

**MOISES TERUEL DE OLIVEIRA PAUFERRO**

**USO DO ETANOL COMO COMBUSTÍVEL PARA MOTORES  
DIESEL: UMA DISCUSSÃO SOBRE A VIABILIDADE**

**SAO CAETANO DO SUL**

**2012**

**MOISES TERUEL DE OLIVEIRA PAUFERRO**

**USO DO ETANOL COMO COMBUSTÍVEL PARA MOTORES  
DIESEL: UMA DISCUSSÃO SOBRE A VIABILIDADE**

Monografia apresentada ao curso MBA – Gestão Ambiental e Práticas de Sustentabilidade, da Escola de Engenharia Mauá do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia para obtenção do título de Especialista.

Orientador: Prof. Dr. Mauricio Assumpção Trielli.

**SAO CAETANO DO SUL**

**2012**

Paufferro, Moises Teruel de Oliveira

Uso do Etanol como combustível para motores diesel: uma discussão sobre a viabilidade. Moises Teruel de Oliveira Paufferro – São Caetano do Sul, SP: CEUN-EEM, 2012.

51 p.

Monografia (Especialização) — MBA – Gestão Ambiental e Práticas de Sustentabilidade, Escola de Engenharia Mauá do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, SP, 2012.

Orientador: Prof. Dr. Mauricio Assumpção Trielli

1. Tecnologias alternativas. 2 . Motores diesel. 3. Motores a Etano. 4. biocombustíveis.

Instituto Mauá de Tecnologia. Centro Universitário. Escola de Engenharia Mauá. II. Título.

Aos meus pais que sabiamente construíram as bases de minha educação.  
À minha esposa, sempre amiga, companheira, conselheira e apoiadora incondicional deste  
projeto.  
Ao meu filho que abdicou de muitos momentos comigo devido à minha dedicação a esta  
nobre tarefa.

## **AGRADECIMENTOS**

Meus agradecimentos aos Professores, Coordenadores e Colegas do curso de MBA – Gestão Ambiental e Práticas de Sustentabilidade que viabilizaram este projeto e em especial ao meu orientador, Prof. Dr Mauricio Trielli que pacientemente e sabiamente conduziu a orientação para a realização deste trabalho.

A humanidade não se propõe nunca senão resolver os problemas que ela pode resolver, pois, aprofundando a análise, ver-se-á sempre que o próprio problema só se apresenta quando as condições materiais para resolvê-lo existem ou estão em vias de existir.

**Karl Marx**

## RESUMO

A grande maioria dos veículos de transporte de cargas pesadas ou meio-pesadas utiliza óleo diesel como combustível de seus propulsores, os denominados motores de combustão interna de ignição por compressão ou motores diesel. Entretanto, o abatimento e a redução dos gases poluentes e do material particulado produzido durante a combustão do óleo diesel é uma tarefa cada vez mais difícil para os fabricantes desses motores. Apesar dos grandes esforços dispendidos por esses fabricantes nas últimas décadas em desenvolver tecnologias de injeção, novas formas de câmaras de combustão e dispositivos de pós-tratamento capazes de reduzir os níveis de emissão para atmosfera dos poluentes, enquadrando-os aos limites cada vez mais restritivos das legislações ambientais, busca-se também o uso de combustíveis alternativos ao óleo diesel, preferencialmente renováveis. Os estudos e experimentos relativos a esse processo de desenvolvimento acontecem, principalmente, em países onde se localizam as matrizes dos fabricantes destes motores e os resultados chegam ao Brasil por meio de suas filiais ou empresas de importação visando satisfazer as exigências impostas pela legislação ambiental brasileira que tende a seguir, com certo atraso, as que vigoram naqueles países. Neste contexto, uma das opções estudadas é a alternativa de substituir, total ou parcialmente, o óleo diesel por etanol, uma vez que este combustível se firmou nas últimas três décadas como opção de combustível renovável para motores de veículos leves no Brasil movidos a gasolina ou na formação da mistura gasolina-álcool. Um primeiro passo para essa substituição é estudada para aplicações em ônibus coletivos urbanos e caminhões de frotas cativas. O presente trabalho pretende mostrar as principais tecnologias disponíveis para redução das emissões dos motores de ignição por compressão pelo uso do etanol, visando contribuir para análises de estudos de viabilidade do uso desse biocombustível.

Palavras chave: tecnologias alternativas, motores diesel, motores a etanol, biocombustíveis.

## **ABSTRACT**

The great majority of the heavy or medium duty vehicles use diesel oil as fuel in its propellers, the named ignition compression internal combustion engines or diesel engines. However, the mitigation and the reduction of the pollutants gases and particulate matter obtained produced from the combustion process it is a highly important and difficult task to the engine manufactures. Despite the hard efforts expended by these manufacturers in last decades to develop injection technologies, new combustion chambers designs and after-treatment devices able to reducing the pollutants levels emitted to the atmosphere, framing on the more and more restrictive limits set by the environmental legislation, looking for the use of alternative fuels too, preferably renewable. The studies and experiments related to this process of development occur specially in countries where are located the headquarters of the manufacturer head offices of these engines and the results arrive in Brazil through its subsidiaries or to meet theirs import requirements imposed by the Brazilian environmental legislation that tends to follow with some delay, those existing in those countries. In this context, an option is the partial or total exchange of the diesel by ethanol, which is an option already used in the last three decades as renewable fuel in light duty vehicles in total substitution of the gasoline or making the blend so called gasohol. As the first step toward this exchange, is studied the application on urban buses and captive truck fleets. This work intent to show the mainly technologies to reduce emissions in compression ignition engines by use of ethanol, aiming to contribute in feasibility studies analysis about this biofuel.

**Keywords:** Alternative technologies, diesel fueled engines, ethanol fueled engines, biofuels.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>FIGURA 1 –</b>	Evolução da produção de álcool a partir da moagem de cana	24
<b>FIGURA 2 –</b>	Representação esquemática para produção de derivados do milho	25
<b>FIGURA 3 –</b>	Motor SCANIA modelo DC9 E02	32
<b>FIGURA 4 –</b>	Curvas características do motor DC9 E02 270 EEV Ethanol	42
<b>FIGURA 5 –</b>	Curvas características do motor DC9 29 280 EEV	43
<b>GRÁFICO 1 –</b>	Produção mundial de petróleo em milhões de barris por dia	37
<b>GRÁFICO 2 –</b>	Preço do petróleo em US\$/barril	38
<b>QUADRO 1 –</b>	Tipos de aplicações: Veiculares, Marítimas e Estacionárias.	33
<b>QUADRO 2 –</b>	Matriz de decisão	45

## LISTA DE TABELAS

<b>TABELA 1 –</b>	<b>LIMITES DE EMISSÃO PARA MOTORES DE VEÍCULOS PESADOS MOVIDOS A ÓLEO DIESEL DE ACORDO COM AS FASES DO PROCONVE</b>	<b>17</b>
<b>TABELA 2 –</b>	<b>TIPOS DE PETRÓLEO</b>	<b>23</b>
<b>TABELA 3 –</b>	<b>COMPOSIÇÃO ELEMENTAR DO PETRÓLEO</b>	<b>23</b>
<b>TABELA 4 –</b>	<b>PRINCIPAIS CONSTITUINTES DA CANA DE AÇÚCAR</b>	<b>25</b>
<b>TABELA 5 –</b>	<b>CARACTERÍSTICAS DO ÓLEO DIESEL</b>	<b>27</b>
<b>TABELA 6 –</b>	<b>CARACTERÍSTICAS DO ETANOL</b>	<b>29</b>
<b>TABELA 7 –</b>	<b>DIFERENÇAS EM MANUTENÇÕES PREVENTIVAS DE DOIS MOTORES DE MESMA POTÊNCIA QUE UTILIZAM COMO COMBUSTÍVEIS DIFERENTES</b>	<b>33</b>
<b>TABELA 8 –</b>	<b>PREÇOS AO CONSUMIDOR DO ETANOL HIDRATADO EM R\$/LITRO</b>	<b>35</b>
<b>TABELA 9 –</b>	<b>PREÇOS AO CONSUMIDOR DO ÓLEO DIESEL EM R\$/LITRO</b>	<b>35</b>
<b>TABELA 10 –</b>	<b>PREÇOS MÉDIOS AO CONSUMIDOR</b>	<b>35</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
API	<i>American Petroleum Institute</i>
CN	número de cetano
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
EGR	<i>Exhaust Gas Recirculation</i>
EHC	Etanol Hidratado Combustível
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
EPE	Empresa de Pesquisas Energéticas
Fronape	Frota Nacional de Petroleiros
GNV	Gás Natural Veicular
MP	material particulado
N <sub>2</sub> O	óxido nitroso
NO	óxido nítrico
NO <sub>2</sub>	dióxido de nitrogênio
NO <sub>x</sub>	óxidos de nitrogênio
OBD	<i>On Board Diagnose</i>
OPEP	Organização dos Países Exportadores de Petróleo
PNMA	Programa Nacional do Meio Ambiente
ppm	partes por milhão
PROCONVE	Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores
SCR	<i>Selective Catalytic Reduction</i>
Sisnama	Sistema Nacional do Meio Ambiente
SLP	Sistema de Levantamento de Preços
VGT	<i>variable-geometry turbocharger</i>

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	12
1.1 JUSTIFICATIVA	13
1.2 OBJETIVOS	14
1.3 METODOLOGIA	15
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	16
2.1 PADRÕES DE EMISSÃO	16
2.2 TECNOLOGIAS APLICADAS AOS MOTORES DIESEL PARA VIABILIZAR O USO DE ETANOL EM SUBSTITUIÇÃO TOTAL OU PARCIAL DO ÓLEO DIESEL	17
2.2.1 Substituição total do óleo diesel por etanol aditivado com recuperadores de lubricidade e de número de cetano	17
2.2.2 Substituição parcial do óleo diesel por mistura com etanol	18
2.2.3 Substituição parcial do óleo diesel por fumigação de etanol no coletor de admissão	19
2.2.4 Substituição parcial de óleo diesel por etanol por meio do uso de dupla – injeção	20
2.2.5 Substituição total de óleo diesel por etanol com o uso de superfícies quentes (velas aquecedoras)	20
2.2.6 Substituição parcial de óleo diesel por injeção de etanol internamente ao cilindro do motor no início do tempo de compressão	21
2.3 TECNOLOGIAS DE PÓS-TRATAMENTO PARA REDUÇÃO DE NO <sub>x</sub>	21
2.3.1 <i>Exhaust Gas Recirculation</i> (EGR)	21
2.3.2 <i>Selective Catalytic Redution</i> (SCR)	22
2.4 MATÉRIAS PRIMAS PARA PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEIS	22
2.4.1 Petróleo	22
2.4.2 Biomassa	23
<b>3 CONSIDERAÇÕES TÉCNICAS E ECONÔMICAS</b>	26
3.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DOS COMBUSTÍVEIS	26
3.1.1 Número de Cetano	26
3.1.2 Ponto de Fulgor	26

<b>3.1.3 Massa Específica</b>	26
<b>3.1.4 Teor de Enxofre</b>	26
<b>3.2 CARACTERÍSTICAS DO ÓLEO DIESEL</b>	27
<b>3.3 CARACTERÍSTICAS DO ETANOL</b>	29
<b>3.4 INFRA-ESTRUTURA PARA PRODUÇÃO, ARMAZENAMENTO E DISTRIBUIÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS</b>	33
<b>3.5 DISPONIBILIDADE DE MOTORES</b>	31
<b>3.6 MANUTENÇÃO</b>	32
<b>3.7 MÃO-DE-OBRA</b>	33
<b>3.8 CONSUMO DE COMBUSTÍVEL</b>	34
<b>3.9 PREÇOS DOS COMBUSTÍVEIS</b>	34
<b>3.10 SAZONALIDADE NA PRODUÇÃO DO ETANOL</b>	36
<b>3.11 VARIAÇÃO DO PREÇO DO PETRÓLEO</b>	37
<b>4 DISCUSSÃO E ANÁLISE</b>	39
<b>4.1 DISCUSSÃO SOBRE AS TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS</b>	39
<b>4.2 DISCUSSÃO SOBRE FATORES POLÍTICOS</b>	43
<b>4.3 MATRIZ DE DECISÃO</b>	44
<b>5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	47
<b>REFERÊNCIAS</b>	49

## 1 INTRODUÇÃO

O uso do etanol em substituição ao óleo diesel é defendido por seu grande potencial em promover a redução da produção de material particulado e também de facilitar o uso de dispositivos de pós-tratamento mais simples que visem o abatimento dos óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), produzidos na combustão em motores de ignição por compressão.

Essa afirmação se respalda no fato do etanol incorporar quantidades de enxofre muito menores que aquelas verificadas em combustíveis diesel derivados de petróleo, mesmo submetidos a hidrogenação catalítica (hidrotratamento); isso reduz a produção de ácidos de enxofre, sulfúrico e sulfuroso fundamentalmente, que podem comprometer a vida útil dos motores e inviabilizar atualmente o uso do dispositivo de pós-tratamento denominado *Exhaust Gas Recirculation* (EGR). Esse tipo de dispositivo permite reenviar parte dos gases resultantes da combustão de volta ao coletor de admissão e diluí-lo com a nova carga de ar admitido, diminuindo a possibilidade de produção de NO<sub>x</sub>; substitui o sofisticado e oneroso sistema *selective catalytic reduction* (SCR) que necessita da injeção de um insumo adicional, a uréia que, uma vez convertida em amônia (NH<sub>3</sub>) em temperaturas superiores a 200°C, realiza a reação de redução de NO<sub>x</sub> em um catalisador instalado na extremidade do escapamento do motor.

