

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO E DA  
COMBUSTÃO DE UM MOTOR DE IGNIÇÃO POR  
COMPRESSÃO ALIMENTADO POR UMA MISTURA  
TERNÁRIA DE COMBUSTÍVEIS – DIESEL, BIODIESEL E  
ETANOL

Rodrigo Fernando Estella dos Santos

Orientador: Prof. Dr. Antônio Moreira dos Santos

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

**EXEMPLAR REVISADO**

Data de entrada no Serviço.....*25*...../*07*...../*2005*.....

Ass.:.....*lesan*.....

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

São Carlos  
2005



DEDALUS - Acervo - EESC



31100052218

Class.	TESE-EESC
Call.	5077
Tombo	T194/05
Sysno	1455457

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento da  
Informação do Serviço de biblioteca - EESC/USP

S237a Santos, Rodrigo Fernando Estella dos  
Análise experimental do desempenho e da combustão  
de um motor de ignição por compressão alimentado por  
uma mistura ternária de combustíveis - diesel,  
biodiesel e etanol / Rodrigo Fernando Estella dos  
Santos. -- São Carlos, 2005.

Tese (Doutorado) -- Escola de Engenharia de São  
Carlos-Universidade de São Paulo, 2005.

Área : Engenharia Mecânica.

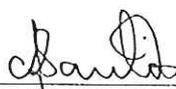
Orientador: Prof. Dr. Antônio Moreira dos Santos.

1. Combustão. 2. Liberação de calor. 3. Detonação.  
4. Biodiesel. 5. Emissões. I. Título.

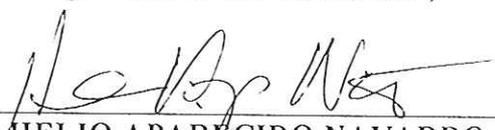
FOLHA DE JULGAMENTO

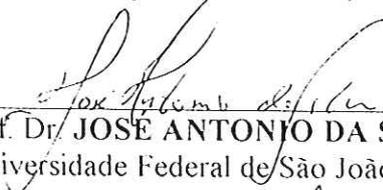
Candidato Engenheiro RODRIGO FERNANDO ESTELLA DOS SANTOS

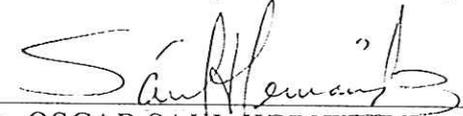
Tese defendida e julgada em 25-05-2005 perante a Comissão Julgadora:

  
Prof. Dr. ANTONIO MOREIRA DOS SANTOS (Orientador)  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) Aprovado

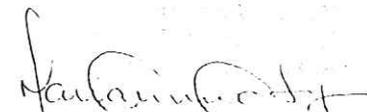
  
Prof. Titular DUILIO VENANZI  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) APROVADO

  
Prof. Dr. HELIO APARECIDO NAVARRO  
(UNESP/Campus de Rio Claro) APROVADO

  
Prof. Dr. JOSÉ ANTONIO DA SILVA  
(Universidade Federal de São João Del Rey/UFSJ) APROVADO

  
Prof. Dr. OSCAR SAUL HERNANDEZ MENDOZA  
(Universidade Federal de Uberlândia/UFU) APROVADO

  
Prof. Associado JONAS DE CARVALHO  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Mecânica

  
Profª. Titular MARIA DO CARMO CALLJURI  
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

*Aos meus pais pela luta, amor e confiança  
e meus irmãos que são pessoas  
que tanto amo.*

## AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pela concessão da bolsa de Doutorado e pelo apoio ao projeto de pesquisa nº 478161/2001-8.

Ao Professor Antônio Moreira dos Santos, pela orientação, dedicação, confiança e amizade.

À querida namorada Carolina, pelo carinho, compreensão, ajuda e pela paciência durante estes anos.

Ao amigo Roberto Lourenço, por estar sempre disposto a ajudar e pela grande amizade adquirida ao longo deste trabalho.

Aos amigos Luchesi, Hélio, Roberto Pratavieira, Jorge, técnicos do laboratório, que estiveram sempre dispostos a ajudar.

Aos amigos de motores Zé Antônio, Keyll, Gustavo e Felipe, pela amizade e presença constante.

Às amigas Kelen, Lú, Cuca, Fabiana e Beth, pela grande amizade e inúmeras vezes em que nos divertimos juntos. Obrigado por tudo.

À Gi, minha grande amiga e companheira, que esteve sempre ao meu lado em todas as horas, participando de tudo, ajudando e incentivando nas horas difíceis. Serei sempre grato a você.

Aos amigos Naga, Panamá, Bila, Mariano, Tigela, Toddy, Paulo Marcos, Paulo Roberto, Graziela, Vanessa, Bigode, Helder, Juliana, Érica, Geraldo, Teodora, Volnei, Valdinei, Manoel, Cecília, Luben, João Paulo, Júlio, Sérgio, Marcus Vinícius, Adriano, Márcio, Renato, Christian e Torres.

À Ana Paula, pela amizade e pela ajuda durante estes anos todos.

Ao amigo Marcelo Valente Feitosa, que teve atuação fundamental no desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores, secretárias e funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica.

E às demais pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

*"O motor Diesel pode ser alimentado com óleos vegetais e poderá ajudar consideravelmente o desenvolvimento da agricultura dos países. Isto parece um sonho, mas posso predizer com inteira convicção que esse modo de emprego do motor Diesel poderá adquirir uma grande importância no futuro "*

*Rudolph Diesel, 1911*

# ÍNDICE

1	Introdução	1
1.1	Combustão	1
1.1.1	O processo da combustão	2
1.2	Combustíveis Alternativos	3
2	Objetivos	6
3	O Biodiesel	7
3.1	Transesterificação	8
3.2	Biodiesel no Brasil	10
3.3	Biodiesel no Mundo	12
3.3.1	Alemanha	13
3.3.2	França	14
3.3.3	Estados Unidos	14
3.3.4	Austrália	15
3.3.5	Argentina	16
3.3.6	Malásia	16
3.3.7	Outros Países	16
3.4	Outros aspectos ambientais e sócio-econômicos	17
3.5	Probiodiesel	21
4	Viabilidade Técnica do uso de Biodiesel	23
4.1	Óleo diesel	23
4.2	Especificações e seus significados	25
4.2.1	Cor	25
4.2.2	Volatilidade	26
4.2.3	Viscosidade	26
4.2.4	Ponto de Fulgor	27
4.2.5	Enxofre	27
4.2.6	Número de Cetano	28
4.2.7	Água e Sedimentos	29
4.2.8	Corrosividade	29
4.3	Biodiesel	30
4.3.1	Propriedades químicas do biodiesel	31
4.3.2	Viabilidade Técnica	33

5	Revisão Bibliográfica	35
5.1	Modelagem do Processo de Combustão e Liberação de Calor	35
5.2	Quantificação da Detonação	46
6	Estudo Físico Matemático	49
6.1	Combustão no Motor Diesel	49
6.1.1	Liberação de Calor	50
6.2	Código do Programa	53
6.2.1	Modos de utilização do Programa	62
6.3	Dados de entrada do Programa	62
7	Metodologia	63
7.1	Ensaios	63
7.2	Equipamento para medir pressão na câmara de combustão	67
7.3	Equacionamento da Liberação de Calor	69
8	Resultados e Discussões	70
8.1	Torque e Potência	70
8.2	Rendimento Térmico	72
8.3	Consumo Específico de Combustível	75
8.4	Pressão no Interior do Cilindro	78
8.5	Liberação de Calor	83
8.6	Detonação	91
8.7	Emissões	98
8.7.1	Emissões de Hidrocarbonetos - HC	98
8.7.2	Emissões de Monóxido de Carbono - CO	102
8.7.3	Emissões de Óxidos de Nitrogênio - NO <sub>x</sub>	104
9	Conclusões	108
10	Sugestões para Trabalhos Futuros	112
11	Referências Bibliográficas	113
	Anexo I - Probiodiesel	120
	Anexo II - Resolução ANP n° 42	140
	Anexo III - Diretiva do Parlamento Europeu	150

## LISTA DE FIGURAS

1	Esquema do processo de transesterificação para obtenção do biodiesel.	9
2	Potencialidades regionais e demanda de óleos vegetais no Brasil.	12
3	Amostras de biodiesel de algodão, girassol e soja do Ladetel.	20
4	Amostra um biodiesel de soja obtido de um processo mais refinado no Ladetel.	20
5	Esquema de uma modelagem zero-dimensional.	38
6	Esquema do volume de controle adotado por GATOWSKI et al. (1984).	41
7	Vista lateral do motor utilizado nos ensaios.	65
8	Vista superior do motor utilizado nos ensaios.	65
9	Esquema da bancada de teste e instrumentação.	66
10	Sistema de medição de consumo de combustível.	67
11	Sensor de pressão instalado no cilindro nº 1 do motor.	68
12	Curvas de potência para o diesel, B10, B20 e B100.	70
13	Curvas de torque para o diesel, B10, B20 e B100.	71
14	Rendimento térmico dos combustíveis sem adição de etanol.	72
15	Rendimento térmico dos combustíveis com adição de etanol, a 1500 rpm.	73
16	Rendimento térmico dos combustíveis com adição de etanol, a 2000 rpm.	73
17	Rendimento térmico dos combustíveis com adição de etanol, a 2500 rpm.	74
18	Rendimento térmico dos combustíveis com adição de etanol, a 3000 rpm.	74
19	Consumo específico dos combustíveis sem a adição de etanol.	75
20	Consumo específico dos combustíveis com adição de etanol, a 1500 rpm.	76
21	Consumo específico dos combustíveis com adição de etanol, a 2000 rpm.	76
22	Consumo específico dos combustíveis com adição de etanol, a 2500 rpm.	77
23	Consumo específico dos combustíveis com adição de etanol, a 3000 rpm.	77
24	Curvas de pressão do diesel, B10, B20 e B100, sem a substituição por etanol.	79
25	Curvas de pressão do diesel, com e sem a substituição por etanol.	80
26	Curvas de pressão do B10, com e sem a substituição por etanol.	81
27	Curvas de pressão do B20, com e sem a substituição por etanol.	81
28	Curvas de pressão do B100, com e sem a substituição por etanol.	82
29	Liberação de calor do diesel, B10, B20 e B100, sem a substituição por etanol.	83

30	Pressão do B10 sem a adição de etanol.	84
31	Pressão do B100 sem adição de etanol.	85
32	Taxa de variação da pressão em função do ângulo de girabrequim para o diesel.	86
33	Taxa de variação da pressão em função do ângulo de girabrequim para o B10.	86
34	Curvas de liberação de calor do diesel, com e sem a substituição por etanol.	87
35	Curvas de liberação de calor do B10, com e sem a substituição por etanol.	88
36	Curvas de liberação de calor do B20, com e sem a substituição por etanol.	89
37	Curvas de liberação de calor do B100, com e sem a substituição por etanol.	89
38	Taxa de liberação de calor obtida a partir do equacionamento proposto por HEYWOOD (1988) e utilizando-se a equação proposta no trabalho, para o caso do diesel.	90
39	Índice de detonação do diesel sem etanol.	92
40	Índice de detonação do diesel com adição de etanol.	92
41	Índice de detonação do B10, sem a adição de etanol.	93
42	Índice de detonação do B10, com a adição de etanol.	93
43	Índice de detonação do B20, sem a adição de etanol.	94
44	Índice de detonação do B20, com a adição de etanol.	94
45	Índice de detonação do B100, sem a adição de etanol.	95
46	Índice de detonação do B100, com a adição de etanol.	95
47	Liberação de calor do diesel para diferentes índices de detonação.	97
48	Emissões de HC do diesel e do biodiesel em função da rotação.	100
49	Emissões de HC do Biodiesel sem e com a substituição por etanol.	101
50	Emissões de CO do diesel e do Biodiesel em função da rotação.	103
51	Emissões de CO do Biodiesel sem e com a substituição por etanol.	103
52	Emissões de NO <sub>x</sub> do diesel e Biodiesel em função da rotação.	105
53	Emissões de NO <sub>x</sub> do Biodiesel sem e com a substituição por etanol.	106

## LISTA DE TABELAS

1	Produção, importação, exportação e consumo de óleo diesel no Brasil.	17
2	Características dos combustíveis usados neste trabalho. P22	22
3	Propriedades físico-químicas biodiesel de várias espécies vegetais e do óleo diesel.	33

## RESUMO

SANTOS, R. F. E. (2005). *Análise experimental do desempenho e da combustão de um motor de ignição por compressão alimentado por uma mistura ternária de combustíveis – diesel, biodiesel e etanol*. São Carlos. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

É analisado o desempenho de um motor de ignição por compressão turboalimentado por uma mistura ternária de combustíveis (diesel, biodiesel e etanol) através do comportamento do motor operando com um combustível principal, o qual poderá ser o diesel ou biodiesel ou misturas destes dois, com e sem sua substituição parcial por etanol no coletor de admissão. A análise do desempenho é feita através das curvas de torque, potência, rendimento térmico e consumo específico de combustível. A combustão do motor é estudada através de um programa simulador que utiliza um modelo zero-dimensional, que avalia a taxa de liberação de calor durante a combustão e tem como dado de entrada a curva de evolução da pressão dentro do cilindro. Faz-se a identificação e quantificação do fenômeno da detonação utilizando análise espectral, através do sinal de pressão da câmara de combustão, para o motor operando com diversas misturas combustíveis. São analisadas também as emissões gasosas do motor com as misturas, e a viabilidade técnica do uso de biodiesel em motores de ignição por compressão, além de um estudo geral sobre o uso do éster de óleo vegetal.

*Palavras chave:* combustão, liberação de calor, detonação, biodiesel, emissões.

## ABSTRACT

SANTOS, R. F. E. (2005). *Experimental analysis of the performance and combustion of a compression ignition engine supplied by a three-fuel system – diesel, biodiesel and ethanol*. São Carlos. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

The performance of a three-fuel system (diesel, biodiesel and ethanol) turbocharged compression-ignition engine is analyzed, through the engine behavior supplied by mixtures of diesel or biodiesel or mixtures of these fuels with ethanol in the intake manifold. The performance analysis is made by torque, power, specific fuel consumption and thermal efficiency curves. The engine combustion is studied by a simulator program that uses a zero-dimensional model, that evaluate the heat release rate during the combustion and it has as input data the pressure evolution curves inside the cylinder. The knocking phenomenon is studied by spectral analysis. The pollutant gases emissions and the technical viability of the utilization of biodiesel also are analyzed, beyond a general study about of vegetal oil ester.

Key words: combustion, heat release, knocking, biodiesel, pollutant gases emissions.

## **1. INTRODUÇÃO**

Desde a criação dos motores de combustão interna (MCI), extensivos estudos têm sido realizados com o objetivo de se alcançar alto desempenho, baixa emissão de poluentes e boa economia de combustível, simultaneamente.

A busca por melhoria de eficiência nos MCI é feita nas mais variadas direções: redução de massa dos componentes móveis por meio da utilização de novos materiais; pesquisa e desenvolvimento de novos lubrificantes e combustíveis que, além de almejarem melhoria no desempenho dos motores, buscam atender às normas mundiais de emissão de poluentes, cada vez mais exigentes; desenvolvimento de sistemas inteligentes de injeção de combustível bem como a utilização de sistemas multicomcombustível; etc (ZABEU, 1999).

### **1.1 Combustão**

Um dos setores que ainda propicia um largo campo de estudo e evolução é o processo da combustão, que pode ser considerado o núcleo do funcionamento do motor. Vários pesquisadores têm se dedicado ao estudo desse fenômeno ao longo das últimas décadas, tentando melhor compreender o que ocorre no interior do cilindro de um motor desde que a válvula de admissão se fecha até a abertura da válvula de escape. É um processo complexo que envolve reações químicas, escoamentos de difícil previsão, fuga de massa pelos anéis e frestas, variação de volume, troca de calor, além de outros fatores. E todos esses fenômenos são transitórios, isto é, não são constantes ao longo do tempo. Todos esses fatores não

permitem que uma modelagem matemática dos processos envolvidos com a combustão seja simples (ZABEU, 1999).

Devido a essas dificuldades, a modelagem em motores começou a ser específica, ou seja, começaram a se formar grupos dedicados ao estudo de cada fenômeno ou até subpartes de um fenômeno. Nesse contexto, iniciou-se a tentativa de diagnosticar a combustão em motores.

Além de possibilitar um maior conhecimento dos fenômenos e processos citados, o emprego de modelos simuladores no trabalho de otimização e desenvolvimento de motores proporciona uma racionalização de tempo e recursos investidos, uma vez que uma prévia avaliação (através da simulação) da influência dos parâmetros construtivos nas variáveis de operação do motor permite direcionar a pesquisa experimental (SILVA, 1992).

### **1.1.1 O processo de combustão**

O processo de combustão de um motor de ignição por compressão de injeção direta pode ser descrito da seguinte maneira: o combustível é injetado pelo sistema de injeção no interior do cilindro pouco antes de o pistão atingir o ponto morto superior, justo antes do ponto pré-determinado como início da combustão. O combustível líquido, injetado a alta velocidade em forma de jatos através de pequenos orifícios do injetor, se atomiza em pequenas gotas e penetra na câmara de combustão. O combustível se vaporiza e se mistura com o ar em movimento dentro do cilindro, a uma alta pressão e temperatura. Dado que as condições de pressão e temperatura no cilindro neste ponto superam o ponto de inflamabilidade do combustível, ocorre, depois de um período de atraso, a ignição espontânea da mistura ar-combustível. Com a combustão da mistura cresce a pressão no cilindro. Como consequência, o período de atraso das porções da mistura sem queimar se reduz, de maneira que todo ar e combustível misturados até este momento, que se encontram entre os limites de inflamabilidade, se queimarão rapidamente. Também se reduz o tempo de evaporação do combustível líquido injetado posteriormente. O processo de injeção continua até que toda quantidade de combustível necessária tenha sido introduzida no cilindro. A atomização e evaporação do combustível, a mistura do ar e do combustível, e a combustão da mistura continuam até que todo combustível injetado tenha

passado por cada processo. Adicionalmente, ocorre a mistura do ar remanescente com as porções que vão se queimando e com as já queimadas durante os processos de combustão e expansão (VERGEL, 1998).

Os detalhes do processo dependem das características do combustível, do desenho das câmaras de combustão, do sistema de injeção e das condições de operação do motor (VERGEL, 1998).

## 1.2 Combustíveis Alternativos<sup>1</sup>

A partir da primeira crise de energia, ocorrida em 1973, diversos combustíveis alternativos têm sido estudados com o objetivo de substituir o petróleo como único insumo energético para os motores de combustão interna, sejam eles automotivos ou industriais (SAPUAN et al, 1996; SCHOLL e SORENSON, 1993; CHRISTENSEN et al, 1997; BAILEY et al, 1997). No início, os estudos desse tipo eram realizados com o intuito de obter fontes alternativas seguras para o fornecimento de combustíveis. Entretanto, com o passar dos anos e sem perder de vista o propósito original, a principal motivação para esses estudos foi modificada em função da necessidade de se resolver um problema que demandava soluções mais imediatas — a redução das emissões poluentes regulamentadas produzidas pelos motores, visando atingir os padrões estabelecidos por normas ambientais que se tornavam cada vez mais exigentes. Nos últimos anos, a preocupação com o aquecimento global do planeta e a decorrente necessidade de diminuir os níveis de CO<sub>2</sub> na atmosfera tornaram-se mais uma motivação importante para as pesquisas sobre combustíveis alternativos.

Como resultado desta preocupação crescente com as questões ambientais todos os países passaram a adotar legislações que regulamentam as emissões poluentes tanto das indústrias como dos veículos automotores - estes últimos, notoriamente responsáveis por uma parte significativa da poluição nos grandes centros urbanos. Reconhecendo-se a necessidade de uma ação conjunta da comunidade internacional diante dos problemas ambientais, em 1997 foi realizada em Quioto (Japão) a Terceira Sessão da Conferência das

---

<sup>1</sup> PIANOVSKI JR. (2002).

Partes. Buscando reverter a tendência histórica de crescimento das emissões de gases que causam o efeito estufa, nesse evento foi proposto, por decisão consensual, um Protocolo segundo o qual os países industrializados reduziriam essas emissões, até o período entre 2008 e 2012, em pelo menos 5% em relação aos níveis de 1990.

As considerações acima expostas tornam evidente a necessidade de buscar insumos energéticos alternativos que possam substituir o petróleo. Experiências anteriores mostram que os combustíveis provenientes de fontes renováveis, como a biomassa, constituem uma das alternativas mais promissoras para este fim, principalmente nos países com grandes extensões territoriais e com clima propício para a atividade agrícola, como é o caso do Brasil. O Programa Nacional do Alcool (ProAlcool), adotado em 1975 para substituir a gasolina, é um exemplo da viabilidade de experiências deste tipo. Talvez seja o momento de começar a incentivar no país o uso de um substituto para o óleo diesel.

