange apenas uma rotação, ou seja, dois cursos do pistão. A exaustão e a admissão não se verificam e são substituídas, como segue:

- Exaustão dos gases residuais, por meio da abertura da válvula de escape no fim do curso do pistão;
- Substituição da exaustão pelo percurso com ar pouco comprimido (os gases são expulsos pela ação da própria pressão);

- Fechamento da válvula, o ar que ainda permanece no cilindro, servirá para a combustão;
- Curso do motor é reduzido e o gás de exaustão permanece na câmara e é misturado ao ar admitido.

Como principal vantagem tem-se que o motor dois tempos dá maior potência que o motor quatro tempos e o torque é uniforme. Já as desvantagens são a necessidade de bombas especiais de exaustão e carga, maior consumo de combustível e carga calorífica maior quando comparado a um motor quatro tempos de mesmo dimensionamento, além da grande emissão de gases na atmosfera (PEREIRA, 2011).

Os motores dois tempos são usados, principalmente, em moto-serras, tratores de jardinagem e vários outros pequenos utilitários.

Com relação às questões ambientais, a necessidade de diminuir as emissões de gases dos veículos automotores, para atendimento aos limites regulamentados pelo CONAMA, demanda, além da melhoria do processo de combustão e tratamento dos gases de escape dos atuais motores, a melhoria das características técnicas dos combustíveis.

Dentre as diferentes tecnologias e estratégias adotadas por diferentes fabricantes de motores, pode-se destacar a redução dos Óxidos de Nitrogênio (NOx) e da emissão de Material Particulado (MP).

Para redução dos valores de NOx, efetuando-se modificações no processo de combustão, é importante trabalhar visando à redução da temperatura da chama. A principal consequência é o aumento do consumo de combustível. Em contrapartida, é possível otimizar o consumo de combustível e ao mesmo tempo diminuir os valores de material particulado desde que a emissão de NOx seja tratada fora do ambiente de combustão (LEAL, 2008).

A redução de hidrocarbonetos (HC) e monóxido de carbono (CO) deve ser obtida pelo aumento da eficiência da combustão, já que estes componentes são formados no processo de combustão incompleta.

Também é possível efetuar-se o tratamento dos gases fora do ambiente de combustão combinando-se técnicas de filtragem de partículas com técnicas de redução de NOx, CO e HC. A eficiência de tal combinação é, contudo, dispendiosa e nem sempre de alta eficiência (LEAL, 2008).

Segundo Leal (2008), pode-se deduzir que o melhor sistema de tratamento de emissões gasosas será aquele que:

- a) Efetua o tratamento das emissões diretamente na fonte;
- b) Maximiza a eficiência de queima de combustível;

- c) Utiliza combustível com propriedades químicas e físicas adequadas a alta performance.
- d) E, quando necessário, por processos de pós-tratamento dos gases de escape, confiáveis e capazes de manter alta eficiência por longos períodos de utilização;
- e) Transforma o mínimo possível de energia em sistemas auxiliares.

A seguir, é apresentado um esquema de algumas possibilidades de desenvolvimento de melhorias para redução das emissões em motores diesel.

Figura 02 – Esquema das melhorias para redução das emissões em motor diesel

Fonte: LEAL, 2008.

1.1 Tratamento para redução de Material Particulado (MP).

1.1.1 Tratamentos internos ao motor para redução de material particulado (MP)

Para a redução da emissão de material particulado há a necessidade de melhorar a combustão. Para tal, algumas modificações/adaptações podem ser efetuadas como o redesenho da câmara de combustão, adiantamento do ponto de injeção, aumento da pressão de injeção, otimização do direcionamento dos jatos de injeção e/ou utilização de pré-injeção.

Conforme apresentado na Figura 02, algumas melhorias no combustível trazem melhorias e redução das emissões de material particulado. As principais características presentes no diesel que afetam as emissões de MP são:

Teor de Enxofre: a redução do teor de enxofre de 500 para 30 ppm resulta em uma redução de 7% de emissão de particulados em motores com consumo de 200 g/kWh e de até 9% em motores com consumo de 270 g/kWh (WORLD-WIDE FUEL CHAPTER, 2000⁴³ apud PEREIRA, 2001).

Curva de destilação: a formação de resíduos de carbono e o aumento das emissões de fuligem, fumaça e material particulado deve-se a frações mais pesadas da destilação (temperatura entre 95 e 360°C). Daí a necessidade de diesel com melhores características de curva de destilação.

Concentração de aromáticos: Hidrocarbonetos aromáticos são geralmente compostos caracterizados por apresentar como cadeia principal um ou vários anéis benzênicos. A redução de 9 para 1% na concentração de poli-aromáticos reduz em 6,5% a emissão de MP em veículos leves e de 4% em motores diesel pesados (PEREIRA, 2011).

Densidade: a redução da densidade de 855 para 828 kg/m³ gerou redução de 18% de emissões de MP em motores leves e 3% em motores diesel pesados (WORLD-WIDE FUEL CHAPTER, 2000⁸ apud PEREIRA, 2011).

1.1.2 Tratamentos externos ao motor para redução de material particulado (MP)

Para o tratamento externo ao motor visando à redução de emissão de material particulado temos dois filtros, apresentados a seguir.

⁴³ World-Wide Fuel Chapter, 2000.

Filtro de partículas ou Diesel Particulate Filter (DPF): são filtros de passagem total, construídos em três diferentes versões, com materiais diferentes, cordierite, silício e metal sintetizado.

Filtro de regeneração passiva e contínua ou Continuously Regenerative Trap (CRT): este filtro converte fuligem em CO_2 . Utilizando diesel com elevado número de cetano (Cetano 60), baixo teor de enxofre ($< 10 \text{ ppm}$) e baixa concentração de aromáticos ($< 10\% \text{ vol.}$), conseguiu-se alcançar índices de até 95 % de redução de PM.

1.2 Tratamentos para redução de óxidos de nitrogênio (NO_x).

1.2. 1 Tratamentos internos ao motor para redução de Óxido de Nitrogênio (NO_x)

A formação de NO_x está diretamente ligada a temperatura da chama. As principais modificações/adaptações para redução da formação do NO_x seriam o atraso do ponto de ignição e a utilização da recirculação dos gases de escape (EGR).

Recirculação dos Gases de Escape - EGR

Do inglês *Exhaust Gas Recirculation (EGR)*, é uma técnica de redução de emissão de NO_x utilizada em motores diesel. O EGR funciona por meio do resfriamento e reinjeção, na câmara de combustão, de parte dos gases de escape. O gás de exaustão substitui parte do ar e a combustão desta mistura alcançará temperatura mais baixa. Em contrapartida, o rendimento do motor diminui. É possível observar redução da ordem de 12% na potência por litro de cilindrada em motores pesados que utilizam EGR de alta recirculação (PEREIRA, 2011). Já, segundo Branco (2006) o motor sofre uma redução do seu rendimento térmico, entretanto, as reduções de NO_x em decorrência da utilização do sistema EGR é da ordem de 25% até 40%. O emprego do EGR requer cuidados especiais no projeto do motor, pois haveria a tendência de aumento do consumo de combustível em decorrência da perda de rendimento. Então, para esse controle o EGR é minimizado em regimes de potência e torque elevados (BRANCO, 2006).

Apesar do sistema EGR também ser utilizado em motores ciclo Otto, é utilizado mais amplamente em motores ciclo diesel, pois as emissões de NO_x destes motores são de maior expressão.

A influência de redução de NO_x depende da taxa de recirculação de gases. Quanto mais alta esta taxa menor será a emissão de NO_x , contudo em altas taxas de recirculação ocorrerá também o aumento da emissão de material particulado. Tem-se, então, que o EGR é

uma solução de compromisso e que seu pleno efeito depende também de outras alterações no motor, visando à maximização dos ganhos.

É necessário prever que para o resfriamento dos gases de escape antes da sua admissão na câmara de combustão, como parte do sistema EGR, ocorre o processo de troca térmica entre estes gases e o sistema de arrefecimento do motor. Em geral, aproximadamente 10% da vazão do líquido refrigerante é desviada para o trocador de calor do EGR. Consequentemente, um aumento na carga térmica do sistema de arrefecimento deve ser previsto.

Motores equipados com esta tecnologia necessitam de diesel com baixo teor de Enxofre (máximo de 50 ppm). Isto se deve a grande quantidade de tubos de calor presente no trocador de calor do sistema EGR onde escoam os gases e líquidos refrigerantes. O sistema sofre variações muito bruscas de temperatura e pressão e quando submetido a resíduos gasosos com alta concentração de enxofre pode necessitar a aplicação de materiais nobres e caros, podendo inviabilizar seu uso.

Conforme apresentado anteriormente, algumas melhorias no combustível trazem melhorias e redução das emissões de óxido de nitrogênio. As principais características presentes no diesel que afetam as emissões de NOx são:

Número de cetano: o numero de cetano é o indicador do comportamento do combustível para a auto-ignição sobre pressão. Um baixo numero de cetano induz dificuldades de partida a frio, aumenta a emissão de poluentes e o nível de ruído de combustão.

Concentração de aromáticos: presença de aromáticos aumenta a temperatura da chama, consequentemente influencia o aumento da emissão de NOx. Redução de 30 para 10% na concentração total de aromáticos possibilita redução de 5,5% de NOx em motores diesel leves e de 4 % em motores diesel pesados (PEREIRA, 2011).

Densidade: Uma redução de 855 para 828 kg/m³ proporciona redução de ate 4,5% na emissão de NOx. Altas cargas no motor exigem maior massa de combustível, o que provoca picos de alta pressão e temperatura na câmara de combustão, favorecendo a formação dos óxidos de nitrogênio. Assim, as emissões de NOx estão relacionadas com a massa de combustível injetado. Observa-se, também, que as emissões de NOx estão diretamente relacionadas com a potência desenvolvida pelo motor. Quando a potência é aumentada, a emissão de NOx também aumenta, e quando se opera o motor em potências moderadas, as emissões de NOx diminuem. Porém, diferentemente das emissões de CO, que se mantêm praticamente constantes em potências moderadas, as emissões de NOx tendem a ser

diretamente proporcionais à potência desenvolvida em faixas moderadas. Este efeito ocorre pelo fato de as emissões de NOx estarem relacionadas diretamente com os picos de pressão e temperatura na câmara de combustão. Quando a potência está decrescendo, a quantidade de combustível é reduzida e isso resulta também na redução da emissão de NOx. Assim, observa-se que a emissão de NOx é proporcional à massa de combustível injetado (SANTOS; MATAI, 2006).