A sigla NO<sub>x</sub> faz referência aos seguintes gases: óxido nítrico (NO), dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O). Esses gases, quando absorvidos pelas vias respiratórias, provocam, além de broncoconstrições, várias doenças de pele e vias respiratórias (YADAV; SETH, 1998).

Além disso, quando emitido para a atmosfera, pode combinar-se com a umidade do ar formando ácidos (nítrico e nitroso) e torna-se um componente importante para produção de ozônio catalisada pela luz solar. O ozônio, por sua vez, é um forte oxidante que promove embolias e corrosão metálica intensa.

O etanol apresenta propriedades físico-químicas que minimizam consideravelmente estes problemas, mas, que por outro lado, exigem o uso de aditivos para que se aproximem daquelas observadas no óleo diesel, necessários para o atingimento dos níveis de eficiência típicos dos motores diesel movidos pelo derivado de petróleo.

Como um exemplo importante disso temos o número **de** cetano (CN) que, no etanol, assume valores muito baixos comparado com os típicos do óleo diesel devido à sua elevada temperatura de auto-ignição; isso aumenta o retardamento da ignição da mistura combustível-

ar, exigindo aumento de razões volumétricas dos motores ou uso de aditivos promovedores de ignição.

Outra característica desfavorável do etanol relativamente ao óleo diesel é sua baixa lubricidade, que pode reduzir significativamente a vida útil de componentes dos sistemas de injeção tais como bombas e bicos injetores utilizados nos motores diesel. Essa propriedade pode ser entendida como a capacidade do combustível aderir à superfície dos materiais, atribuindo-lhes facilidade de promover lubrificação por camada-limite. Trata-se de uma propriedade importante pelo fato das tolerâncias de fabricação dos componentes de sistemas de injeção serem muito pequenas para garantir a capacidade de vedação quando elevadas pressões de trabalho são exigidas. Como exemplo, o motor MWM Maxxforce da série NGD 9.3E trabalha com pressões próximas de 2.400 bar em alguns pontos de seu sistema de injeção (MWM INTERNATIONAL, 2011).

O menor poder calorífico do etanol, da ordem de 27 MJ/kg, se comparado com o do óleo diesel, que é da ordem de 42 MJ/kg, representa mais uma propriedade que exige compensação, podendo, parcialmente, ser conseguida com o aumento da taxa de compressão do motor.

É notável que essas e outras características dos combustíveis, apresentadas posteriormente na seção 3 deste trabalho, são determinantes para configurar adequadamente os motores, fazendo-os capazes de alcançar baixos níveis de emissão de poluentes. As principais tecnologias disponíveis para se chegar nessas configurações apresentam vantagens e desvantagens e são apresentadas na revisão bibliográfica, na seção 2.

Além da viabilidade técnica enfatizada anteriormente, é importante ressaltar que o uso do etanol em motores diesel de forma abrangente exige, também, a análise dos fatores relacionados à sua viabilidade econômica tais como disponibilidade, qualidade, preço e produção de sua matéria prima que, no caso do Brasil, é a cana-de-açúcar. A seção 5 traz indicadores que viabilizam a análise desse tipo de viabilidade.

Nas seções 4 – Discussão e Análise e 5 – Conclusões e Considerações Finais são avaliadas as possibilidades de aplicação das tecnologias à luz das limitações a elas inerentes.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A entrada de veículos equipados com motores de ignição por compressão movidos a etanol na frota de uma das empresas de ônibus da região metropolitana da cidade de São Paulo e o lançamento, na FENATRAN 2011, de um modelo de caminhão do fabricante

SCANIA, configurado para o segmento de distribuição de mercadorias em meio urbano, conduz, num primeiro momento, ao estado de otimismo sob os pontos de vista social e econômico do uso do etanol.

A formação desse cenário, ainda em fase embrionária no Brasil, tem como principal razão, a percepção de fabricantes de motores sobre os seguintes fatores:

- a) disponibilidade dos combustíveis de origem fóssil no longo prazo;
- b) pressão crescente, geradas a partir da sociedade civil e governos, por diminuição de emissão de poluentes e;
- c) necessidade vital de manter a imagem de suas marcas associadas ao conceito de sustentabilidade.

Entretanto, do ponto de vista técnico, há a necessidade de análise a respeito das vantagens e desvantagens desta modalidade de utilização da energia renovável, pois o uso do etanol como combustível em motores diesel exige soluções complexas para problemas técnicos e logísticos que se refletem diretamente nos custos de operação para veículos pesados.

## 1.2 OBJETIVOS

Este estudo tem como principal objetivo identificar quais os principais desafios tecnológicos e quais as barreiras existentes para utilização do biocombustível etanol em motores diesel para veículos pesados, considerando os aspectos e impactos ambientais relacionados a essa aplicação, reunindo assim, subsídios que contribuam para responder as seguintes questões:

- a) Qual o atual estágio de desenvolvimento tecnológico dos motores de combustão interna e quais as tecnologias previstas para serem implementadas visando reduzir a emissões de poluentes dos veículos pesados?
- b) Quais as vantagens e desvantagens que os motores de ignição por compressão movidos a etanol apresentam quando comparados a equivalentes movidos a óleo diesel?



### 1.3 METODOLOGIA

A metodologia empregada neste estudo foi pesquisa bibliográfica. Foram levantadas obras de diversos autores tanto em meio físico como eletrônico, publicações de congressos e da imprensa escrita especializada.

Entre as obras consultadas citam-se:

- Alternative fuels: emissions, economics, and performance, escrito por Jones e Maxwell;
- Aplicação de motores biocombustível Diesel/ Gás Natural, contribuição de Ricardo Pereira, Sérgio Braga, Carlos Braga e L. G. Freire, por ocasião do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás;
- Corrosão metálica associada ao uso de combustíveis minerais e biocombustíveis organizado por Sebastião Elias Kuri e Alessandra Regina Pepe Ambrozim.

Consultas às informações de órgãos oficiais também fizeram parte da pesquisa, mantendo o estudo balizado em parâmetros estabelecidos por lei. Como exemplo, cita-se o site do Ministério do Meio Ambiente, onde o acesso ao arcabouço legal está disponível.

A imprensa escrita especializada foi consultada por conectar o conteúdo pesquisado na bibliografia acadêmica às práticas implementadas no mercado pelos fabricantes. Como exemplo, citam-se a revista *Jornauto*, dirigida por Gilberto Gardesani e revista *Acontece*, publicação da Scania editada por Tatiane Leonardo.

O estudo do material se deu sistematicamente de modo a fundamentar a pesquisa realizada.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

São apresentados na revisão bibliográfica os parâmetros de emissão de poluentes estabelecidos pelo CONAMA e as principais tecnologias disponíveis para viabilizar o atendimento ao que é exigido na resolução relativa a esta matéria. As matérias primas e os combustíveis utilizados nos motores diesel também estão abordados nesta seção.

### 2.1 PADRÕES DE EMISSÃO

No Brasil, o Programa Nacional do Meio Ambiente (PNMA), ligado ao Ministério do Meio Ambiente, “[...] atua na melhoria da qualidade do meio ambiente em todo o País por meio de incentivo à gestão integrada dos recursos naturais e do fortalecimento das instituições que compõem o Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA)” (BRASIL, 2011).

Neste sistema há um órgão consultivo e deliberativo denominado CONAMA, instituído pela Lei nº 6938/81, que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, regulamentada pelo Decreto nº 99.274/90. Segundo o Ministério do Meio Ambiente, uma das competências do CONAMA é a de “[...] estabelecer, privativamente, normas e padrões nacionais de controle da poluição causada por veículos automotores, aeronaves e embarcações, mediante audiência nos Ministérios competentes.” (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 1986)

Sua atuação se estabelece por meio de Resoluções “[...] quando se tratar de deliberação vinculada a diretrizes e normas técnicas, critérios e padrões relativos à proteção ambiental e ao uso sustentável dos recursos ambientais.” (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 2011).

No uso de suas atribuições, o CONAMA instituiu diversas ações por meio da Resolução CONAMA nº18/86, o Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE). Entre elas destaca-se: “reduzir os níveis de emissão de poluentes por veículos automotores visando o atendimento aos Padrões de Qualidade do Ar, especialmente em centros urbanos” e “promover o desenvolvimento tecnológico nacional, tanto na engenharia automobilística, como também em métodos e equipamentos para ensaios e medições da emissão de poluentes” (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 1986)

Martins e Souza (2007) afirmam que, no Brasil, a legislação americana é a base para definição de normas de controle das emissões de poluentes por veículos leves (até 3.856 kg de

peso bruto total-PBT) e segue as normas europeias para o controle de emissões dos veículos pesados (acima de 3.856 kg de PBT).

Para os veículos pesados, que consomem óleo diesel, o PROCONVE estabeleceu os padrões de emissão conforme descrito na Tabela 1, a seguir.

**TABELA 1 - LIMITES DE EMISSÃO PARA MOTORES DE VEÍCULOS PESADOS MOVIDOS A ÓLEO DIESEL DE ACORDO COM AS FASES DO PROCONVE**

PROCONVE	CONAMA	Vigência	NOx (g/kWh)	MP (g/kWh)	Teor de S (PPM)
P1	18/86	1989 a 1993	18	-	-
P2	08/93	1994 a 1995	14,4	0,60	3.000 a 10.000
P3	08/93	1996 a 1999	9,00	0,40	3.000 a 10.000
P4	08/93	2000 a 2005	7,00	0,15	3.000 a 10.000
P5	315/02	2006 a 2008	5,00	0,10	500 a 2000
P6	315/02	2009 a 2012	3,5	0,02	50
P7	403/08	2012 a 2013	2,00	0,02	10

FONTE: Ladeira (2010)

Esses padrões e as tecnologias a serem utilizadas pelos fabricantes de motores diesel são estabelecidos por Grupos de Trabalho formados por especialistas.

## 2.2 TECNOLOGIAS APLICADAS AOS MOTORES DIESEL PARA VIABILIZAR O USO DE ETANOL EM SUBSTITUIÇÃO TOTAL OU PARCIAL DO ÓLEO DIESEL

Nesta seção são apresentadas seis alternativas de tecnologias aplicáveis à redução de poluentes gerados pelos motores diesel. Os principais aspectos tanto destas tecnologias como dos combustíveis nelas utilizados também estão aqui descritos.

### 2.2.1 Substituição total do óleo diesel por etanol aditivado com recuperadores de lubricidade e de número de cetano

De acordo com o que já foi mencionado anteriormente, a alimentação de motores diesel exclusivamente com etanol exige o uso de recuperadores de lubricidade e de aumentadores de número de cetano.

O número de cetano é uma das principais propriedades do combustível para motores de ignição espontânea por tratar-se de uma característica físico-química relacionada ao intervalo de tempo entre a injeção do combustível e sua ignição quando submetido às condições de temperatura e pressão que se estabelecem na câmara de combustão.

Esse intervalo de tempo, denominado atraso de ignição, é fundamental que seja curto para que se garanta que a combustão ocorra de forma eficiente termicamente, ou seja, a mais isovolumétrica possível.

Para o óleo diesel, o número de cetano deve situar-se entre 40 e 55, considerando os parâmetros utilizados no projeto das câmaras de combustão dos motores diesel; o etanol tem número de cetano entre 5 e 15, o que provoca atrasos significativos na ignição em motores diesel.

Com vistas à melhoria dessas propriedades, são utilizados aditivos, que representam aumento no custo de operação. Além disso, devem ser adicionados também redutores de corrosão para inibir a ação do etanol sobre os componentes, formados a partir de materiais metálicos e elastômeros com os quais ele entra em contato.

Apesar do uso exclusivo de etanol reduzir drasticamente a produção de poluentes na forma de material particulado, em geral ocorre um significativo aumento de produção de aldeídos. Os aditivos promovedores de cetano, que em geral são compostos nitrogenados, e aumentadores de lubricidade, que geralmente são ésteres de cadeias longas ou policíclicos aromáticos, podem fomentar as produções de óxidos de nitrogênio e de hidrocarbonetos carcinogênicos.

Corrosão, devida principalmente à presença de cloretos, acetatos e água no etanol, pode ser significativa. Segundo Ambrozim e Kuri (2009), o efeito corrosivo em uma mistura de etanol anidro e óleo diesel com 10% em volume desse álcool, ocorre em ligas de cobre e em algumas ligas de alumínio a temperaturas próximas de 130°C.

### **2.2.2 Substituição parcial do óleo diesel por mistura com etanol**

Pelo fato dos álcoois leves como o etanol se caracterizarem como moléculas polares, eles não são miscíveis em porcentagens acima de 3% no óleo diesel que é basicamente constituído por moléculas apolares. Desta forma, torna-se imprescindível o uso de substâncias que promovam a necessária homogeneização dessas misturas, os chamados cossolventes que, em geral, são substâncias de moléculas longas e que se caracterizam por possuírem afinidades químicas com ambos os tipos de moléculas: polares e apolares.

Apesar de se observar sensíveis reduções nas produções de material particulado quando se utiliza essa técnica, as baixas lubricidades e altas pressões de vapor dos álcoois podem se manifestar, causando danos significativos sobre os componentes dos sistemas de

injeção originais dos motores fabricados para uso exclusivo de óleo diesel. A produção de aldeídos comumente aumenta.

Rangel e Pereira (2002) observaram em testes no motor Mercedes-Benz, modelo OM355/6A, resultados preocupantes devido à perda de “viscosidade aparente” (lubricidade) do combustível quando misturado com álcool, ocasionando redução do poder de lubrificação, comprometendo a sua durabilidade e, principalmente, dos componentes do sistema de injeção.