O consumo de petróleo no Brasil é comandado pela demanda de óleo diesel. Para atender a esta demanda, as refinarias do país processam petróleo nacional e petróleo importado maximizando a produção de óleo diesel. Por isso, o volume produzido nas refinarias resulta ser o corresponde a aproximadamente 35% do volume de petróleo processado. Apesar disto, uma parte significativa da demanda de óleo diesel ainda precisa ser suprida com a importação deste derivado. Analisando os dados da Agência Nacional de Petróleo relativos ao consumo de óleo diesel no país, podem-se identificar as parcelas de óleo diesel proveniente de petróleo nacional, de petróleo importado e a parcela de óleo diesel importado como tal (já processado). Embora a parte correspondente ao óleo diesel oriundo do petróleo nacional tenha aumentado durante a última década, ainda 40% do óleo diesel consumido no País em 1999 foi suprido a partir de importações. ROTSTEIN (1996) chama a atenção para o fato que no processo de produção de óleo diesel surge a gasolina como subproduto, sendo que a produção obrigatória de gasolina corresponde à metade do óleo diesel produzido. Obviamente, existe um conflito entre a produção obrigatória de gasolina e a sua almejada substituição pelo álcool combustível. Assim, resulta evidente que qualquer programa de utilização de combustíveis alternativos deve estar voltado, principalmente, à substituição do óleo diesel.

Dentre as diversas possibilidades consideradas na literatura, os glicerídeos ou óleos vegetais constituem a fonte renovável mais promissora para a obtenção de combustíveis

líquidos capazes de substituir o óleo diesel. Além de seu alto poder calorífico, os óleos vegetais apresentam qualidades que os diferenciam como combustíveis sustentáveis — a ausência de enxofre na sua composição química; o fato que a sua produção industrial não gera substâncias danosas ao meio ambiente e, ainda, o fato de serem elaborados a partir de culturas vegetais que consomem o dióxido de carbono da atmosfera durante a fotossíntese. Além disso, deve-se mencionar que a tecnologia de sua produção está amplamente dominada e que, quando processados para formarem ésteres de álcoois, os óleos transesterificados (que recebem a denominação genérica de biodiesel) podem ser utilizados nos motores diesel atualmente existentes, sem a necessidade de fazer modificações neles.

Finalmente, é preciso mencionar os aspectos sociais que servem como justificativa para a pesquisa e o desenvolvimento de novos combustíveis oriundos de biomassa. Os problemas e conflitos sociais com que o País se debate exigem soluções que otimizem a geração de empregos no campo. Entretanto, cerca de 15 a 20% do óleo diesel consumido no Brasil é na agricultura, o que significa que o agricultor acaba pagando impostos sobre o óleo diesel (e o seu transporte) ao invés de receber estímulos para ser auto-suficiente, usando combustíveis provenientes de biomassa, produzidos localmente e gerando empregos.

## 2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivos:

- estudar a viabilidade técnica do uso de óleos vegetais em motores de ignição por compressão.
- analisar o desempenho de um motor de ignição por compressão turboalimentado por uma mistura ternária de combustíveis - diesel, biodiesel e etanol. Será analisado o comportamento do motor operando com um combustível principal, o qual poderá ser o diesel ou biodiesel ou misturas destes dois, com e sem sua substituição parcial por etanol no coletor de admissão. A análise do desempenho será feita através das curvas de torque, potência, rendimento térmico e consumo específico de combustível. O sistema de injeção de etanol utilizado foi o proposto e idealizado por FEITOSA (2003);
- adotar o sistema proposto por HEYWOOD (1988) para obtenção da taxa de liberação de calor e modificá-lo a fim de que seja possível sua utilização para o caso de se operar com dois ou mais combustíveis simultaneamente no motor;
- quantificar e analisar a detonação para cada condição de ensaio realizado, e sua influência na taxa de liberação de calor;
- através do uso do biodiesel e do etanol (combustíveis renováveis) reduzir os efeitos das emissões de gases, principalmente do CO<sub>2</sub>, pois o uso de combustíveis de origem vegetal estabelece um ciclo compreendido pela emissão de CO<sub>2</sub> no processo de combustão e pela absorção de CO<sub>2</sub> no crescimento da planta.

### 3. O BIODIESEL

“ O uso de óleos vegetais em substituição ao óleo diesel não é uma idéia recente. Sabe-se que já no início do século, o próprio Rudolf Diesel funcionou um de seus motores com óleo de nozes. Todavia, nesta época, os derivados do petróleo eram tão baratos que inibiram qualquer desenvolvimento nesta linha (MÓDOLO, 1998). p. 21

Por serem renováveis e apresentarem grandes quantidades de carbono, os óleos vegetais *in natura* possuem um grande potencial como combustíveis alternativos. Eles têm sido usados como combustíveis para motores de ignição por compressão desde 1900. No Brasil, as primeiras pesquisas voltadas à utilização de óleos vegetais *in natura* foram realizadas no Instituto Nacional de Tecnologia, no Instituto de Óleos do Ministério da Agricultura e no Instituto de Tecnologia Industrial de Minas Gerais. Neste último, registram-se estudos realizados em 1950 sobre o uso dos óleos de ouricuri, mamona e algodão em motores diesel de 6 cilindros (PIANOVSKI JR., 2002).

Porém, o emprego de óleos vegetais *in natura* em motores de combustão interna apresenta algumas desvantagens como, por exemplo, a alta viscosidade, que interfere no processo de injeção ocasionando uma insuficiente atomização do combustível. A mistura ineficiente com o ar contribui para uma combustão incompleta e provoca a formação de depósitos de carbono ao redor dos bicos injetores e nos anéis dos pistões, além de diluir e degradar o óleo lubrificante (SRIVASTAVA, 2000). A combinação de alta viscosidade com baixa volatilidade é a principal causa das dificuldades de partida a frio nos motores movidos a óleos vegetais. Outra desvantagem desses óleos vegetais reside no fato que a sua oxidação causa depósitos no interior dos bicos injetores que, obstruídos, deixam de vedar

com perfeição a passagem de combustível, causando um gotejamento que prejudica o processo de combustão (PIANOVSKI JR., 2002).

MÓDOLO (1998) cita outras desvantagens:

- as densidades são pouco maiores;
- as curvas de destilação sugerem que os óleos vegetais podem sujeitar-se ao “cracking” em temperaturas que são atingidas pelo jato de combustível em motores com aspiração normal de ar;
- necessidade de pré-aquecimento;
- baixa volatilidade.

Para solucionar os inconvenientes do uso direto de óleos vegetais nos motores diesel, têm sido realizados, em diversos países, estudos visando a produção de ésteres de óleo vegetal. O processo que transforma óleos vegetais em ésteres é conhecido como transesterificação. Estes estudos mostram que os ésteres de óleos vegetais em geral são atualmente apresentados na literatura científica como a melhor alternativa de substituição do óleo diesel nos motores de ignição por compressão. O nome dado aos combustíveis obtidos através desta transesterificação é biodiesel. Este processo será mostrado no próximo item.

### **3.1 Transesterificação**

O termo biodiesel foi definido pela “National Biodiesel Board”, dos Estados Unidos, como o derivado monoalquiléster de ácidos graxos de cadeia longa, proveniente de fontes renováveis como óleos vegetais ou gordura animal, cuja utilização está associada à substituição de combustíveis fósseis em motores de ignição por compressão (motores do ciclo Diesel) (NATIONAL, 1998). O biodiesel, como dito anteriormente, é obtido através do processo de transesterificação.

A transesterificação de um óleo com álcoois, especificamente metanol ou etanol, promove a quebra da molécula de triglicídios, gerando mistura de ésteres metílicos ou etílicos dos ácidos graxos correspondentes, liberando glicerina como subproduto. O peso molecular destes ésteres é próximo ao do diesel. O processo tem como subproduto a

glicerina, produto de grande valor na indústria química (ALMEIDA, 2001). Um esquema do processo de transesterificação é mostrado na Figura 1.

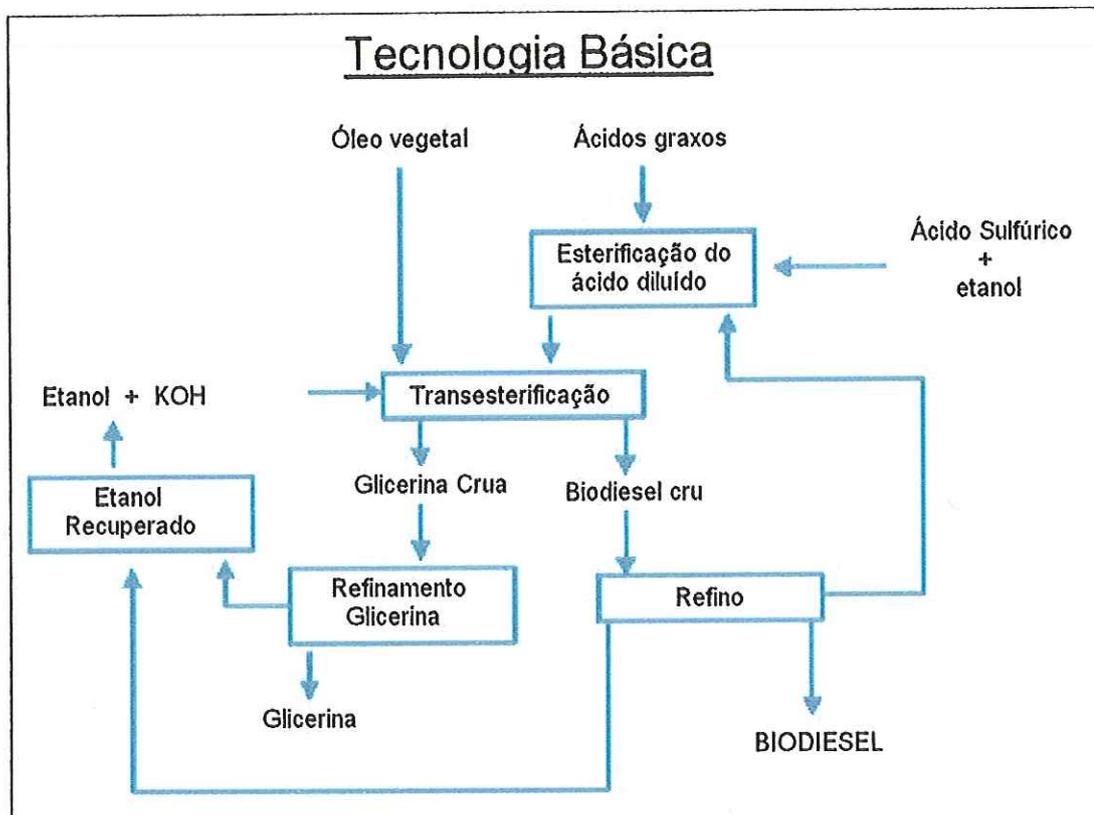


Figura 1: Esquema do processo de transesterificação para obtenção do biodiesel ([http://www.afdc.doe.gov/altfuel/bio\\_made.html](http://www.afdc.doe.gov/altfuel/bio_made.html)).

A reação de transesterificação de óleos vegetais com álcoois primários pode ser realizada tanto em meio ácido quanto em meio básico. A reação de síntese, geralmente empregada a nível industrial, utiliza uma razão molar óleo:álcool de 1:6 na presença de 0,4% de hidróxido de sódio ou de potássio, porque o meio básico apresenta melhor rendimento e menor tempo de reação do que o meio ácido. Por outro lado, o excesso de agente transesterificante (álcool primário) faz-se necessário devido ao caráter reversível da reação (FREEDMAN, 1986).

### 3.2 Biodiesel no Brasil

As alternativas para o fornecimento de óleo vegetal são diversas e podem ser obtidas conforme as espécies cultivadas em cada região. No Brasil, a soja é a única oleaginosa com escala suficiente para a produção imediata de Biodiesel, uma vez que cerca de 90% da produção brasileira de óleo provém dessa leguminosa. Porém, existem muitas culturas alternativas que podem ser utilizadas como fonte de óleo vegetal, inclusive com maior rendimento que a soja, tais como girassol, amendoim, algodão, dendê, coco, babaçu, mamona, colza, entre outros (MEIRELLES, 2003).

Como fonte de álcool, a opção preferencial tem sido o etanol, produzido nacionalmente em larga escala, a partir da cana-de-açúcar e a custos altamente competitivos, enquanto o metanol, além de ser tóxico, necessita ser importado (MEIRELLES, 2003).

O biodiesel é um combustível renovável e, portanto, uma alternativa aos combustíveis tradicionais, obtidos através do petróleo. Sua utilização traz uma série de vantagens ambientais, econômicas e sociais.

Segundo CAMPOS (2003), no Brasil 60% da energia gerada provém de fontes renováveis, enquanto que outros países pretendem chegar a 12% somente em 2010. Outra constatação da autora é que 85% da energia que movimenta o mundo é de origem fóssil e 80% dessa energia tem seu uso concentrado em cerca de 10 países. A contribuição do Brasil na emissão de gás carbônico para a atmosfera é de 0,41%, enquanto que a dos EUA, China, Alemanha, Rússia e Japão, soma 65%.

Os combustíveis de origem vegetal dos trópicos representam o contraponto ao estopim de conflitos provocados pela escassez do petróleo e pelo declínio das demais fontes fósseis. No Século 21, caberá ao Brasil, em termos mundiais, desempenhar um importante papel; trata-se de uma grande oportunidade econômica que jamais país algum teve na história do mundo globalizado.

A perspectiva de o Brasil se consolidar como o principal supridor mundial de combustíveis renováveis de elevado conteúdo energético, é viável graças à sua dimensão continental localizada numa área tropical, e por possuir abundantes recursos hídricos (22 a 24% da água doce do planeta), além de imensas áreas desocupadas.

O biodiesel surge como uma alternativa de diminuição da dependência dos derivados de petróleo e como um novo mercado para as oleaginosas, com perspectiva de redução da emissão de poluentes. A introdução deste combustível no mercado representará uma nova dinâmica para a agroindústria, com seu conseqüente efeito multiplicador em outros segmentos da economia, envolvendo óleos vegetais, álcool, óleo diesel e mais os insumos e subprodutos da produção do éster vegetal (CAMPOS, 2003).

A viabilização do biodiesel requer, porém, a implementação de uma estrutura organizada para produção e distribuição de forma a atingir, com competitividade, os mercados potenciais. A introdução do biodiesel demanda, portanto, investimentos ao longo da cadeia produtiva para garantir a oferta do produto com qualidade, além da perspectiva de retorno do capital empregado no desenvolvimento tecnológico e na sustentabilidade do abastecimento em longo prazo.

A produção agrícola de óleos vegetais é mais do que uma alternativa energética; constitui a base para um modelo de desenvolvimento tecnológico e industrial autônomo e auto-sustentado, baseado em dados concretos da realidade nacional e na integração do homem a uma realidade econômica em harmonia com o meio ambiente. O Brasil, que ocupa a posição de segundo produtor e exportador mundial de óleo de soja, poderá se tornar, gradativamente, um importante produtor e consumidor de biodiesel, acrescida da oportunidade de se utilizar aqui outros óleos vegetais característicos das diferentes regiões do País e, também, da possibilidade de reduzir a dependência da importação de óleo diesel, desonerando o balanço de pagamentos e criando riqueza no interior.

A produção de oleaginosas poderá expandir significativamente para atender o aumento da demanda por óleo para a produção de biodiesel, destacando-se o potencial de 70 milhões de hectares com aptidão para o cultivo do dendê, localizados principalmente na região Amazônica e no leste do Estado da Bahia<sup>2</sup> (CAMPOS, 2003).

Em cada Estado e região do País está sendo avaliado o desenvolvimento das cadeias produtivas dos diferentes óleos vegetais, na seguinte distribuição:

- Região Norte: dendê, babaçu, soja e gordura animal;
- Região Nordeste: babaçu, soja, mamona, dendê, algodão, coco, gordura animal e óleos de peixes;

---

<sup>2</sup> O Brasil tinha, em 2003, apenas 50 mil hectares plantados com dendê.

- Região Centro-Oeste: soja, mamona, algodão, girassol, dendê, gordura animal;
- Região Sul: soja, colza, girassol, algodão, gordura animal e óleos de peixes e;
- Região Sudeste: soja, mamona, algodão, girassol, gordura animal e óleos de peixes.

A Figura 2 mostra as potencialidades regionais, o diesel consumido e a demanda de B5 (mistura com 5% de biodiesel e 95% de diesel) no Brasil, em milhares de toneladas.

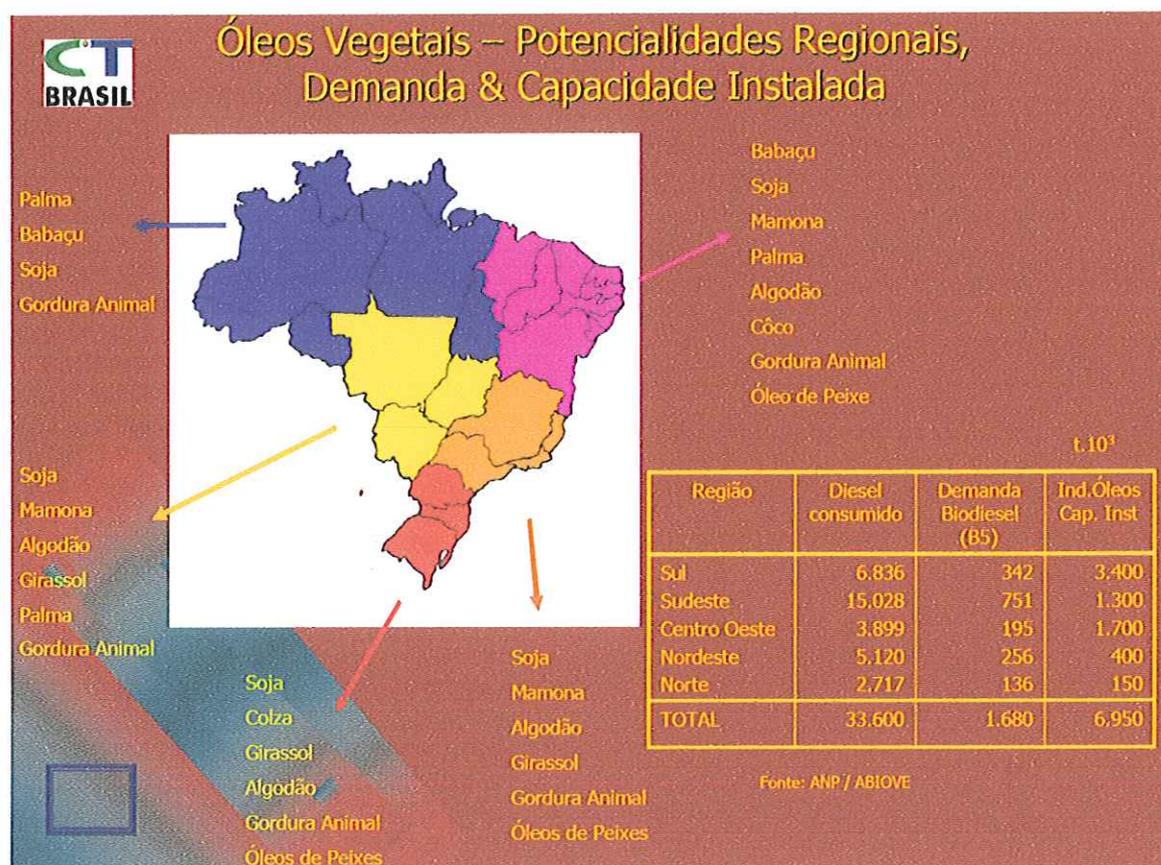


Figura 2: potencialidades regionais e demanda de óleos vegetais no Brasil (CAMPOS, 2003).

### 3.3 Biodiesel no mundo<sup>3</sup>

No início dos anos 90, o processo de industrialização do *Prodiesel*<sup>4</sup> foi iniciado na Europa, com um novo nome, simplesmente Biodiesel. Portanto, foi na Europa que o novo

<sup>3</sup> TECBIO (2003).

<sup>4</sup> Nome dado inicialmente, na Europa, ao combustível obtido através do processamento de um óleo vegetal.

combustível para motores do ciclo diesel foi ressuscitado, exatamente com a mesma concepção original brasileira, em todos os seus aspectos.

Um fato novo que tem sido constatado nos países europeus é a prática da eliminação do enxofre do óleo diesel em nível das refinarias de petróleo. Como a lubricidade do óleo diesel mineral dessulfurado diminuiu muito, a correção tem sido feita, adicionando -se biodiesel ao diesel mineral, já que a lubricidade do biodiesel é maior. A seguir, serão apresentados e comentados os estágios de implantação dos programas relevantes de produção e utilização do biodiesel:

### 3.3.1 Alemanha

Com base na colza, os alemães montaram um expressivo programa de produção de óleo diesel vegetal, utilizando a mesma tecnologia e a logística desenvolvida no Ceará. O sistema produtivo de biodiesel praticado na Alemanha, como nos demais países europeus, tem a seguinte configuração:

- os agricultores plantam colza para nitrogenar naturalmente os solos exauridos daquele elemento;
- o óleo é extraído, produzindo-se o farelo protéico que é direcionado para ração de animais, especialmente na estação invernal;
- o óleo de colza é processado e transformado em biodiesel;
- o biodiesel é distribuído de forma pura, isento de qualquer mistura ou aditivação, numa já enorme rede de abastecimento de combustíveis, composta de mais de 1.000 postos.