1.2.2 Tratamentos externos ao motor para redução de Óxido de Nitrogênio (NOx)

Existem atualmente três possibilidades de tratamento:

- Catalisador passivo;
- Catalisador de acumulação de NOx – Diesel NOx;
- Catalisador de Redução Seletiva – SCR.

Catalisador passivo: Possui baixa eficiência de conversão de NOx. Estes catalisadores são mais utilizados em carros de passeio e aplicações de motores diesel leves.

Catalisador de acumulação de NOx: Na primeira etapa este catalisador absorve o NO, depois transforma o NO em NO₂ e por fim as moléculas de NOx reagem com os hidrocarbonetos não queimados e com moléculas de CO para formar N₂ e CO₂.

Catalisador de Redução Seletiva (SCR): Este sistema utiliza injeção de Uréia no fluxo do gás de escape após a saída do turbo compressor. A Uréia fornecerá a Amônia necessária para redução dos diferentes poluentes. A reação é, basicamente

Óxidos de Nitrogênio + Oxigênio + Amônia → Nitrogênio + Água

Os elementos catalisadores presentes são óxido de titânio (TiO₂), óxido de vanádio (V₂O₅) e óxido de tungstênio (WO₃).

Este sistema permite tratar os Óxidos de Nitrogênio no lado externo do motor e desta forma otimizar a combustão para buscar uma grande redução dos materiais particulados, mantendo-se o consumo de combustível em patamares aceitáveis e reduzindo-se as trocas térmicas de sistemas auxiliares. Este sistema é o único, de todos apresentados, que resiste a diesel com teor de enxofre de 500 ppm. (PEREIRA, 2011).

2.1 Taxa de Compressão

A taxa de compressão de um motor é uma razão matemática entre os volumes interno do cilindro com o pistão no Ponto Morto Inferior (PMI) e o volume do cilindro com o pistão no Ponto Morto Superior (PMS). A taxa de compressão indica quantas vezes o ar aspirado para dentro do motor é comprimido no cilindro de combustão, conforme a Figura 3. No motor ciclo diesel movido a etanol aditivado, cuja taxa de compressão é de 28:1, o ar é comprimido 28 vezes para que se atinja a temperatura de auto-ignição do etanol aditivado, que é igual a 360°C (GREENENERGY, 2000). A alta taxa de compressão do motor ciclo diesel movido a etanol aditivado justifica-se como uma compensação do baixo número de cetano do combustível, Etamax D, que é igual a 10 (SEKAB, 2001).

Figura 3 - Motor com taxa de compressão de 8:1.

Fonte: ALMEIDA, 2001.

Do ponto de vista termodinâmico, a taxa de compressão é responsável pelo rendimento térmico do motor, o que significa que o aproveitamento energético do combustível será tão grande quanto a taxa de compressão envolvida no ciclo termodinâmico (Figura 4). Tal constatação justifica a vantagem, no que diz respeito ao rendimento energético, que o ciclo Diesel possui sobre o ciclo Otto, cuja taxa de compressão envolvida é menor (MORAN; SHAPIRO, 2002).

Figura 4 - Eficiência Térmica do ciclo Diesel segundo a taxa de compressão.

Fonte: MORAN; SHAPIRO, 2002.

APÊNDICE B - Síntese da Legislação Brasileira sobre o Controle de Emissões Atmosféricas Veiculares

Com base nas informações, do site Despoluir – Programa Ambiental do Transporte (2011), é apresentada a seguir uma síntese da legislação brasileira sobre o controle de emissões atmosféricas veiculares.

Resolução CONAMA nº 18/86: Institui o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores - PROCONVE.

Resolução CONAMA nº 05/89: Institui o Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar - PRONAR.

Resolução CONAMA nº 03/90: Estabelece padrões de qualidade do ar, aumentando o número de poluentes atmosféricos passíveis de monitoramento e controle no país.

Resolução CONAMA nº 07/93: (Retificação publicada no DOU de 21.10.93 / Alterado pela Res. CONAMA 227/97): Define as diretrizes básicas e padrões de emissão para os Programas de Inspeção e Manutenção de Veículos em Uso - I/M.

Resolução CONAMA nº 08/93: (Retificação publicada no DOU de 21.10.93) Atualiza o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores - PROCONVE, com relação a veículos pesados, e dá outras providências.

Lei nº 8.723, de 28 de outubro de 1993: Dispõe sobre a redução de emissão de poluentes por veículos automotores e dá outras providências.

Resolução CONAMA nº 14/95: (Retificação publicada no DOU de 03.04.96): Atualiza o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores - PROCONVE, com relação à durabilidade das emissões.

Resolução CONAMA nº 15/95: (Retificação publicada no DOU 03.04.96): Atualiza o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores - PROCONVE, com relação a veículos leves de passageiros e leves comerciais.

Resolução CONAMA nº 16/95: Atualiza o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores - PROCONVE, com relação à fumaça em aceleração livre para veículos a diesel.

Resolução CONAMA nº 18/95: Cria o Plano de Controle da poluição do Ar por Veículos em Uso - PCPV.

Portaria IBAMA nº 086/96: Regulamenta os procedimentos para importação de veículos automotores e motocicletas quanto aos requisitos do PROCONVE.

Resolução CONAMA n° 226/97: Determina limites máximos de emissão de material particulado para motores do ciclo Diesel; aprova especificações do óleo diesel comercial e dá outras providências.

Lei n° 9.503, de 23 de setembro de 1997: Institui o Código Nacional de Trânsito e dá providências relativas ao controle de emissões veiculares (arts. 104 e 131).

Resolução CONTRAN n° 84/98: Estabelece diretrizes para inspeção de segurança veicular. Obs.: vigência suspensa pela Resolução n° 107 de 21 de dezembro de 1999).

Resolução CONAMA n° 241/98: Determina prazos para cumprimento das exigências relativas ao PROCONVE para os veículos importados.

Resolução CONAMA n° 242/98: Determina o limite máximo de emissão de material particulado para veículo leve comercial, alterando parcialmente a Resolução CONAMA n° 15/95, e dá outras providências.

Resolução CONAMA n° 251/99: Estabelece critérios, procedimentos e limites máximos de opacidade da emissão de escapamento para avaliação do estado de manutenção de veículos automotores do ciclo Diesel, a serem utilizados em programas de Inspeção e Manutenção (I/M).

Resolução CONAMA n° 256/99: Dispõe sobre o Plano de Controle da Poluição por Veículos em Uso - PCPV.

Resolução CONAMA n° 315/2002: Dispõe sobre a nova etapa do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores - PROCONVE.

Resolução CONAMA n° 403/2008: Dispõe sobre a nova fase de exigência do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE para veículos pesados novos (Fase P-7) e dá outras providências.

O Termo de Ajustamento de Conduta - TAC, celebrado entre MPF, estado de São Paulo, IBAMA, ANP, Petrobrás, Fabricantes de Veículos, Fabricantes de Motores e CETESB, com o objetivo de estabelecer as obrigações de cada parte com relação as emissões atmosféricas que seriam evitadas com a comercialização de motores e de veículos leves comerciais e pesados a óleo diesel adequados aos limites estabelecidos na Resolução CONAMA 315/2002. Uma discussão mais detalhada sobre este TAC e a nova fase do Proconve será realizada no Capítulo 05.

Resolução CONAMA n° 415/2009: Dispõe sobre nova fase (PROCONVE L6) de exigências do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores - PROCONVE para veículos automotores leves novos de uso rodoviário e dá outras providências.

Resolução CONAMA nº 418/2009: Dispõe sobre critérios para a elaboração de Planos de Controle de Poluição Veicular - PCPV e para a implantação de Programas de Inspeção e Manutenção de Veículos em Uso - I/M pelos órgãos estaduais e municipais de meio ambiente e determina novos limites de emissão e procedimentos para a avaliação do estado de manutenção de veículos em uso.

APÊNDICE C - Histórico do projeto BEST e Resultados dos Testes em Campo

1. Histórico do Projeto BEST

Além das reuniões ocorridas durante o ano de 2005 em outros países que desenvolveram o projeto, em 18 de novembro de 2005 a equipe do Cenbio se reuniu com técnicos da Scania, SPTrans e Secretaria Municipal de Transportes para apresentar o projeto BEST e tratar da substituição do motor diesel existente nos ônibus Scania brasileiros pelo motor movido a etanol a ser importado da Suécia, a necessidade da parceria com a Unica para a construção do reservatório e o fornecimento do etanol, além de definir o fabricante da carroceria e as possíveis operadoras.

Outra reunião ocorreu em fevereiro de 2006, entre os mesmos participantes da reunião anterior, e foram sugeridas as empresas Marcopolo e Busscar para construir a carroceria. A Scania decidiu não repotenciar o motor no chassi nacional e a SPTrans não havia encontrado operadora interessada em participar do projeto.

Em abril de 2006, ocorreu um encontro entre Cenbio e EMTU/SP para apresentação do projeto. A EMTU/SP informou que a operadora METRA possuía 25 ônibus Scania e que seria consultada quanto ao interesse em participar do projeto. Enquanto isso, nova reunião com a Scania foi agendada, agora com a área Institucional do Produto para apresentação do projeto e a Scania explicou o desinteresse no projeto devido à necessidade de apoio governamental. Entretanto, tomou conhecimento da existência de uma nova geração do motor sendo desenvolvida na Suécia.

O Cenbio, então, em setembro de 2006, agendou reunião com o Secretário de Meio Ambiente do Estado de São Paulo, José Goldemberg, que sinalizou com a participação do governo no sentido de incentivar o uso do ônibus movido a etanol, caso os testes se apresentem favoráveis.

Em outubro de 2006, a Unica foi consultada quanto à possibilidade de doação do etanol e construção/aluguel de tanque para o combustível. Na ocasião, orientou quanto à busca do fabricante do aditivo.

Neste ínterim, a Scania concordou em importar o chassi e o motor da Suécia, a Marcopolo em construir a carroceria, a EMTU/SP em operar o ônibus por meio da concessionária METRA, a Unica em fornecer o etanol e uma minuta de convênio estava em processo de elaboração.

Por meio de contato realizado com representante da BAFF, no Brasil, obteve-se da SEKAB a doação do aditivo. Havia, então, a necessidade de importá-lo e misturá-lo ao etanol, além de distribuir o combustível pronto na operadora.

O envolvimento da Petrobrás foi fundamental para a realização dos testes de demonstração, bem como pela necessidade que o projeto teve de mostrar que o combustível aditivado estaria disponível e poderia ser encontrado e comprado em qualquer ponto do Brasil. Tal procedimento só pode ser realizado pela Petrobrás para que as operadoras tenham a segurança de abastecimento e só assim teriam essa certeza.