A baixa solubilidade do etanol e óleo diesel e a instabilidade desta mistura quando ocorre variação da temperatura, configuram um dos principais problemas para utilização dessa alternativa. Nesse mesmo teste foi constatado que a redução da viscosidade aparente do combustível e do número de cetano mudou a característica do jato de combustível no cilindro promovendo maior atraso na combustão. Os autores concluem que há possibilidade de viabilizar a aplicação em escala no uso desse tipo de mistura mas reconhecem que são necessários testes em outros tipos de motores e de durabilidade em campo.

### **2.2.3 Substituição parcial do óleo diesel por fumigação de etanol no coletor de admissão**

Segundo Gerpen e Meter (1990), fumigação de álcool no coletor de admissão consiste em misturar esse combustível com ar antes de iniciar o processo de compressão no cilindro disponibilizando-o para queima na câmara de combustão, complementando a reduzida massa de óleo diesel injetado dentro do cilindro no final da compressão.

Gerpen e Meter (1990) investigaram, no início da década de 90, os efeitos da fumigação de álcool nas emissões de gases de motores diesel. Foram motivados pelas restrições definidas pela *Environmental Protection Agency* (EPA), a agência ambiental dos Estados Unidos, consideradas drásticas naquele momento.

Com o uso de fumigação, esses pesquisadores observaram reduções de 12,7% e 28,3% para emissões de óxidos de nitrogênio (NOx) e de material particulado (MP), respectivamente. A redução de produção de óxidos de nitrogênio deveu-se às menores temperaturas observadas na câmara de combustão nas diversas condições de funcionamento do motor e a redução de material particulado resultou da maior rapidez com que a combustão se processou e pelos menores teores de enxofre envolvidos. A produção de aldeídos, de forma semelhante à alternativa anterior, pode aumentar.

Nesse caso, em função da eficiência de substituição, pode-se também observar variações nas produções de monóxido de carbono e hidrocarbonetos. Quanto menor for essa eficiência, maiores serão as produções desses poluentes.

#### **2.2.4 Substituição parcial de óleo diesel por etanol por meio do uso de dupla-injeção**

O uso de dupla injeção, implementado e comercializado no Brasil na década de 1980, apesar de promover maiores eficiências de substituição que as observadas com o uso das alternativas anteriores, também necessita de aditivação do etanol para preservar a vida útil dos componentes de injeção.

Além de ter a alimentação complicada pelo uso de dois sistemas completos de injeção, um para o óleo diesel e outro para etanol, o etanol, quando não aditivado, apresenta alto potencial corrosivo.

#### **2.2.5 Substituição total de óleo diesel por etanol com o uso de superfícies quentes (velas aquecedoras)**

O uso das velas de aquecimento, atuando nas câmaras de combustão, promove, principalmente, redução de formação dos gases poluentes, economia de combustível e redução de fumaça branca.

As velas aquecedoras, também conhecidas como *glow plugs*, elevam a temperatura no interior do cilindro para até 850°C, eliminando os efeitos do menor número de cetano do etanol. A eficiência de aquecimento típica desse tipo de vela pode elevar a temperatura do motor até à condição ideal de funcionamento em poucos segundos, contribuindo para a redução na formação e fumaça branca (BOSCH, 2011).

Essas velas podem ser controladas por módulos que fazem a leitura da temperatura de operação do motor e processam os dados enviando comandos que acionam ou interrompem o funcionamento deste sistema, de acordo com a temperatura nas áreas sensíveis à atuação do calor por elas dissipadas.

Os resultados obtidos e os problemas apresentados com o uso de velas de aquecimento (*glow-plugs*) para ativar a reação de combustão no etanol em superfície aquecida são muito semelhantes aos observados com o uso de dupla-injeção.

Em termos de emissões, os resultados obtidos são similares aos dos casos anteriores de substituição total de óleo diesel por etanol.

### **2.2.6 Substituição parcial de óleo diesel por injeção de etanol internamente ao cilindro do motor no início do tempo de compressão**

Com o intuito de manter a vantagem de injeção a baixas pressões, mas buscando aumentar a eficiência energética da substituição, a injeção de etanol no interior do cilindro no início do tempo de compressão parece ser mais adequada.

Desta forma, a mistura etanol-ar formada durante o curso ascendente do pistão, concentrada no interior da câmara de combustão, terá sua temperatura de auto-ignição alcançada como consequência da combustão do óleo diesel injetado previamente.

A porcentagem de óleo diesel substituída por etanol é limitada pela possibilidade de ocorrência de pré-ignição da carga de ar-etanol comprimida e pela garantia de obtenção de substituição eficiente.

De forma radical, pode-se ainda fazer com que motores originalmente projetados para funcionar com combustível diesel passem a utilizar combustíveis de alta octanagem e baixo cetano. Nesse procedimento, denominado ottolização, são retirados os componentes de injeção diesel e instalados sistema de injeção de baixa pressão ou carburadores, bem como sistemas elétricos para uso velas de ignição, reduzindo a taxa de compressão (BRAGA et al., 2005).

## **2.3 TECNOLOGIAS DE PÓS-TRATAMENTO PARA REDUÇÃO DE NO<sub>x</sub>**

Uma das técnicas para o tratamento de poluentes é denominado pós-tratamento devido a ação para sua redução ocorrer após a geração. Nesta seção são citadas duas tecnologias aplicadas em motores com a finalidade de controlar o volume de NO<sub>x</sub> emitidos pela combustão dos motores.

### **2.3.1 *Exhaust Gas Recirculation* (EGR)**

Citado na introdução deste estudo, a recirculação de gases de escapamento consiste em fazer com que até 25% dos gases produzidos na combustão sejam conduzidos de volta à câmara de combustão, passando antes por sistema de arrefecimento e mistura com os gases de admissão para reduzir sua temperatura.

O resultado que se obtém neste processo é a diminuição da temperatura máxima no momento da explosão. Combinado com menor quantidade de oxigênio disponível para a combustão, a consequência é economia de combustível e baixos níveis de formação de NO<sub>x</sub>.

### 2.3.2 Selective Catalytic Reduction (SCR)

Esse dispositivo dispõe de um sensor na saída dos gases de escape que detecta a quantidade de NOx que está sendo emitida pelos cilindros do motor após a combustão. Uma central eletrônica recebe a informação enviada pelo sensor e aciona válvulas que liberam doses de uréia diluída em água desmineralizada em solução de 32,5% de uréia -  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$  em água.

Em alta temperatura, acima de 220°C, o gás de escape mistura-se com a uréia que, na presença de água, ao passar por um catalisador, produz amônia -  $\text{NH}_3$ . Essa amônia reage com os óxidos de nitrogênio formando nitrogênio e água, por exemplo, como mostra a reação  $\text{NO} + \text{NO}_2 + 2\text{NH}_3 = 2\text{N}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$ , reduzindo a emissão de NOx em até 80%.

## 2.4 MATÉRIAS PRIMAS PARA PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEIS

Os combustíveis discutidos neste trabalho tem como origem matérias primas de diferentes fontes. Nesta seção são apresentadas as principais características de fonte fóssil, o petróleo e biomassas.

### 2.4.1 Petróleo

O óleo diesel tem como matéria prima o petróleo, cujas propriedades variam de acordo com o local de onde foi extraído.

Segundo Almeida (2010), “[...] cada campo de petróleo produz um tipo de óleo” e, assim, centenas de tipos de petróleo são ofertados aos mercados. Sua composição química é resultado da “mistura de hidrocarbonetos, moléculas compostas de carbono e hidrogênio, e compostos voláteis” e ainda óxidos de enxofre - SOx, oxigênio e nitrogênio.

Entretanto, três características são predominantes nos diferentes tipos de petróleo:

- 1) tipo de hidrocarboneto predominante (parafinas, olefinas, naftênicos ou aromáticos);
- 2) densidade, que caracteriza o petróleo de tipo leve, médio ou pesado; e esta propriedade é definida pela *American Petroleum Institute* (API);
- 3) teor de enxofre, que define o petróleo como *sweet*, para concentrações de até 0,5% de sua massa, ou ácidos se essa concentração for maior que 0,5%.



A Tabela 2 relaciona os principais tipos de petróleos comercializados no planeta, sua origem e os respectivas densidades (expressas em grau API).

**TABELA 2 - TIPOS DE PETRÓLEO**

<b>Tipo de Petróleo</b>	<b>País de Origem</b>	<b>Grau API</b>
Mistura Suburina	Argélia	44
West Texas Intermediate (WTI)	Estados Unidos	40
Brent	Reino Unido	38
Benny Lager	Nigéria	37
Arabian Light	Arábia Saudita	34 Leves ↑
Minas	Indonésia	34
Isthma	México	34 Pesados ↓
Fateh	Dubai	32
Corvina	Brasil (Campos)	29
Tia Juana Leve	Venezuela	26
Cabiúnas / Marlin	Brasil (Campos)	19

FONTE: Gazeta Mercantil (1999 apud ALMEIDA, 2010)

A Tabela 3, a seguir, mostra a composição do petróleo em termos de elementos químicos e seus respectivos percentuais:

**TABELA 3 – COMPOSIÇÃO ELEMENTAR DO PETRÓLEO**

<b>Composição do petróleo de acordo com a Química e Engenharia do Petróleo</b>	
<b>Tipo de elemento Químico</b>	<b>% Encontrada em 1 litro de Petróleo</b>
Carbono	82% - O Carbono é o elemento predominante no Petróleo
Hidrogênio	12% - Atua junto como Carbono formando as moléculas
Nitrogênio	4% - Encontrado na forma de Amina
Oxigênio	1% - Muito pouco é encontrado
Sais	0,5 % - Raramente aparecem
Metais (Ferro, Cobre, etc...)	0,5 % - Considerados como resíduos

FONTE: Guiametal Noticias e informações (2011)

## 2.4.2 Biomassa

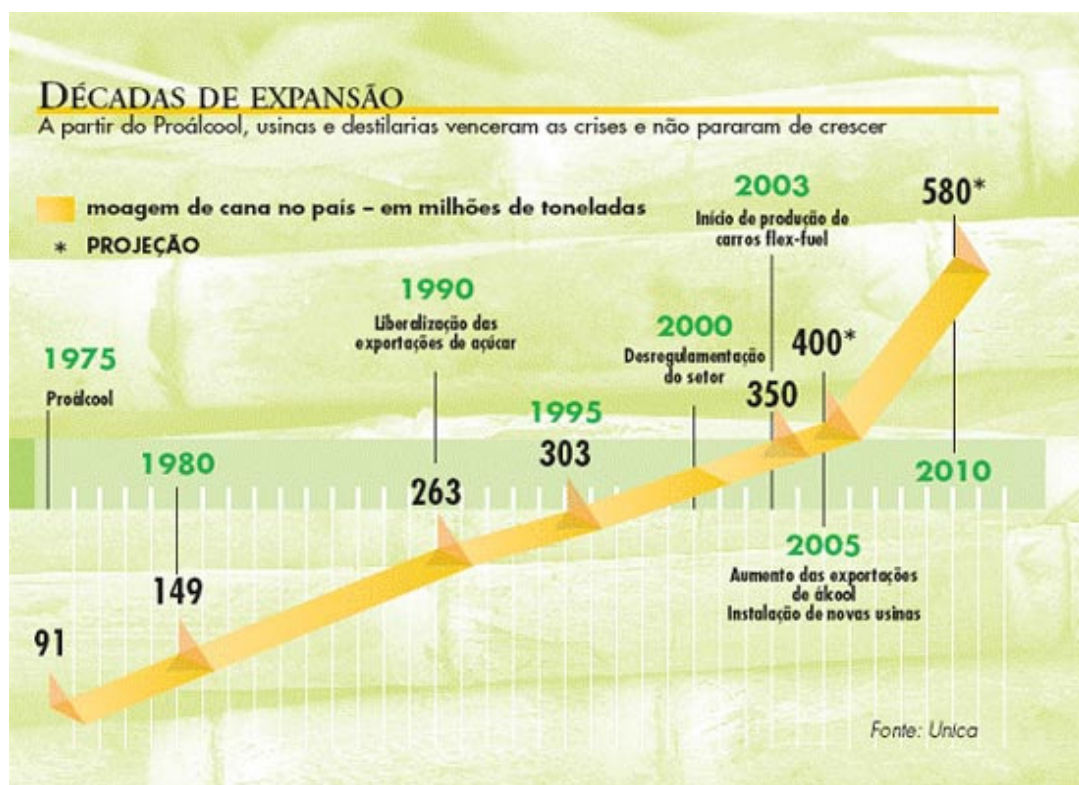
A partir da crise do petróleo de 1973 e principalmente após o segundo choque de 1979, o mundo passou a considerar a necessidade de encontrar combustíveis produzidos de

fontes renováveis. Pesquisas direcionadas para busca de combustíveis alternativos foram largamente realizadas e o etanol demonstrou bons resultados.

O etanol caracteriza-se como um líquido incolor e sua fórmula química é  $C_2H_5OH$ . É obtido a partir de fontes renováveis como cana-de-açúcar, beterraba e milho ou a partir da oxigenação de gases metano e etano. No caso do Brasil, é obtido a partir da sacarose, cuja fórmula é  $C_{12}H_{22}OH_{11}$ , oriunda de processo de fermentação da garapa da cana-de-açúcar.