Uma boa estratégia dos alemães foi a preparação da introdução do biodiesel no mercado. Frotas de táxis, ditos “vegetarianos”, nas principais cidades do país, foram utilizados para fazer a publicidade do biodiesel, através da distribuição de folhetos explicativos das características e vantagens do novo óleo combustível.

Uma outra estratégia interessante foi a disponibilização de dois bicos numa mesma bomba, sendo um para o óleo diesel de petróleo, e o outro, com selo verde, para suprir o biodiesel. Grande parte dos usuários misturava nas mais diversas proporções o biodiesel com o diesel comum, até ganhar confiança no biodiesel, cerca de 12% mais barato, e com várias vantagens ambientais. De fato, o preço médio do diesel mineral é 0,84 euros por

litro, e 0,73 euros por litro o preço médio do biodiesel<sup>5</sup> A prática de um menor preço para o biodiesel na Alemanha é explicável pela completa isenção dos tributos em toda a cadeia produtiva desse biocombustível.

### 3.3.2 França

Apesar dos alemães terem ressuscitado o biodiesel na Europa, a França é atualmente o maior produtor mundial deste combustível.

As motivações e os sistemas produtivos na França são os mesmos adotados na Alemanha, porém o combustível apresenta-se, em nível de distribuição, misturado com o óleo diesel mineral na proporção atual de 5%, com tendência a fixar-se, em curto prazo, em 8%.

Na França, o uso do biodiesel misturado com o diesel mineral visa melhorar as emissões dos motores, em especial através da eliminação das mercaptanas, substâncias ricas em enxofre, extremamente danosas à saúde dos animais e das plantas. A partir de 20% de biodiesel na mistura, as mercaptanas e os hidrocarbonetos cíclicos são suficientemente oxidados.

A evolução dos conceitos de um ecodiesel para uso urbano deu-se através da criação do *Clube de Villes*, uma associação de municípios franceses com a finalidade de disseminar e avaliar os efeitos positivos do biodiesel misturado ao diesel do petróleo, nos centros urbanos, especialmente nos transportes coletivos.

Em razão das melhorias de qualidade das emissões veiculares, atualmente todos os ônibus urbanos franceses consomem ecodiesel, numa proporção de até 30% de biodiesel na mistura com o diesel mineral. Esta quantidade de biodiesel na mistura ainda não é utilizada em nível de distribuição nacional devido a problemas de capacidade de produção.

A cadeia produtiva do biodiesel também é incentivada, com relação aos impostos incidentes.

---

<sup>5</sup> Preço referente a abril de 2002.

### 3.3.3 Estados Unidos

Os Estados Unidos têm demonstrado grande interesse no uso do biodiesel misturado com o óleo diesel do petróleo, visando a melhoria das emissões dos motores do ciclo diesel. Essa demonstração tem sido notória pelos inúmeros estudos que estão sendo realizados com o uso do ecodiesel em suas diversas configurações.

A grande motivação americana reside na qualidade do meio ambiente. Na realidade, os americanos estão se preparando, com muita seriedade, para o uso de um ecodiesel, especialmente nas grandes cidades e em ambientes especiais como, por exemplo, nos ônibus escolares.

A proporção que tem sido mais cogitada para a mistura biodiesel/diesel mineral tem sido 20%, mistura esta que tem sido chamada de EcoDiesel B-20. Nesta proporção, as mercaptanas e os hidrocarbonetos cíclicos têm sido suficientemente oxidados por ocasião da combustão.

Os padrões para o biodiesel nos EUA são determinados e fixados pela norma ASTM D-6751, e a política americana de produção e utilização de biodiesel emana do *National Biodiesel Board*, com os seguintes destaques:

- A Lei do Senado S -517, de 25 de abril de 2002, entre várias providências, cria o Programa de Biodiesel com a meta de produção de 5 bilhões de galões anuais;
- Uma lei estadual de Minnesota, de 15 de março de 2002, obriga que seja adicionado, pelo menos 2% de biodiesel no óleo diesel mineral;
- No intuito de dar vazão aos estoques extras de óleo de soja, vários outros Estados americanos estão incentivando a transformação dos excedentes em biodiesel;
- A Comissão de Segurança Ambiental, depois de muitos estudos, recomendou a utilização de biodiesel nos ônibus de transporte escolar (*Yellow Bus*);
- A NASA e as Forças Armadas Americanas consideram oficialmente o biodiesel, um combustível de excelência para qualquer motor do ciclo diesel.

### 3.3.4 Austrália

Com trabalhos importantes publicados na área, a motivação neste país continente parece ser na produção simultânea e responsável de energia e alimentos. É bastante sabido que toda oleaginosa possui duas porções: a porção lipídica que pode originar o óleo comestível e/ou o biodiesel, e a porção protéica que pode ser empregada como ração e/ou diretamente como alimentos.

A estrutura do programa australiano de biodiesel tem certas semelhanças com o programa do álcool brasileiro, especialmente com respeito a sua magnitude.

### 3.3.5 Argentina

Os argentinos já iniciaram o seu programa de biodiesel quando estabeleceram os padrões para o combustível através da Resolução 129/2001. O Decreto Governamental 1.396 de novembro de 2001 isenta de impostos por 10 anos toda a cadeia produtiva do biodiesel.

### 3.3.6 Malásia

Este país é o maior produtor mundial de óleo de dendê, obtendo uma produtividade de 5.000 kg óleo por hectares por ano. Uma usina capaz de produzir 500.000 m<sup>3</sup> por ano de biodiesel foi implantada iniciando seu funcionamento em 2003.

### 3.3.7 Outros países

Vários outros países têm demonstrado interesse no biodiesel, seja para produzir, seja para adquirir e consumir. É o caso do Japão que tem demonstrado interesse em importar biodiesel, e de alguns países europeus, onde se incluem os países do norte e do leste, além da Espanha e da Itália que pensam não somente em produzir como também em importar biodiesel.

A questão ambiental, vista de forma localizada através da qualidade das emissões dos motores, e de forma de mudanças climáticas globais, através da redução das emissões de gases poluentes, e por consequência na redução do efeito estufa, constitui a verdadeira força motriz para a produção e consumo dos combustíveis limpos oriundos da biomassa, especialmente o biodiesel.

### 3.4 Outros aspectos ambientais e sócio-econômicos

Em termos ambientais, uma das mais expressivas vantagens trazidas pelo biodiesel refere-se à redução da emissão de gases poluentes<sup>6</sup>.

Os benefícios ambientais podem, ainda, gerar vantagens econômicas. O país poderia enquadrar o biodiesel nos acordos estabelecidos no protocolo de Kyoto e nas diretrizes dos Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL), já que existe a possibilidade de venda de cotas de carbono através do Fundo Protótipo de Carbono (PCF), pela redução das emissões de gases poluentes e também créditos de “seqüestro de carbono”, através do Fundo Bio de Carbono (CBF), administrados pelo Banco Mundial. Outra vantagem econômica é a possibilidade de redução das importações de petróleo e diesel refinado. Segundo estatísticas da Agência Nacional do Petróleo (ANP), o consumo brasileiro de óleo diesel apresentou um crescimento acumulado de 42,5%, no período de 1992 a 2001. Para suprir a demanda crescente, foi necessário aumentar o volume importado do combustível, de 2,3 milhões de m<sup>3</sup>, em 1992, para 6,6 milhões de m<sup>3</sup>, em 2001, enquanto que a produção passou de 24,5 milhões de m<sup>3</sup> em 1992 para 33,6 milhões de m<sup>3</sup> em 2001. É importante destacar que, em 1992, 8,5% do consumo brasileiro de óleo diesel era suprido via importações. Em 2001, essa participação já havia saltado para 16,5%. A Tabela 1 mostra estes dados (MEIRELLES, 2003).

Em 2002, por exemplo, o Brasil importou 6,389 milhões de metros cúbicos de óleo diesel, ou 17% dos 37,6 milhões de metros cúbicos consumidos, de acordo com a ANP (Agência Nacional do Petróleo). O dispêndio com o diesel importado alcançou US\$ 1,088 bilhão. Se o biodiesel fosse introduzido como B5 (adição de 5% do combustível vegetal no

---

<sup>6</sup> Esta redução será mostrada no decorrer deste trabalho

diesel), seriam economizados anualmente US\$ 347 milhões em gastos com diesel importado, levando em conta os números de 2002 (GONÇALVES, 2003).

Tabela 1: Produção, importação, exportação e consumo de óleo diesel no Brasil (ANP, 2004).

Ano	Produção (mil m <sup>3</sup> )	Importação (mil m <sup>3</sup> )	Exportação (mil m <sup>3</sup> )	Consumo Aparente (mil m <sup>3</sup> )	Importação (US\$ mil)
1992	24.513	2256,6	158,65	26.611	337.535
1993	25.509	4387,0	591,19	29.305	591.314
1994	27.952	3257,3	627,25	30.582	393.335
1995	27.558	4249,7	504,46	31.303	550.823
1996	27.605	4906,0	256,03	32.255	767.803
1997	28.003	5892,2	188,96	33.706	836.317
1998	30.132	6207,1	0,52	36.339	630.647
1999	32.211	5830,0	61,39	37.980	670.707
2000	32.432	5801,0	60,63	38.172	1.254.162
2001	33.645	6603,5	73,46	40.175	1.215.035
2002	33.321	6388,7	16,35	37.600	1.087.761
2003	34.511	3818,4	122,23	38.207	791.812

Já em 2003 as importações de óleo diesel caíram para 3,818 milhões de metros cúbicos, o que representou 10% do total consumido no país. A produção foi de 34,5 milhões de metros cúbicos (ANP, 2004).

O biodiesel contribui ainda para a geração de empregos no setor primário, que no Brasil é de suma importância para o desenvolvimento social e prioridade de nosso atual governo. O biodiesel favorece o ciclo da economia auto-sustentável, essencial para a autonomia do país (ECIRTEC, 2003).

É também um combustível de manuseio, transporte e armazenamento seguros, e que apresenta ponto de fulgor maior que o do óleo diesel. Um veículo originalmente movido a óleo diesel poderá operar com biodiesel sem necessidade de efetuar qualquer modificação no motor e sem que isto provoque a alteração significativa de sua capacidade de carga ou de sua autonomia. Além disso, o biodiesel se mistura prontamente com o óleo diesel em qualquer proporção e a mistura permanece estável, podendo ser armazenada ou distribuída em qualquer instalação que já trabalhe com óleo diesel (PIANOVSKI JR., 2002).

As possibilidades de uso do biodiesel são ainda mais atraentes nas regiões remotas do Brasil, onde o custo do transporte encarece o preço do combustível derivado de petróleo.

Além disso, pelo fato do biodiesel ser atóxico e biodegradável ele se torna um excelente combustível para ser usado em locais ecologicamente sensíveis como lagos, parques nacionais, estuários, etc (PIANOVSKI JR., 2002).

Quanto ao custo, a Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais (Abiove), e o governo reconhecem que ainda é mais caro produzir biodiesel do que diesel, se comparados os valores na porta da fábrica. Cálculo da Abiove aponta que o litro de biodiesel custa<sup>7</sup> perto de R\$ 1,17 no Centro-Oeste e R\$ 1,24 no Sul e no Sudeste, considerando o preço do óleo de soja em US\$ 480 a tonelada, valor muito mais alto que o patamar histórico de US\$ 350. Já o diesel custa cerca de R\$ 0,75 o litro, valor que sobe a R\$ 1,13 quando computados PIS/Cofins, Cide e ICMS. Segundo a Abiove, o custo poderá ser reduzido se o governo isentar o biodiesel de tributação. O combustível vegetal também ficará cada vez mais barato com o crescimento de seu consumo e a melhoria da tecnologia de processamento (GONÇALVES, 2003).

O biodiesel é produzido no Brasil em caráter experimental. No Rio de Janeiro, há duas unidades: a Hidroveg implantou uma unidade industrial piloto com capacidade para produzir 200 mil litros/dia de biodiesel, utilizando resíduos de refino de óleos vegetais, e a Coppe, da UFRJ, usa óleos de frituras em sua unidade-piloto, planejada para gerar 6.500 litros/dia. O óleo de soja é empregado na planta da Ecomat, em Mato Grosso, que conta com capacidade para produzir 40 mil litros/dia de biodiesel. No Nordeste, a mamona será a matéria-prima de três fábricas. As plantas das universidades federais do Ceará (UFCE), com capacidade para até 4.000 litros/dia, e do Piauí (UFPI), com potencial para até 3.000 litros/dia, estavam programadas para operar a partir de janeiro de 2004. Em julho deste ano, teve início a fase pré-operacional da unidade da Petrobrás em Estreito, no Rio Grande do Norte, com capacidade para 5.600 litros/dia. Usineiros de São Paulo também se mostram interessados em montar plantas de biodiesel, pois o álcool etílico por eles produzido tem se mostrado como alternativa ambientalmente mais amigável nas reações químicas com óleos vegetais. A usina Virálcool, de Sertãozinho (SP), anunciou em agosto de 2003 que instalaria uma unidade de biodiesel sob a coordenação da USP de Ribeirão Preto (GONÇALVES, 2003).

---

<sup>7</sup> Valores referentes a dezembro de 2003

Na USP de Ribeirão Preto, o Laboratório de Desenvolvimento de Tecnologias Limpas (Ladétel) monitora testes em carros, caminhões, tratores, geradores de energia elétrica e locomotivas. O biodiesel produzido no Ladétel resulta da reação química entre o etanol e óleos vegetais. O produto também está sendo testado em empresas e instituições de pesquisa, podendo usar plantas oleaginosas brasileiras e óleos já utilizados em frituras.

O coordenador do projeto, professor Miguel Dabdoub, afirma que reduziu o tempo necessário na produção do biodiesel. Enquanto que o processo tradicional leva seis horas, o do Ladétel é realizado em 30 minutos, aumentando a produtividade 12 vezes. O Ladétel já utilizou onze variedades de óleos vegetais (soja, amendoim, girassol, algodão, milho, canola, mamona, pequi, macaúba, babaçu e dendê) no biodiesel, além dos óleos de fritura. O óleo utilizado em frituras é originário dos restaurantes da USP e das lanchonetes da Rede McDonalds.

A Figura 3 apresenta amostras de biodiesel de algodão, girassol e soja do Laboratório de Desenvolvimento de Tecnologias Limpas (Ladétel) e a Figura 4 mostra um biodiesel de soja obtido de um processo mais refinado, do mesmo laboratório.



Figura 3: amostras de biodiesel de algodão, girassol e soja do Ladétel.

Até junho de 2002, os estudos sobre biodiesel estavam concentrados no Probiobiodiesel<sup>8</sup> (Programa Brasileiro de Desenvolvimento Tecnológico de Combustíveis Alternativos –

<sup>8</sup> Anexo 1.

item 3.5), do MCT (Ministério da Ciência e Tecnologia). O principal executor desse programa é o Cerbio (Centro Brasileiro de Referência em Biocombustíveis), vinculado ao Tecpar (Instituto de Tecnologia do Paraná), criado em outubro de 2002. O uso do óleo de dendê na produção de biodiesel está sendo testado no Probioamazon (Programa de Produção de Biomassa Energética em Assentamentos do INCRA na Amazônia), gerenciado pelo MCT e pelo MDA (Ministério do Desenvolvimento Agrário). Em julho de 2002, o MME (Ministério de Minas e Energia) lançou o programa Combustível Verde-Biodiesel. O programa iniciará com a mistura de 2% de biodiesel em 2005, com aumento gradual ano a ano até alcançar 5% em 2009. A meta de produção para 2010 foi estabelecida em 1,5 milhões de toneladas, destinado ao mercado interno e à exportação (GONÇALVES, 2003).



Figura 4: amostra um biodiesel de soja obtido de um processo mais refinado no Ladetel.

### 3.5 Probiobiodiesel

O Programa Brasileiro de Desenvolvimento Tecnológico de Combustíveis Alternativos, coordenado pelo Ministério da Ciência e Tecnologia e Secretaria de Política Tecnológica Empresarial tem como principal agente executor o Centro de Referência em Biocombustíveis - CERBIO. O Probiobiodiesel compreende ações de viabilização das tecnologias de adição do etanol e de óleos vegetais ao óleo diesel derivado de petróleo. O programa se concretiza através da ação integrada, em rede de pesquisas, para o desenvolvimento das tecnologias de produção e uso de misturas biocombustíveis, visa a avaliação da sua viabilidade e competitividade técnica, sócio-ambiental e econômica para o

mercado brasileiro e para exportação futura, além de sua produção e distribuição espacial nas diferentes regiões do País. Compreende ações de pesquisa e desenvolvimento tecnológico, incluindo testes em campo, nas adições de óleos vegetais em óleo diesel, além de tecnologias específicas que viabilizem o desenvolvimento sócio-econômico de assentamentos rurais pela produção de eletricidade e combustíveis (Probioamazon).

O Probiobiodiesel é o resultado da interação e parceria para o desenvolvimento oriundos da Rede Nacional de Biocombustíveis, que congrega especialistas, representantes de entidades de pesquisa, associações empresariais, agências reguladoras e de fomento, Governos Federal, Estadual e Municipal e da Comissão de Minas e Energia da Câmara dos Deputados. No Programa destacam-se as entidades com responsabilidades diretas de coordenação das atividades do Programa: INT, TECPAR, LACTEC, IPT, CENPES, UNICAMP, USP, UESC, UFPR, UFCE, UFRJ, COPPE, UFRGS, IME, CTA, ANFAVEA, ABIOVE, SINDIPEÇAS - BOSCH e DELPHI, AEA, SINDICOM, ALCOPAR, SINDALCOOL, UNICA, ANP, PETROBRAS, IBAMA, FGV. Um dos grandes desafios do Probiobiodiesel é o de constituir um projeto ecológico brasileiro; trata-se de um esforço coordenado de remodelação das cidades, das tecnologias, das indústrias e das estruturas físicas a fim de torná-las ecologicamente sustentáveis, ou seja, capaz de atender às necessidades e satisfazer às aspirações da população sem diminuir as oportunidades das gerações futuras.

A seguir apresenta-se uma tabela com as propriedades dos combustíveis que compõem a mistura ternária estudada neste trabalho, permitindo avaliar suas potencialidades.

Tabela 2 - Características dos combustíveis usados neste trabalho.

<b>Combustível</b>	<b>Diesel</b>	<b>Etanol</b>	<b>B100***</b>	<b>B10*</b>	<b>B20**</b>
<b>Densidade (g/ml)</b>	0,848	0,785	0,86	0,8492	0,8504
<b>Ar/Combustível</b>	14,6	8,99	12,5	14,39	14,18
<b>PCI (KJ/Kg)</b>	43000	25700	37714	42190	41942,8
<b>Custo (R\$/l)</b>	1,13	0,91	1,76	1,193	1,256

(ABIOVE - Associação Brasileira de Óleos Vegetais - 2003).

\*B10 - Mistura 90% Diesel 10% Biodiesel

\*\*B20 - Mistura 80% Diesel 20% Biodiesel

\*\*\*B100 - 100% Biodiesel

## 4. VIABILIDADE TÉCNICA DO USO DO BIODIESEL

Para um óleo combustível poder ser usado em um motor de ignição por compressão, ele deve apresentar características que o tornem capaz de produzir uma boa combustão no interior do cilindro, sem prejudicar o desempenho do motor e sem causar avarias nos seus componentes.

A seguir serão mostradas as características necessárias que deve apresentar um bom combustível para motores de ignição por compressão. Estas características são mostradas inicialmente num âmbito geral, através das propriedades do óleo diesel e através das propriedades do biodiesel. Em seguida é feita uma comparação entre os combustíveis e, finalmente, é feita uma análise se é ou não viável tecnicamente o uso dos ésteres de óleo vegetal em motores ICO.

### 4.1 Óleo Diesel<sup>9</sup>

Os combustíveis normalmente utilizados nos motores diesel são constituídos de hidrocarbonetos. A composição química é muito variável no que diz respeito à distribuição desses hidrocarbonetos, que podem ser classificados em 4 tipos: parafinas, olefinas, naftênicos e aromáticos. Predominância de um ou de outro depende do petróleo que deu origem ao combustível e do processamento e tratamento que ele sofreu na refinaria. O peso molecular médio é também variável, mas geralmente o óleo diesel apresenta hidrocarbonetos variando de 9 a 20 átomos de carbono. A distribuição dos hidrocarbonetos

---

<sup>9</sup> Instituto Brasileiro do Petróleo - Combustíveis e Combustão

dessas quatro categorias é muito importante, porque as propriedades do combustível serão função dela. Assim a relação carbono/hidrogênio, tão importante na combustão, é variável, sendo maior nos hidrocarbonetos aromáticos e menor nos parafínicos. Propriedades como a densidade, faixa de destilação, poder calorífico, viscosidade, ponto de fluidez, número de cetano, etc, variam com a distribuição dos diversos hidrocarbonetos.