Devido à quantidade de parceiros envolvidos e à burocracia dos procedimentos na Petrobrás, foi solicitado a Copersucar que importasse o primeiro lote de aditivo, para que os testes de montagem da carroceria pudessem ser realizados.

Para que se possa compreender melhor as atividades de cada parceiro envolvido no projeto, a seguir encontram-se descritas as responsabilidades de cada um dos envolvidos. Estas responsabilidades fizeram parte de um convênio assinado entre todos os parceiros.

- FUSP⁴⁴: Avaliar comparativamente o consumo de combustível, desempenho e ocorrências, durante a operação de um veículo movido a etanol e um veículo movido exclusivamente a diesel, em uma linha específica, por um período de 12 meses, em corredor da EMTU/SP e SPTrans. Realizar evento de lançamento do projeto BEST, com a colaboração dos demais parceiros. Desenvolver tratativas junto diferentes instituições públicas e privadas para incentivar/viabilizar a adoção dos ônibus a álcool na RMSP e em outras cidades do estado de São Paulo
- EMTU/SP: integrar a operadora METRA para disponibilizar os veículos; fornecer os dados necessários para a análise, além de facilitar o acesso dos técnicos do FUSP à garagem e aos veículos. Acompanhar o desenvolvimento do projeto e mediar os entendimentos entre os parceiros.
- Scania: Importar o ônibus a etanol da Suécia e realizar as revisões periódicas no veículo.
- UNICA: Viabilizar o fornecimento do etanol para a realização dos testes.
- MARCOPOLLO: Viabilizar o fornecimento da carroceria.
- CONPET⁴⁵: Importar o aditivo.

⁴⁴ O CENBIO foi representado pela FUSP – Fundação de Apoio à Universidade de São Paulo.

⁴⁵ A Petrobrás foi representada por meio do CONPET - Programa Nacional de Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural.

- BR Distribuidora: Misturar o aditivo ao etanol e entregar o combustível misturado na operadora METRA e na operadora da SPTrans a ser indicada. Fornecer o tanque de combustível para armazenagem do etanol nas operadoras.
- COPERSUCAR: Importar 950 l de Etamax D para os testes iniciais.

O chassi do ônibus Scania embarcou, na Suécia, no dia 9 de abril e chegou ao Brasil, no porto de Santos, por volta do dia 2 de maio (Figuras 1 e 2).

Figura 1 - Chassi do ônibus movido a etanol chegando no Porto de Santos.

Figura 2 - Chassi do ônibus movido a etanol chegando no Porto de Santos.

Em quatro semanas o chassi foi enviado à Marcopolo, no Sul do país, para o encarroçamento, conforme Figuras 3 a 5.

Figuras 3 - Chassi sendo encarroçado na Marcopolo

Figuras 4 - Chassi sendo encarroçado na Marcopolo

Figuras 5 - Chassi sendo encarroçado na Marcopolo

A BAFF, apesar de não estar no Convênio assinado entre os parceiros, foi responsável por intermediar os contatos com a SEKAB para o fornecimento do aditivo. Um primeiro problema encontrado foi que a SEKAB só exportava o etanol aditivado (ED95). Como o etanol fornecido pela SEKAB é produzido no Brasil e exportado para a Suécia, a equipe técnica do projeto não viu a necessidade de importar o etanol aditivado e solicitou a importação somente do aditivo. Isto causou vários atrasos na negociação com a SEKAB. Após um longo período, a SEKAB decidiu exportar para o Brasil o aditivo diluído em 50% de etanol. A principal alegação era que o aditivo possui características explosivas e o seu transporte e manuseio, sem qualquer diluição poderia trazer problemas.

Enquanto isso, a BAFF intermediou os contatos com a SEKAB para aquisição do aditivo, EMTU e BR definiram as dimensões da bomba e do depósito de combustível além de infraestrutura na garagem e os departamentos de Comunicação e Marketing das empresas envolvidas devolveram os folders e prepararam o evento de lançamento do projeto.

A SPTrans tomou conhecimento do andamento do projeto e entrou na parceria. Como o ônibus tem 12 metros e porta de um único lado, devido à proposta de testá-lo exclusivamente nos corredores da EMTU, o impossibilita de circular nos corredores de São Paulo, nos quais os ônibus necessitam ter portas dos dois lados. Neste contexto, a SPTrans

deveria indicar as linhas em que o ônibus poderiam circular, nestas condições, durante dois meses.

A equipe da EMTU/SP, depois de discussões entre os parceiros, elaborou duas propostas para adesivagem do ônibus e a Figura 6 abaixo, mostra o modelo de adesivagem que foi aprovada por todos os parceiros.

Figura 6 - Proposta de pintura/adesivagem do ônibus movido a etanol.

Em 1 de outubro de 2006, foi realizado um workshop, na Scania, para que cada parceiro fizesse uma apresentação de sua empresa, de interesses relacionados ao projeto, das questões socioeconômicas relacionadas ao etanol, para uniformização da linguagem. Na ocasião, foi feita uma visita à fábrica da Scania.

Foi realizada consulta à Agência Nacional de Petróleo – ANP, com relação à utilização do combustível etanol aditivado. Na ocasião verificou-se que a Portaria ANP nº 240/03, em vigor, isenta de autorização os consumos inferiores a 2.000 kg/mês de combustível não especificado. Sendo assim, não houve problema com relação ao uso experimental para o ônibus movido a etanol, uma vez que o consumo esperado, de 800 litros, corresponderia a cerca de 650 kg de combustível, abaixo dos 2.000 kg mensais previstos na Portaria sendo, portanto, isentos de autorização.

Entretanto, tal portaria foi revogada pela Resolução ANP Nº 19, de 22/06/2007 – DOU 25/06/2007, que estabelecia a obrigatoriedade da autorização prévia da ANP para utilização de combustíveis não especificados no país, destinados ao uso experimental, caso o consumo mensal superasse 10.000 litros.

Como o consumo previsto para o ônibus é de aproximadamente 70.000 litros por ano, certamente o limite da resolução não seria atingido.

Ficou acordado entre os parceiros do projeto que o ônibus iria circular durante um ano no estado de São Paulo, a partir de dezembro, como teste para demonstração de viabilidade, no corredor Jabaquara - São Mateus, com parada em nove terminais e atendimento a quatro municípios: São Paulo, Diadema, São Bernardo do Campo e Santo André.

Figura 7 - Corredor Jabaquara – São Mateus.

Figura 8 - Corredor Jabaquara – São Mateus.

O Corredor Jabaquara – São Mateus, conforme esquematizado nas Figuras 9 e 10, tem 33 km de extensão em operação e, na ocasião, 11 km em construção, onde se localizam 11 linhas em 9 terminais. Possui 22 km eletrificados e transporta 6 milhões de passageiros por mês em uma frota composta por 195 ônibus

Figura 9 - Corredor Jabaquara - São Mateus.

Figura 10 – Detalhamento da linha Jabaquara – São Mateus

Fonte: Sistema de Transportes Metra- Metropolitana, 2008.

O veículo foi incorporado à frota da operadora Metra - Sistema Metropolitano de Transporte, indicada pela EMTU/SP e, posteriormente, seria incorporado durante dois meses a mais uma operadora escolhida pela SPTrans, que gerencia o transporte de ônibus na capital paulista. No período de teste, o ônibus foi comparado a outro do mesmo modelo movido a diesel.

Após o encarroçamento do ônibus, definição da linha de operação, entre outros, a Copersucar efetuou a importação do primeiro lote de etanol aditivado.

O primeiro lote de etanol aditivado (E95), importado da Suécia, foi de 9.500 litros e veio armazenado em 10 containers de 950 litros, como mostra a Figura 11.

Figura 11 – Imagem dos containers de E95

Após a chegada do primeiro lote de combustível, a equipe do Cenbio se responsabilizou pela organização do evento de lançamento do Projeto BEST. Para tal, foi cedido o auditório da Escola Politécnica da USP, o serviço de gravação do evento com apresentação simultânea no site da USP, o cerimonial da Reitoria, incluindo o mestre de cerimônias, a equipe de jornalismo da universidade e os serviços de segurança para isolamento da área onde seria montado um posto de abastecimento simbólico da Petrobrás e receberia o ônibus, além de área para a imprensa.

A pauta do evento foi elaborada sob orientação do mestre de cerimônias, bem como o convite, que foi distribuído para autoridades do Governo Federal, Estadual e Municipal, para empresas relacionadas a todos os parceiros, universidades, além de professores e alunos do Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia – PIPGE, do IEE/USP.

A imagem do ônibus aprovada pelos parceiros passou a ser a imagem oficial do ônibus utilizada em todo material de divulgação elaborado.

Estiveram presentes na cerimônia aproximadamente 300 pessoas. Entre as personalidades pode-se citar Gilberto Kassab, Prefeito da cidade de São Paulo, Dilma Seli Pena, Secretária de Energia e Saneamento do Estado de São Paulo, representando o Governador do Estado José Serra, Eduardo Jorge, Secretário do Verde e Meio Ambiente da cidade de São Paulo, Alexandre de Moraes, secretário de Transportes da cidade de São Paulo, Fernando Rei, presidente da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB, da Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo, Franco

Maria Lajolo, vice-reitor da Universidade de São Paulo, representando a Reitora Suely Vilela, José Goldemberg, ex-Reitor da Universidade de São Paulo e ex- Secretário de Meio Ambiente do Estado de São Paulo, entre outras. A seguir, são apresentadas algumas fotos do dia do evento.

Figura 12 - Apresentação do projeto pelo Prof. José Roberto Moreira

Figura 13 - Composição da mesa pelas autoridades presentes

Figura 14 - Pronunciamento do prefeito Gilberto Kassab

Figura 15 - Abastecimento simbólico do ônibus

Figura 16 - Test drive pelas ruas da Universidade

Entre as personalidades internacionais, pode-se citar o parceiro do projeto BEST, da empresa *Renewable Energies - WIP*, de Munique, o Dr. Rainer Janssen, que veio ao Brasil para o lançamento do projeto, acompanhando uma delegação de pesquisadores estrangeiros em visita a indústrias brasileiras em busca de transferência de conhecimento e tecnologia, que também compareceram ao evento.

O evento foi amplamente divulgado em jornais, revistas e sites.

Em 20 de dezembro, foi realizado novo evento de lançamento do ônibus no corredor onde vai operar. Entre as autoridades que compareceram, presidentes das empresas parceiras, esteve presente o Secretário de Transportes do Estado de São Paulo, José Luiz Portella. Foi realizado um passeio simbólico no ônibus e, em seguida, houve uma breve apresentação do projeto.

O acompanhamento do funcionamento do ônibus no corredor teve início após esta data. Entretanto, o início dos testes foi realizado de maneira reduzida (somente 100 quilômetros por dia), pois a Petrobras ainda não havia viabilizado a importação do aditivo.