O programa Proálcool, iniciado em 1975, desencadeou o processo que resultou na criação da infra-estrutura de produção e implementação de tecnologias que permitiu a inserção desse combustível no país. Um dos principais fatores que viabilizou a produção em larga escala, capaz de abastecer o mercado brasileiro com razoável competitividade foi a cogeração, que permitiu a utilização do bagaço da cana, resultante do processo de extração do caldo, como combustível em termoeletricas que, por sua vez, produzem energia utilizada no próprio processo produtivo do etanol (CAMPOS, 2010).

O crescimento na produção de etanol no Brasil pode ser vista na Figura 1.



**FIGURA 1** – Evolução da produção de álcool a partir da moagem de cana  
FONTE: União da Indústria de Cana-de-Açúcar (2011)

A Tabela 4 apresenta a constituição da matéria-prima utilizada para produção de etanol no Brasil.

**TABELA 4 - PRINCIPAIS CONSTITUINTES DA CANA DE AÇÚCAR**

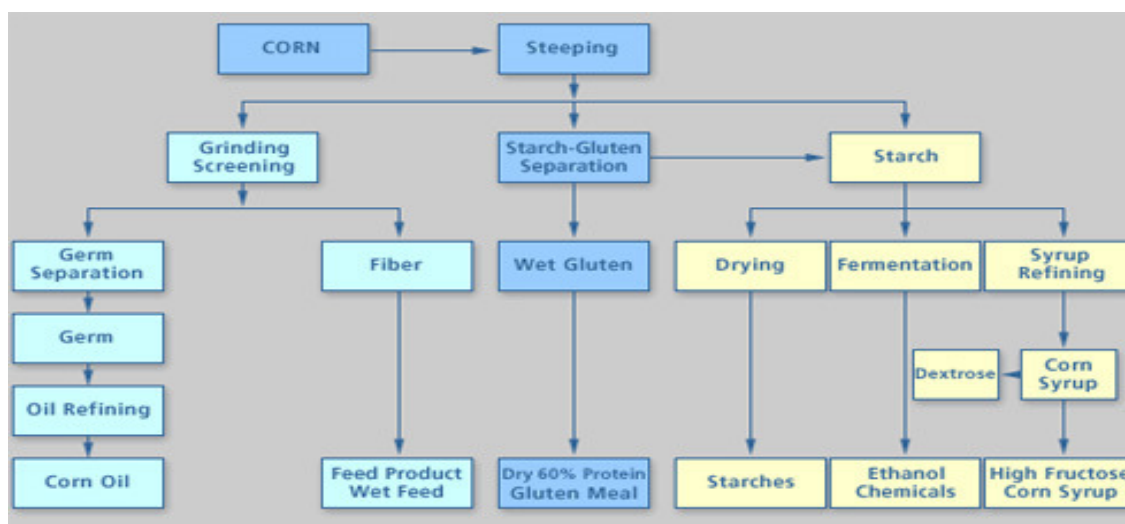
Constituintes	Sólidos Solúveis (%)
Açúcares	75 a 93
Sacarose	70 a 91
Glicose	2 a 4
Frutose	2 a 4
Sais	3,0 a 5,0
Ácidos inorgânicos	1,5 a 4,5
Ácidos orgânicos	1,0 a 3,0
Proteínas	0,5 a 0,6
Amido	0,001 a 0,05
Gomas	0,3 a 0,6
Ceras e Graxas	0,05 a 0,15
Corantes	3 a 5

Fonte: Portal São Francisco (2011)

Nos Estados Unidos, o etanol é obtido por amilase de grãos de milho.

Esse processo produz cerca de 3,7 mil litros por hectare contra os 7,0 mil litros por hectare de cana-de-açúcar no Brasil e não tem sido economicamente viável, necessitando de incentivos do governo federal. Para os Estados Unidos, o problema para produzir este combustível é que “o processo de obtenção do etanol consome mais energia que a obtida quando o combustível é queimado” (MAXWELL; JONES, 1994).

A Figura 2 mostra como a produção de etanol se encaixa dentro de um processo de aproveitamento racional do milho.

**FIGURA 2 – Representação esquemática para produção de derivados do milho**

FONTE: Renewable Fuels Association (2011)

### **3 CONSIDERAÇÕES TÉCNICAS E ECONÔMICAS**

O óleo diesel e o etanol apresentam características físico-químicas distintas porque se originam de fontes muito diferentes. Isto gera impactos econômicos importantes que são discutidos nesta seção.

#### **3.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DOS COMBUSTÍVEIS**

Algumas características importantes dos combustíveis, no que tange à utilização em motores diesel, são relacionadas e definidas a seguir:

##### **3.1.1 Número de Cetano**

Está relacionado com o intervalo de tempo decorrido entre a injeção do combustível e a auto-ignição da mistura combustível-ar na câmara de combustão.

##### **3.1.2 Ponto de Fulgor**

É a temperatura em que se observa vaporização suficiente do combustível líquido de forma que, misturado ao ar em excesso, se inflama ao entrar em contato com uma fonte de calor. É um parâmetro importante no que diz respeito à segurança de manipulação do combustível, bem como na sua capacidade de produzir emissões evaporativas ao ser armazenado em reservatórios.

##### **3.1.3 Massa Específica**

Massa Específica é o quociente entre a massa de um corpo fluido ou sólido e seu volume. Quanto maior seu valor, mais lenta costuma ser a combustão. A unidade de medida para essa propriedade no Sistema Internacional de Unidades – SI é  $\text{kg/m}^3$ .

##### **3.1.4 Teor de Enxofre**

A presença de enxofre nos combustíveis é crítico para a emissão de material particulado e óxidos de enxofre ( $\text{SO}_x$ ) que geram ácidos sulfuroso e sulfúrico na atmosfera

úmida. Sua presença nos combustíveis é medida em partes por milhão (ppm). Associa-se à fuligem (carvão), aumentando a massa de material particulado produzida.

### 3.2 CARACTERÍSTICAS DO ÓLEO DIESEL

O óleo diesel é constituído predominantemente de hidrocarbonetos alifáticos contendo de 8 a 28 átomos de carbono na cadeia. Durante o processo de produção, o diesel é destilado em temperaturas na faixa de 130 a 370°C. Contém ainda outros compostos que porventura destilam na mesma faixa de temperatura, tais como os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (que lhe atribuem lubricidade) e seus derivados alquílicos. Comercialmente, a composição do diesel varia de acordo com a origem do petróleo e com os diferentes processos de refino. (MENEZES, 2009).

A seguir na tabela 5, constam as especificações do óleo diesel de uso rodoviário conforme Regulamento Técnico ANP nº 8/2009, anexo da Resolução ANP nº 42, de 16.12.2009.

**TABELA 5 - CARACTERÍSTICAS DO ÓLEO DIESEL**

CARACTERÍSTICA (1)	UNIDADE	LIMITE			MÉTODO	
		Tipo A e B				
		S50	S500	S1800 (2)	ABNT NBR	ASTM
continua						
Aspecto	-	Límpido e Isento de Impurezas			Visual (3)	
Cor	-	(4)	vermelho		Visual (3)	
Cor ASTM max (5).	-	3,0			14483	D1500 D6045
Teor de biodiesel (7)	% volume	(6)			15568	-
Enxofre total max.	mg/kg	50				D2622 D5453 D7039 D7212 (8) D7220 (8)
			500	1800	14533	D2622 D4294 D5453
Destilação	°C				9619	D86
10% vol recuperados		Anotar				
50%vol recuperados		245 a 310				
85% vol recup max.			360 Max.	370		
90% recuperados		360 Max anotar	anotar			

CARACTERÍSTICA (1)	UNIDADE	LIMITE			MÉTODO	
		Tipo A e B				
		S50	S500	S1800 (2)	ABNT NBR	ASTM
conclusão						
Massa específica a 20 °C	Kg/m3	820  A 850 (9)	820 a  865	820 a 880	7148 14065	D1298 D4052
Ponto de fulgor min.	°C	38			7974 14598	D56 D93 D3828
Viscosidade a 40°C	mm2/s	2.0 a 5,0			10441	D445
Ponto de entupimento do filtro a frio, Max	°C	(10)			14747	D6371
Numero de cetano ou Numero de cetano derivado (NCD), min.	-	46	42 (11)	42 (11)	-	D613
						D6890
						D7170
Resíduo de carbono Ramsbottom no resíduo dos 10% finais da destilação, max.	% massa	0,25			14318	D524
Cinzas, max	% massa	0.010			9842	D482
Corrosividade ao cobre, 3h a 50°C, max.	-	1			14359	D130
Água (12) (13)	mg/kg	Anotar	-	-		D6304
Contaminação total (12)(14)	mg/kg	Anotar	-	-		
Água e sedimentos max. (15)	% volume	0,05				D2709

FONTE: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2011a)

**LEGENDA:**

(1)serão incluídas nesta especificação outras características, com seus respectivos limites, para óleo diesel obtido de processo diverso de refino e processamento de gás natural ou a partir de matéria prima distinta do petróleo.

(2) A partir de 1º de janeiro de 2014, o óleo diesel S1800 deixará de ser comercializado como óleo diesel de uso rodoviário e será substituído integralmente pelo óleo diesel S500.

(3) A visualização deverá ser realizada em proveta de vidro de 1L.

(4) Usualmente de incolor a amarelada, podendo apresentar-se ligeiramente alterada para as tonalidades marrom e alaranjada devido à coloração do biodiesel.

(5) Limite requerido antes da adição do corante. O corante vermelho, segundo especificação constante da Tabela III deste Regulamento Técnico, deverá ser adicionado ao óleo diesel A S1800 no teor de 20 mg/L pelas Refinarias, Centrais de Matérias-Primas Petroquímicas e Importadores.

(6) No percentual estabelecido pela legislação vigente. Será admitida variação de  $\pm 0,5\%$  volume. A determinação do teor de biodiesel no óleo diesel B deverá ser realizada segundo a norma EN 14078.

(7) Aplicável apenas para o óleo diesel B.

(8) Aplicável apenas para óleo diesel A.

(9) Será admitida a faixa de 820 a 853 kg/m<sup>3</sup> para o óleo diesel B.

(10) Limites conforme Tabela II.

(11) Alternativamente, fica permitida a determinação do índice de cetano calculado pelo método NBR 14759 (ASTM D4737), para os óleos diesel A S500 e A S1800, quando o produto não contiver aditivo melhorador de cetano, com limite mínimo de 45. No caso de não-conformidade, o ensaio de número de cetano deverá ser realizado. O produtor e o importador deverão informar no Certificado da Qualidade nos casos em que for utilizado aditivo melhorador de cetano. Ressalta-se que o índice de cetano não traduz a qualidade de ignição do óleo diesel contendo biodiesel e/ou aditivo melhorador de cetano.

(12) Aplicável na produção e na importação.

(13) Poderá ser utilizado alternativamente o método EN ISO 12937.

(14) Deverá ser determinada segundo o método EN 12662.

(15) Aplicável na importação, antes da liberação do produto para comercialização.

(16) Os resultados da estabilidade à oxidação e dos hidrocarbonetos policíclicos aromáticos poderão ser encaminhados ao distribuidor até 48 h após a comercialização do produto de modo a garantir o fluxo adequado do abastecimento.

(17) Poderá ser determinado, alternativamente, pelo método EN 12916, aplicável ao óleo diesel B contendo até 5% de biodiesel. Os métodos ASTM D6591 e D5186 não se aplicam ao óleo diesel B.

(18) O método ASTM D2274 se aplica apenas ao óleo diesel A.

(19) Poderá ser determinada pelos métodos ISO 12156 ou ASTM D6079, sendo aplicáveis os limites de 460µm e 520µm, respectivamente. A medição da lubricidade poderá ser realizada após a adição do biodiesel, no teor estabelecido na legislação vigente.

(20) Limite requerido no momento e na temperatura do carregamento/bombeio do combustível pelo produtor e distribuidor. Para o distribuidor, o controle e o atendimento ao limite especificado serão compulsória a partir de 01.01.2010.

### 3.3 CARACTERÍSTICAS DO ETANOL

As especificações do etanol anidro e combustível (EAC) e do Etanol Hidratado Combustível (EHC) são definidas pela Agência Nacional do Petróleo (ANP).

Estão estabelecidas na Resolução ANP nº 7, de 09.02.2011, no anexo Regulamento Técnico ANP nº 3/2011 apresentado na tabela 6 a seguir:

**TABELA 6 - CARACTERÍSTICAS DO ETANOL**

CARACTERÍSTICA (1)	UNIDADE	LIMITE		MÉTODO	
		EAC	EHC	NBR	ASTM
Aspecto	-	Límpido e isento de impurezas (L11)		Visual	
Cor	-	(2)	(3)	Visual	
Acidez total max.(em miligramas de ácido acético 96)	mg/L	30		9866	-
Condutividade elétrica max.	µS/m	350		10547	-
Massa específica a 20°C (4) (5) (6)	Kg/m <sup>3</sup>	791,5	807,6 a 811	5992 e 16939	D4052
Teor alcoólico (5) (6) (7) (8)	%volume	99,6 min.	95,1 a 96,0	5992 e 15639	-
	%massa	99,3 min	92,5 a 93,8		
Potencial Hidrogeniônico (pH)	-	-	6,0 a 8,0	10891	-
Teor de etanol min.(9)		98,0	94,5	-	D5501
Teor de água max. (9) (10)	%volume	0,4	4,9	15531 15888	E203
Teor de metanol max. (11)	%volume	1		Cromatografia	
Resíduo por evaporação max. (10) (13)	mg/100mL	5		8644	-
Goma Lavada (12) (13)	mg/100mL	5		-	D381
Teor de hidrocarbonetos max. (12)	%volume	3		13993	-
Teor de cloreto max. (12) (14)	mg/kg	1		10894	D7328 D7319
Teor de sulfato max. (14) (15)	mg/kg	4		10894	D7328 D7319
Teor de ferro max. (14) (15)	mg/kg	5		11331	
Teor de sódio max. (14) (15)	mg/kg	2		10422	
Teor de cobre max. (15) (16)	mg/kg	0,07	-	11331	

FONTE: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2011a)

LEGENDA:

(1) A ANP poderá acrescentar características adicionais, métodos complementares e/ou impor novos limites às especificações dispostas na Tabela III, deste Regulamento Técnico, para o caso de etanol combustível produzido

a partir de métodos ou processos distintos ao da rota fermentativa, que utiliza o caldo e/ou melaço de cana-de-açúcar como matéria-prima.