Um combustível diesel tem que satisfazer uma série de requisitos dos mais variados. O combustível finamente atomizado é disperso pelos injetores numa atmosfera de ar comprimido e uma temperatura de 540 °C a 650 °C. Em alguns milésimos de segundo, o combustível deve se misturar com o ar, vaporizar, sofrer auto-ignição e queimar completamente. Para poder realizar tudo isto, ele deve ser suficientemente volátil para vaporizar e ter características de auto-ignição que lhe permitam iniciar a queima o mais rápido possível após a injeção. A necessidade de uma boa vaporização e boas características de auto-ignição é mais importante durante o período de partida, quando a temperatura do cilindro ainda é baixa. Uma vez o cilindro aquecido, estas características tornam-se menos críticas.

É preciso também que a câmara de combustão, anéis de segmento, bicos injetores e janelas de exaustão permaneçam limpos e livres de depósitos, o que exige que o combustível deixe um mínimo de resíduos de carbono ou materiais produtores de cinza. Finalmente, o teor de enxofre do combustível deve ser relativamente baixo, pois, ao queimar, gera óxidos de enxofre que podem ser corrosivos. Esses compostos, em presença de umidade condensada, também formada na combustão dos hidrocarbonetos, formam os ácidos sulfúrico e sulfuroso que são muito corrosivos. O vazamento de gases através dos anéis de segmento para o cárter, aumenta o problema contaminando o óleo lubrificante com compostos corrosivos.

Em resumo, um bom combustível para motores diesel deverá apresentar as características mostradas abaixo:

- Permitir boa partida;
- Proporcionar aquecimento uniforme e aceleração suave;
- Proporcionar uma operação suave sem problemas de detonação;
- Minimizar a fumaça;
- Conservar limpos os injetores, câmara de combustão e áreas de exaustão;

- Minimizar a corrosão e o desgaste;
- Evitar excessiva diluição do óleo lubrificante;
- Proporcionar longa vida aos filtros;
- Dar a máxima quilometragem por litro.

As características de partida, aquecimento, aceleração suave e tendência do combustível diluir o óleo lubrificante, estão relacionadas com a volatilidade do mesmo.

A qualidade da ignição é influenciada pelo retardo da ignição, característica avaliada pelo número de cetano e influenciada pela volatilidade do combustível.

A tendência para formar fumaça depende principalmente da volatilidade, do número de cetano e da viscosidade.

Os depósitos formados estão relacionados com a volatilidade, a viscosidade, o teor de enxofre, o resíduo de carbono e a estabilidade do combustível.

A corrosão e o desgaste são principalmente função do teor de enxofre.

A vida dos filtros está ligada ao teor de água e sedimentos do combustível, assim como à sua estabilidade.

A densidade está diretamente relacionada com o poder calorífico do combustível. Assim, ela está ligada a economia de quilometragem por litro ou a uma igual potência obtida com uma menor quantidade de combustível.

## **4.2 Especificações e seus significados**

As propriedades do combustível para motores do ciclo diesel, o que significam e como elas influenciam no comportamento da combustão são mostradas a seguir.

### **4.2.1 Cor**

A aparência geral, cor e limpidez de um combustível destilado, auxiliam na avaliação da sua contaminação por óleos residuais, água ou minúsculas partículas sólidas.

A cor já foi considerada uma indicação do grau de refinação, o que hoje, nem sempre é correto, em vista do uso de aditivos e da prática de tingir os combustíveis para identificá-los. A cor não tem influência no desempenho do combustível, servindo apenas

para indicar sua uniformidade e a isenção de impurezas grosseiras ou de contaminantes mais pesados.

#### 4.2.2 Volatilidade

Pode ser definida como a porcentagem de um combustível que se evapora a uma dada temperatura, quando a pressão atuante for de uma atmosfera.

Os requisitos de volatilidade dos combustíveis diesel variam com a velocidade, tamanho e projeto do motor. Um bom combustível deve ser bem balanceado em componentes leves e pesados.

Combustíveis pouco voláteis tendem a reduzir a potência do motor e a economia do combustível devido a atomização deficiente, enquanto os muito voláteis podem reduzir a potência e a economia de combustível através do fenômeno de tamponamento<sup>10</sup> no sistema de combustível ou penetração inadequada das gotículas oriundas do bico injetor. De um modo geral, a faixa de destilação deve ser tão baixa quanto possível sem que afete de modo adverso o ponto de fulgor, as características de queima, o poder calorífico ou a viscosidade do combustível.

#### 4.2.3 Viscosidade

A viscosidade é a medida da resistência interna ao escoamento de um líquido e constitui uma propriedade importante do combustível, de considerável influência no mecanismo de atomização do jato de combustível, afetando por isso o funcionamento do sistema de injeção e refletindo-se no processo de combustão, de cuja eficiência dependerá a potência máxima desenvolvida (ALMEIDA, 2001).

Uma viscosidade muito baixa pode tornar necessária uma manutenção mais freqüente do sistema de injeção, enquanto uma viscosidade demasiado alta poderá provocar pressões excessivas neste mesmo sistema. Além disso, a viscosidade afeta o grau de atomização e influencia sua forma.

Viscosidade elevada pode causar atomização deficiente, gotículas grandes e alta penetração do jato. A nebulização é prejudicada e o combustível não é adequadamente distribuído e misturado com o ar necessário para a queima. A combustão não é boa,

---

<sup>10</sup> Controlar o pH de uma solução mediante a adição de solução tampão, ou de reagentes que a formem. ?

ocasionando perdas de potência e economia. Além disso, especialmente em motores menores, a grande penetração da corrente de combustível faz com que ele colida com as paredes dos cilindros, lavando a película de óleo lubrificante e provocando a diluição do óleo no cárter. Tais condições levam a um desgaste excessivo.

Viscosidades muito baixas resultam em uma pulverização com pouca penetração, o que prejudica a combustão e diminui a potência do motor e a economia de combustível. A viscosidade baixa também pode acarretar vazamentos no pistão da bomba. O desgaste em certos componentes do sistema de combustível também pode aumentar porque as propriedades lubrificantes do combustível tendem a diminuir com a baixa viscosidade.

#### 4.2.4 Ponto de Fulgor

É a temperatura na qual um líquido, quando aquecido em um aparelho em condições padronizadas, emite vapores suficientes para formar com o ar uma mistura inflamável quando em presença de uma chama. O ponto de fulgor de um combustível indica a temperatura abaixo da qual ele pode ser manuseado sem o risco de fogo. Portanto, este ensaio não dá uma indicação de qualidade, mas sim de riscos envolvidos no manuseio, armazenamento e transporte do combustível, isto é, considera o aspecto de segurança.

Um ponto de fulgor muito baixo indica maiores riscos e as companhias de seguro estabelecem limites mínimos para esta característica. Além disso, se um óleo diesel tem um ponto de fulgor muito baixo, isto pode indicar uma contaminação por produto mais volátil, tal como a gasolina. Apesar de sua importância sob o aspecto de segurança, o ponto de fulgor de um combustível diesel não tem significado maior em relação ao seu desempenho num motor e não influencia, de um modo geral, a temperatura de auto-ignição.

No Brasil não é fixado o ponto de fulgor para óleos diesel de uso terrestre, porém, devido a problemas de tamponamento (*vapor lock*) na Região Nordeste do país, a Petrobrás passou a adotar o limite de 100°C para o ponto inicial de ebulição da destilação, o que indiretamente limita o ponto de fulgor (ALMEIDA, 2001).

#### 4.2.5 Enxofre

Devido à natureza corrosiva de seus produtos de combustão, o enxofre pode provocar nos motores diesel um desgaste pronunciado, bem como aumentar os depósitos na

câmara de combustão e nos pistões, podendo ainda promover a formação de borras no cárter.

Durante a operação intermitente<sup>11</sup> do motor ou quando ele opera a baixas temperaturas, a condensação da umidade é apreciável, e esta umidade em contato com óxidos de enxofre formados na combustão, forma os ácidos sulfúrico e sulfuroso, ambos corrosivos.

O teor de enxofre de um óleo diesel depende da origem do petróleo do qual ele provém e dos processos de refinação utilizados.

#### 4.2.6 Número de Cetano

O número de cetano de um combustível indica a qualidade de ignição deste. O valor dessa propriedade condiciona o desempenho global do motor, influenciando a partida a frio, o nível de ruído e o gradiente de pressão (ALMEIDA, 2001).

Para que o motor diesel opere satisfatoriamente, é necessário que a combustão se processe normalmente, com um curto retardo de ignição, isto é, o tempo decorrido entre a injeção de combustível e sua ignição deve ser o menor possível. O retardo de ignição pode ser reduzido pelo uso de elevadas pressões de injeção e alta turbulência da mistura combustível/ar. Uma atomização perfeita do combustível, com distribuição uniforme também é fundamental. Embora a redução do retardo de ignição por meios mecânicos seja muito importante, a natureza do combustível é o fator principal para reduzir este tempo. Características físicas, tais como a viscosidade, densidade e ponto médio de ebulição têm grande influência. A composição dos hidrocarbonetos do combustível é muito importante porque ela influencia aquelas características citadas. Torna-se fundamental e desejada uma base numérica para avaliar o retardo da ignição do combustível e para medir e predizer esta propriedade.

O processo usado para avaliar as características de ignição de um óleo diesel é bastante parecido com aquele utilizado para medir o índice de octano da gasolina.

O número de cetano de um óleo diesel é definido como “o número inteiro mais próximo do valor determinado por cálculo, da porcentagem em volume de normal cetano (n-Hexadecano, que possui excelentes características de ignição, conseqüentemente um

---

<sup>11</sup> Que se interrompe e prossegue repetidas vezes. Não contínuo.

retardo de ignição muito curto, e que recebeu o valor arbitrário 100), em uma mistura com heptametilnonano (que possui número de cetano igual a 15), que iguala a qualidade de ignição do combustível ensaiado, quando comparado por este método”. Para se obter o número de cetano usa-se a equação:

$$\text{n}^\circ \text{ cetano} = \% \text{ n-cetano} + 0,15 \cdot (\% \text{ heptametilnonano})$$

Quanto menor o retardo de ignição, maior será o número de cetano do combustível e menor será a quantidade de combustível na câmara de combustão quando iniciar a ignição.

O número de cetano pode ser aumentado pelo uso de certos aditivos. Normalmente o número de cetano do diesel do mercado varia de 45 a 55, mas para motores de baixa rotação podem ser usados combustíveis com número de cetano de até 35.

#### 4.2.7 Água e Sedimentos

A presença de água e sedimentos no óleo diesel é indesejável, e geralmente ela é resultado de práticas incorretas de armazenamento e manuseio, desde que o produto deixa a refinaria até chegar ao sistema de injeção do motor.

A contaminação com água pode ocorrer como resultado da “respiração” com absorção de umidade do ar, por efeito da condensação que ocorre quando a temperatura baixa, nas facilidades de armazenamento. Também pode haver contaminação por água da chuva e vazamentos que ocorrem em tubulações, tanques ou durante o transporte. A água pode provocar ferrugem nos motores, irregularidades na queima quando ela vaporiza nas linhas de alimentação do combustível.

Os sedimentos consistem geralmente de material carbonáceo, metais ou outros materiais inorgânicos. A presença de ferrugem proveniente de tanques e linhas, bem como poeiras e areia, são relativamente comuns. A instabilidade de certos combustíveis pode formar sedimentos orgânicos, particularmente durante o armazenamento e manuseio e temperaturas elevadas. Os sedimentos podem ocasionar desgaste e criar depósitos tanto no sistema de injeção como no motor propriamente dito.

#### 4.2.8 Corrosividade

A tendência corrosiva de um combustível, como mostrado anteriormente, depende do teor de enxofre total, mas a forma sob a qual este enxofre está presente é muito importante. O enxofre elementar e alguns de seus compostos são corrosivos para os metais presentes no sistema do motor.

Os óleos combustíveis devem queimar nos vários tipos de queimadores e atomizadores sem problemas. Um bom óleo combustível deverá ser isento de contaminantes ácidos, abrasivos, materiais fibrosos ou outras impurezas que possam obstruir ou danificar os equipamentos.

Pode-se resumir as características e requisitos de desempenho da seguinte maneira:

- Bom poder calorífico, propriedade ligada à densidade e ao teor de carbono, hidrogênio, oxigênio e enxofre do combustível;
- Boa bombeabilidade e escoamento em baixas temperaturas, característica relacionada com os pontos de fluidez e de névoa;
- Não ser corrosivo, o que depende do teor de enxofre e vanádio;
- Ser limpo e isento de matérias estranhas – água, sedimentos, areia, ferrugem, etc;
- Ter volatilidade adequada, o que para os óleos leves implica em uma curva de destilação bem balanceada e, para os óleos pesados, um ponto de fulgor adequado;
- Ter viscosidade correta para uma boa atomização nos injetores;
- Não formar depósitos – tendência avaliada pelo resíduo de carbono;
- Ter boa estabilidade – não formar gomas e sedimentos insolúveis. Nas misturas de tipos diferentes de óleo, a compatibilidade química é muito importante.

### 4.3 Biodiesel

Vistas as características necessárias que deve apresentar um bom combustível para motores de ignição por compressão, agora serão mostradas as propriedades químicas do biodiesel.

A diferença de propriedades entre o diesel e os óleos vegetais é devida principalmente à diversidade molecular entre esses dois grupos de substâncias. O diesel é constituído de hidrocarbonetos com número médio de carbonos em torno de quatorze. Os óleos vegetais são triésteres da glicerina, ou seja, produtos naturais da condensação da glicerina com ácidos graxos, cujas cadeias laterais têm números de carbonos variando entre dez e dezoito, com valor médio de quatorze a dezoito para os tipos de óleos mais abundantes. Além da presença do grupamento funcional do tipo de éster, os óleos vegetais possuem peso molecular cerca de três vezes maior que o diesel. A transesterificação de um óleo com monoálcoois (alcoólise), especificamente metanol ou etanol, promove a quebra da molécula dos triglicédeos, gerando mistura de ésteres metílicos ou etílicos dos ácidos graxos correspondentes, liberando glicerina como subproduto. O peso molecular desses monoésteres é próximo ao do diesel. (ALMEIDA, 2001).

A transesterificação dos óleos vegetais resulta em:

- redução da densidade em relação ao respectivo óleo vegetal;
- redução da viscosidade, enquadrando-se dentro da especificação do óleo diesel;
- diminuição do ponto de fulgor;
- diminuição do ponto de névoa;
- redução do resíduo de carbono, resultando em um valor menor do que o do óleo diesel;
- produtos com menor peso molecular, embora seja mantida a estrutura original dos ácidos graxos;
- aumento do número de cetano, que se torna maior ou igual ao do óleo diesel.

#### 4.3.1 Propriedades químicas do biodiesel

A composição química dos ésteres de óleos vegetais depende do tamanho da cadeia e do grau de insaturação da matéria prima. Uma característica própria do biodiesel em relação ao diesel automotivo é a presença de oxigênio na molécula<sup>12</sup>. Biodiesel contém cerca de 10 a 12% de oxigênio em peso, o que melhora a combustão da mistura

---

<sup>12</sup> A fórmula química típica do diesel é  $C_{13}H_{28}$  e do Biodiesel é  $C_{16}H_{30}O_2$ .

ar/combustível, além de provocar uma diminuição da densidade e uma diminuição da emissão de particulados.

O diesel proveniente de petróleo também contém compostos aromáticos (cerca de 20 a 40% em volume). Estes compostos são responsáveis por um aumento das emissões de particulados e alguns estudos indicam que são carcinogênicos. O biodiesel não contém compostos aromáticos (ALMEIDA, 2001).

O número de cetano do biodiesel depende da matéria prima utilizada na sua produção, mas em geral é mais elevado que o do óleo diesel. Por exemplo, o biodiesel de soja tem número de cetano de 51, o de algodão tem 52 e o de dendê tem 50. O diesel tem um número de cetano de 40. O efeito da mistura do biodiesel em diesel automotivo é de um aumento do número de cetano praticamente linear em função da porcentagem da mistura (ALMEIDA, 2001).

O número de cetano cresce com o aumento do tamanho da cadeia e decresce com o número de duplas ligações. A utilização de álcoois com cadeia longa, como etanol ou butanol, tem um pequeno efeito no aumento do número de cetano. Ensaio de emissões mostraram que quando o número de cetano está na faixa de 55 a 60, o aumento dessa propriedade praticamente não afeta as emissões (HEYWOOD, 1988).

No entanto, o aumento do número de cetano mostrou-se eficaz na redução das emissões dos óxidos de nitrogênio (ULLMAN, 1990).

O ponto de fulgor do biodiesel é, em geral, superior ao do diesel. Os valores dependem de qual oleaginosa é utilizada no processo de obtenção do biodiesel. Por exemplo, o biodiesel de soja tem ponto de fulgor de 131, o de algodão tem 110 e o de dendê tem 174. O diesel tem ponto de fulgor de 100. Estes valores são uma média, uma vez que na literatura especializada é encontrada uma grande variação destes valores. Essa variação pode ser devida aos diferentes métodos de transesterificação<sup>13</sup> (ALMEIDA, 1999).

A densidade do biodiesel é um pouco superior a do óleo diesel convencional, em cerca de 4% na média. Como o sistema de injeção de combustível em motores de ignição por compressão é volumétrico, a massa de combustível injetada no motor quando se utiliza

---

<sup>13</sup> Se o processo de transesterificação não for de boa qualidade, o resultado será um produto inadequado ao uso.

biodiesel é ligeiramente superior, o que contribui para compensar a diminuição da potência do motor devido ao menor poder calorífico deste combustível (ALMEIDA, 1999).

O poder calorífico do biodiesel utilizado neste trabalho é aproximadamente 12% inferior ao do diesel. Este valor está de acordo com os dados encontrados na literatura.

Quanto à viscosidade, embora os ésteres de óleos vegetais apresentem valores médios ligeiramente mais elevados em relação ao diesel, eles estão dentro da faixa especificada. Para o diesel a viscosidade fica entre 2 e 6 mm<sup>2</sup>/s, já para o biodiesel ela também depende da oleaginosa utilizada no processo de transesterificação. O biodiesel de soja tem uma viscosidade de 4,1 mm<sup>2</sup>/s, o de algodão tem 4,8 mm<sup>2</sup>/s e o de dendê tem 4,6 mm<sup>2</sup>/s<sup>14</sup>.

A presença de enxofre não é verificada no biodiesel. Conforme já era esperado, ao se estudar a literatura técnica especializada disponível, o teor de enxofre presente no biodiesel foi extremamente baixo, o que representa uma grande vantagem em relação ao diesel automotivo.

#### 4.3.2 Viabilidade técnica

Pelas semelhanças de propriedades fluidodinâmicas e termodinâmicas, o biodiesel e o diesel do petróleo possuem características de completa equivalência, especialmente vistas sob os aspectos de combustibilidade em motores do ciclo diesel.

Portanto, os desempenhos e os consumos são praticamente equivalentes, e não há necessidade de qualquer modificação ou adaptação dos motores para funcionar regularmente com um ou com o outro combustível.

Pela equivalência de suas propriedades físico-químicas e como o biodiesel e o diesel mineral são completamente miscíveis entre si, as misturas de biodiesel com o diesel mineral podem ser empregadas em qualquer proporção. Esta condição é por demais vantajosa, uma vez que não são requeridas bombas específicas para os abastecimentos de biodiesel, nem tampouco motores diferenciados e dedicados para o uso de um ou do outro combustível.

---

<sup>14</sup> Estes valores são uma média dos obtidos na literatura.

Com estas informações e sendo o biodiesel um combustível que não contribui para o aumento do efeito estufa, biodegradável e renovável, pode-se concluir que é viável sim a utilização deste combustível em motores de combustão interna.

A Resolução nº 42, da Agência Nacional do Petróleo (ANP), que estabelece a especificação para a comercialização de biodiesel a ser adicionado ao óleo diesel na proporção de 2% em volume, publicada no Diário Oficial de 9 de dezembro de 2004, é apresentada no “Anexo 2”. O “Anexo 3” mostra uma diretiva do Parlamento Europeu, de maio de 2003, relativa à promoção da utilização de biocombustíveis ou de outros combustíveis renováveis nos transportes daquele continente.

## **5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **5.1 Modelagem do Processo de Combustão e Liberação de Calor**

A análise dos processos realizados nos motores de combustão interna e seu uso para direcionar o desenvolvimento dos motores vêm de longa data. Enquanto os problemas com as emissões vieram à tona mais recentemente, o uso de simulações dos fenômenos realizados nos motores para estimar seu desempenho e sua eficiência vem desde o início do desenvolvimento dos MCI no final do século XIX. Pode-se ver esta história como uma série de atividades direcionadas ao desenvolvimento tanto de métodos para estudar os processos básicos dos motores, como os tempos de admissão, compressão ou expansão, quanto de métodos mais precisos para cálculo de propriedades termodinâmicas dos fluidos operantes usados no motor, como, por exemplo, as misturas queimadas e não-queimadas (HEYWOOD, 1980).