Outra importante melhoria no sistema de coleta de dados do ônibus a etanol foi a instalação do Sistema IRIS para rastreamento de dados no barramento de etanol. A partir desse sistema, o consumo de combustível era rastreado eletronicamente e de forma mais precisa do que o consumo de combustível calculado utilizando o medidor de vazão. Ao mesmo tempo, este sistema é capaz de localizar o ônibus por meio de sistema de Posicionamento Global Service – GPS, este tipo de equipamento é normalmente utilizado em veículos Scania para o rastreamento de dados.

Finalmente, a Petrobras concluiu a importação do primeiro lote de aditivo. Como parte do acordado entre os parceiros do projeto BEST no Brasil, a Petrobras deveria fornecer tanque e bomba de combustível para ser instalado na EMTU / Metra, que seria usado para abastecer o ônibus etanol. Entretanto, a Petrobras não foi capaz de fornecer, em um primeiro momento, equipamentos em boas condições. O tanque de combustível que foi entregue em março de 2008 já havia sido utilizado para experimentos com Biodiesel e, portanto, estava contaminado com outros produtos, pois não havia sido limpo. A Petrobras contratou uma empresa, que limpou parcialmente o tanque de combustível, o que não foi suficiente. Havia dúvidas com relação a contaminação do E95 pelos resíduos de biodiesel que estavam dentro do tanque de combustível e na tubulação. Assim, foi acordado entre Cenbio e EMTU que o tanque de combustível não seria utilizado para uso de etanol até que um relatório oficial da Petrobras fosse entregue esclarecendo se o reservatório teria de ser alterado ou limpo.

O tanque entregue pela Petrobras era de aço carbono, com capacidade de 15.000 litros e com cerca de 300-400 litros sob o tubo de drenagem. Isso significa que o tanque do combustível não poderia ser completamente drenado. O tanque oferecido (Figura 17) é um reservatório Petrobras padrão para qualquer loja temporária de combustível.

Figura 17 – Tanque de combustível fornecido pela Petrobras

Finalmente, em agosto o tanque de combustível foi substituído. O tanque de combustível novo é similar ao primeiro em tamanho e características mecânicas, mas está em perfeitas condições para o recebimento do ED95.

A Petrobras (responsável pela importação do aditivo junto à SEKAB) e a BR Distribuidora (responsável pela mistura do aditivo ao etanol e entrega na operadora) tiveram inúmeros problemas. Um deles foi referente à patente do aditivo. Como o aditivo foi patenteado pela SEKAB, que também detém direitos exclusivos de processamento e mistura do aditivo, foi necessário negociar uma declaração oficial da Petrobras, informando que a BR é uma de suas subsidiárias e, portanto, são pertencentes ao mesmo grupo, a fim de superar os obstáculos jurídicos.

Durante as negociações entre Petrobras, BR Distribuidora e Sekab, um segundo lote de mais 9 recipientes de ED95 foi importado pela Scania para continuidade das atividades do projeto, em 2008. Finalmente, em setembro de 2008, o aditivo chegou ao Brasil.

A partir daí, teve início a mistura do aditivo ao etanol, pela BR Distribuidora. Este processo, também, foi demorado, pois havia a necessidade da Sekab enviar a ficha de segurança do aditivo e o processo de mistura, o que levou algum tempo.

Um outro problema enfrentado no projeto foi a necessidade de implementação de três ônibus. A coordenação geral do projeto estabeleceu que a frota mínima para o projeto seria de três veículos movidos a etanol. As tratativas de importação de mais dois chassis, com a Scania, demoraram e a aquisição de outros dois ônibus movidos a etanol como parte das atividades de demonstração em São Paulo não foram possíveis dentro do prazo remanescente do projecto BEST.

Quando as negociações com a Scania iniciaram havia um “gap” entre o motor atual e uma nova geração que estava sendo desenvolvida pela Scania sueca, sendo que, naquele momento, não havia mais nenhum motor Euro 4 disponível e a nova geração, que atendia aos padrões de emissão Euro 5, também não havia sido lançada.

Devido a estas dificuldades foi impossível implementar ônibus com a nova geração de motores a etanol Euro 5. No entanto, finalmente, um novo chassi com motor a etanol Euro 5 foi adquirido e demonstrado em São Paulo. Novas parcerias foram negociadas para a continuação da demonstração em São Paulo.

O novo veículo operou durante os últimos dois meses de projeto em São Paulo, em uma linha de ônibus da SPTrans, entre os bairros da Lapa e Vila Mariana, passando pela Av. Paulista. Esta linha de ônibus foi escolhida pela SPTrans, pois não requer portas de ambos os lados, já que o veículo foi encarroçado com portas, somente, do lado direito. Este veículo foi incorporado a frota da operadora Gato Preto.

O segundo ônibus é de 15 metros de comprimento, equipado com a nova geração de motor a etanol, que atende aos padrões de emissão Euro 5 (motor modelo DC9 E02 270). Nesta nova fase do projeto, o grupo Cosan foi responsável por fornecer o etanol aditivado e todas as instalações necessárias na operadora Gato Petro, conforme Figura 18, abaixo.

Figura 18 – Tanque de combustível fornecido pela Cosan, instalado na garagem da operadora Gato Petro.

Fonte: CENBIO, 2009.

Outro parceiro incorporado a esta nova fase do projeto foi a Caio Construtor Carroçaria, que encarrou o ônibus com o chassi modelo K270. Uma foto do novo veículo é apresentada na Figura 19.

Figura 19 – Segundo ônibus a etanol.

Fonte: CENBIO, 2009.

Assim como ocorreu nos testes com o primeiro ônibus a etanol, o segundo ônibus também teve acompanhamento de um ônibus diesel, cedido pela Viação Gato Preto.

A cerimônia de lançamento do segundo ônibus a etanol ocorreu em 21 de Outubro de 2009 e reuniu representantes da CENBIO, Viação Gato Preto, Grupo Cosan, SPTrans e Scania do Brasil. Entretanto, apenas em 12 de novembro de 2009, foi lançado, oficialmente, o segundo ônibus etanol. A cerimônia ocorreu na Viação Gato Preto e contou com a presença do Prefeito da Cidade de São Paulo, Gilberto Kassab, do Secretário Municipal dos Transportes, Alexandre de Moraes e do Secretário Municipal do Meio Ambiente, Eduardo Jorge, conforme Figura 20.

Figura 20 – Lançamento do segundo ônibus a etanol na garagem da Viação Gato Petro.

Fonte: CENBIO, 2009.

Como dito anteriormente, este segundo ônibus entrou em operação no final do projeto BEST e teve somente dois meses de operação dentro deste projeto. Entretanto, um novo convênio entre o CENBIO o CNPq – Conselho Nacional de Pesquisas Tecnológicas proporcionou a continuidade da operação dos veículos movidos a etanol.

Devido ao problema de importação e mistura do aditivo, por parte da Petrobrás/BR Distribuidora, o ônibus operou continuamente entre o período entre janeiro e agosto. Durante este período de operação o consumo médio foi de 0,78 km/litro, enquanto que o ônibus diesel apresentou consumo médio de 1,43 km/litro. No que diz respeito a manutenção de ônibus de etanol, nenhuma ação foi necessária. A tabela a seguir reflete o consumo de combustível do ED95 e do ônibus Diesel. A Tabela 1 apresenta uma comparação entre o Diesel e o ônibus Etanol.

Tabela 1 - Dados médios obtidos a partir da operação do primeiro ônibus a etanol e do ônibus diesel, de Janeiro a Agosto de 2009.

Tipo de Veículo	Etanol			Diesel		
Mês	Km/dia (percorrido)	Quantidade de combustível Abastecida (litros)	Desempenho (km/l)	km/dia (percorrido)	Quantidade de combustível Abastecida (litros)	Desempenho (km/l)
Janeiro 2008	2028	2850	0,712	3996,6	2971	1,345
Fevereiro 2008	2908	5700	0,510	3989,2	2783	1,433
Março 2008	1688	1900	0,888	4221,2	2924	1,444
Abril 2008	1696	1900	0,893	4503,4	2960	1,521
Mai 2008	1656	1900	0,872	3685,1	2370	1,555
Junho 2008	785	950	0,826	4171	2906	1,435
Julho 2008	748	950	0,787	4841,1	4048	1,196
Agosto 2008	735	950	0,774	5156,6	3327	1,550

A variação significativa no consumo de combustível em Fevereiro de 2008 foi motivada pela necessidade de modificações para adaptar o veículo às condições brasileiras, conforme mencionado anteriormente.

No final do mês de novembro de 2008, o primeiro lote de ED95 misturado no Brasil, foi entregue nas instalações da concessionária METRA. Após a entrega do combustível, foi possível utilizar o equipamento fornecido pela Petrobras, possibilitando medições mais precisas. Na Tabela 2 a seguir é apresentado o consumo de combustível do ônibus a etanol e diesel.

Tabela 2 – Dados médios obtidos a partir da operação do primeiro ônibus a etanol e ônibus a diesel, de Novembro de 2008 a Setembro de 2009.

Tipo de Veículo	Etanol			Diesel		
Mês	Quilometragem percorrida (km)	Quantidade de combustível Abastecida (litros)	Desempenho (km/l)	Quilometragem percorrida (km)	Quantidade de combustível Abastecida (litros)	Desempenho (km/l)
Novembro 2008	198,9	72,9		84,1	32,0	
Dezembro 2008	4 034,9	4 886,0	0,826	4 692,2	3 514,0	1,335
Janeiro 2009	5 192,6	6 030,0	0,861	3 932,1	2 880,0	1,365
Fevereiro 2009	5 425,2	6 279,7	0,864	5 294,6	3 670,0	1,443
Março 2009	5 947,6	6 810,6	0,873	7 535,3	5 286,0	1,426
Abril 2009	6 376,6	7 305,5	0,873	6 725,2	4 553,0	1,477
Maio 2009	4 973,6	5 361,0	0,928	6 753,1	4 499,0	1,501
Junho 2009	1 731,0	2 001,8	0,865	5 686,2	3 779,0	1,505
Julho 2009	3 035,8	3180	0,955	7578,8	4358,0	1,739
Agosto 2009	5779,2	5168,6	1,118 ¹	5891,7	3656,0	1,612
Setembro 2009	4744,1	4268,1	1,112 ¹	6333,9	3734,0	1,696
Total	47.240,6	51.291,3	0,921	48 197,5	32 539,0	1,481

¹ Modificação na caixa de câmbio.