- (2) Laranja após adição do corante especificado segundo a Tabela IV deste Regulamento Técnico.
- (3) Não pode conter qualquer corante e, em caso de dúvidas, uma amostra do produto deve ser analisada em laboratório quanto à presença de corante.
- (4) Os limites mínimo para a massa específica e máximo para o teor alcoólico do etanol hidratado combustível serão, respectivamente, de 805,0 kg/m<sup>3</sup> e 96,6 % em volume (94,7 % massa) na importação, distribuição e revenda do produto, ficando inalterados os respectivos limites superior e inferior.
- (5) Será aceita a comercialização de etanol hidratado combustível com limites de massa específica de 799,8 a 802,7 kg/m<sup>3</sup> e de teor alcoólico de 95,5 a 96,5 % massa (97,1 a 97,8 % volume), o qual deverá atender aos demais requisitos da qualidade exigidos para o etanol hidratado combustível, sendo permitida, nesse caso, a utilização da nomenclatura etanol hidratado combustível premium.
- (6) No caso de etanol hidratado combustível Premium, ou seja, o que atender aos limites indicados na nota 5 desta especificação será aceita a comercialização com limites de massa específica de 796,4 a 802,7 kg/m<sup>3</sup> e de teor alcoólico de 95,5 a 97,7 % massa (97,1 a 98,6 % volume) na importação, distribuição ou revenda.
- (7) A unidade °INPM é equivalente à unidade % massa para o teor alcoólico.
- (8) Para o etanol anidro combustível, quando o teor de hidrocarbonetos for maior do que zero e menor do que o limite permitido, o item teor alcoólico não será considerado para a importação e distribuição.
- (9) Análise obrigatória quando o etanol combustível for originado de importação, bem como em caso de dúvida quando da possibilidade de contaminação por metanol ou outros produtos ou por solicitação da ANP.
- (10) No caso de Etanol Anidro Combustível (EAC) importado a metodologia ASTM E1064 poderá ser utilizada para determinação do teor de água.
- (11) A análise do teor de metanol para etanol combustível somente é obrigatória na certificação de produto pelo importador e em caso de dúvida quando da possibilidade de contaminação por metanol, o que não isenta de responsabilidade cada agente econômico que comercializa o combustível em atender o limite previsto na especificação ao longo de toda a cadeia.
- (12) Limite requerido na importação, distribuição e revenda, não sendo exigida esta para emissão do Certificado da Qualidade pelo fornecedor de etanol, sendo a determinação do teor de cloreto obrigatória apenas no caso de transporte aquaviário por navegação marítima.
- (13) No caso de etanol combustível aditivado a determinação da característica resíduo por evaporação poderá ser substituída pela de goma lavada na emissão do Certificado da Qualidade ou do Boletim de Conformidade.
- (14) A análise dos teores de cloreto, sulfato, ferro e sódio para etanol anidro combustível somente são obrigatórias na certificação pelo importador, o que não isenta de responsabilidade cada agente econômico que comercializa o combustível em atender os limites previstos na especificação ao longo de toda a cadeia.
- (15) O fornecedor de etanol deverá transcrever no Certificado da Qualidade, para o etanol hidratado combustível, o resultado obtido na última determinação quinzenal, conforme previsto no § 13 do art. 4º da presente Resolução.
- (16) Item obrigatório somente quando o etanol anidro combustível for produzido, armazenado ou transportado em equipamentos ou linhas que contenham ligas metálicas compostas por cobre, conforme § 14 do art. 4º.

### 3.4 INFRA-ESTRUTURA PARA PRODUÇÃO, ARMAZENAMENTO E DISTRIBUIÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS

Conforme a Cooperativa de Profissionais da Indústria do Petróleo (2011), o Brasil tem dez refinarias de petróleo para produção de combustíveis e estão distribuídas como segue:

- 1 – Landulfo Alves (Rlam) – Mataripe - BA
- 2 – Presidente Bernardes (RPBC) –Cubatão – SP
- 3 – Duque de Caxias (Reduc) – Duque de Caxias – RJ
- 4 – Gabriel Passos (Regap) – Betim – MG
- 5 – Alberto Pasqualini (Refap) – Canoas – RS
- 6 – Paulínia (Replan) – Paulínia - SP
- 7 – Manaus (Reman) – Manaus – AM



8 – Capuava (Recap) – Mauá – SP

9 – Presidente Getulio Vargas (Repar) – Araucária – PR

10 – Henrique Lage (Revap) – São Jose dos Campos – SP

Existem mais duas refinarias de pequeno porte, uma no Rio de Janeiro (Manguinhos) e outra no Rio Grande do Sul (Ipiranga).

Para o abastecimento destas refinarias, a Petrobras importa petróleo utilizando a Frota Nacional de Petroleiros (Fronape) fretando outros navios. O transporte do petróleo extraído em território nacional é realizado por oleodutos, gasodutos e polidutos, que são também utilizados para o transporte de álcool.

De acordo com a União da Indústria da Cana de Açúcar (2011), existem 31 grupos produtores de etanol a ela associados. As unidades produtoras estão distribuídas nos seguintes Estados: Goiás (4), Minas Gerais (4), Mato Grosso (1), Mato Grosso do Sul (8) e São Paulo (112).

A capacidade de armazenamento do etanol é um fator limitante para o atendimento da atual demanda. Buscando minimizar esse problema, o presidente da Petrobras Biocombustíveis, Miguel Rosseto (apud FERNANDES, 2011), anunciou incentivos no curto prazo para no financiamento da produção e armazenamento de etanol.

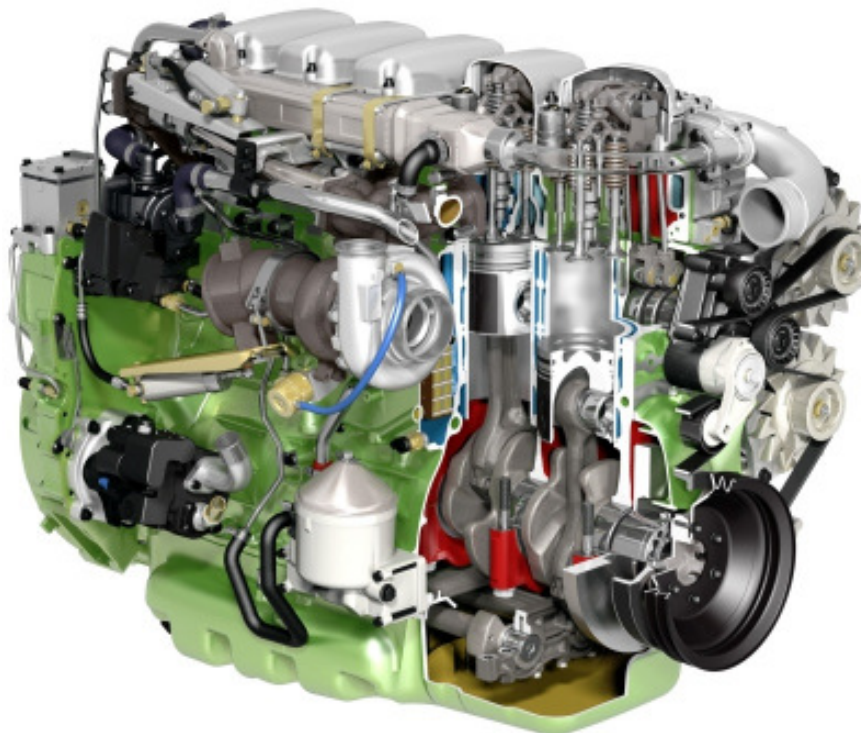
### 3.5 DISPONIBILIDADE DE MOTORES

A FENATRAN é o principal evento do Brasil e o um dos cinco maiores do mundo na área de produtos e serviços destinados a transportadores. É neste evento que os fabricantes de veículos e motores fazem o lançamento de seus produtos.

Em sua 18ª edição, o Salão Internacional do Transporte - FENATRAN 2011, realizou-se de 24 a 28 de outubro de 2011 em São Paulo. Estiveram presentes 365 expositores de 15 países, dos quais 10 eram montadoras de veículos pesados e semipesados, a saber: DAF, FORD Caminhões, INTERNATIONAL, IVECO, MAN, MERCEDES BENZ, SCANIA, SINOTRUCK, SHACMAN e VOLVO (FENATRAN, 2011).

No que se refere à apresentação das tecnologias nos lançamentos dos veículos para cumprimento da fase P7 do PROCONVE, equivalente à diretiva EURO 5, há nos lançamentos dos fabricantes uma evidente predominância da aplicação da tecnologia SCR de pós-tratamento de NOx, seguida por uma tímida presença da tecnologia EGR com aplicação em apenas dois motores modelos MAN : o D08 36 280 de 275 CV e o D08 34 190 de 186 CV.

Apenas o fabricante SCANIA apresentou um motor com tecnologia para utilização de etanol. Trata-se do modelo DC9 E02 com 270 CV de potência, mostrado na Figura 3.



**FIGURA 3** - Motor SCANIA modelo DC9 E02  
FONTE: Scania (2011a)

### 3.6 MANUTENÇÃO

Muitos componentes dos motores de combustão interna operam com tolerâncias dimensionais muito pequenas, exigindo verificações constantes e/ou regulagens. Essas tolerâncias situam-se, em alguns casos, na faixa dos milésimos de milímetros (microns).

Para garantir a operação em condições adequadas, é necessário manter temperaturas dentro de certos limites por meio do uso de sistemas de arrefecimento previstas em projeto, bem como funcionar com eficientes sistemas de lubrificação.

Entretanto, os motores podem ter aplicações estacionárias ou veiculares que variam em função do veículo em que estão instalados, atendendo demandas específicas como, por exemplo, transporte de cargas líquidas, sólidas, grãos, pessoas, entre outras. As solicitações a que os motores ficam sujeitos em cada tipo de aplicação muda e, deste modo, os programas e técnicas de manutenção têm relação direta com a aplicação do motor (Quadro 1).

<b>a – Veiculares</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• transporte de carga em trajetos rodoviários de médias e longas distâncias;</li> <li>• transporte de carga em curtas distâncias e distribuição;</li> </ul>
-----------------------	--

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• transporte de passageiros em trajetos rodoviários em médias e longas distâncias;</li> <li>• transporte de passageiros em trajetos urbanos;</li> <li>• transporte de produtos agrícolas nos processos de colheita;</li> <li>• coleta e transporte de resíduos urbanos;</li> <li>• atividades especiais (bombeiros, varrição, limpeza, etc.)</li> </ul>
<b>b – Marítimas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• embarcações de médio porte;</li> <li>• embarcações de grande porte.</li> </ul>
<b>c – Estacionárias</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• acionamento de geradores de energia elétrica;</li> <li>• acionamento de bombas hidráulicas;</li> <li>• acionamento de máquinas usadas em processos de fabricação.</li> </ul>

**QUADRO 1** – Tipos de aplicações Veiculares, Marítimas e Estacionárias

FONTE: elaborado pelo autor

Essa classificação mostra inúmeras aplicações típicas em que a utilização de motores de ignição por compressão é vantajosa.

A manutenção deve ser planejada em função da atividade considerada, pois, quanto maiores as cargas aplicadas ao motor, tanto maiores serão as exigências sobre seus componentes. Esse é o principal fator que define os critérios de manutenção especificados pelos fabricantes dos motores.

A tabela 7, a seguir, exhibe as diferenças para manutenção preventiva de dois motores de mesma potência utilizados no transporte de passageiros em trajetos urbanos.

**TABELA 7 - DIFERENÇAS EM MANUTENÇÕES PREVENTIVAS DE DOIS MOTORES DE MESMA POTÊNCIA QUE UTILIZAM COMO COMBUSTÍVEIS DIFERENTES**

Motor SCANIA	Troca óleo lubrificante	Troca filtro combustível	Reparo UI	Troca filtro ar	Custo previsto em R\$
DL 09 E02 (etanol)	10.000 km (35 litros)	20.000 km	20.000 km	40.000 km	16.885,00
DC9 (diesel)	15.000 km	30.000 km	60.000 km	120.000 km	8.349,22

FONTE: Scania (2011b)

### 3.7 MÃO-DE-OBRA

Todas as tecnologias relacionadas à utilização de combustíveis alternativos demandam por preparo de mão de obra para prover o bom funcionamento dos motores. É em campo onde esta necessidade se mostra mais crítica, pois tanto as manutenções preventivas como as corretivas serão exigidas em função da severidade da aplicação.

Assim, profissionais qualificados, capazes de responder as diversas demandas por manutenção, terão atuação crescente com reflexo nos custos operacionais devido à tendência de aumento no preço desta mão de obra.

### 3.8 CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

O consumo de combustível é um fator crítico para decisão sobre o uso de qualquer motor. Esta variável tem tido sua amplitude reduzida, principalmente, a partir do desenvolvimento da eletrônica automotiva que promove o controle eficaz da massa injetada na câmara de combustão.