O inglês Dugald Clerk (1854-1932) foi o primeiro a usar modelos simuladores para MCI. Ele utilizou uma técnica de análise de um ciclo padrão de ar para comparar eficiências térmicas de motores. Rudolph Diesel propôs um número de modelos de ciclos motores alternativos com diferentes modos de combustão. Nos próximos 80 anos, os desenvolvimentos concentraram-se na melhoria da precisão da análise das propriedades termodinâmicas dos gases queimados e não queimados. O principal avanço veio de Hottel et. al. que desenvolveu gráficos para as propriedades termodinâmicas de misturas de gases queimados, assumindo os produtos da combustão estarem em equilíbrio termodinâmico –

uma boa aproximação para cálculos de desempenho que precisavam somente ser melhorados se as emissões do motor necessitassem ser estudadas também. Somente com o advento dos computadores mais rápidos foi possível obter-se um avanço na modelagem dos ciclos de operação dos motores. (HEYWOOD, 1980).

Desde que foi possível medir-se a pressão no interior dos cilindros dos MCI, e se levantar a curva de pressão em função do tempo ou posição angular do virabrequim, tal curva passou a ser o principal diagnóstico do processo de combustão dentro dos motores. Uma das primeiras tentativas de se obter mais informações a partir da curva de pressão, além da máxima pressão do ciclo ou da taxa de crescimento da pressão, foi realizada por RASSWEILER e WITHROW, em 1938, que em seu trabalho relataram uma forma de obter a taxa de massa queimada a partir da curva de pressão e assim estabelecer uma indicação sobre a evolução da combustão. Esse trabalho foi posteriormente revisado por SHAYLER, WISEMAN e MA, em 1990. A idéia básica do trabalho de RASSWEILER e WITHROW era separar a variação de pressão devida à variação de volume daquela devida à combustão (ZABEU, 1999).

O modelo de RASSWEILER e WITHROW é bastante simples e duas dentre suas principais vantagens estão a fácil implementação e a curva de pressão como único dado de entrada. Embora não considere formalmente a troca de calor com as paredes e a fuga de massa, esses efeitos estão de certa forma embutidos na utilização de um coeficiente politrópico aparentemente adequado, o que traz de certo modo alguns resultados com relativa imprecisão. Mas, adotado como aproximação inicial, esse método se mostra como uma boa maneira de se estimar a fração de massa queimada (ZABEU, 1999).

Na intenção de melhorar a representação do processo de combustão, surgiram trabalhos mais sofisticados e que não mais se baseavam só na variação de volume e na combustão como causadores da variação de pressão no cilindro. Começaram a surgir modelos fenomenológicos baseados na Primeira Lei de Termodinâmica. Porém para se poder aplicar a Primeira Lei de Termodinâmica é necessária a medição das diversas variáveis que integram o sistema. Uma destas que tem interessado de maneira particular a diversos pesquisadores é a taxa de transferência de calor pelas paredes do cilindro, e para a determinação desta taxa se torna necessário o conhecimento do coeficiente instantâneo de

transferência de calor entre os gases contidos no cilindro e as paredes deste. Contudo verificou-se uma grande dificuldade na obtenção deste coeficiente, esta dificuldade é devido à característica deste coeficiente de apresentar diferentes valores comparando o obtido em um ponto do cilindro com o obtido em um outro ponto qualquer do cilindro sendo ambos medidos no mesmo instante de tempo, e também os coeficientes medidos num mesmo ponto, entretanto em instantes diferentes, provavelmente diferirão entre si. Portanto o que se fazia na prática era determinar um valor médio para toda a superfície do cilindro para cada instante, considerado na simulação. Porém, a determinação deste valor médio ainda não era adequadamente estabelecida pelos pesquisadores, pois existiam diversas fórmulas para a obtenção deste valor encontradas na literatura e aplicando estas diferentes fórmulas para um mesmo sistema encontramos uma considerável divergência de valores, e por isso podemos observar que cada formula obtém dados precisos e confiáveis apenas para o sistema específico no qual o seu autor desenvolveu os seus trabalhos. Devido ao fato destas formulas serem de uso específico, alguns pesquisadores publicaram trabalhos a respeito de formulas de uso universal (WOSCHNI, 1967).

Dentre as várias classificações de modelos de combustão citados na literatura, aquela que tem maior aceitação, sendo utilizada por muitos autores, é a classificação proposta por BRACCO (1974), que divide os modelos de combustão em três categorias: modelos zero-dimensionais, quase-dimensionais e multidimensionais.

Os modelos zero-dimensionais e quase-dimensionais, também chamados fenomenológicos, são construídos admitindo-se que processos independentes ocorrem durante um ciclo de trabalho do motor, como, por exemplo, injeção de combustível, mistura ar-combustível, combustão, transferência de calor, escoamento de gases. Ou seja, estes modelos são agregados de sub-modelos, nos quais são empregadas equações simplificadas ou relações empíricas. A Figura 5 ilustra um exemplo desta categoria de modelos.

A modelagem zero-dimensional, tendo o tempo (ou o ângulo de virabrequim -  $\theta$ ) como única variável independente, usualmente se refere a uma análise termodinâmica do ciclo de trabalho do motor, na qual a evolução do processo de combustão é especificada como um dado de entrada ou uma simples correlação empírica. Várias referências, dentre

elas ALKIDAS (1986), CHEUNG e HEYWOOD (1993), fornecem alguns exemplos de modelagem zero-dimensional.

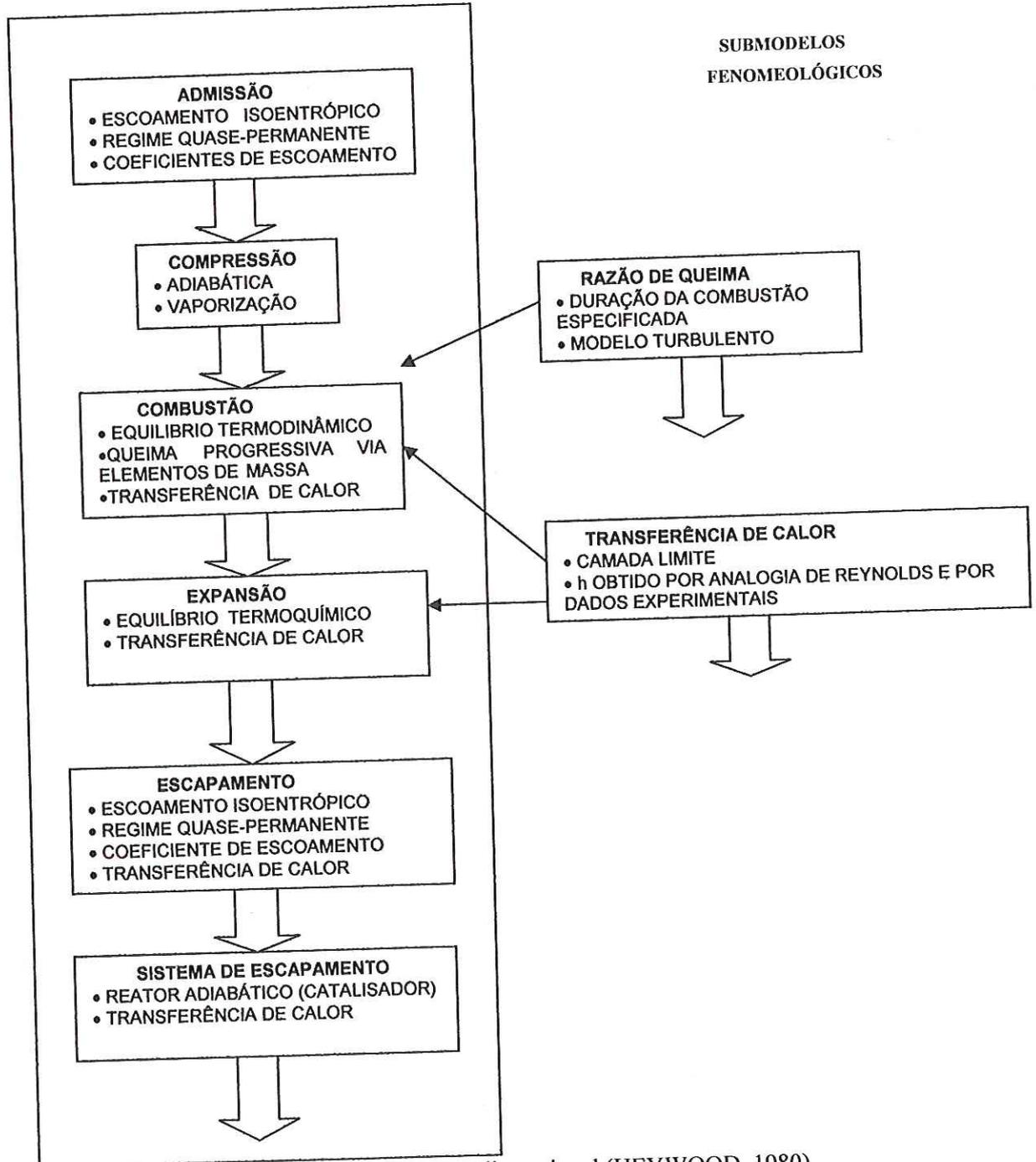


Figura 5: Esquema de uma modelagem zero-dimensional (HEYWOOD, 1980)

Nos modelos quase-dimensionais utiliza-se adicionalmente um submodelo de combustão turbulenta, com o objetivo de se prever o atraso de inflamação e a evolução da combustão, representados em função dos parâmetros de operação e de projeto do motor. Neste tipo de modelo, os gases no interior do cilindro são subdivididos em duas zonas: dos gases queimados (produtos da combustão) e dos gases ainda não queimados, além de ser considerada a velocidade de propagação da frente de chama no interior da câmara de combustão. Devido a estas características, os modelos quase-dimensionais são muito empregados no estudo das emissões, por exemplo: formação de  $\text{NO}_x$ , HC não queimados e particulados (SILVA, 1992).

Os modelos multidimensionais são baseados na solução numérica de sistemas de equações diferenciais parciais, que representam o balanço mássico, energético (energia térmica e de turbulência) e de quantidade de movimento para a mistura ar-combustível no cilindro do motor, além da conservação das espécies químicas envolvidas. Com a escolha adequada das condições de contorno, estes modelos fornecem ambas soluções (espacial e temporal) das variáveis de interesse (SILVA, 1992).

Em princípio, os modelos multidimensionais têm a capacidade de prever em detalhes o escoamento do fluido dentro do cilindro e a razão da propagação e forma geométrica da frente de chama. Tais modelos, entretanto, requerem um grande tempo computacional para a simulação de todo o ciclo de trabalho, resultante da complexidade de sua formulação, além de apresentarem a necessidade de um grande número de dados confiáveis, assim como de sofisticados ensaios experimentais para a validação do modelo. Segundo TINAUT et. al. (1999), os programas computacionais multidimensionais disponíveis no mercado, como KIVA e FIRE, entre outros, apresentam o inconveniente de necessitarem um longo período de ajuste do código computacional ao problema específico a ser resolvido. E também são limitados no tocante a seus submodelos de química da combustão e turbulência (SOTO PAU, 2003).

Como o objetivo do programa simulador apresentado neste trabalho é o de analisar o processo de combustão de um motor de ignição por compressão, alimentado por um sistema ternário de combustíveis (diesel, biodiesel e etanol), comparando as curvas dos processos que mostram o comportamento da combustão, optou-se pela modelagem zero-

dimensional, que fornece as informações necessárias no escopo do trabalho, com esforço computacional bem menor do que o requerido pelos modelos multidimensionais.

LYN (1966), com o advento do cálculo computacional, deu os primeiros passos na área da modelagem da razão de liberação de calor, pesquisando motores diesel com injeção direta. Ele determinou, a partir da curva de injeção do combustível, a razão de liberação de calor, modelando-a numa forma triangular. ZINNER (1970), estudou a influência da evolução da combustão no rendimento de motores diesel empregando o modelo da razão de liberação de calor na forma triangular simples e na forma de dois triângulos compostos (SILVA, 1992).

KRIEGER e BORMAN (1966) modelaram a liberação de calor, utilizando a curva de pressão em função do volume medido em várias condições de operação, para motores do ciclo Otto (modelagem da combustão em duas zonas: de gases queimados e não-queimados) e para motores do ciclo diesel (distribuição uniforme de gases no cilindro). Nestes modelos foram feitos equacionamentos semi-empíricos, envolvendo a análise termodinâmica do sistema, os fenômenos de transferência de calor convectiva, as perdas de gases por vazamento durante o tempo de compressão e a dissociação dos gases queimados, além da consideração de alguns parâmetros que devem ser estimados.

Em 1986, MATHUR et al. estudaram o princípio de estimativa de razão de liberação de calor a partir da curva de injeção de combustível (SILVA, 1992).

Um outro trabalho sobre combustão, na área de análise de liberação de calor, foi o publicado por GATOWSKI et al. (1984), que tratava a câmara de combustão como um só volume, admitido homogêneo, com propriedades termodinâmicas representadas por uma aproximação linear da razão entre os calores específicos. Embora seja um modelo de uma só zona, efeitos de troca de calor, injeção de combustível e resfriamento da mistura em frestas das câmaras são considerados, o que acarreta uma melhoria significativa dos métodos de análise de uma só zona (ZABEU, 1999).

Aplicando-se a equação da conservação de energia (1ª lei) para um sistema aberto (ou volume de controle), vem:

$$dU = \delta Q - \delta W - \sum dm_i h_i \quad (1)$$

onde  $dU$  representa a variação de energia interna da massa contida no volume de controle,  $\delta Q$  representa a transferência de calor para o volume de controle,  $\delta W$  é o trabalho realizado pelo volume de controle sobre o meio e a somatória significa o fluxo de entalpia através da fronteira do volume de controle. A Figura 6 mostra esquematicamente o volume de controle adotado por GATOWSKI em seu trabalho.

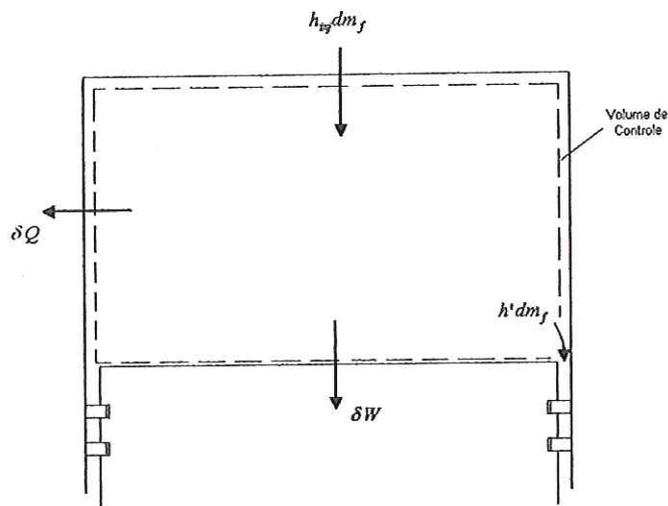


Figura 6: Esquema do volume de controle adotado por GATOWSKI et al. (1984).

Os possíveis fluxos de massa que atravessam a superfície do volume de controle após o fechamento das válvulas são basicamente restritos a três tipos: fuga de massa pelas válvulas de admissão e escape; escoamento de gases para frestas entre o pistão, cilindro e anéis (*crevices*) e daí, uma fração desses gases para o cárter (*blow-by*) e; injeção de combustível diretamente na câmara. O modelo de GATOWSKI despreza o primeiro tipo de fuga, levando em consideração só efeitos de injeção de combustível, efeitos de frestas e *blow-by*.

O modelo de uma zona, definindo o estado do conteúdo do cilindro em termos de propriedades médias e não distinguindo gases queimados de não queimados, oferece maior simplicidade de tratamento dos fenômenos de troca de calor e efeitos de resfriamentos em frestas em relação aos modelos multizonas. A combustão é então encarada como uma “adição separada de calor”. Partindo dessas simplificações, reescreve-se a Primeira Lei:

$$\delta Q_{ch} = dU_s + \delta W + \sum h_i dm_i + \delta Q_{ht} \quad (2)$$

As mudanças de energia interna sensível do sistema são separadas das mudanças devido à variação de composição. O termo  $\delta Q_{ch}$  representa a “adição de energia química” devida à combustão. O trabalho  $\delta W$  é representado por  $p dV$  e o termo  $\delta Q_{ht}$  representa a troca de calor com as paredes. A mudança na energia interna sensível é calculada admitindo-se como sendo devida exclusivamente à temperatura média:

$$U_s = m_c \cdot u(T) \quad (3)$$

que derivada fornece:

$$dU_s = m_c \cdot du(T) + dm_c \cdot u(T) = m_c \cdot c_v(T) \cdot dT + dm_c \cdot u(T) \quad (4)$$

onde  $m_c$  é a massa contida no interior do volume de controle, e  $c_v$  é o calor específico a volume constante. A temperatura média é determinada admitindo-se comportamento de gás perfeito para os gases contidos no interior do volume de controle, resultando em:

$$T = \frac{pV}{m_c R} \quad (5)$$

O autor comenta que, embora a forma de cálculo de  $dU$  não seja exata, a temperatura média calculada pela equação de gás perfeito é próxima da média das temperaturas ponderadas pelas massas dos reagentes e produtos da combustão. Essa proximidade entre os valores das temperaturas se explica pela semelhança dos pesos moleculares dos reagentes e produtos.

O modelo de transferência de calor utilizado por GATOWSKI é o desenvolvido por WOSCHINI (desenvolvido para motores de ignição por compressão). Este trabalho, que se tornou uma importante ferramenta na análise da transferência de calor em motores, propõe uma correlação do tipo  $Nu = C.Re^m$ , admitindo que a troca de calor entre os gases e as superfícies do cilindro a que estão expostos é essencialmente uma convecção turbulenta forçada. A densidade, viscosidade e condutibilidade térmica são expressas em função da temperatura e pressão; o comprimento característico no número de Reynolds adotado por WOSCHINI é o diâmetro do cilindro; e a velocidade característica adotada varia de acordo com a fase em que se encontra o ciclo – explica-se: WOSCHINI efetuou experimentos primeiramente com o motor arrastado, isto é, sem combustão, e derivou expressões do coeficiente de película para o período de troca de gases; posteriormente, realizou testes com o motor queimando combustível e avaliou o incremento da troca de calor devido à combustão.

Esse acréscimo na troca de calor durante a combustão se deve, entre outros fatores como o aumento da temperatura de gases, a um aumento na velocidade dos gases no interior do cilindro. Em contrapartida, na fase de expansão há uma diminuição da velocidade dos gases em virtude de atritos e conservação do momento angular para motores com algum nível de *swirl* e, portanto, há um decréscimo na troca de calor.

Como resultado de seu trabalho, GATOWSKI discute a influência de vários parâmetros na curva de liberação de calor. Uma de suas conclusões diz respeito à determinação da massa no interior do cilindro no final do processo de admissão. Transdutores piezelétricos não apresentam precisão suficiente para determinar a pressão no início de ciclo de compressão. Variações da ordem de  $\pm 0,05$  atm em torno da pressão estimada de início de ciclo acarretaram apenas pequenas alterações na curva de calor

liberado. O autor sugere, a partir dessa constatação, que a determinação da pressão de início de ciclo deve ser estimada dentro de uma faixa de  $\pm 5\%$ .

Um trabalho de comparação entre os modelos de KRIEGER e BORMAN e o de GATOWSKI et al. foi elaborado por CHUN e HEYWOOD (1987). Neste trabalho, os autores comentam que a fração de energia química liberada e a fração de massa queimada durante a combustão podem ser estimadas com exatidão por modelos de uma zona desde que a razão média de calores específicos para o conteúdo do cilindro seja adequadamente utilizada.

Ainda trabalhando em modelos de uma só zona, CHEUNG e HEYWOOD (1993) efetuaram aprofundamentos em testes utilizando o modelo proposto por GATOWSKI e observaram que a análise por meio desse modelo é mais sensível a erros em dados experimentais de entrada (massa inicial e pressão no início do ciclo, por exemplo) do que a alterações em parâmetros dos submodelos como coeficientes de troca de calor e expoente do número de Reynolds, admissão de temperaturas de parede, estimativas de *swirl ratio*, aproximações do coeficiente politrópico, entre outros.

NIGRO e TRIELLI (1983) também realizaram experimentos com a predição da curva de liberação de calor para motores de ignição por compressão (diesel) trabalhando com combustíveis alternativos como ésteres de óleos vegetais. Para tanto, adotaram um modelo de uma zona, com seu conteúdo composto por gás ideal com calor específico constante, percorrendo um ciclo reversível. Para corrigir a curva de pressão medida, levaram em consideração efeitos de perda térmica e vazamento para o cárter: a correção da pressão devida às perdas térmicas emprega uma equação semelhante à de WOSCHINI, modificada, entretanto, para levar em consideração os maiores efeitos de turbulência presentes em motores de ignição por compressão. Já a modelagem de vazamento emprega a hipótese de escoamento laminar de gases distribuídos ao longo de uma fração do perímetro dos anéis. Como se tratava de um estudo comparativo de combustíveis, essas simplificações no modelo foram suficientes para gerar resultados aproveitáveis na análise comparativa.

Em 1984, numa pesquisa realizada no IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas), em São Paulo, foram obtidas curvas de evolução da combustão e de razão de liberação de calor em função do ângulo do girabrequim, para diversas condições de operação, com a

finalidade de se estudar o efeito da adição de promovedores de ignição na combustão do metanol em motores Diesel de injeção direta (SILVA, 1992).