Conforme demonstrado na Tabela 2, de novembro de 2008 a setembro de 2009, o ônibus ED95 viajou 47.240 km e consumiu 51.291 litros de combustível ED95 que foram misturados no Brasil. De setembro de 2008 a novembro de 2008, o ônibus teve que ser retirado de tarefas operacionais devido à falta de combustível ED95. Na Tabela 2, há uma variação significativa no consumo de combustível em agosto e setembro de 2009 em comparação com meses anteriores. Esta variação ocorreu porque duas experiências foram realizadas no ônibus de etanol a fim de aumentar o desempenho do veículo: modificações técnicas sobre a configuração da caixa de engrenagem de transmissão automática e eventual desligamento do ar condicionado que levou a uma quilometragem satisfatório na Região Metropolitana de São Paulo.

A transmissão automática tem quatro modos diferentes da engrenagem: modo de alimentação, modo Normal, Modo Econômico e modo Super Econômico. Foi acordado entre os parceiros do projeto que novas experiências seriam necessárias para melhorar o consumo de combustível, pois esta seria a principal barreira contra a implementação ônibus de etanol no Brasil. Maiores detalhes das modificações são apresentadas na Tabela 3 abaixo.

Tabela 3 – Melhorias no consumo de combustível do ônibus a etanol

Data	Configuração	Distância (km)	Combustível (litros)	Consumo (km/l)	Melhoria (%)
Nov/08 – 10/Jul/09	Ligada em condições normais / AC ligado	34.563,1	39.638,9	0,872	-
11/Jul/09 – 31/Jul/09	AC desligado / Ligada em condições normais	2.353,1	2.472,6	0,952	9,17%
1/Ago/09 - 21/Ago/09	AC desligado / Modo Econômico	4.658,0	4.221,2	1,103	26,49 %

Nota: AC – ar condicionado; Condições normais – Modificada manualmente por um sistema liga/desliga.

Os resultados de consumo apresentados na tabela acima mostram que uma mudança na configuração do veículo (AC desligado / Modo Econômico) levam a uma redução significativa no consumo de combustível. É altamente recomendável que o modo econômico seja usado.

Ao mesmo tempo, a fim de estabelecer o parâmetro consumo de combustível para a comparação, é importante reforçar que o ônibus diesel, ou “sombra”, é muito semelhante às características do ônibus de etanol utilizada para demonstração (incluindo a potência do motor, peso, a transmissão da caixa de velocidades e construção da carroçaria). O consumo de combustível do ônibus "sombra" (ônibus a diesel) também foi apresentado na Tabela 2.

Outras modificações foram executadas no ônibus a etanol. Entretanto, não foram realizadas no "sombra", pois a METRA, proprietária do veículo, não autorizou nenhuma modificação.

As alterações na caixa de engrenagem de transmissão e no ar condicionado trouxeram um significativo aumento no desempenho do ônibus, mais de 25%. Entretanto, estes resultados teriam sido melhor avaliados caso a modificação tivesse sido efetuada também no ônibus a diesel. Entretanto, deve-se considerar que o Brasil é um país tropical e que o desligamento do ar condicionado não pode ser considerado como uma solução para a melhoria do consumo de combustível, pois o conforto do passageiro não pode ser desprezado. Além disso, a avaliação do ajuste no câmbio contribuiu significativamente com a melhoria no consumo.

As Figura 21, Figura 22, Figura 23 mostram uma visão geral da declividade da linha "Jabaquara / São Mateus". Os pontos de ônibus regulares estão incluídos nos gráficos. A seção "Santo André / Parque das Nações" é a que apresenta mais declividades na pista, o que influencia significativamente o consumo de combustível.

Como parte das atividades de demonstração do projeto BEST, um sistema de rastreamento eletrônico de dados (IRIS) foi usado para quantificar a influência no consumo de combustível, conforme mencionado anteriormente. O sistema utiliza o Sistema de Posicionamento Global (GPS) e é capaz de registrar a localização e o consumo de combustível.

Figura 21 – Resumo gráfico do trecho Santo André – Parque das Nações

Fonte: EMTU, 2005.

Figura 22 – Resumo gráfico do trecho Parque das Nações – Santo Amaro

Fonte: EMTU, 2005.

Figura 23 – Resumo gráfico do trecho Santo Alberto – São Mateus

Fonte: EMTU, 2005.

2. Sistema de Rastreamento de Dados Eletrônico - IRIS

O sistema de rastreamento de dados eletrônico foi utilizado para monitorar o consumo de combustível, com medição em tempo real. O sistema utiliza o medidor de vazão instalado para registrar o consumo e combina esta dado com a localização do ônibus. Além disso, potência do motor, velocidade de rotação do motor, temperatura do motor, temperatura no interior do veículo e da velocidade do veículo são monitorados.

Tabela 4 – Exemplo do relatório gerado pelo sistema IRIS

Date	Time	Ignition	Latitude	Longitude	Reference location
22/9/2008	23:24:00		-25.428	-49.081	2.7 Km de Piraquara-PR
22/9/2008	23:30:00		-25.495	-49.116	7.4 Km de Piraquara-PR
22/9/2008	23:30:27		-25.501	-49.120	8.2 Km de Piraquara-PR
22/9/2008	23:36:00		-25.563	-49.154	6.3 Km de São Jose dos Pinhais-PR
22/9/2008	23:42:00		-25.565	-49.244	3.7 Km de São Jose dos Pinhais-PR
22/9/2008	23:48:00		-25.534	-49.317	1.8 Km de MRJD
22/9/2008	23:54:00		-25.474	-49.352	8.0 Km de Cotrasa (Curit.Pinheirinho-PR)
23/9/2008	00:00:00		-25.438	-49.365	(41)3346-0202
23/9/2008	00:00:19		-25.437	-49.365	8.5 Km de Curitiba-PR
23/9/2008	00:06:00		-25.437	-49.366	8.5 Km de Curitiba-PR
23/9/2008	00:12:00		-25.437	-49.366	8.6 Km de Curitiba-PR

					PR
23/9/2008	00:18:00	X	-25.437	-49.366	8.6 Km de Curitiba-PR
23/9/2008	00:24:00	X	-25.437	-49.366	8.6 Km de Curitiba-PR
23/9/2008	00:30:00	X	-25.437	-49.366	8.6 Km de Curitiba-PR
23/9/2008	00:36:00	X	-25.437	-49.366	8.6 Km de Curitiba-PR
23/9/2008	00:42:00	X	-25.470	-49.354	8.5 Km de Cotrasa (Curit.Pinheirinho-PR)
23/9/2008	00:48:00	X	-25.528	-49.328	(41)3346-0202
23/9/2008	00:54:00	X	-25.560	-49.265	3.0 Km de MRJD
23/9/2008	01:00:00	X	-25.570	-49.189	4.3 Km de MRJD
23/9/2008	01:01:17	X	-25.568	-49.174	3.6 Km de Sao Jose dos Pinhais-PR
23/9/2008	01:06:00	X	-25.568	-49.173	4.6 Km de Sao Jose dos Pinhais-PR
23/9/2008	01:12:00		-25.569	-49.176	4.7 Km de Sao José dos Pinhais-PR
23/9/2008	01:18:00		-25.569	-49.176	4.5 Km de Sao Jose dos Pinhais-PR
23/9/2008	01:24:00		-25.569	-49.176	4.5 Km de Sao Jose dos Pinhais-PR
23/9/2008	01:30:00		-25.569	-49.176	4.5 Km de Sao Jose dos Pinhais-PR

Fonte: CENBIO, 2008.

O relatório mostra que a partir do dia 22 de setembro o ônibus foi enviado para a cidade de Curitiba, no Estado do Paraná, a fim de apresentar a tecnologia para a administração municipal local.

Devido aos problemas com o fornecimento de etanol aditivado, o Sistema IRIS não foi utilizado regularmente. O atraso no fornecimento das instalações de abastecimento fez com que os números exatos sobre o consumo de combustível não pudesse ser gerado por mais de dois meses. Os números no odômetro do ônibus e no relatório não estavam sincronizados. Como o Sistema IRIS, até então, só havia sido utilizado em veículos diesel, o método de aquisição de dados manual de consumo de combustível também foi implementado nas atividades de demonstração. Isso ajudou a comparar os dados coletados e garantiu maior qualidade nos dados de consumo de combustível.

Depois de quatro meses sendo utilizado como um método secundário para o rastreamento de dados, observou-se que os dados fornecidos pelo medidor de fluxo eletrônico não eram confiáveis. No entanto, o equipamento não foi removido do veículo e, eventualmente, o medidor de fluxo parou de funcionar por causa de problemas de corrosão na borboleta do medidor de fluxo. No entanto, o sistema de GPS permaneceu operacional e foi

constantemente usado por pessoal técnico a fim de monitorar o veículo e seu itinerário diário. Muitas melhorias ainda são necessárias no dispositivo de medidor de fluxo para o adaptá-lo ao combustível.

3. Acompanhamento do segundo ônibus movido a etanol.

A partir do início das atividades do projeto financiado pelo CNPq, o Cenbio continuou o monitoramento do segundo ônibus. Os dados foram coletados a partir do mês de julho de 2010. A Tabela 5 apresenta os dados que foram coletados durante a operação e a Tabela 6 apresenta a média de dados entre os meses de julho de 2010 e Março de 2011, dos veículos diesel e etanol.

Tabela 5 - Dados do ônibus movido a etanol – mês de julho

Data	Km inicial	Km Final	Km/dia (percorrido)	Quantidade de combustível Abastecida (litros)	Desempenho (km/l)	Disponibilidade de etanol (litros) ¹
01/07/10	18.327	18.527	200	234,6	0,85	12.896
02/07/10	18.527	18.721	194	225,3	0,86	12.808
03/07/10	Dados não monitorados					
04/07/10	Dados não monitorados					
05/07/10	18.721	18.918	197	240,5	0,82	12.630
06/07/10	18.918	19.115	197	234,0	0,84	12.266
07/07/10	19.115	19.311	196	230,5	0,85	12.081
08/07/10	19.311	19.507	196	228,5	0,86	11.894
09/07/10	Dados não monitorados					
10/07/10	Dados não monitorados					
11/07/10	Dados não monitorados					
12/07/10	19.507	19.704	197	223,6	0,88	11.704
13/07/10	19.704	19.901	197	228,5	0,86	11.416
14/07/10	19.901	20.098	197	220,1	0,90	11.124
15/07/10	20.098	20.296	198	219,6	0,90	10.928
16/07/10	Dados não monitorados					
17/07/10	Dados não monitorados					
18/07/10	Dados não monitorados					
19/07/10	20.296	20.575	279	301,1	0,93	10.730
20/07/10	20.575	20.772	197	221,0	0,89	10.530
21/07/10	20.772	20.968	196	208,8	0,94	10.330
22/07/10	20.968	21.163	195	222,0	0,88	10.128
23/07/10	21.163	21.359	196	208,2	0,94	9.925
24/07/10						
25/07/10	21.359	21.615	256	238,0	1,08	9.721
26/07/10	21.615	21.786	171	190,7	0,90	9.517
27/07/10	21.786	21.958	172	189,4	0,91	9.311
28/07/10	21.958	22.129	171	213,0	0,80	9.105
29/07/10	22.129	22.300	171	180,0	0,95	8.898

30/07/10	22.300	22.470	170	187,6	0,91	8.795
31/07/10	Dados não monitorados					
Total			4.143	4.645	0,89	

¹ Dado monitorado para garantir a disponibilidade de combustível no tanque.