Com vistas a reduzir ainda mais o consumo, medidas que promovem a redução de atritos impostos ao deslocamento dos veículos também vem sendo aplicadas, tais como: desenho aerodinâmico, utilização de “saías” e “*spoilers*”, além de redução de peso conseguida pela troca de materiais de construção de carrocerias e pneus.

Sistemas de transmissão automáticos e automatizados, treinamento de motoristas para condução adequada, bem como a não utilização de acessórios dispensáveis também contribuem para diminuir o arrasto dos veículos e, por consequência, o consumo e as emissões.

Com o uso do etanol, que possui menor poder calorífico, o consumo em massa é maior. Então, para obter um mesmo desempenho, o volume de etanol necessário para um dado deslocamento também é sempre maior.

### 3.9 PREÇOS DOS COMBUSTÍVEIS

Os preços praticados para combustíveis no Brasil segue a lei nº 9478/1997, alterada pela lei nº 9990/2000, que estabelece a liberdade para os preços em toda a cadeia; produção, distribuição e revenda. (BRASIL, 1997).

A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) acompanha os preços praticados, os quais são pesquisados semanalmente pelo Sistema de Levantamento de Preços (SLP), cuja metodologia está disponível para consulta em sua página eletrônica.

Na tabela 8 são exibidos maiores e menores preços pesquisados em 117 dos 645 municípios do Estado de São Paulo na semana entre os dias 11/09/2011 e 17/09/2011. Estes preços variam entre o máximo e mínimo conforme Tabelas 8 e 9, a seguir.

**TABELA 8 - PREÇOS AO CONSUMIDOR DO ETANOL HIDRATADO EM R\$/LITRO**

Município	Postos pesquisados	R\$ médio	Desvio padrão	Preço mínimo	Preço máximo
Cubatão	8	2,075	0,077	1,929	2,199
Jose Bonifácio	10	1,672	0,050	1,590	1,750

FONTE: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2011b)

**TABELA 9 - PREÇOS AO CONSUMIDOR DO ÓLEO DIESEL EM R\$/LITRO**

Município	Postos pesquisados	Preço médio padrão	Desvio padrão	Preço mínimo	Preço máximo
Caraguatatuba	14	2,085	0,061	1,999	2,259
Lorena	9	1,885	0,053	1,829	1,999

FONTE: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2011b)

Caraguatatuba apresentou o maior preço médio para o óleo diesel, R\$2,085/litro, e Lorena o menor, R\$ 1,885/litro. O etanol teve o maior preço médio medido em Cubatão, R\$2,075 e o menor em José Bonifácio, R\$ 1,672.

Não são apontados, nestas pesquisas, quais os volumes vendidos em cada município, não sendo possível, apenas com estes dados, um estudo que leve à conclusão de qual o real impacto sobre custos de operação para os consumidores.

Em boletim eletrônico disponível no site da ANP, os preços médios em âmbito nacional são publicados mensalmente, conforme tabela 10.

**TABELA 10 - PREÇOS MÉDIOS AO CONSUMIDOR**

Derivado	Jul 11	Média ano	média 12 meses
Diesel (R\$/l)	2,009	2,005	1,996
Etanol Hidratado (R\$/l)	1,997	2,035	1,891

FONTE: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2011c)

A ANP publicou, para o mês de julho de 2011, a movimentação detalhada dos derivados de petróleo produzidos nas refinarias brasileiras, confirmando a produção de 3.280.336 m<sup>3</sup> de óleo diesel no mês de julho de 2011.

A União das Indústrias de Cana de Açúcar (2011) fez a última publicação do volume de etanol hidratado produzido em agosto de 2009, ou seja, 18.176.619 m<sup>3</sup>. A partir de então não foram mais disponibilizadas informações sobre a produção deste combustível.

Entretanto, Marcos Jank, (2011) afirma em sua fala na 1ª Conferência Brasileira de Ciência e Tecnologia em Bioenergia, que está prevista, para 2011, uma redução de 28,4% na produção de etanol hidratado relativamente à de 2010.

Todavia, Ferrés, (2010) lembra que os combustíveis produzidos a partir de fontes renováveis no Brasil apresentam competitividade aparente, visto que há uma política de tributação que consiste na prática do subsídio cruzado, que “[...] distorce preços relativos entre os combustíveis derivados do petróleo, e por conseguinte, entre os biocombustíveis”

A Empresa de Pesquisas Energéticas (2011) aponta três fatores com forte potencial para o aumento no preço do etanol:

- 1) Japão misturando 3% de etanol à gasolina;
- 2) exigência da *Environmental Protection Agency* (EPA)- para utilização de 28,4 bilhões de litros de etanol até 2012 e;
- 3) aumento de demanda por biocombustíveis na União Europeia.

### 3.10 SAZONALIDADE NA PRODUÇÃO DO ETANOL

A produção de cana-de-açúcar no Brasil é distribuída da seguinte forma:

- na região centro-sul, a safra começa em abril até novembro;
- no nordeste, a safra começa em setembro até março.

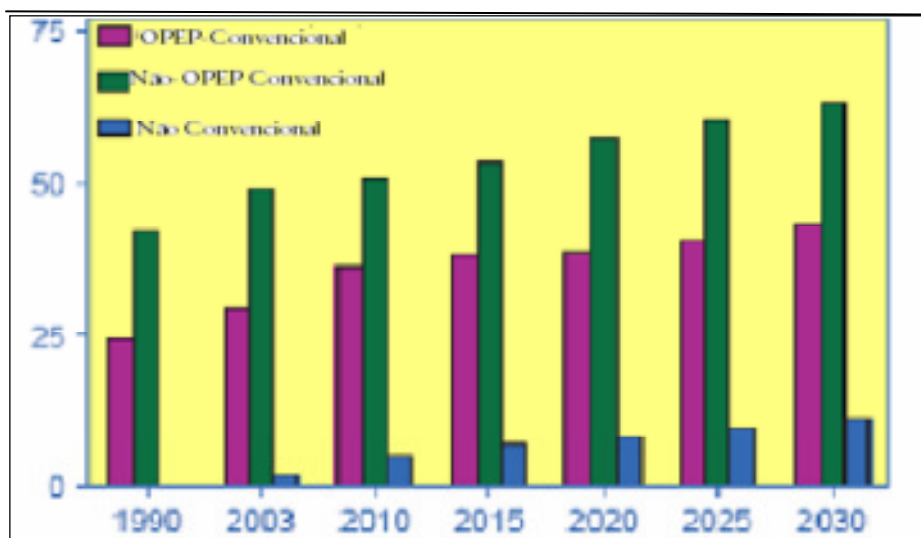
A cultura de cana-de-açúcar permite repetição de 5 a 7 safras. Um intervalo com a plantação de outra cultura é necessária para retomar a produção de cana-de-açúcar. Desta forma, é considerada uma cultura semiperene.

A produção de etanol acontece nos meses em que há oferta de cana, ou seja, coincide com os meses da safra e, na entressafra, acontece a manutenção das instalações das usinas.

Em 2007, a produção de cana representava “um dos cultivos comerciais de maior importância em todo o mundo” totalizando “mais de 20 milhões de hectares, nos quais foram produzidos, aproximadamente, 1.500 milhões de toneladas”. (FERRES, 2010).

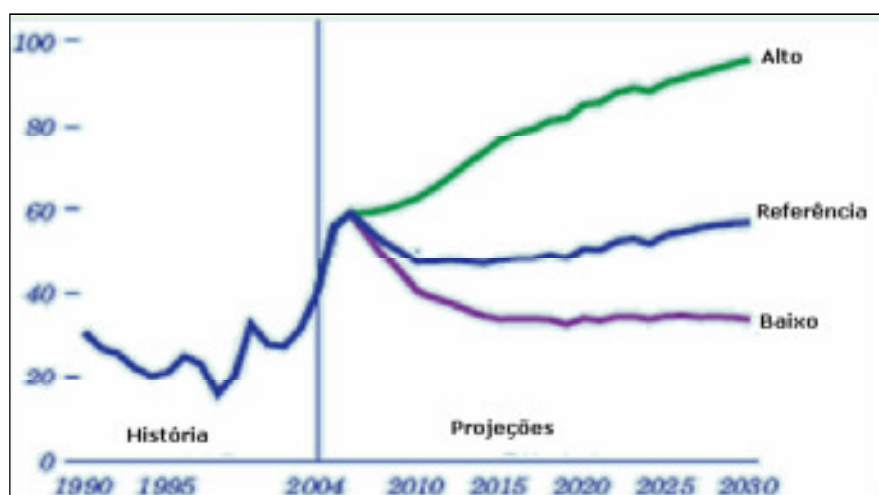
### 3.11 VARIAÇÃO DO PREÇO DO PETRÓLEO

O preço do petróleo varia não somente em função da oferta e demanda por consumo, mas também devido a fatores geopolíticos e de eventos climáticos extremos. Segundo a Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE), que é uma empresa vinculada ao Ministério das Minas e Energias, o preço fica menos sensível a estes fatores se a capacidade ociosa de produção aumentar.



**GRÁFICO 1** - Produção mundial de petróleo em milhões de barris por dia  
 FONTE: Empresa de Pesquisas Energéticas (2011)

O Gráfico 1 mostra a produção estimada pelos três grupos produtores: países da OPEP, fundada em 1961 (Argélia, Venezuela, Indonésia, Irã, Iraque, Qatar, Kuwait, Líbia, Arábia Saudita, Emirados Árabes, Unidos e Nigéria), não OPEP (principalmente Angola, Brasil, México e Brasil, que responde por 1% da produção mundial)e não convencionais (extraídos de águas profundas e círculo polar).



**GRÁFICO 2** - Preço do petróleo em US\$/barril  
FONTE: Empresa de Pesquisas Energéticas (2011)

O Gráfico 2 sinaliza as perspectivas para o preço do barril de petróleo até 2030 tendo como pior cenário o valor aproximado de US\$ 100 para aquele ano.



## 4 DISCUSSÃO E ANÁLISE

Nesta discussão e análise são revistas as principais características das tecnologias apresentadas no decorrer do trabalho e é feita a inter-relação com fatores que incidem sobre suas aplicações.

### 4.1 DISCUSSÃO SOBRE AS TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS

Os problemas mencionados nas várias alternativas de tecnologias desenvolvidas para os motores podem ser minimizados utilizando-se sistemas de dosagem de álcool que se caracterizam por menores requisitos de estanqueidade e por pressões de trabalho mais baixas que, conseqüentemente, reduza de modo significativo, ou elimine a necessidade do uso de aditivos.

Nesta linha, sistemas de injeção de etanol hidratado no coletor de admissão, semelhantes aos já disponíveis para substituição de óleo diesel por Gás Natural Veicular (GNV), vêm sendo desenvolvidos por sistemistas que dominam o mercado de componentes de motores diesel.

Esta técnica, versão atualizada da fumigação, minimiza os problemas associados à compatibilidade de materiais, mas está, em geral, atrelada a uma substituição energética não muito eficiente. Isso se deve, comumente, ao acúmulo de combustível em seções críticas do coletor e conseqüente ocorrência de *back-fire*.

A redução das emissões de MP e NO<sub>x</sub> nos motores diesel, sejam movidos a óleo diesel ou a etanol, pode também ser conseguida por meio de soluções implementadas na produção do combustível, na fonte de geração do poluente (motor) e nos dispositivos de pós-tratamento (após sua geração).

No caso do MP, as medidas para contenção podem ser realizadas durante a combustão no interior dos cilindros do motor. Por exemplo, aumentando a pressão e adequando o ponto de injeção e/ou ainda utilizando combustíveis com menor densidade, menor teor de enxofre e baixa concentração de aromáticos no combustível esse objetivo pode ser atingido. Por meio de intervenções de pós-tratamento, essa redução é possível utilizando filtros de partículas.

Para quaisquer das técnicas descritas há fatores que limitam suas aplicações. Assim, a análise do funcionamento, vantagens e desvantagens de cada uma delas torna-se imprescindível numa definição de viabilidade.

As tecnologias já colocadas no mercado e que se mostram economicamente viáveis, protagonizam a cena no mercado automobilístico em diversos países, principalmente na Europa. Por exemplo, o uso do *selective cathalytic reduction* (SCR) se mostra como uma das principais opções para abatimento de óxidos de nitrogênio.

Esta tecnologia foi adaptada de aplicações em plantas industriais, com funcionamento em regime permanente, para utilização em veículos por um conjunto de fabricantes europeus de caminhões com vistas ao atendimento dos parâmetros de emissão estabelecidos pela diretiva europeia EURO 5, vigente desde 2009. Neste continente, incentivos fiscais e pedágios mais baratos são aplicados a veículos equipados com esta tecnologia.

No Brasil, os veículos movidos a óleo diesel deverão atender a norma PROCONVE 7, equivalente à diretiva EURO 5, a partir de 1 de Janeiro de 2012. O SCR é a tecnologia definida pela maioria dos fabricantes de motores com o intuito de atender o cumprimento das exigências da legislação no que tange ao abatimento de NOx. Todavia, os veículos precisarão utilizar o diesel S50 para que o SCR funcione adequadamente, o que se configura em uma dificuldade para a aplicação desta tecnologia no Brasil. Esse combustível, produzido inicialmente apenas nas refinarias REDUC-RJ, REPLAN-SP, REVAP-SP e REGAP-MG não suprirá a demanda. Segundo a própria Petrobras (2011), o consumo de S50 deverá atingir 2,5 milhões de m<sup>3</sup> em 2012, sendo necessária a importação de parte deste volume. Some-se a isso o fato que regiões mais distantes das refinarias citadas podem ficar desabastecidas por este tipo de óleo diesel. Some-se a isso o fato de apenas 4.300 postos de combustível, em todo o território nacional, estarem sendo previstos para comercializá-lo.