CARTELLIERI e HERZOG (1988) estudaram a influência da geometria e turbulência na câmara de combustão no desempenho e emissões de poluentes de motores diesel baseados na análise da razão de liberação de calor (SILVA, 1992).

ALI et al. (1995) estudaram as emissões e as curvas características de motores diesel (um Detroit 6V-92 TA o outro Cummins NTA-855-C) usando misturas de diesel e biodiesel metílico de soja. Os gases de exaustão, exceto o  $\text{NO}_x$ , foram reduzidos para ambos os motores conforme a concentração de biodiesel aumentava na mistura. Os resultados indicaram, ainda, que houve um aumento da potência para as misturas com 10 e 20% de biodiesel (aumento de 4% na potência); daí para frente a potência cai, chegando a ficar 30% menor que a do diesel.

Em 1996, ALI et al. analisaram o efeito de misturas de diesel com biodiesel e com etanol, na liberação de calor em um motor diesel Cummins N14-410. Foi observado que a taxa de liberação de calor diminuiu com o aumento da rotação. Os picos das taxas de liberação de calor de todas as misturas foram menores que os do diesel puro.

ZABEU (1999) estudou a combustão em motores de combustão interna utilizando a concepção básica do modelo de KRIEGER e BORMAN, ou seja, a determinação da evolução da combustão a partir da curva de pressão é baseada na Primeira Lei da Termodinâmica, aliada à formulação de WOSCHINI para quantificação de troca de calor. São empregados ainda submodelos fenomenológicos para consideração de efeitos de frestas e dissociação dos produtos da combustão, bem como a evolução da frente de chama e vazamento de gases para o cárter (*blow-by*).

A hipótese fundamental do trabalho de ZABEU é que, a qualquer instante entre o fechamento da válvula de admissão e a abertura da válvula de escape, pode-se tratar a câmara de combustão como sendo dividida principalmente em um volume de controle com gases não queimados, compostos por mistura ar-combustível não queimada e gases residuais, e um outro volume de controle com gases queimados. A fronteira comum desses dois volumes de controle é a frente de chama, considerada adiabática e esférica, centrada na vela de ignição. As demais fronteiras são as paredes do cilindro, cabeçote e pistão. Além

desses volumes de controle principais, considera-se também o volume de controle correspondente às frestas, que é admitido constante, e a partir do qual podem ocorrer vazamentos para o cárter. ZABEU admite também não haver gradientes de pressão no interior de toda a câmara, e supõe regime de uniformidade de temperatura e composição em cada um dos volumes de controle.

PIANOVSKI JR. e VELÁSQUEZ (2002) estudaram as características de liberação de calor durante a combustão de diversas misturas de biodiesel e óleo diesel. Para este estudo foi admitido que o fluido de trabalho do motor consiste de uma mistura homogênea de gases de combustão (considerados gases ideais) em equilíbrio químico, térmico e mecânico. Além disso, considerou-se que o combustível injetado vaporiza e queima instantaneamente de acordo com o modelo de uma zona de combustão. Para avaliar a taxa de liberação de calor durante a combustão determinou-se experimentalmente a curva de evolução da pressão no cilindro de um motor turboalimentado. Como resultado, foi observado que devido ao maior número de cetano do biodiesel<sup>14</sup>, as misturas de óleo diesel e biodiesel apresentaram uma redução da fração de combustível que queima na fase pré-misturada da combustão. Além disso, as curvas de liberação de calor calculadas para o caso da mistura B20 mostraram a ocorrência de injeções secundárias e gotejamentos no bico injetor.

## 5.2 Quantificação da Detonação

Detonação é o nome dado ao fenômeno da auto-ignição da mistura não queimada, isto é, antes da passagem da frente de chama. Quando isto ocorre, há uma liberação extremamente rápida de grande parte da energia química contida na mistura não queimada, causando pressões locais muito altas e a propagação de ondas de pressão de amplitude substancial através da câmara de combustão (HEYWOOD, 1988).

---

<sup>14</sup> O efeito da mistura do biodiesel em diesel automotivo é de um aumento do número de cetano praticamente linear em função da porcentagem da mistura (ALMEIDA, 2001).

Segundo FERGUSON (1986), esta propagação da chama muito mais rápida que a normal ocorre principalmente devido ao fato de vários focos de auto-ignição aparecerem quase simultaneamente (o que concorda com as medições de SPICHER et al., 1992) e, além disso, porque o gás não queimado está a uma temperatura elevada, e portanto a velocidade da frente de chama laminar é substancialmente aumentada.

A intensidade da detonação depende da massa de gás não queimado no momento da auto-ignição e da taxa de liberação de energia durante o fenômeno. SUN et al. (1996) mostram que a intensidade da detonação aumenta quando seu ângulo de início se aproxima progressivamente do ponto morto superior e a massa dos gases não queimados aumenta.

Durante a ocorrência da detonação, surgem oscilações de pressão cuja frequência está normalmente entre 5kHz e 10kHz segundo HEYWOOD (1988). Esta frequência cai rapidamente devido à diminuição da temperatura dos gases e à variação da forma da câmara de combustão pela movimentação do pistão, o que constitui uma característica marcante do fenômeno (TAYLOR, 1968).

A intensidade da detonação tem sido caracterizada quantitativamente de diferentes formas. Tradicionalmente, esta medida é obtida a partir do sinal de pressão na câmara de combustão, identificando-se componentes frequenciais típicos do fenômeno. Estes estão relacionados com a frequência ressonante da câmara, devido à propagação e reflexão das ondas de pressão, característica do fenômeno (SUN et al., 1996).

A análise numérica do sinal de pressão tem sido a forma mais utilizada e provavelmente a mais eficiente de se diagnosticar a detonação. Para detectar sua ocorrência, diferentes metodologias de análise do traço de pressão têm sido utilizadas.

A Transformada de Fourier (TF) é um método largamente utilizado para análise de sinais, tendo aplicações em várias áreas. Dentre elas, pode-se citar comunicações, radar, sonar, engenharia biomédica, processamento de imagem, espectroscopia, análise metalúrgica, mecânica, geofísica, de sistemas não-lineares, simulação, síntese de músicas e análise de dados do mercado de ações (BRIGHAM, 1988).

A TF é a representação de uma função no domínio da frequência. Ela contém exatamente a mesma informação da função original, podendo, portanto, ser interpretada como a mesma informação (sinal) sob outra representação.

O tratamento numérico dado aos sinais de pressão adquiridos foi feito de maneira a contemplar as condições da aplicação do teorema da amostragem e minimizar os efeitos *aliasing*.

Um sinal periódico  $x(t)$ , de período  $T_0$ , pode ser representado por uma combinação linear de exponenciais complexas harmonicamente relacionadas, chamada de Série de Fourier de  $x(t)$ :

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} a_k e^{jk\omega_0 t} \quad (6)$$

onde,

$$a_k = \frac{1}{T_0} \int_{T_0} x(t) e^{-jk\omega_0 t} dt \quad (7)$$

e,

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0} \quad (8)$$

Na definição de  $a_k$ , é representada a integral sobre qualquer intervalo de comprimento  $T_0$ . Os termos  $a_k$  são chamados de coeficientes de Fourier ou coeficientes espectrais de  $x(t)$ . Estes coeficientes complexos medem a “porção” do sinal  $x(t)$  que está em cada harmônica<sup>15</sup> da componente fundamental.

---

<sup>15</sup> Associado a um sinal  $x(t) = e^{j\omega_0 t}$ , o conjunto de exponenciais complexas harmonicamente relacionadas é definido como  $\phi_k(t) = e^{jk\omega_0 t}$ ,  $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ . Assim, as harmônicas de uma componente fundamental são oscilações cujas frequências são múltiplas da fundamental.

## **6. ESTUDO FÍSICO MATEMÁTICO**

Para a obtenção da equação numérica a ser simulada partiu-se da modelagem zero-dimensional. Optou-se por esta modelagem devido ao fato de que ela proporciona resultados adequados para o objetivo do trabalho, sem, contudo, requerer um grande esforço computacional, que é o caso de quando se utiliza o modelo multidimensional.

### **6.1 Combustão no motor Diesel**

Os dados de pressão no interior do cilindro versus o ângulo do eixo de manivelas durante os períodos de compressão e expansão do motor podem ser utilizados para obtenção de informações quantitativas do progresso da combustão através da análise da taxa de liberação energética de queima do combustível (HEYWOOD, 1988).

Para um motor de injeção direta, partindo da 1ª Lei da Termodinâmica para um sistema aberto e quase estático, os únicos fluxos de massa através das fronteiras do sistema (enquanto as válvulas de admissão e de exaustão estão fechadas) são do combustível que entra e dos gases comprimidos que saem através dos anéis do pistão (blow-by). Porém, desprezando-se o último efeito para facilidade de cálculos:

$$\frac{dQ}{dt} - p \frac{dV}{dt} + \sum_i \dot{m}_i h_i = \frac{dU}{dt} \quad (9)$$

Onde  $dQ/dt$  é a taxa de transferência de calor através das fronteiras do sistema,  $p \cdot dV/dt$  é a taxa de trabalho realizado durante o deslocamento das fronteiras do sistema,  $\dot{m}_i$  é o fluxo mássico de combustível para o interior do sistema,  $h_i$  é a entalpia do fluxo  $\dot{m}_i$  entrando no sistema e  $U$  é a energia das substâncias contidas no interior das fronteiras.

Considerando que somente combustível atravessa a fronteira, a eq. (9) torna-se:

$$\frac{dQ}{dt} - p \frac{dV}{dt} + \dot{m}_f h_f = \frac{dU}{dt} \quad (10)$$

Dois métodos são usados para obter informações do processo de combustão a partir dos dados de pressão. Em ambos assume-se que a temperatura dentro do cilindro é uniforme em cada instante de tempo durante a combustão. Um método dá a taxa de liberação de calor; o outro dá a taxa de massa de combustível queimada.

### 6.1.1 Liberação de calor

A partir da Eq. (9), considerando-se  $U$  como a energia interna sensível do conteúdo no interior do cilindro e  $h_f$  como a entalpia sensível do combustível injetado, então  $dQ/dt$  será a diferença entre a liberação de calor pela combustão do combustível (uma quantidade positiva) e o calor transferido para fora do sistema (quantidade negativa). Considerando-se desprezível a entalpia sensível do combustível:

$$\frac{dQ_n}{dt} = \frac{dQ_{ch}}{dt} - \frac{dQ_{ht}}{dt} = p \frac{dV}{dt} + \frac{dU_s}{dt} \quad (11)$$

$\frac{dQ_n}{dt}$  é a taxa de liberação de calor líquida;

$\frac{dQ_{ch}}{dt}$  é a taxa de liberação de calor bruta;

$\frac{dQ_{ht}}{dt}$  é a transferência de calor para as paredes;

$p \frac{dV}{dt}$  é a taxa no qual trabalho é feito pelo pistão;

$\frac{dU_s}{dt}$  é a taxa de variação da energia interna sensível dos produtos no interior do cilindro.

Assumindo que o gás no interior do cilindro é ideal, a eq. (11) torna-se:

$$\frac{dQ_n}{dt} = p \frac{dV}{dt} + mc_v \frac{dT}{dt} \quad (12)$$

$pV = mRT$ , então:

$$\frac{dp}{p} + \frac{dV}{V} = \frac{dT}{T} \quad (13)$$

Substituindo a eq. (13) na (12):

$$\frac{dQ_n}{dt} = p \frac{dV}{dt} + mc_v T \left( \frac{dp}{p} + \frac{dV}{V} \right) \frac{1}{dt} = p \frac{dV}{dt} + mc_v \frac{T}{p} \frac{dp}{dt} + mc_v \frac{T}{V} \frac{dV}{dt}$$

$$\frac{dQ_n}{dt} = p \left( 1 + \frac{c_v}{R} \right) \frac{dV}{dt} + c_v \frac{V}{R} \frac{dp}{dt}$$

$$\boxed{\frac{dQ_n}{dt} = \frac{\gamma}{\gamma-1} p \frac{dV}{dt} + \frac{1}{\gamma-1} V \frac{dp}{dt}} \quad (14)$$

Onde:

$$\gamma = c_p / c_v$$

Para motores do ciclo Diesel, o valor de  $\gamma$  está entre 1,3 a 1,35, porém, segundo HEYWOOD (1988), é mais adequado a utilização do valor 1,35 referente ao ar no final do estágio de compressão. No caso dos gases queimados,  $\gamma$  varia desde 1,26 a 1,3 porém, tal como verificado por LYN (1962) e CHENG & GENTRY (1986), durante a combustão, por ser um processo bastante rápido onde a composição e temperatura dos gases variam abruptamente, os valores de  $\gamma$  não são bem conhecidos.

Como o objetivo do programa simulador apresentado neste trabalho é o de analisar o processo de combustão de um motor alimentado por um mistura de combustíveis, comparando as curvas dos processos que mostram o comportamento da combustão, faz-se necessário uma adaptação da equação (14) para que esta seja capaz de mostrar a taxa de liberação de calor para a mistura combustível. Assim, transformando a equação (14) para um sistema alimentado por diesel e etanol, por exemplo, o resultado seria:

$$\frac{dQ_{nB}}{dt} = \left[ \left( \frac{\gamma_d}{\gamma_d - 1} r_d \right) + \left( \frac{\gamma_e}{\gamma_e - 1} r_e \right) \right] p \frac{dV}{dt} + \left[ \left( \frac{1}{\gamma_d - 1} r_d \right) + \left( \frac{1}{\gamma_e - 1} r_e \right) \right] V \frac{dp}{dt} \quad (15)$$

Onde:

$\frac{dQ_{nB}}{dt}$  é a taxa de liberação de calor líquida de um sistema bi-combustível;

$\gamma_d$  é a relação entre os calores específicos do diesel (ou biodiesel);

$\gamma_e$  é a relação entre os calores específicos do etanol;

$r_d$  é a proporção de diesel injetado e;

$r_e$  é a quantidade de etanol injetado necessária para gerar a mesma quantidade de calor, em kJ, que a quantidade de diesel que foi diminuída da injeção, considerando combustão completa. Com os valores dos poderes caloríficos do diesel e do etanol, adota-se a seguinte

$$\text{relação}^{16}: r_e = (1 - m_d) P_{ce} / P_{cd} .$$
$$r_d = 1 - r_e$$

A equação (14) foi simulada no programa Matlab, onde foram criados dois vetores de tamanhos idênticos: o vetor pressão, que representa os vários valores de pressão da câmara de combustão e o vetor taxa de transferência de calor. O primeiro deve ser obtido por meio de ensaios experimentais e depois serem fornecidos ao programa, enquanto o segundo é fornecido pelo programa. O programa fornece os resultados na forma de um gráfico da taxa de transferência de calor versus ângulo de virabrequim. O vetor do ângulo de virabrequim é relacionado com o de pressão, pelo fato de que os valores de pressão foram adquiridos em função do ângulo do virabrequim, e portanto o vetor do ângulo é obtido na parte experimental.

## 6.2 Código do programa

Como foi dito anteriormente, o programa de simulação foi produzido no ambiente de programação do programa Matlab .

Logo abaixo segue o código do programa, que está em linguagem característica do Matlab. O programa está no modo para se produzirem comparações gráficas da taxa de liberação de calor entre várias diferentes misturas. No caso do programa abaixo se utilizam duas comparações, isto devido ao fato de não ser necessário neste momento a comparação de mais amostras, mas a configuração do programa foi mantida para a análise de várias amostras devido ao fato de ser extremamente simples e rápido alterar-se de duas para três, quatro ou mesmo cinco as comparações a serem feitas, isto caso surja a necessidade de

---

<sup>16</sup> Considerando o poder calorífico do diesel 45337 kJ/kg, e o poder calorífico do etanol 29680 kJ/kg, e que tenha sido injetado, por exemplo, 50% de etanol, então:  $r_d = 0,655$  e  $r_e = 0,345$ .

serem realizadas tais comparações. Cabe ressaltar que pode-se alterar o programa sem grandes problemas caso seja necessário realizar comparações com mais amostras.

Os dados de pressão oriundos dos ensaios estão armazenados em arquivos no formato matlab, arquivos estes que são rotineiramente chamados pelo programa. O programa possui uma função, que faz o cálculo da derivada da pressão, utilizando um método dos mínimos quadrados, para cada ângulo de virabrequim.

```
% esta e a rotina de calculo da equação (15)  
clear ;  
close all ;  
bd20_01_3000 % inicia o vetor pressão e o incremento (dt) para o cálculo do  
vetor ângulo  
ye =1.4; % digitar o valor de y, e a relação entre os calores específicos do etanol  
yd=1.35; % e a relação dos calores específicos do diesel  
re=0; % e a quantidade de etanol injetado  
rd=1; % e a proporção de diesel injetado  
re=(1-rd)*0.655;  
f=length(p01) ; % calcula o numero de elementos do vetor p  
theta=(0:dt:((length(p01)-1)*dt)); % calculo do vetor ângulo , ele deve possuir o  
mesmo numero de elementos que p  
for i=1:length(p01) % repete o processo o numero de vezes igual ao numero de  
elementos de p  
    ang=theta(i); % ang recebe o valor do vetor theta na posição i  
    der(i)=dpdt(ang, theta, p01); % chama a função dpdt , que calcula a  
derivada na posição de ang e salva no vetor der  
        % vetor este que e' a derivada da pressão e também possui o  
mesmo tamanho que p  
    end  
b = 9.05; % digitar o valor do diâmetro
```

```

R = 4.85; % digitar o valor de R
L = 17.05; % digitar o valor de L
e = 0; % digitar o valor de descentralização
v0 = 33.728; % digitar o valor de v0
S = 9.7; % valor do curso
for i=1:f % calculo da transferência de calor em cada instante considerado no
    experimento
v(i) = v0 + (pi*(b^2)*S/4)*0.5*(1-cos(theta(i)*pi/180) +
(R/(2*L))*(sin(theta(i)*pi/180)*sin(theta(i)*pi/180))); % volume pela Lydia
dv(i) =
1/2*(pi*(b^2)*S/4)*(sin(theta(i)*pi/180)+(R/L)*sin(theta(i)*pi/180)*cos(theta(i)*
pi/180)); % derivada do volume pela Lydia
V(i) = ((L+R)*((1-(e/(L+R))^2)^0.5)-L*((1-((R/L)^2)*(sin(theta(i)*pi/180)-
e/R)^2)^0.5)-R*cos(theta(i)*pi/180))*((b^2)*pi/4); % calcula o valor do volume
segundo Jovav para o ângulo theta(i)
Dv(i) = (pi*(b^2)/4)*(R*sin(theta(i)*pi/180) +(R*R*cos(theta(i)*pi/180)*((-
e/R)+sin(theta(i)*pi/180))/(L*(1-((R/L)^2)*(sin(theta(i)*pi/180)-(e/R))^2)^0.5)));
% calcula a derivada da função V segundo Jovav com relação ao ângulo theta(i)
dQ(i) = (((yd/(yd-1))*rd)+((ye/(ye-1))*re))*p01(i)*dv(i) + (((1/(yd-1))*rd)+((1/(ye-
1))*re))*v(i)*der(i); % calculo propriamente dito da transferência de calor
end
Q=0; % valor inicial antes de iniciar a combustão
for i=1:f % calculo da transferência total de calor
Q=dQ(i)+Q;
Q=Q;
end

bd20_04_50perc_sub % inicia o vetor pressão e o incremento (dt) para o calculo
do vetor ângulo
ye =1.4; % digitar o valor de y, e a relação entre os calores específicos do etanol
yd=1.35; % e a relação dos calores específicos do diesel
re=0.5; % e a quantidade de etanol injetado

```

```

rd=0.5; % e a proporção de diesel injetado
re=(1-rd)*1.527;
f=length(p04) ; % calcula o numero de elementos do vetor p
theta3=(0:dt:((length(p04)-1)*dt)); % calculo do vetor ângulo , ele deve possuir o
mesmo numero de elementos que p
for i=1:length (p04) % repete o processo o numero de vezes igual ao numero de
elementos de p
    ang=theta3(i); % ang recebe o valor do vetor theta na posição i
    der(i)=dpdt(ang, theta3, p04); % chama a função dpdt , que calcula a
derivada na posição de ang e salva no vetor der
        % vetor este que é a derivada da pressão e também possui
o mesmo tamanho que p
    end
b = 9.05; % digitar o valor do diâmetro
R = 4.85; % digitar o valor de R
L = 17.05; % digitar o valor de L
e = 0.2; % digitar o valor de descentralização
v0 = 33.728; % digitar o valor de v0
S = 9.7; % valor do curso
for i=1:f % calculo da transferência de calor em cada instante considerado no
experimento
v(i) = v0 + ((pi*(b^2)*S)/4)*0.5*(1-cos(theta3(i)*pi/180) +
(R/(2*L))*(sin(theta3(i)*pi/180)*sin(theta3(i)*pi/180))); % volume pela Lydia
dv(i) =
1/2*(pi*(b^2)*S/4)*(sin(theta3(i)*pi/180)+(R/L)*sin(theta3(i)*pi/180)*cos(theta
3(i)*pi/180)); % derivada do volume pela Lydia
V(i) =((L+R)*((1-(e/(L+R))^2)^0.5)-L*((1-((R/L)^2)*(sin(theta3(i)*pi/180)-
e/R)^2)^0.5)-R*cos(theta3(i)*pi/180))*((b^2)*pi/4); % calcula o valor do volume
segundo Jovav para o ângulo theta(i)
Dv(i)= (pi*(b^2)/4)*(R*sin(theta3(i)*pi/180) +(R*R*cos(theta3(i)*pi/180)*((-
e/R)+sin(theta3(i)*pi/180)))/(L*(1-((R/L)^2)*(sin(theta3(i)*pi/180)-