Fonte: CENBIO, 2010.

Tabela 6 – Dados médios obtidos a partir da operação do segundo ônibus a etanol e do ônibus diesel , de Julho de 2010 a Março de 2011

Tipo de Veículo	Etanol			Diesel		
Mês	Quilometragem percorrida (km)	Quantidade de combustível Abastecida (litros)	Desempenho (km/l)	Quilometragem percorrida (km)	Quantidade de combustível Abastecida (litros)	Desempenho (km/l)
Julho 2010	4.143	4.645	0,89	2.148	1.430	1,50
Agosto 2010	4.950	5.600	0,88	4.866	3.170	1,54
Setembro 2010	5.200	5.444	0,96	5.114	3.057	1,67
Outubro 2010	5.216	5.097	1,02	5.886	3.403	1,73
Novembro 2010	5.037	5.200	0,97	6.363	3.757	1,69
Dezembro 2010	5.314	5.456	0,97	6.045	3.569	1,69
Janeiro 2011	4.964	5.178	0,96	3.370	2.099	1,61
Fevereiro 2011	3.650	3.645	1,00	1.762	988	1,78
Março 2011	2.538	2.783	0,91	6.351	3.585	1,77

Fonte: CENBIO, 2011b.

Infelizmente, as modificações na caixa de engrenagem e no modo de operação do ar condicionado não foram feitas neste segundo ônibus. Elas seriam importantes para comprovar os resultados obtidos na primeira experiência e para verificar a melhoria no consumo.

APÊNDICE D - Emissões dos ônibus a diesel

O Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas apresenta as emissões de 1980 a 2009 e as projeções até 2020 dos poluentes regulamentados pelos programas PROCONVE e PROMOT: monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NOx), hidrocarbonetos não-metano (NMHC), aldeídos (RCHO) e material particulado (MP); além dos gases de efeito estufa, dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄). O Inventário permite ainda, conhecer as contribuições relativas das frotas de automóveis, veículos comerciais leves, ônibus, caminhões e motocicletas nas emissões; e como as diferentes fases dos programas responsáveis desde 1986 pela introdução de combustíveis de melhor qualidade e tecnologias automotivas mais avançadas influenciaram, e ainda poderão influenciar as emissões.

O Inventário apresenta os resultados de forma desagregada por tipo de combustível utilizado, por idade ou geração tecnológica, por tipo de aplicação – transporte de cargas ou passageiros – bem como por sua capacidade ou porte.

A Tabela 1 apresenta o nível de desagregação da frota, por categoria de veículos adotada no Inventário.

Tabela 1 – Categorias de Veículos segundo Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas

Categoria	Motor/Combustível	Definição
Automóveis	Otto/Gasolina C ⁴⁶ Otto/Etanol Hidratado Otto/Flex Fuel Otto/GNV	Veículo automotor destinado ao transporte de passageiros, com capacidade para até oito pessoas, exclusive o condutor
Veículos Comerciais leves	Otto/Gasolina C Otto/Etanol Hidratado Otto/ <i>Flex Fuel</i> Diesel	Veículo automotor destinado ao transporte de pessoas ou carga, com peso bruto total de até 3.500 kg
Motocicletas	Otto/Gasolina C Otto/ <i>Flex Fuel</i>	Veículo automotor de duas rodas, com ou sem <i>side-car</i> ,

⁴⁶ Gasolina preparada pelas companhias distribuidoras que adicionam álcool etílico anidro à gasolina tipo A . O teor de álcool na gasolina final é previsto em legislação. Esta gasolina apresenta uma octanagem no mínimo igual a 80.

		dirigido em posição montada
Caminhões leves ($3,5t < PBT^1 < 10t$)	Diesel	Veículo automotor destinado ao transporte de carga, com carroçaria, e PBT superior a 3.500 kg.
Caminhões médios ($10t \leq PBT < 15t$)		
Caminhões pesados ($PBT \geq 15t$)		
Ônibus Urbanos Ônibus Rodoviários	Diesel	Veículos automotores de transporte coletivo

Notas: ¹ PBT – Peso Bruto Total

Fonte: MMA, 2011.

Como o foco deste trabalho são os ônibus urbanos para transporte coletivo, somente os resultados provenientes desta categoria de veículos serão considerados neste trabalho.

A metodologia utilizada para estimar as emissões de escapamento é apresentada a seguir.

As emissões de escapamento da frota circulante num determinado ano calendário, para cada poluente e ano modelo de veículo, são estimadas a partir da seguinte equação (MMA, 2011):

$$E = Fr * Iu * Fe$$

Onde:

- E é a taxa anual de emissão do poluente considerado (g/ano);
- Fr é a frota circulante de veículos do ano modelo considerado (número de veículos);
- Iu é a intensidade de uso do veículo do ano modelo considerado, expressa em termos de quilometragem anual percorrida (km/ano). Trata-se de uma variável que depende de um conjunto de fatores socioeconômicos que, neste Inventário, foram representados pela idade do veículo.
- Fe é o fator de emissão do poluente considerado, expresso em termos da massa de poluentes emitida por km percorrido ($g_{poluente}/km$). É específico para o ano modelo de veículo considerado e depende do tipo de combustível utilizado.

Ou seja, as emissões estão diretamente relacionadas a três fatores, a frota, a intensidade de uso do veículo e o fator de emissão.

Para estimar a frota do veículo, foi levado em consideração o histórico de venda de veículos novos (informação oficial ANFAVEA/DENATRAN⁴⁷, ABRACICLO⁴⁸) e a curva de sucateamento (estimativas oficiais MCT, SINDIPEÇAS⁴⁹). A partir destas informações, foi feita a estimativa histórica da frota, por categoria de veículo, por tipo de combustível e por ano de fabricação.

Para automóveis, veículos comerciais leves, caminhões e ônibus foram adotadas as curvas de sucateamento utilizadas na elaboração do Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa (Relatório de Referência: Emissões de Gases de Efeito Estufa no Setor Energético por Fontes Móveis), MCT (2006).

Já o fator de emissão para veículos do ciclo Diesel, foram utilizados os fatores de emissão médios para motores, gerados nos ensaios de homologação segundo os ciclos estabelecidos nas normas técnicas ABNT - NBR 14489 e ABNT - NBR 15634, disponíveis no Relatório de qualidade do ar do estado de São Paulo 2009, CETESB (2010). As emissões são medidas em termos da massa de poluentes gerados por unidade de trabalho realizado pelo motor, expressas em $g_{poluente}/kWh$.

No que se refere aos motores da fase P7, previstos para 2012, assumiu-se que:

- Os fatores de emissões para CO e NMHC (hidrocarbonetos não metano) mantêm-se os mesmos dos motores P6, uma vez que se encontram abaixo dos limites estabelecidos pela fase P7;
- Os fatores de emissões para NOx e MP: correspondem a 90% dos limites legais estabelecidos.

Os fatores de emissão expressos em $g_{poluente}/kWh$ são convertidos para $g_{poluente}/km$ utilizando fatores de conversão que levam em conta o consumo específico de combustível (g_{diesel}/kWh) e a quilometragem por litro (km/L_{diesel}) dos veículos, sendo:

$$g_{poluente} / km = g_{poluente} / g_{diesel} * g_{diesel} / L_{diesel} * km / L_{diesel}; e,$$

$$g_{poluente} / g_{diesel} = g_{poluente} / kWh \div g_{diesel} / kWh$$

Os valores de consumo específico dos motores (g_{diesel}/kWh), mostrados na Tabela 3, foram baseados em ensaios de motores realizados pela Mercedes-Benz e fornecidos pela

⁴⁷ Associação Nacional de Veículos Automotores – Brasil / Departamento Nacional de Trânsito

⁴⁸ Associação Brasileira dos Fabricantes de Motocicletas, Ciclomotores, Motonetas, Bicicletas e Similares.

⁴⁹ Sindicato Nacional da Indústria de Componentes para Veículos Automotores

ANFAVEA. A partir destes valores e dos fatores de emissão indicados, aplicou-se a Equação acima para calcular os fatores de emissão, em ($g_{\text{poluente}}/kg_{\text{diesel}}$), mostrados na Tabela 4.

Tabela 2 – Fatores de emissão em motores diesel para diferentes tipos de poluentes por fase do PROCONVE ($g_{\text{poluente}}/kWh^1$)

Fase do PROCONVE	CO	NMHC	NOx	MP ¹
Pré-PROCONVE, P1 e P2	1,86	0,68	10,70	0,660
P3	1,6	0,54	6,55	0,318
P4	0,85	0,29	6,16	0,120
P5	0,83	0,16	4,67	0,078
P7	0,83	0,16	1,80	0,018

Nota: ¹Valor válido para o teor de enxofre no diesel utilizado no ensaio de homologação

Fonte: MMA, 2011.

Tabela 3 - Consumo específico de combustível por fase do PROCONVE (g_{diesel}/kWh)

Fase do PROCONVE	Consumo específico de combustível (g_{diesel}/kWh)
Pré-PROCONVE, P1 e P2	225
P3	218
P4	210
P5	220
P7	210

Fonte: MMA, 2011.

Tabela 4 – Fatores de emissão em motores diesel para diferentes tipos de poluentes por fase do PROCONVE ($g_{\text{poluente}}/kg_{\text{diesel}}$)

Fase do PROCONVE	CO	NMHC	NOx	MP ¹
Pré-PROCONVE, P1 e P2	8,27	3,02	47,56	2,933
P3	7,43	2,48	30,05	1,459
P4	4,05	1,38	29,33	0,571
P5	3,77	0,73	21,33	0,355
P7	3,95	0,76	8,57	0,086

Nota: ¹Valor válido para o teor de enxofre no diesel utilizado no ensaio de homologação

Fonte: MMA, 2011.

A partir destes dados, foi estimado o fator de emissão para veículos diesel. A Tabela 5 apresenta os resultados encontrados para ônibus urbano.