Outro problema que não pode ser negligenciado é a disponibilidade de uréia em todo o território nacional, insumo fundamental para o funcionamento do sistema SCR.

Por outro lado, o SCR tem como vantagem a possibilidade de aumentar a temperatura na câmara de combustão, visando a melhoria da queima, a valores proibitivos sem sua utilização. O que torna isto possível é, justamente, sua capacidade de reduzir os óxidos de nitrogênio após sua produção.

Essa medida, em princípio, resulta em economia de combustível. Entretanto, não pode ser considerada vantajosa porque a substância redutora, a uréia, representa de 5% a 7% do volume de diesel consumido. Ademais, ela congela abaixo de -11°C, exigindo o controle de muitos parâmetros para o bom funcionamento do sistema, além de aumentar o peso do veículo pela instalação do sistema completo. Por fim, a uréia, que até meados do segundo semestre de 2011 ainda não tinha seu preço estabelecido e com plano de distribuição indefinido, cristaliza-se em altas temperaturas.

No caso do uso do EGR, a recirculação dos gases de exaustão em proporções inferiores a 10%, não se mostra eficiente para reduzir de forma significativa a emissão de NOx, o que se transforma num fator limitante de sua utilização. A quantidade de oxigênio tende a diminuir na proporção em que se aumenta a parte de gases recirculados, cujo limite máximo é de aproximadamente 25%. Ocorre, então, significativa redução de desempenho na medida em que se aumenta a proporção desses gases. No entanto, essas perdas podem ser compensadas com sistemas de sobre-alimentação, que elevam a pressão do ar que entra na câmara, provendo mais oxigênio para a combustão.

A concentração de enxofre tem efeito importante no uso da tecnologia EGR devido à formação de ácidos no momento em que os óxidos de enxofre e a água, produzidos na reação de combustão, são mantidos em contato nas elevadas temperaturas de escapamento. Quanto menor for a concentração de enxofre no combustível, menor será a tendência de formação dos ácidos agressivos (sulfuroso e sulfúrico) aos componentes do motor. Logo, se o motor é alimentado por combustível cujo teor de enxofre é superior ao especificado para uso adequado da tecnologia nele implementada (50 ppm), ele terá sua vida útil seriamente comprometida. O controle desta variável só é possível no processo de produção do óleo diesel.

Outra tendência nos motores diesel é o aumento de produção de fumaça quando se aumenta a carga a que é submetido. Este comportamento faz com que a quantidade de oxigênio disponível para a combustão diminua devido à recirculação no sistema. Os sistemas EGR modernos utilizam, então, sensores que detectam estas variações e comandam as válvulas controladoras da vazão dos gases, enviando sinais ao módulo eletrônico que gerencia o funcionamento do motor.

Esses problemas são minimizados com o uso do etanol como combustível, já que os níveis de enxofre no etanol são muito inferiores do que aqueles observados nos combustíveis derivados de petróleo.

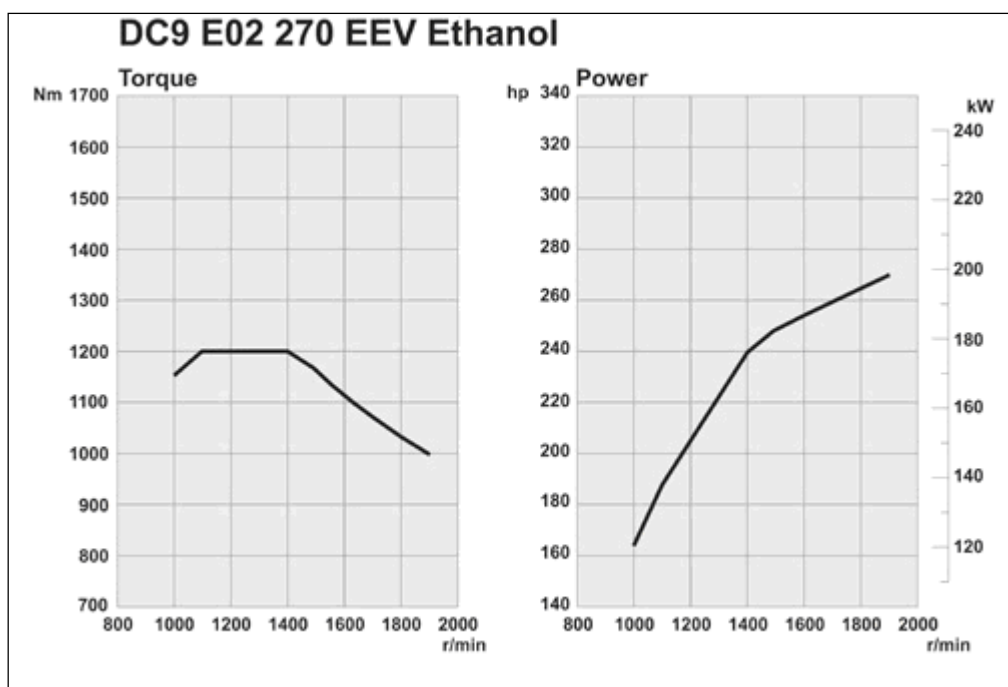
A produção de MP aumenta significativamente nos picos de carga. Isto se traduz também em uma desvantagem para o sistema EGR, visto que, assim como o SCR, precisa da análise de muitos parâmetros para os módulos eletrônicos enviarem os comandos para as válvulas direcionais e proporcionais.

Estes módulos fazem parte de sistemas denominados *On Board Diagnose* (OBD), capazes de registrar eventos que, por meio de diagnósticos eletrônicos, reduzem o desempenho do motor em caso de falhas.

Consideradas as questões apresentadas relativas às tecnologias SCR e EGR, em que a complexidade e, por consequência, custos elevados de implementação, o etanol tende a ser

uma opção a ser considerada no processo de desenvolvimento das tecnologias relacionadas à redução de emissões de poluentes por motores diesel.

As Figuras 4 e 5 a seguir permitem a comparação de potência e torque em motores similares movidos a óleo diesel e a etanol.

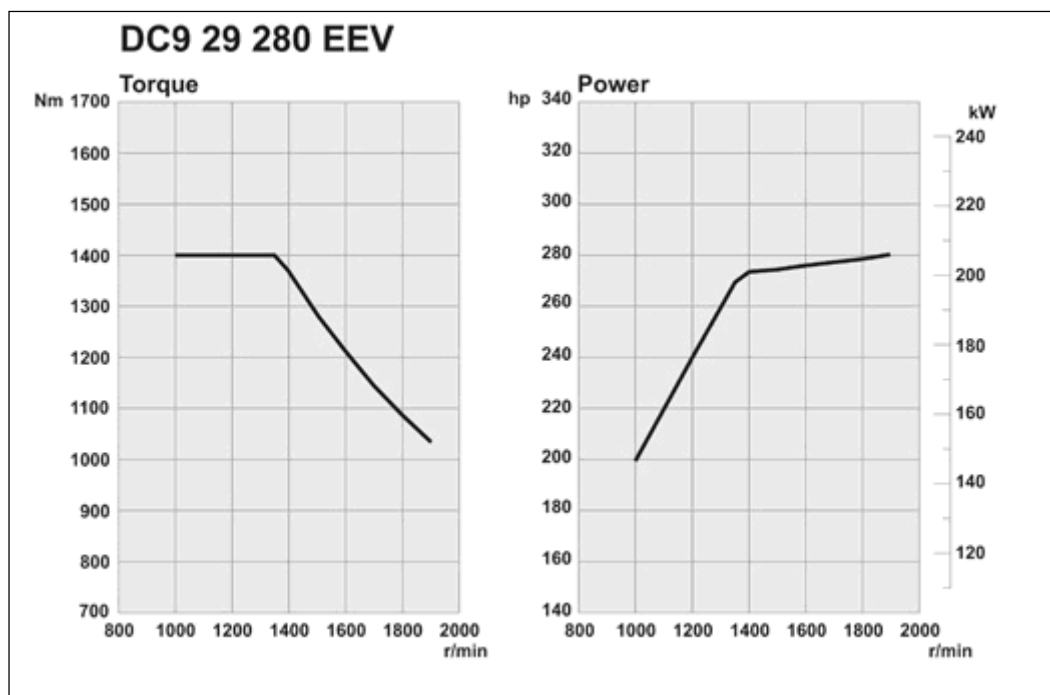


**FIGURA 4** - Curvas características do motor DC9 E02 270 EEV Ethanol

FONTE: Scania (2011a)

O motor movido exclusivamente a etanol possui as seguintes especificações técnicas:

- volume total: 8,9 litros;
- potência máxima: 270hp a 1900 rpm;
- torque máximo: 1200 Nm entre 1100 e 1400rpm;
- sistema de Injeção de combustível: Scania PDE com unidades injetoras de alta pressão - *high pressure unit injectors*



**FIGURA 5** - Curvas características do motor DC9 29 280 EEV  
 FONTE: Scania (2011a)

O motor movido exclusivamente a óleo diesel possui as seguintes especificações técnicas:

- volume total: 9,3 litros;
- potência máxima: 280hp a 1900rpm;
- torque máximo: 1000 Nm entre 1000 e 1350rpm;
- enquadramento ambiental: atendimento à diretiva Euro 5 com tecnologia EGR, filtro de particulados e *variable-geometry turbocharger* (VGT)
- sistema de Injeção de combustível: Scania XPI – *extra high pressure injection*

O motor de fabricação SCANIA DC9 E02 270 EEV Ethanol atende à diretiva EURO 5 com tecnologia EGR, enquanto que o SCANIA DC9 29 280 EEV também utiliza a tecnologia EGR, mas também dispõe de filtro de particulados e *variable-geometry turbocharger* (VGT), sistema capaz de variar a pressão de sobrealimentação (SCANIA, 2012).

## 4.2 DISCUSSÃO SOBRE FATORES POLÍTICOS

As políticas públicas geram grande empecilho à utilização de etanol em veículos pesados em frotas cativas. O preço para estes motores ainda é maior que os que utilizam óleo

diesel e, desse modo, a iniciativa privada aguarda por incentivos que justifiquem a aquisição de veículos movidos a etanol para composição de sua frota.

Os primeiros movimentos nessa direção estão ocorrendo e podem ser expressos pela aquisição, em maio de 2011, de cinquenta ônibus equipados com o motores SCANIA DC9 E02 270 EEV Ethanol para integrar a frota da Viação Metropolitana, uma das empresas de transporte urbano da Região Metropolitana de São Paulo.

O valor desses veículos é aproximadamente 10% maior que o similar movido a diesel. Trata-se do mesmo motor utilizado desde 1990 na cidade de Estocolmo, na Suécia, que foi pioneira no uso desse tipo de motor equipando ônibus urbanos.

Em 2010, a Storstockholms Lokaltrafik-SL, empresa regional que opera o transporte público na capital sueca, adquiriu 85 veículos articulados para transporte urbano, compondo 50% da frota por ônibus com motores movidos a etanol e, segundo a União da Indústria de Cana-de-Açúcar (2011), a cidade de Estocolmo prevê completar os 100% dessa frota de ônibus até 2025, confirmando a tendência daquele país em utilizar esta alternativa.

#### 4.3 MATRIZ DE DECISÃO

Embora a escolha de uma tecnologia exija a análise de problemas complexos, como fatores financeiros, ambientais, logísticos, entre outros, não será feita análise com tal abrangência neste estudo.

Entretanto, com o objetivo de evidenciar as principais diferenças que devem ser consideradas em um processo decisório, as alternativas apresentadas pelos fabricantes expositores na FENATRAN 2011 foram comparadas à luz dos custos operacionais incluindo manutenção do motor, da disponibilidade do combustível e do investimento que deverá ser feito para aquisição de veículo equipado com a tecnologia em questão.

O Quadro 2 a seguir corresponde à matriz de decisão que leva em conta essas diferenças.

Tecnologia →		Motor movido a óleo diesel e equipado com SCR	Motor movido a etanol e equipado com EGR	Motor movido a óleo diesel equipado com EGR
Fator ↓	Pesos	2	3	3
Custos operacionais (inclusive manutenção)	Etanol: 2	$3 \times 2 = 6$	$2 \times 3 = 6$	$3 \times 3 = 9$
	Óleo diesel: 3			
Disponibilidade de combustível	Etanol: 1	$3 \times 2 = 6$	$1 \times 3 = 3$	$3 \times 3 = 9$
	Óleo diesel: 3			
Investimento inicial	Etanol: 0,5	$0,6 \times 2 = 1,2$	$0,5 \times 3 = 1,5$	$0,6 \times 3 = 1,8$
	Óleo diesel: 0,6			
<b>Total</b>		<b>13,2</b>	<b>10,5</b>	<b>19,8</b>

QUADRO 2 - Matriz de decisão

FONTE: elaborado pelo autor

Os pesos adotados na matriz de decisão seguem à seguinte lógica:

a) quanto à tecnologia de abatimento de NOx empregada:

- O dispositivo EGR, mesmo para aplicações em que grande abatimento é necessário, possui preço inicial menor ou igual àquele de um SCR equivalente. Desde que se disponha de um combustível de baixo teor de enxofre, as vidas úteis são equivalentes.
- Pela vantagem do EGR não exigir um insumo adicional como a ureia, foram adotados os pesos 3 e 2, respectivamente para EGR e para o SCR.

b) quanto aos fatores:

- Como o **custo operacional** de um motor movido a etanol é maior que um equivalente movido a óleo diesel, considerando uma maior frequência de manutenção, principalmente dos componentes dos sistemas de injeção, e eventual uso de aditivos inibidores de corrosão, foi atribuído o peso 2 para esse caso; para veículos movidos a óleo diesel utilizou-se o peso 3;
- Como a oferta de etanol é significativamente menor que a de óleo diesel em todo território nacional e a política de estoque regulador não é bem executada

no Brasil, a possibilidade de um desabastecimento é alta, como vem se verificando ao longo dos últimos 30 anos em que essa alternativa é utilizada. Desta forma, foi atribuído o peso 1 para veículos movidos a etanol e peso 3 para veículos movidos a óleo diesel;

- Como o investimento inicial é cerca de 10% maior para veículos equipados com motores movidos a etanol, conforme mencionado anteriormente e devidamente justificado, foi atribuído o peso 0,5 para esse caso; para veículos movidos a óleo diesel utilizou-se o peso 0,6. Os valores decimais utilizados são coerentes com a significância do investimento inicial no custo total previsto para a vida média de um veículo com essas características, incluindo o valor a ele associado por ocasião de sua desativação.