```

```

(e/R))^2)^0.5)); % calcula a derivada da função V segundo Jovav com relação
ao ângulo theta(i)
dQ3(i)= (((yd/(yd-1))*rd)+((ye/(ye-1))*re))*p04(i)*Dv(i) + (((1/(yd-1))*rd)+((1/(ye-
1))*re))*V(i)*der(i); % calculo propriamente dito da transferência de calor
end
%Q=0; % valor inicial antes de iniciar a combustão
%for i=1:f % calculo da transferência total de calor
%Q=dQ(i)+Q;
%Q=Q;
%end
%
%
clear ;
close all ;
or3000_100%t61 % inicia o vetor pressão e o incremento (dt) para o cálculo do
vetor ângulo
ye =1.4; % digitar o valor de y, e a relação entre os calores específicos do etanol
yd=1.35; % e a relação dos calores específicos do diesel
re=0; % e a quantidade de etanol injetado
rd=1; % e a proporção de diesel injetado
re=(1-rd)*1.527;
f=length(p01) ; % calcula o numero de elementos do vetor p
theta=(0:dt:(length(p01)-1)*dt)'; % calculo do vetor ângulo , ele deve possuir o
mesmo numero de elementos que p
for i=1:length(p01) % repete o processo o numero de vezes igual ao numero de
elementos de p
    ang=theta(i); % ang recebe o valor do vetor theta na posição i
    der(i)=dpdt(ang, theta, p01); % chama a função dpdt , que calcula a
derivada na posição de ang e salva no vetor der
    % vetor este que e' a derivada da pressão e também possui o
mesmo tamanho que p
end

```

```

b = 9.05; % digitar o valor do diâmetro
R = 4.85; % digitar o valor de R
L = 17.05; % digitar o valor de L
e = 0; % digitar o valor de descentralização
v0 = 33.728; % digitar o valor de v0
S = 9.7; % valor do curso
for i=1:f % calculo da transferência de calor em cada instante considerado no
experimeto
v(i) = v0 + (pi*(b^2)*S/4)*0.5*(1-cos(theta(i)*pi/180) +
(R/(2*L))*(sin(theta(i)*pi/180)*sin(theta(i)*pi/180))); % volume pela Lydia
dv(i) =
1/2*(pi*(b^2)*S/4)*(sin(theta(i)*pi/180)+(R/L)*sin(theta(i)*pi/180)*cos(theta(i)*
pi/180)); % derivada do volume pela Lydia
V(i) =((L+R)*((1-(e/(L+R))^2)^0.5)-L*((1-((R/L)^2)*(sin(theta(i)*pi/180)-
e/R)^2)^0.5)-R*cos(theta(i)*pi/180))*((b^2)*pi/4); % calcula o valor do volume
segundo Jovav para o ângulo theta(i)
Dv(i)= (pi*(b^2)/4)*(R*sin(theta(i)*pi/180) +(R*R*cos(theta(i)*pi/180)*((-
e/R)+sin(theta(i)*pi/180))/(L*(1-((R/L)^2)*(sin(theta(i)*pi/180)-(e/R))^2)^0.5)));
% calcula a derivada da função V segundo Jovav com relação ao ângulo theta(i)
dQ(i)= (((yd/(yd-1))*rd)+((ye/(ye-1))*re))*p01(i)*dv(i) + (((1/(yd-1))*rd)+((1/(ye-
1))*re))*v(i)*der(i); % calculo propriamente dito da transferência de calor
end
Q=0; % valor inicial antes de iniciar a combustão
for i=1:f % calculo da transferência total de calor
Q=dQ(i)+Q;
Q=Q;
end
%
%
bic3000_100%t64_50%sub % inicia o vetor pressão e o incremento (dt) para o
cálculo do vetor ângulo
ye =1.4; % digitar o valor de y, e a relação entre os calores específicos do etanol

```

```

yd=1.35; % e a relação dos calores específicos do diesel
re=0; % e a quantidade de etanol injetado
rd=1; % e a proporção de diesel injetado
re=(1-rd)*1.527;
f=length(p01) ; % calcula o numero de elementos do vetor p
theta=(0:dt:(length(p01)-1)*dt)'; % calculo do vetor ângulo , ele deve possuir o
mesmo numero de elementos que p
for i=1:length(p01) % repete o processo o numero de vezes igual ao numero de
elementos de p
    ang=theta(i); % ang recebe o valor do vetor theta na posição i
    der(i)=dpdt(ang, theta, p01); % chama a função dpdt , que calcula a
derivada na posição de ang e salva no vetor der
    % vetor este que é a derivada da pressão e também possui o
    mesmo tamanho que p
end

b = 9.05; % digitar o valor do diâmetro
R = 4.85; % digitar o valor de R
L = 17.05; % digitar o valor de L
e = 0; % digitar o valor de descentralização
v0 = 33.728; % digitar o valor de v0
S = 9.7; % valor do curso
for i=1:f % calculo da transferência de calor em cada instante considerado no
experimento
v(i) = v0 + (pi*(b^2)*S/4)*0.5*(1-cos(theta(i)*pi/180) +
(R/(2*L))*(sin(theta(i)*pi/180)*sin(theta(i)*pi/180))); % volume pela Lydia
dv(i) =
1/2*(pi*(b^2)*S/4)*(sin(theta(i)*pi/180)+(R/L)*sin(theta(i)*pi/180)*cos(theta(i)*
pi/180)); % derivada do volume pela Lydia
V(i) =((L+R)*((1-(e/(L+R))^2)^0.5)-L*((1-((R/L)^2)*(sin(theta(i)*pi/180)-
e/R)^2)^0.5)-R*cos(theta(i)*pi/180))*((b^2)*pi/4); % calcula o valor do volume
segundo Jovav para o ângulo theta(i)

```

```

Dv(i)= (pi*(b^2)/4)*(R*sin(theta(i)*pi/180) +(R*R*cos(theta(i)*pi/180)*((-
e/R)+sin(theta(i)*pi/180)))/(L*(1-((R/L)^2)*(sin(theta(i)*pi/180)-(e/R))^2)^0.5));
% calcula a derivada da função V segundo Jovav com relação ao ângulo theta(i)
dQ(i)= (((yd/(yd-1))*rd)+((ye/(ye-1))*re))*p01(i)*dv(i) + (((1/(yd-1))*rd)+((1/(ye-
1))*re))*v(i)*der(i); % calculo propriamente dito da transferência de calor
end
Q=0; % valor inicial antes de iniciar a combustão
for i=1:f % calculo da transferência total de calor
Q=dQ(i)+Q;
Q=Q;
end

%
function derivada = dpdt(t, vt, p01)
% Calcula a derivada da curva de pressão gravada em "t", dado o
% vetor da curva de pressão "p" e o vetor dos ângulos de aquisição
% "theta".
bd20_01_3000
n=length(p01);
l=50;
% Localiza o valor desejado na curva p x theta
índice=1;
while vt(índice) < t
    índice=índice+1;
end;
aux1 = l;
aux2 = l;
if índice < l
    aux1 = índice - 1;
end
if índice == l
    aux1 = l - 1 ;

```

```
end
if índice > n - 1
    aux2 = n - índice;
end
fitx=vt(índice-aux1:índice+aux2);
fity=p(índice-aux1:índice+aux2);
coef=polyfit(fitx, fity, 3);

derivada = 3*coef(1)*t^2 + 2*coef(2)*t + coef(3);

plot(theta,dQ,'r',theta3,dQ3,'b') % faz o gráfico da taxa de transferência de
calor pelo o ângulo t
xlabel('theta'), ylabel('dQ'),
title('gráfico da taxa de transferência de calor por ângulo theta, b20'),
legend('b20-3000','b20-3000-50%'),
% plot(t,u,t,vv,t,dvv),%plot os dados de todas as funções
figure
plot(theta,p01,'r',theta3,p04,'b')% faz o gráfico da pressão pelo ângulo theta
xlabel('theta'), ylabel('P'),
title(' gráfico da pressão pelo ângulo theta, a 1500rpm')
legend('b20-3000','b20-3000-50%'),
% figure
% plot(theta,dpdt)% faz o gráfico da derivada da pressão pelo ângulo theta
% xlabel('theta'), ylabel('dp')
% title(' gráfico da derivada da pressão pelo ângulo theta')
% figure
% plot(theta,v,theta,V)% faz o gráfico do volume pelo ângulo theta
% xlabel('theta'), ylabel('V'),
% title(' gráfico do volume pelo ângulo theta')
figure
plot(theta,dv,'r',theta,Dv,'b')% faz o gráfico da derivada do volume pelo ângulo
theta
```

```
% xlabel('theta'), ylabel('Dv'),  
% title('gráfico da derivada do volume pelo ângulo theta');
```

### 6.2.1 Modos de utilização do programa

Além do que está explicado sobre o programa na sua descrição, este faz o gráfico de duas, ou mais amostras diferentes de dados, ou seja, pode-se obter curvas de pressão para diferentes combustíveis, o que é inerente ao objetivo deste trabalho, pois cada variação na porcentagem dos combustíveis na mistura pode corresponder a um comportamento diferente, e cada mistura foi tratada como um combustível diferente. Portanto, por meio destes gráficos pode-se analisar comparativamente quais são as conseqüências causadas por diferentes misturas.

### 6.3 Dados de entrada do programa

Os ensaios para obtenção das curvas de pressão foram realizados em um motor a diesel de 2.5 L. Estes ensaios foram realizados no próprio laboratório de motores. Os detalhes dos ensaios são mostrados no próximo capítulo.

## 7. METODOLOGIA

### 7.1 Ensaaios

Os ensaios foram realizados em um motor diesel (Figuras 7 e 8), de injeção direta, turboalimentado, de 4 cilindros, utilizando a mesma bancada usada por FEITOSA (2003). Do motor original foi retirado o “intercooler” e no seu lugar foi adaptado um sistema de alimentação de etanol constituído por três bicos injetores controlados eletronicamente. O etanol injetado entre o turbo compressor e o coletor de admissão, visa substituir parcialmente o combustível injetado através do sistema de alta pressão. Este mesmo etanol, injetado eletronicamente no coletor de admissão, troca calor com o ar aquecido no turbo compressor, vaporizando-se e resfriando a carga admitida. Este processo traz dois benefícios: promove maior enchimento do cilindro e amplia o limite de inflamabilidade da carga.

Ensaiou-se inicialmente o motor alimentado apenas com óleo diesel para referência inicial. Neste ensaio, visto que o “intercooler” foi retirado, o ponto estático (inicial) de injeção foi estabelecido pelo posicionamento da bomba injetora, para dar o melhor desempenho em todos os regimes de rotação com o diesel. Em seguida, ensaiou-se o motor alimentado por B10 pelo sistema de injeção de alta pressão e etanol pelo sistema de injeção eletrônica. Também foram testados B20 e B100 alimentados pelo sistema de alta pressão, com substituição parcial através do sistema de injeção eletrônica. Durante todos os ensaios o ponto estático de injeção e a bomba injetora de alta pressão não sofreram modificações.

Os testes com substituição parcial do combustível principal (diesel ou biodiesel), injetado no interior dos cilindros por etanol hidratado injetado no coletor de admissão,

tinham como referência o torque do motor movido apenas por óleo diesel, ou seja, era visada a restituição do torque original para cada rotação ensaiada. Primeiramente, fixava-se uma determinada condição original de funcionamento (apenas com o combustível principal) para que fossem adquiridos os valores de torque, rotação, consumo, temperaturas, etc. Depois, para a mesma condição de funcionamento, reduzia-se o débito deste combustível (pela alavanca da bomba injetora) para que fosse atingida uma condição de 20, 35 ou 50% de redução de torque. Como o dinamômetro estava programado para manter uma condição de rotação constante, a velocidade do motor não variava durante a redução do débito, variando-se assim apenas o torque. Após atingir-se uma condição de regime, era estabelecido o torque original do motor através da injeção de álcool etílico hidratado no coletor de admissão, realizado através do ajuste da frequência de pulsação dos bicos injetores, pelo controlador de onda quadrada. Quando o motor atingia uma condição de regime, os parâmetros de funcionamento eram então adquiridos e anotados.

Os ensaios foram realizados para rotações de 1500, 2000, 2500 e 3000 rpm; cargas de 50 e 100% e substituições de diesel (ou biodiesel) por etanol, em porcentagem de torque, de 20, 35 e 50%.

Os dados do motor ensaiado são mostrados abaixo:

- motor Maxxion HS 2.5 L, turboalimentado;
- ignição por compressão, quatro tempos, quatro cilindros;
- arrefecimento forçado à água;
- cilindrada: 2500 cm<sup>3</sup>;
- diâmetro x curso (mm): 90,48 x 97,0;
- taxa de compressão: 19,5:1;
- alimentação: diesel, injeção direta, bomba injetora mecânica rotativa.

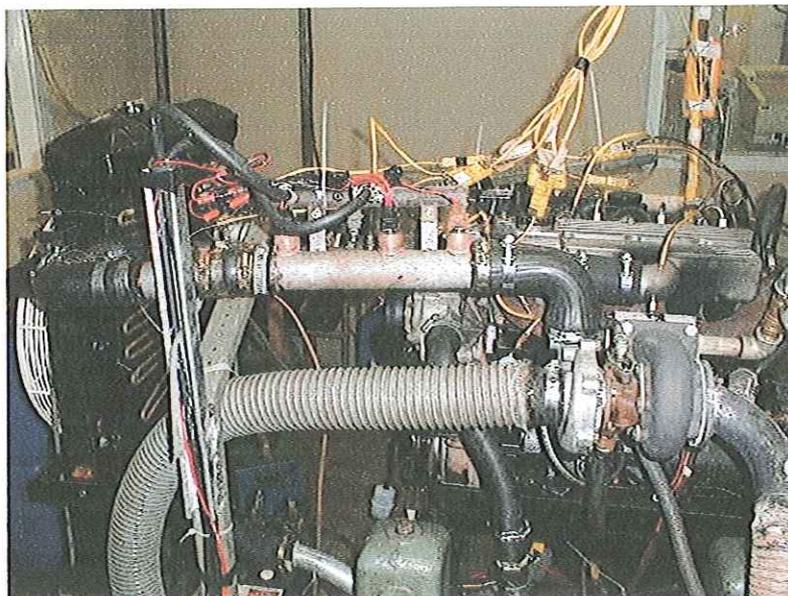


Figura 7: vista lateral do motor utilizado nos ensaios.

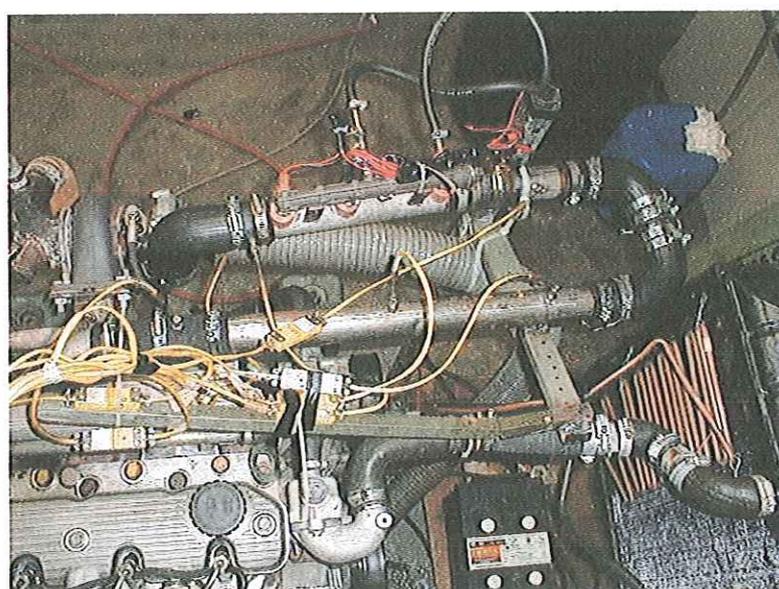


Figura 8: vista superior do motor utilizado nos ensaios.

Para monitoramento das temperaturas no coletor de admissão, 6 termopares foram instalados na admissão do motor, 1 no coletor de exaustão e 1 no sistema de arrefecimento<sup>17</sup>. A aquisição dos valores das temperaturas, realizada por um sistema da National Instruments, foi fundamental para a determinação da quantidade de energia cedida

---

<sup>17</sup> Termopares de cromo-alumínio do tipo K, da marca Mit-exacta.

pelo turbocompressor ao ar e da quantidade de combustível vaporizado no coletor de admissão.

Na Figura 9, que apresenta um esquema da bancada de teste e instrumentação, pode-se observar a posição dos termopares.

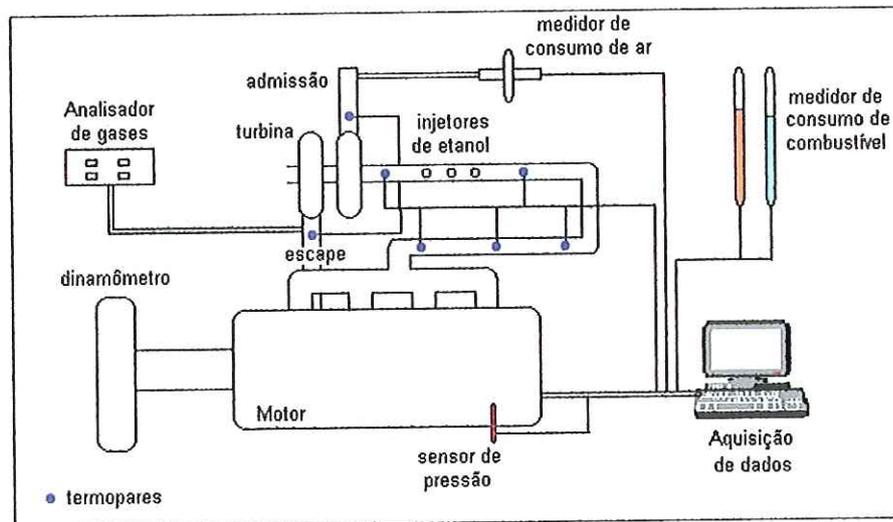


Figura 9: Esquema da bancada de teste e instrumentação.

O consumo dos combustíveis foi medido através do uso de um sistema volumétrico, construído a partir de tubos graduados, e do uso de um cronômetro, para determinação do tempo necessário para o consumo de um certo volume de combustível (Figura 10). Medições da temperatura dos combustíveis eram realizadas para correção da densidade e determinação do consumo mássico.

Para a injeção de etanol no coletor de admissão, foi montado um segundo sistema de alimentação, idealizado por FEITOSA (2003), formado por bicos injetores, bomba de combustível, reservatório de etanol e linhas de distribuição.

O controle dos injetores era realizado por um gerador de pulsos de onda quadrada, o qual possibilitava o controle do tempo em que o injetor ficava aberto e que ficava fechado. Este controle, realizado por dois potenciômetros, permitia a injeção de etanol finamente atomizado no coletor de admissão.

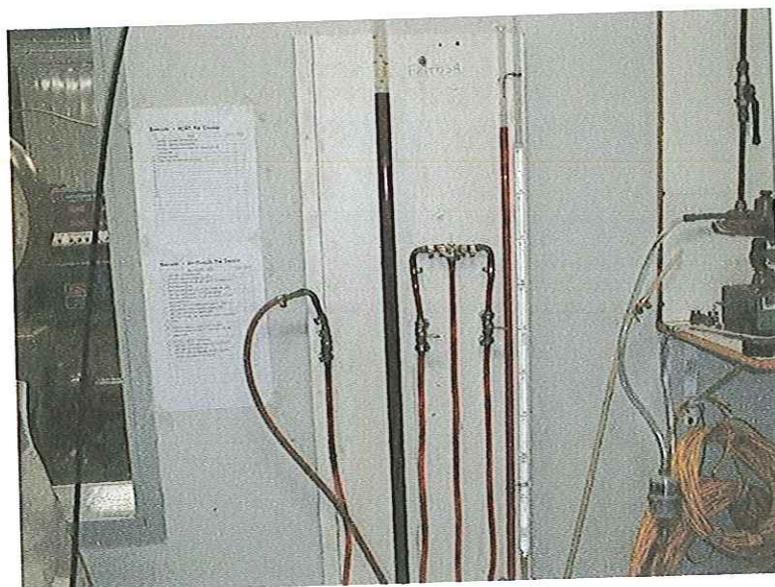


Figura 10: sistema de medição de consumo de combustível, FEITOSA (2003).