Tabela 5 – Fatores de emissão para motores diesel de diferentes poluentes ($g_{\text{poluente}}/\text{km}$)

Categoria	Fase do PROCONVE	CO	NMHC	NO_x	MP
Ônibus urbano	Pré-PROCONVE, P1 e P2	3,06	1,12	17,57	1,084
	P3	2,75	0,92	11,10	0,539
	P4	1,50	0,51	10,84	0,2111
	P5	1,39	0,27	7,81	0,131
	P7	1,46	0,28	3,17	0,032

Fonte: MMA, 2011.

A intensidade de uso da frota diesel foi baseada em informações levantadas pela ANFAVEA em 2008 e pela Petrobras em 2010. Foi considerado, também, hipótese de decaimento da qualidade com o avanço da idade dos veículos, à semelhança dos veículos do ciclo Otto.

A seguir as emissões de cada poluente serão apresentadas, quando disponível, por categoria de veículo, por tipo de combustível e pela fase do PROCONVE. Será apresentada, também, a projeção de emissão para o ano de 2020.

1. Monóxido de Carbono (CO)

O Gráfico 01 apresenta as emissões de CO por categoria de veículo.

Gráfico 01 – Emissões de CO por categoria de veículo

Fonte: MMA, 2011.

Há de se destacar a redução de emissão de CO a partir do ano de 1991. Neste caso, os veículos de ciclo Otto são os grandes responsáveis pela emissão deste poluente e, segundo as estimativas, continuarão sendo em 2020.

O Gráfico 02 a seguir apresenta as emissões de CO por tipo de combustível.

Gráfico 02 – Emissões de CO por tipo de combustível

Fonte: MMA, 2011.

Neste gráfico é notória a participação das emissões provenientes de etanol hidratado e gasolina, sendo que as projeções para 2020, a contribuição destes combustíveis continuará expressiva.

Gráfico 03 – Emissões de CO por fase do PROCONVE.

Fonte: MMA, 2011.

É nítida a redução das emissões posteriormente a instauração das políticas de redução de emissão do PROCONVE. Obviamente, este gráfico tem que ser relacionado com a quantidade de veículos, por fase do PROCONVE, em circulação. A tendência para 2020, mostra que devido ao sucateamento da frota, a tendência é que os veículos da Fase 5 e 6 sejam a maioria e, portanto, a contribuição seja maior.

2. Óxidos de Nitrogênio (NOx)

Gráfico 04 – Emissões de NOx por categoria de veículo

Fonte: MMA, 2011.

Gráfico 05 – Emissões de NOx por tipo de combustível

Fonte: MMA, 2011.

Gráfico 6 – Emissões de NO_x do ciclo diesel por fase do PROCONVE

Fonte: MMA, 2011.

Os gráficos de emissões de NO_x por categoria de veículo e por tipo de combustível enfatizam a importância do diesel na emissão deste poluente. A implementação da P4 e P5 diminuem o crescimento das emissões de NO_x pelo diesel. Entretanto, as projeções para 2020, a partir do sucateamento da frota, revelam um aumento das emissões em veículos da Fase P5 e P7 do PROCONVE.

3. Material Particulado (MP)

Gráfico 7 – Emissões de MP por tipo de veículo

Fonte: MMA, 2011.

Gráfico 8 – Emissões de MP por tipo de combustível

Fonte: MMA, 2011.

Gráfico 9 – Emissões de MP por veículo do ciclo diesel por fase do PROCONVE.

Fonte: MMA, 2011.

A frota de veículo diesel é a principal responsável pela emissão de MP, em qualquer uma das abordagens. Em 2009, os caminhões pesados foram responsáveis por 45% das emissões de MP, enquanto que os ônibus urbanos são responsáveis por 20% das emissões. Essa correlação sofre modificações, mas para 2020 a contribuição da emissão de MP na atmosfera continua sendo dos veículos diesel, em particular caminhões e ônibus.

A adoção dos limites de emissão por parte do PROCONVE mostra resultados a partir do ano 2002, quando entra em vigor a fase 4 do PROCONVE.

Outra informação proporcionada pelo Inventário diz respeito à desagregação das emissões de MP por veículos do ciclo Diesel em (i) sulfatos particulados, e (ii) outros compostos, independentes do teor de enxofre no combustível (MP “zero enxofre”). No gráfico a seguir, o comportamento das emissões desses sulfatos presentes nos combustíveis comercializados.

Gráfico 10 - Emissões de MP_{zero enxofre} e sulfatos particulados por veículos do ciclo Diesel

Fonte: MMA, 2011.

4. Aldeídos

As emissões de aldeídos só é apresentada por tipo de combustível, já que para os veículos diesel não há a emissão de aldeídos, segundo o Inventário.

Gráfico 11 – Emissão de aldeído por tipo de combustível

Fonte: MMA, 2011.

Na emissão de aldeídos nota-se o impacto do etanol hidratado e da gasolina. A projeção futura indica um aumento na contribuição deste poluente pelo uso de etanol hidratado.

Atualmente, os veículos ciclo diesel (ônibus e caminhões), que fazem o transporte de passageiros e carga, respectivamente, não aparecem como emissores de aldeídos. Entretanto, o capítulo 6 deste trabalho abordará este tema a fim de comprovar que as emissões de aldeídos também estão vinculadas aos veículos diesel. Além disso, a introdução do etanol no transporte público urbano, certamente, vai contribuir com a emissão deste poluente. Portanto, há a necessidade de verificar a emissão deste poluente nos ônibus a etanol e a diesel e seu impacto sobre o meio ambiente e a saúde das pessoas.

5. Hidrocarbonetos não-metano (HCNM)

Gráfico 12 – Emissão de HCNM por categoria de veículo

Fonte: MMA, 2011.

Gráfico 13 – Emissão de HCNM por tipo de combustível

Fonte: MMA, 2011.

Os HCNM são os precursores do ozônio troposférico (O_3). A grande contribuição deste poluente é proveniente de automóveis e motocicletas (ciclo Otto). Entretanto, percebe-se uma significativa redução de emissão deste poluente a partir do início da década de 90 e posterior estabilização a partir do ano de 2010. As projeções para o ano de 2020 indicam um aumento da contribuição do etanol hidratado na emissão de HCNM. Este fato, também, deverá ser levado em consideração na introdução de ônibus a etanol na frota das regiões metropolitanas.

6. Metano (CH₄)

Gráfico 14 – Emissão de metano por categoria de veículo

Fonte: MMA, 2011.

Gráfico 15 – Emissão de metano por tipo de combustível

Fonte: MMA, 2011.

Ainda que o metano não constitua um poluente diretamente regulado pelo PROCONVE, ou pelo Programa de Controle da Poluição do Ar por Motociclos e Veículos Similares (PROMOT), assumiu-se no Inventário que as melhorias de performance em emissões de hidrocarbonetos totais (THC) ou hidrocarbonetos não-metânicos (NMHC) trariam redução proporcional na emissão de CH₄. Dessa forma, os resultados apresentados mostram uma tendência de queda nas emissões desse gás por automóveis e veículos comerciais leves do ciclo Otto, a partir da segunda metade dos anos 1990, e por motocicletas, mais recentemente. Por outro lado, a partir do ano 2000, a contribuição de veículos movidos a GNV para o conjunto das emissões vem aumentando significativamente (MMA, 2011).

Este é mais um poluente proveniente dos veículos ciclo Otto. Entretanto, mas uma vez, a introdução de ônibus a etanol na frota de veículos de transporte de passageiros deverá considerar o aumento de emissão deste poluente.

6. Dióxido de carbono (CO₂)

As emissões de dióxido de carbono apresentadas são aquelas ocorridas no escapamento, ou seja, produto da queima dos combustíveis durante o uso dos veículos.

Repare que o CO₂ tende a aumentar com o passar dos anos, tendo em vista que ele é proveniente do processo de queima do combustível e, portanto, não tem como ser evitado. Além disso, o aumento da frota ao longo dos anos provocou o aumento de CO₂ presente na atmosfera.

Gráfico 16 – Emissão de CO₂ por tipo de veículo

Fonte: MMA, 2011.

Gráfico 17 – Emissão de CO₂ por tipo de combustível.

Fonte: MMA, 2011.

O CO₂ não é um gás regulamentado pelo PROCONVE, já que não é um gás poluente e é proveniente de qualquer reação de combustão. Entretanto, o aumento da concentração de CO₂ na atmosfera, assim como outros gases como o metano, está intrinsecamente ligada ao efeito estufa e ao aumento da temperatura na Terra. Este assunto será visto com mais detalhes no item 5.4.3 deste capítulo.

APÊNDICE E - Os Mercados de Carbono

A preocupação com o meio ambiente levou os países da Organização das Nações Unidas a assinarem um acordo que estipulasse controle sobre as intervenções humanas no clima. Este acordo nasceu em dezembro de 1999 com a assinatura do Protocolo de Quioto. Desta forma, o Protocolo de Quioto determina que países desenvolvidos signatários, reduzam suas emissões de gases de efeito estufa em 5,2%, em média, relativas ao ano de 1990, entre 2008 e 2012. Esse período é também conhecido como primeiro período de compromisso. Para não comprometer as economias desses países, o protocolo estabeleceu que parte desta redução pode ser feita através de negociação com nações em desenvolvimento ou em vias de transição, como os países da ex-União Soviética, através dos mecanismos de flexibilização.

Com o objetivo de atender as metas estabelecidas pelo protocolo de Quioto, os países da União Européia fizeram então um acordo para reduzir suas emissões de GEE. O Mercado de comercialização resultante deste acordo tem o nome de Sistema de Comércio de Emissões da União Européia (EU ETS). Para isso também surgiram os mecanismos de flexibilização estabelecidos pelo Protocolo de Quioto para cumprimentos de suas metas que permitem importar reduções de projetos em países em desenvolvimento ou em vias de transição. O protocolo de Quioto estabelece que caso seja impossível atingir suas metas de redução de gases, esses países poderão comprar crédito de carbono de outras nações.

Os dois principais ativos negociados em mercados de carbono são as permissões de emissão da União Européia (do inglês *European Union Allowances* - EUA) e os *offsets* ou compensações de carbono gerados a partir de projetos de redução de emissões de GEE. Em um regime obrigatório de *cap-and-trade* internacional/nacional ou regional, as permissões de emissões são distribuídas às fontes emissores com o objetivo de permitir que essas emitam certa quantidade de tCO₂e por período. Se uma fonte emissora excede o limite de emissão definido pelas permissões de emissões, o emissor pode comprar permissões de emissões excedentes de outros participantes do mercado ou ainda pode comprar créditos compensatórios (também equivalentes a 1 tCO₂e) gerados pelos projetos de redução de emissões. Uma série de programas de *cap-and-trade* utilizam permissões de emissões e compensações para cumprir com suas metas regidas pelo Protocolo de Quioto ou por regulamentações nacionais.