O Quadro 2 mostra que a opção por veículos com motores diesel, utilizando óleo diesel como combustível e equipado com EGR para abatimento de NOx, é a mais adequada para ser aplicada em veículos de transporte de carga, seguida por motores que consomem óleo diesel e equipados com SCR; o motor movido a etanol foi o que ficou com a menor pontuação, mesmo usando um dispositivo de abatimento associado mais barato como um EGR convencional.

Esse resultado é coerente com o foi citado na seção 3.5, ou seja, os motores diesel movidos a etanol foram preteridos pelas montadoras na FENATRAN 2011. Apenas uma apresentou essa alternativa em motor equipado com EGR

Entretanto, a tecnologia SCR predominou entre os expositores da referida feira, em desacordo com o resultado obtido na matriz de decisão desenvolvida neste trabalho. Isto pode ser explicado pelo fato de, num primeiro momento, a tecnologia SCR ser a de aplicação mais fácil por parte dos fabricantes que, desta forma, não precisam se empenhar no desenvolvimento do motor para que os limites legais de emissões sejam respeitados. Todavia, no médio prazo, com o aumento das restrições legais, essa opção deixará de ser a mais adequada, uma vez que uma ação mais eficiente do dispositivo está atrelada a um aumento exponencial de custo.



## 5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Muitos desafios terão que ser suplantados para que o uso do etanol nos motores diesel de veículos pesados se justifique como alternativa tecnológica sustentável em âmbito nacional. O óleo diesel adapta-se melhor à atual conjuntura, se consideradas a infra-estrutura para produção, armazenamento e distribuição de combustíveis no Brasil.

As dimensões continentais do território brasileiro geram um grande desafio e exige muitos investimentos em infra-estrutura para disponibilizar os combustíveis em padrões adequados em todo o país para qualquer das alternativas tecnológicas salientadas neste trabalho.

Com a atual infra-estrutura de produção e distribuição do etanol anidro, somente é possível implementar seu uso em frotas cativas e em poucas regiões do país. Ao longo deste estudo, foi possível perceber que a produção e distribuição de etanol é insuficiente para atender veículos em todo o Brasil, além do preço de venda para o consumo nas regiões mais distantes dos centros de produção ser muito elevado.

Nesse cenário, somente os veículos destinados ao transporte de passageiros e distribuição de mercadorias em meio urbano, próximos aos centros produtores, podem ser indicados para o uso do etanol. Somente nessas condições, os volumes de etanol e de aditivos necessários, com qualidade e logística de distribuição adequados, podem ser conseguidos.

Por outro lado, as opções SCR e EGR, precisarão evoluir em eficiência para que os custos operacionais de sua utilização possam ser reduzidos. Neste momento a tecnologia SCR, mesmo aumentando o custo de operação e aquisição dos veículos, se mostra a opção mais viável, embora também esteja com sua viabilidade atrelada à infra-estrutura de produção e distribuição do diesel S50 e da uréia.

O número de veículos em lançamento equipados com EGR na FENATRAM 2011, demonstra que esta tecnologia não é uma opção interessante para o mercado brasileiro neste momento, em função da necessidade de diesel com baixos teores de enxofre, preferencialmente S10, para seu bom desempenho.

Como as tecnologias estudadas apresentam características muito distintas entre si, fica evidente que a tendência é de utilização ora desta, ora daquela, de acordo com fatores como disponibilidade de combustível que a atenda, custos de operação, e legislação ambiental vigente nos mercados que demandam por transporte rodoviário como modal logístico.

Assim como os motores diesel movidos a etanol, os motores com tecnologia SCR e EGR não se mostram capazes de solucionar o problema das emissões se utilizadas isoladamente.

Portanto, estas tecnologias podem ser vistas, juntamente com outras existentes para reduzir emissões e que não fizeram parte deste estudo, como complementares.

Por fim, a demanda por energia exigida para o transporte de pessoas e mercadorias se mostra sempre maior do que a capacidade de uma única alternativa responder as exigências de redução de emissões, apontando, nos prazos médio e longo, o natural atrelamento do emprego das tecnologias aos recursos energéticos disponíveis.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Indicadores e informações. **Boletim Eletrônico**, Brasília, n.48, set. 2011a. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br>>. Acesso em: 18 set. 2011.

\_\_\_\_\_. **Levantamento de preços e de margens de comercialização de combustíveis**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/?pg=54386>>. Acesso em: 18 set. 2011b.

\_\_\_\_\_. Resolução ANP n° 7, de 09 de fevereiro, 2011. **Diário Oficial da União**, Brasília, 10 fev. 2011c.

ALMEIDA, E. L. F. **Dinâmica tecnológica das indústrias**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2010. (Apostila Didática). Disponível em: <[http://www.ie.ufrj.br/hpp/intranet/pdfs/apost\\_petroleo.pdf](http://www.ie.ufrj.br/hpp/intranet/pdfs/apost_petroleo.pdf)>. Acesso em: 08 set. 2010.

AMBROZIN, A. R. P.; KURI, S. E. Corrosão metálica associada ao uso de combustíveis minerais e biocombustíveis. **Química Nova**, São Carlos, v.32, n.7, p.1910-1916, 2009.

BOSCH. **Glow plug technology from Bosch**. Catalogo Bosch Alternative Aftermarket. Disponível em: <[http://www.bosch.com.au/content/language1/downloads/Bosch\\_Glow\\_Plug\\_Web\\_Ready.pdf](http://www.bosch.com.au/content/language1/downloads/Bosch_Glow_Plug_Web_Ready.pdf)>. Acesso em: 15 out. 2011.

BRAGA, S. L. et al. Geração distribuída de energia elétrica: aplicação de motores biocombustível diesel/gás natural. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO E GÁS, 3., 2005, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, 2005. v., p. 1-10. Disponível em: <[http://www.portalabpg.org.br/PDPetro/3/trabalhos/IBP0433\\_05.pdf](http://www.portalabpg.org.br/PDPetro/3/trabalhos/IBP0433_05.pdf)>. Acesso em: 02 out. 2011.

BRASIL. Lei n° 9.478, de 6 agosto de 1997. Dispõe sobre a política energética nacional, as atividades relativas ao monopólio do petróleo, institui o Conselho Nacional de Política Energética e a Agência Nacional do Petróleo e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 7 ago. 1997.

\_\_\_\_\_. Ministério do Meio Ambiente. **Programa Nacional do Meio Ambiente (PNMA)**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>>. Acesso em: 9 out. 2011.

CAMPOS, T. A. R. **Análise da capacidade de produção de energia de sistemas de cogeração por meio da biomassa e sua representação na matriz energética brasileira**. 2010. 54f. Monografia (Conclusão de Curso) - Engenharia de Produção, Centro Universitário de Formiga, Formiga, 2010. Disponível em: <<http://bibliotecadigital.uniformg.edu.br:21015/jspui/bitstream/123456789/40/1/ThallesAugusto-EP.pdf>>. Acesso em: 22 dez. 2010.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução n° 018, de 06 de maio de 1986. Dispõe sobre a criação do Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE. **Diário Oficial da União**, Brasília, 17 jun. 1986.

COOPERATIVA DE PROFISSIONAIS DA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO - COOPETROLEO. **Quantas refinarias tem a Petrobras?** Perguntas mais frequentes. Disponível em: <<http://www.coopetroleo.com.br/pfaq.htm#32>>. Acesso em: 8 out. 2011.

EMPRESA DE PESQUISAS ENERGÉTICAS. **Contexto mundial e preço do petróleo:** uma visão de longo prazo. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>>. Acesso em: 18 set. 2011.

FENATRAN. **FENATRAN 2011:** Informações sobre a feira e fabricantes de caminhões. Disponível em: <<http://www.fenatran.com.br>>. Acesso em: 2 nov. 2011.

FERNANDES, S. Incentivos ao etanol sairão no curto prazo: diz Petrobras. **Folha de São Paulo**, São Paulo, 2 nov. 2011. p.1-1. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/mercado/1000276-incentivos-ao-etanol-sairao-no-curto-prazo-diz-petrobras.shtml>>. Acesso em: 2 nov. 2011

FERRÉS, D. H. S. **Competitividade dos biocombustíveis no Brasil:** uma comparação entre os principais biocombustíveis - etanol e biodiesel. 2010. 167 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Economia de São Paulo, Fundação Getulio Vargas, São Paulo, 2010.

GERPEN, J. H V.; METER, D. B. V. **Emission control in diesel engines by alcohol fumigation.** Iowa: Midwest Transportation Center, 1990. 50 p.

GUIA METAL NOTÍCIAS E INFORMAÇÕES. **Refinarias de Petróleo.** [S.l.]: Guia Metal, 2011. Disponível em: <<http://www.guiametal.com.br/?pg=home>>. Acesso em: 04 dez. 2011.

JANK, M. Unica pede mais etanol para carros flex. **Ambiente Energia**, 23 ago. 2011. Disponível em: <<http://www.ambienteenergia.com.br/index.php/2011/08/unica-pede-mais-etanol-para-carros-flex/13422>>. Acesso em: 25 nov. 2011.

LADEIRA, V. **A Fase P-7 D0 Proconve e os impactos no setor de transportes.** Rio de Janeiro: CNTDESPOLUIR, 2010. Disponível em: <<http://www.cntdespoluir.org.br/Downloads/A%20Fase%20P7%20do%20Proconve%20e%20os%20seus%20impactos%20no%20Setor%20de%20Transporte.pdf>>. Acesso em: 20 dez. 2010.

MARTINS, O. A. R. S.; SOUZA, G. F. M. **Motores diesel eletrônicos:** contribuição ambiental e confiabilidade. São Paulo: USP, 2007. Disponível em: <[http://www.automotiva-poliusp.org.br/mest/banc/pdf/martins\\_otavio.pdf](http://www.automotiva-poliusp.org.br/mest/banc/pdf/martins_otavio.pdf)>. Acesso em: 25 out. 2011.

MAXWELL, T. T.; JONES, J. C. **Alternative fuels:** emissions, economics, and performance. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1994. 327p.

MENEZES, E. W. **Produção de trabalho, geração de contaminantes e tratamento pós-combustão em motores ciclo diesel.** 2009. 144 f. Tese (Doutorado) – Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

MWM INTERNATIONAL. **Produtos motores pesados:** série NGD 9.3E. Disponível em: <<http://www.nav-international.com.br>>. Acesso em: 02 nov. 2011.

PETROBRAS. **Petrobras garante diesel S50**. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/minisite/ambiental/noticias/petrobras-garante-fornecimento-diesel-S50/>>. Acesso em: 12 out. 2011.

PORTAL SÃO FRANCISCO. **Cana de açúcar**. Disponível em: <<http://www.portalsaofrancisco.com.br/alfa/cana-de-acucar/cana-de-acucar-9.php>>. Acesso em: 15 dez. 2011.

RANGEL, I. R.; PEREIRA, R. G. **Análise da variação dos parâmetros de desempenho de um motor de ignição por compressão utilizando misturas álcool-diesel**. Rio de Janeiro: Universidade Federal Fluminense, 2002. Disponível em: <[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022002000100012&script=sci\\_arttext&tlng=pt](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022002000100012&script=sci_arttext&tlng=pt)>. Acesso em: 15 ago. 2010.

RENEWABLE FUELS ASSOCIATION - RFA. **How ethanol is made**. Disponível em: <<http://www.ethanolrfa.org/pages>>. Acesso em: 04 dez. 2011.

SCANIA. **Motor SCANIA modelo DC9 E02**. Disponível em: <<http://www3.scania.com/pt-pt/Scania-Euro-6/Start/?popup=true>>. Acesso em 10 dez. 2011a.

\_\_\_\_\_. **Plano de manutenção Scania de operação nº 3**. São Bernardo do Campo: Scania, 2011b.

\_\_\_\_\_. **Products & Services**. Scania Group. Disponível em: <<http://www.scania.com/products-services/trucks/main-components/engines/eev/9-litre/230-hp.aspx>>. Acesso em: 19 fev. 2012.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR - UNICA. **Informações gerais da homepage**. Disponível em: <<http://www.unica.com.br>>. Acesso em: 18 set. 2011.

YADAV, J.; SETH, N. **Effect of NO<sub>x</sub> on the somatic chromosomes of goldsmiths**. [S.l.]: Environmental Health Perspectives, 1998. p.643-647. Disponível em: <<http://ehp03.niehs.nih.gov/search/simpleSearch.action?query=nox>>. Acesso em: 8 out. 2011.