Ambas as permissões de emissões e as compensações são transacionados em mercados de carbono através de trocas de créditos carbono e transações *over-the-counter* (OTC)⁵⁰, tanto nos mercados primários como nos mercados secundários (o Mercado Primário compreende o lançamento de títulos ou valores mobiliários, podemos citar uma captação de recursos via abertura de capital ou *IPO* (*Initial Public Offering*), que se caracteriza pelo lançamento inicial de ações no mercado. É no mercado primário que as empresas obtêm recursos para seus investimentos. Uma vez que as ações já se encontram negociadas no mercado, chamamos este mercado de mercado secundário, cuja função básica é fornecer liquidez aos títulos emitidos no mercado primário negociados nas bolsas de valores e os mercado de balcão) (ZENO, 2008).

Os mercados primários existem tanto para as permissões de emissões como para as compensações. Nos mercados de carbono, tanto as unidades de permissões de emissões como as compensações representam a permissão para emitir uma tCO₂e.

As permissões de emissão, que são criadas por agências do governo dos países que aceitaram o Protocolo de Quioto, são distribuídas aos participantes no mercado. Estas operações iniciais criam o mercado primário de permissões de emissão. Os governos podem distribuir licenças de diversas maneiras distintas. É possível vender as suas licenças através de um leilão ou a um preço fixo. Os governos podem também fornecer as permissões de emissão por meio de uma distribuição gratuita. Além disso, os governos podem empregar uma abordagem híbrida, utilizando a alocação e oferecendo preço fixo ou preços variáveis por meio de leilão para distribuir as permissões de emissão.

Os *offsets* ou compensações de gases de efeito estufa geradas a partir de projetos de redução de emissões são muitas vezes vendidos antes da emissão de crédito via operações de mercado no qual o dono de um projeto que reduz as emissões de GEE decide vender créditos de carbono, gerados a partir do projeto, diretamente através de um contrato com o comprador. As compensações negociadas por meio destas operações são tipicamente vendidas a um preço mais baixo devido aos riscos associados com o volume a ser ainda gerado pelo projeto e devido à incerteza do preço do crédito no momento de sua obtenção. Uma vez que esses *offsets* são realmente emitidos, eles podem ser comercializados como uma mercadoria genérica nos mercados secundários.

⁵⁰ Termo utilizado para descrever qualquer transação que não seja conduzida mediante uma troca, ou seja, sem receita.

A negociação de permissões de emissão e compensações pelos participantes do mercado é necessária para ajudar a promover um mercado de carbono eficiente, com a descoberta do preço e da transparência. Há uma série de tipos de transações, locais em que as operações ocorrem, e participantes do mercado de compra e venda de ativos de carbono no mercado secundário. Para esclarecimento, o mercado primário envolve risco na negociação dos créditos com o projeto ainda em fase de aprovação, ou seja, no papel, em processo para ser registrado na Organização das Nações Unidas (ONU). Neste caso, o preço é inferior, devido ao risco envolvido na fase de registro. Já no mercado secundário podemos considerar que praticamente não existem mais riscos, pois nesta etapa o projeto já está em pleno funcionamento ou os certificados de redução já estão em mãos. O valor, portanto, sobe. Entretanto, esse mercado é muito volátil, apresentando grande alteração do preço do crédito de carbono em um curto espaço de tempo.

Com relação à estrutura da transação, permissões de emissão e compensações de carbono são vendidas nos mercados futuros e *spot*. A negociação secundária ocorre através de dois canais principais: através de intercâmbios multilaterais, e através de negociação direta entre as partes, com ou sem a mediação de terceiros, conhecida como negociação *over-the-counter* (OTC).

Dentre os participantes do mercado estão entidades regulamentadas que têm uma demanda natural de permissões de emissão e compensações como instrumentos para cumprimento das metas, corretores ou *brokers*, os criadores de mercado ou revendedores, e outros participantes de capital privado, que podem negociar por conta própria para obter lucro.

1. Principais Mercados

É apresentada uma análise dos mercados regulados e voluntários mais importantes. Conforme mostrado na Figura 1, em 2012, existem diversos mercados de carbono distintos no mundo hoje.

O Sistema de Comércio de Emissões da União Européia (EU ETS) é o maior mercado de carbono regulado no mundo. O EU ETS inclui 27 países, incluindo a Islândia, o Liechtenstein e a Noruega, e permite a importação de reduções de emissões obtidas de

projetos desenvolvidos em países não Anexo I⁵¹ para cumprir com as metas de redução de emissões nacionais estabelecidas para os países integrantes da União Européia.

O Protocolo de Quioto abrange também três mecanismos de flexibilização regulados: o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), a Implementação Conjunta (IC) e o Comércio Internacional de Emissões. Destes, o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) é a maior fonte de projetos de compensação de emissão de gases de efeito estufa. Os países que acolhem projetos de MDL registrados, onde as Reduções Certificadas de Emissões (RCE) são produzidas, são mostrados em verde, os países elegíveis para projetos de MDL, mas que neste momento não têm quaisquer projetos de MDL são mostrados em roxo. Já os países elegíveis para hospedar projetos de IC, ou seja, que possam produzir as Unidades de Redução de Emissões (URE), são mostradas em cinza escuro.

A Nova Zelândia tem implementado seu próprio sistema de transação de emissões, o NZ ETS, que também pode utilizar as RCEs para fins de cumprimento com as metas locais. Outros países signatários do Protocolo de Quioto, com obrigações de conformidade são apresentados em marrom claro; desses países, o Japão tem sido um dos compradores mais ativos de RCEs.

⁵¹ Os países Não Anexo I abrange países em desenvolvimento não comprometidos com as metas obrigatórias de redução de emissão, apesar de muitos adotarem ações voluntárias nesse sentido.

Figura 1 - Mercados Regulatórios e Voluntários de Emissões por Região

Fonte: FOREST TRENDS, 2011.

Os Estados Unidos da América, país que não ratificou o Protocolo de Quioto, é anfitrião de vários mercados regionais, como o “Regional Greenhouse Gas Initiative - RGGI” e a *Western Climate Initiative* - WCI, assim como o sistema *cap-and-trade* da Califórnia. Várias províncias canadenses também devem participar da WCI.

Tabela 1 - Volumes Negociados, Mercado Global de Carbono - 2009, 2010

Mercado de Carbono	2009		2010	
	Volume (MtCO ₂)	Valor (US\$ million)	Volume (MtCO ₂)	Valor (US\$ million)
OTC	55	354	128	414
CCX	41	50	2	0,2

Fonte: FOREST TRENDS, 2011.

A tabela acima demonstra a importância do mercado voluntário para o comércio de emissões globais. O CCX - Chicago Climate Exchange foi um mercado estabelecido sob as

leis dos Estados Unidos e que tinha por objetivo contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE), através de um sistema de *cap and trade*. Entretanto, o CCX cessou suas atividades após o valor dos créditos por ele comercializados atingirem valor de U\$ 0,01, contra U\$ 6,00 médios de outros mercados voluntários. A queda no preço dos créditos comercializados no CCX deu-se devido a falta de rastreabilidade dos projetos que geravam os créditos. Não havia a possibilidade de escolha de compra de créditos de projetos de uma área, já que eles eram agrupados e vendidos, independente do projeto que lhe deu origem⁵².

O maior esquema de comércio de carbono regulado, o comércio na UE, gira em torno de serviços públicos, indústrias, bancos de investimento e empresas de comercialização de energia, realizando operações para atender às obrigações de conformidade anuais da UE e aproveitar as oportunidades de arbitragem do mercado. Embora a maior parte da negociação no mercado regulado da UE está centrada nas operações em unidades de permissão de emissão (do inglês *emission unit allowance* EUA), há também um mercado significativo para as operações de RCEs. O Japão também é um grande comprador de RCEs e é uma importante fonte de demanda nos mercados primários. É importante notar que o Japão não tem atualmente um regime de comércio interno de carbono apesar de ter obrigações de redução de emissões sob o Protocolo de Quioto.

Além dos mercados estabelecidos acima mencionadas, novos mercados voluntários continuam a surgir. Se mostrando cada vez mais sólido, o mercado voluntário de carbono começa a ultrapassar as fronteiras e se consolidar ao redor do mundo.

As incertezas pós 2012, quando expira o primeiro período de compromisso sob Quioto, somadas às falhas de segurança sob o EU ETS têm trazido muitas dúvidas aos participantes deste mercado, que acabam recorrendo aos esquemas voluntários. Entretanto, é preciso ressaltar que os mercados voluntários também têm se tornado cada vez mais complexos.

O mercado voluntário surgiu há cerca de 20 anos, quando os primeiros projetos de compensação das emissões através da conservação florestal começaram a aparecer. Sempre houve muitas críticas como a sua efetividade e permanência das reduções de emissão, relegando o espaço voluntário aos projetos mais "inovadores" que não encontravam espaço no mercado compulsório.

⁵² Informação pessoal. Alfredo Nicastro, MGM Innova, 11 de abril de 2012.

Com o passar dos anos os padrões foram se desenvolvendo em conjunto com registros privados para oferecer créditos com garantias mais credíveis e o mercado voluntário se tornou um ambiente mais "palatável" aos críticos. Até mesmo esquemas compulsórios como o programa de "cap-and-trade" da Califórnia já reconhecem padrões do mercado voluntário.

Dentre as principais plataformas do mercado voluntário de carbono estão: Verified Carbon Standard (VCS – antes conhecido como *Voluntary Carbon Standard*, *Gold Standard* (GS), *Climate Action Reserve* (CAR) e *American Carbon Registry* (ACR). A Figura 2 a seguir apresenta as principais plataformas do mercado voluntário de carbono e suas contribuições.

Figura 2 – Os Principais Mercados Voluntários de Carbono e Suas Respectivas Contribuições, 2010.

Fonte: FOREST TRENDS, 2011.

Outro exemplo de iniciativa voluntária acontece na China, onde cinco províncias e oito cidades foram identificadas como candidatas a inserção precoce no mercado de carbono voluntário. Entre estas cidades estão Tianjin, Chongqing, Shenzhen, Xiamen, Hangzhou, Nanchang, Guiyang, e Baoding.

Além dos países da OCDE e das principais economias emergentes, a Colômbia também está desenvolvendo um intercâmbio de compensações para promover reduções voluntárias de gases de efeito de estufa. O foco inicial incluirá projetos florestais nacionais, especificamente, projetos para reduzir emissões decorrentes do desmatamento e degradação de terras (REDD) e créditos deverão ser registrados.