Para medir os gases de exaustão foi utilizado um aparelho da marca Tecnomotor, modelo TM131, que mede os gases HC, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>. Foi adaptada uma derivação no coletor de escape, antes da turbina, para evitar análises errôneas de emissão de HC e CO devido à contaminação dos gases por óleo lubrificante originário da turbina. A amostra era conduzida por uma linha, a qual possuía um resfriador, separador de água condensada e separador de partículas sólidas, até o analisador de gases.

Para determinação do ponto morto superior (PMS), utilizou-se um sensor magnético, o qual recebia sinal de um ímã instalado no volante do motor. O conjunto era posicionado de tal maneira que era gerado um pulso toda vez que o pistão 1 atingia o PMS.

O consumo de ar foi determinado a partir da utilização de um anemômetro tipo turbina, adaptado em um tubo rígido, o qual foi aferido a partir da utilização de placas de orifício calibradas.

## 7.2 Equipamento para medir pressão na câmara de combustão

A pressão no interior do cilindro também foi medida e analisada. Para isto utilizou-se um sensor de pressão piezoelétrico instalado no cilindro nº 1 (Figura 11), no local

reservado para a vela aquecedora (equipamento opcional para este modelo). O sensor era da marca AVL, modelo 5Qp2002, com faixa de trabalho de até 600 bar.

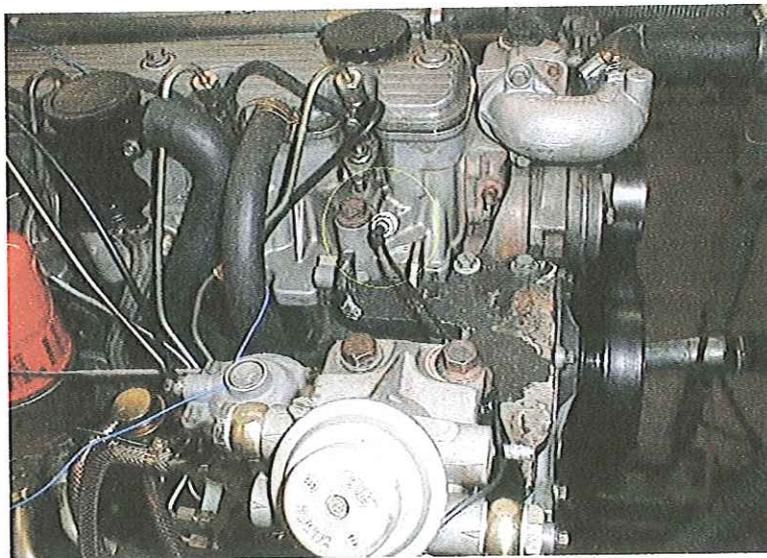


Figura 11: sensor de pressão instalado no cilindro nº 1 do motor, FEITOSA (2003).

O sinal gerado pelo sensor (carga elétrica) alimenta o conversor carga/voltagem e amplificador da marca AVL, modelo 3059C-A01.1, que o transforma em uma voltagem configurável. O sinal (em Volts) é captado pela placa de aquisição da marca National Instruments, modelo DAQScope AT-5102, que apresenta oito canais com conversores A/D de 16 bits, capazes de uma frequência de amostragem máxima de 20MSPS (Mega Samples Per Second – 20 milhões de amostras por segundo). Esta placa é conectada diretamente no conector AT do computador adquirido conforme NF 006079, ficando as entradas disponíveis na sua parte posterior, em conectores BNC.

O sinal proveniente do amplificador foi adquirido e a forma de onda obtida foi gravada em formato texto, para análise posterior. A aquisição de dados foi realizada utilizando-se o software VirtualBench-Scope v.2.1.1, que acompanha a placa de aquisição e é baseado em LabVIEW.

Não foram necessários filtros analógicos anti-aliasing, devido à alta velocidade de amostragem da placa de aquisição (de até 20MHz), muito superior às frequências das componentes relevantes presentes no fenômeno (até 15kHz) e ruídos eletromagnéticos usuais.

O programa de análise do sinal de pressão, de visualização e apresentação dos resultados, foi desenvolvido em ambiente LabVIEW. Ele lê os dados gravados em formato de texto (ASCII) pelo software de aquisição, e executa a análise.

O LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) é um ambiente de desenvolvimento baseado na linguagem gráfica de programação G. É conveniente e próprio para comunicação com hardware, como instrumentos e placas de aquisição. Apresenta extensas bibliotecas de funções ou subprogramas para diversas finalidades, como aquisição, apresentação de dados, análise numérica, comunicação, etc. Difere dos sistemas de programações convencionais por não usar uma linguagem de programação baseada em texto, mas uma gráfica, onde os programas são criados na forma de diagramas de blocos.

### 7.3 Equacionamento da Liberação de Calor

Para a obtenção da equação numérica que foi simulada partiu-se da modelagem zero-dimensional. Optou-se por esta modelagem devido ao fato de que ela proporciona resultados adequados para o objetivo do trabalho, sem, contudo, requerer um grande esforço computacional, que é o caso de quando se utiliza o modelo multidimensional.

O equacionamento foi simulado no programa Matlab<sup>18</sup>, onde foram criados dois vetores de tamanhos idênticos: o vetor pressão, que representa os vários valores de pressão da câmara de combustão e o vetor taxa de transferência de calor. O primeiro foi obtido por meio de ensaios experimentais e depois fornecido ao programa, enquanto o segundo foi fornecido pelo programa. O programa fornece os resultados na forma de um gráfico da taxa de transferência de calor versus ângulo de virabrequim. O vetor do ângulo de virabrequim é relacionado com o de pressão, pelo fato de que os valores de pressão foram adquiridos em função do ângulo do virabrequim, e portanto o vetor do ângulo é obtido na parte experimental.

---

<sup>18</sup> Todo o estudo físico matemático é apresentado no "Capítulo 06".

## 8. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 8.1 Torque e Potência

A análise dos resultados obtidos neste trabalho inicia-se pelas curvas de torque e potência, que apresentaram o comportamento mostrado nas Figuras 12 e 13. São analisados nestes gráficos o diesel e as misturas B10, B20 e B100, sem a adição de etanol, uma vez que os ensaios consistiam na restituição de torque no momento da injeção de etanol.

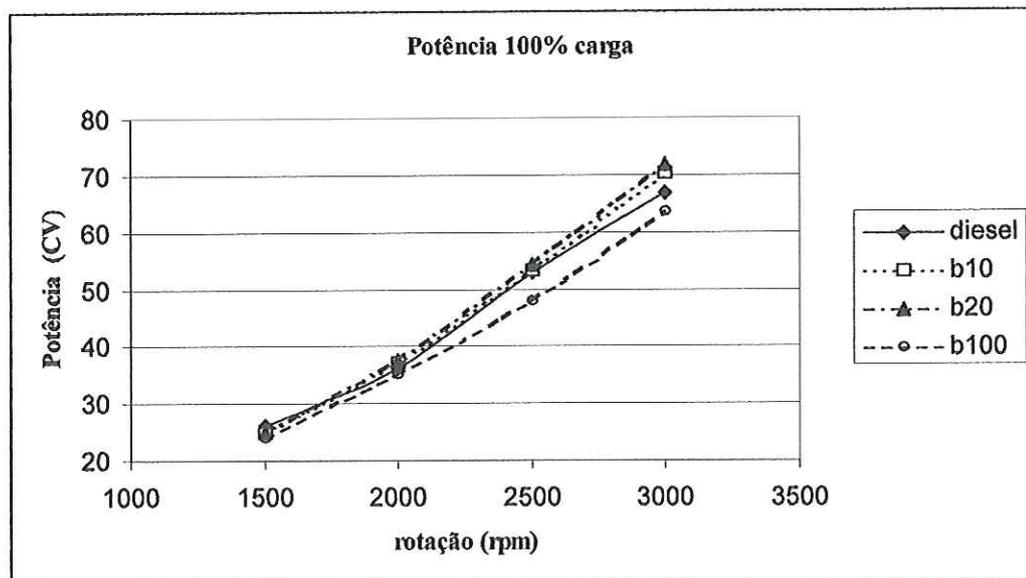


Figura 12: curvas de potência para o diesel, B10, B20 e B100.

De acordo com a Figura 12, observa-se que a adição de biodiesel aumentou a potência para as misturas B10 e B20, principalmente para 3000 rpm, chegando a 7,5% de ganho para o B20 em relação ao diesel. Já para a mistura B100, a potência caiu abaixo da obtida somente com diesel. Este comportamento confere com o apresentado por ALI et al. (1995), que obtiveram um aumento de potência para misturas de 10 e 20% de biodiesel metílico de soja com 80% de diesel, e para misturas com a porcentagem de biodiesel acima de 20% houve uma queda da potência.

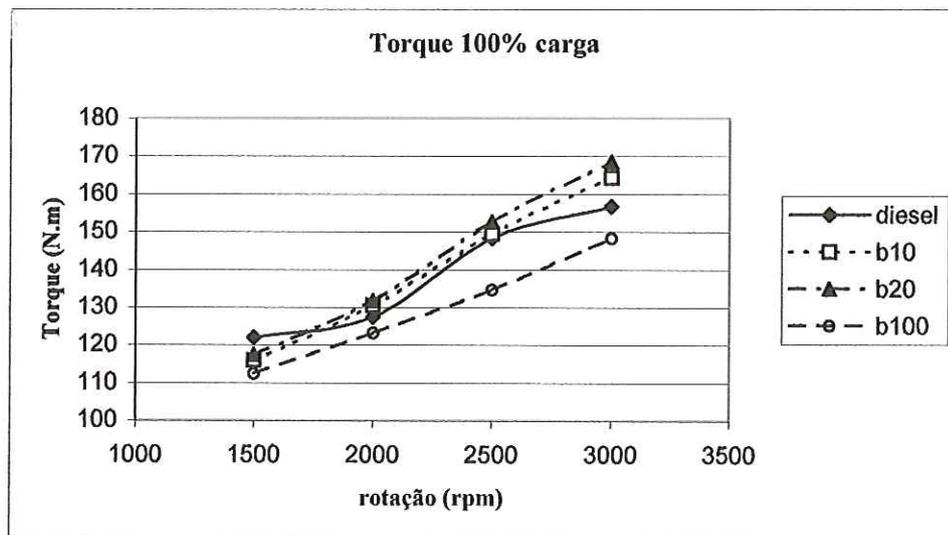


Figura 13: curvas de torque para o diesel, B10, B20 e B100.

O aumento da potência para as misturas B10 e B20, observado na Figura 12, pode ser justificado pelo fato de a molécula de biodiesel possuir oxigênio na sua composição química, o que melhora a queima durante a combustão, já que há maior disponibilidade de oxigênio para o processo, fazendo com que o biodiesel atue como aditivo neste caso.

A curva do B100 foi a que apresentou menores valores de potência para toda a faixa ensaiada. Isso pode ser justificado pela característica energética deste combustível, já que o B100 possui o menor PCI entre todas as misturas testadas. (vide Tabela 2, pág. 22).

Analisando-se a curva de potência e considerando-se a vantagem de o biodiesel ser um combustível oxigenado e a desvantagem de possuir menor PCI, conclui-se que a mistura que mostrou melhor rendimento foi a B20.

A análise para o comportamento da curva de torque, mostrada na Figura 13, acompanhou a mesma tendência da curva de potência, onde a mistura B20 mostrou o melhor desempenho, atingindo o seu valor máximo de 170 N.m a 3000rpm.

## 8.2 Rendimento Térmico

Uma das maneiras de se analisar o desempenho de um motor de combustão interna é examinando seu rendimento térmico. Ele dá a relação de como a potência é aproveitada em função do consumo do combustível e seu poder calorífico superior.

A Figura 14 mostra o rendimento térmico do motor utilizando diesel e as misturas B10, B20 e B100, todos sem a adição de etanol. A análise da figura mostra que as misturas B10, B20 e B100 obtiveram um melhor rendimento térmico que o diesel. Este gráfico mostra um comportamento diferente do mostrado nas curvas de torque e potência, pois o B100 alcançou um rendimento melhor que o do diesel. Isto é explicado pelo fato de que o diesel, aliado a um consumo maior de combustível nos ensaios, possui um poder calorífico superior ao do biodiesel, o que leva a um menor rendimento térmico.

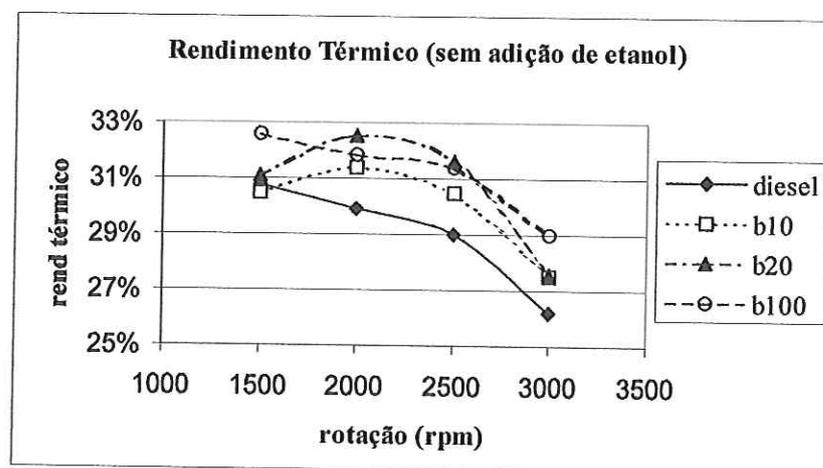


Figura 14: Rendimento térmico dos combustíveis sem adição de etanol.

Observando ainda a Figura 14, nota-se que a condição que deu maior rendimento térmico nesta situação foi a de 2000 rpm para o B10 e o B20, e 1500 rpm para o B100 e o

diesel. As Figuras 15, 16, 17 e 18 mostram o rendimento térmico do diesel e das misturas B10, B20 e B100, em função da quantidade de etanol adicionado a estes combustíveis, nas rotações de 1500, 2000, 2500 e 3000 rpm.

Teoricamente, a existência de álcool vaporizado no interior do cilindro no momento da injeção do diesel deveria facilitar a queima do combustível pela existência de uma grande homogeneidade inicial da mistura ar-vapor de etanol, devido à existência de um átomo de oxigênio em cada molécula de etanol e também por esta possuir um tamanho muito menor que a média das moléculas existentes no diesel. Tudo isto implica em aumento da eficiência térmica (FEITOSA, 2003).

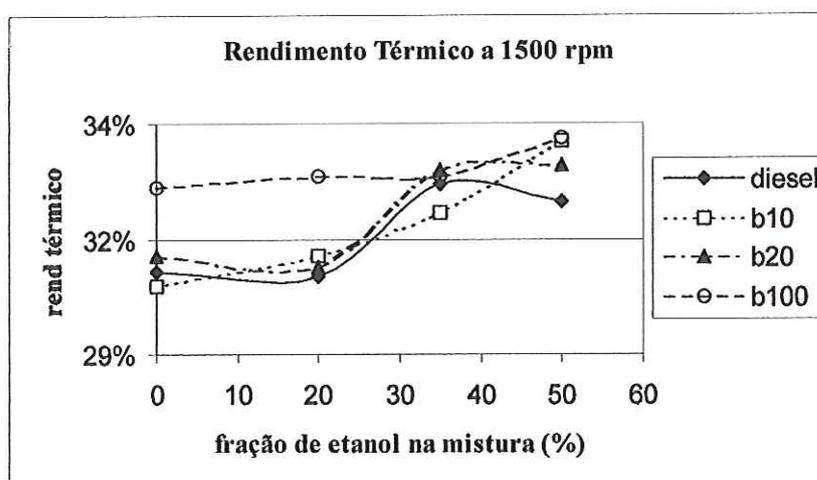


Figura 15: Rendimento térmico dos combustíveis com adição de etanol, a 1500 rpm.

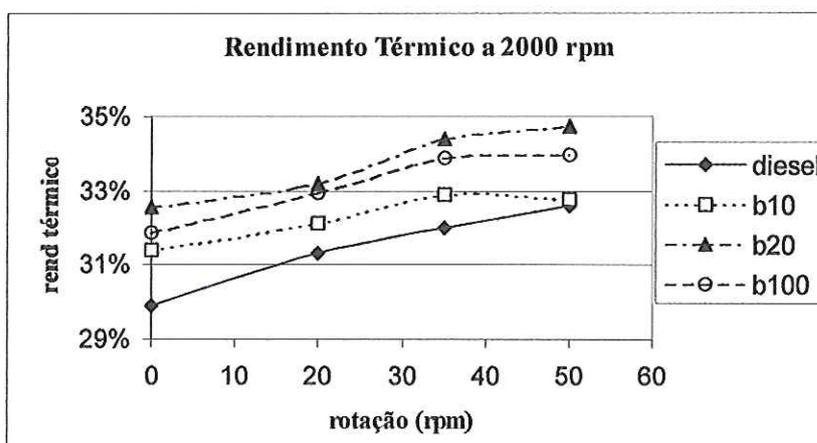


Figura 16: Rendimento térmico dos combustíveis com adição de etanol, a 2000 rpm.

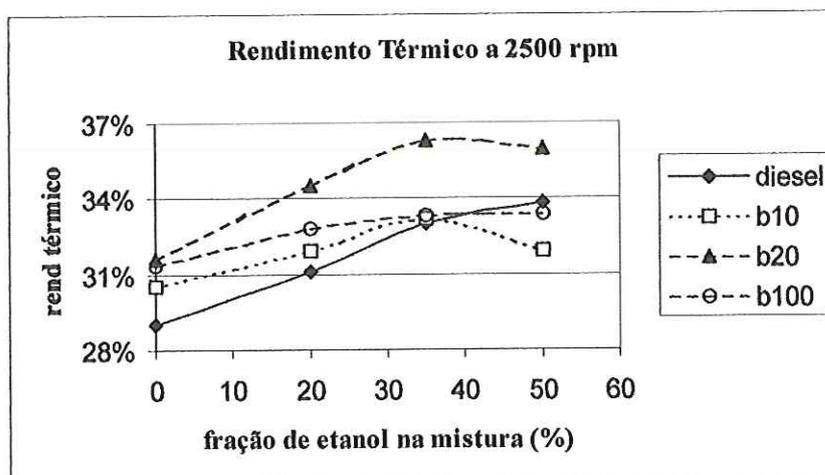


Figura 17: Rendimento térmico dos combustíveis com adição de etanol, a 2500 rpm.

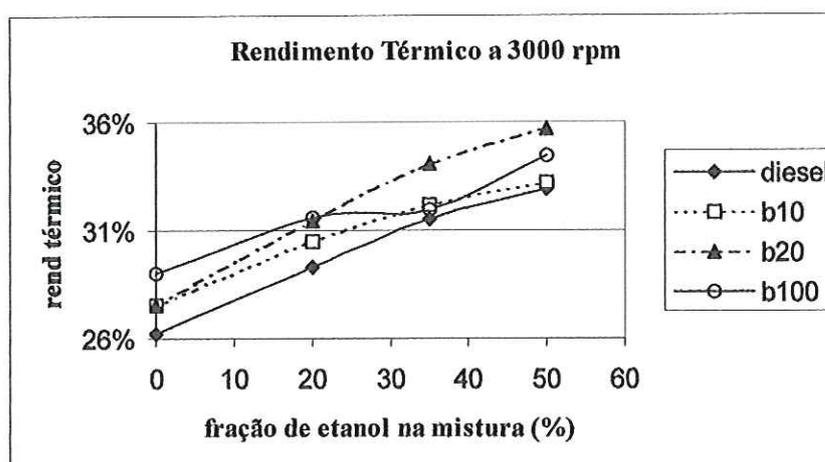


Figura 18: Rendimento térmico dos combustíveis com adição de etanol, a 3000 rpm.

Como era esperado, na maioria dos testes realizados, houve aumento no rendimento térmico do motor com a substituição parcial do diesel ou biodiesel pelo etanol, como pode ser verificado nas Figuras 15, 16, 17 e 18. Estes resultados conferem com os apresentados por FEITOSA (2003).

O aumento no rendimento térmico, também está relacionado ao melhor aproveitamento da energia fornecida pelo turbocompressor ao ar comprimido quando se injeta álcool etílico finamente vaporizado. Neste processo, o líquido absorve energia do ar

aquecido pelo compressor para mudar de fase (vaporizar-se), reduzindo a temperatura do gás admitido, retornando ao motor, na forma de calor latente<sup>19</sup>, grande parte da energia que seria desperdiçada caso fosse utilizado um intercooler para tal finalidade.

### 8.3 Consumo Específico de Combustível

O consumo específico de combustível é um parâmetro de comparação muito usado para mostrar quão eficientemente um motor está transformando combustível em trabalho (OBERT, 1971). O consumo específico dá a relação entre o consumo mássico de combustível do motor e a potência por ele produzida. Quanto maior o consumo específico de combustível de um motor, mais combustível ele está gastando para produzir determinada potência.

A Figura 19 mostra o consumo específico do motor utilizando diesel e as misturas B10, B20 e B100, todos sem a adição de etanol. Na figura observa-se que o B100 foi o combustível que apresentou o maior consumo específico, o que já era esperado, uma vez que foi usando este combustível que o motor produziu a menor potência. Outro fator que contribuiu para o alto consumo específico do B100 foi o fato de ter sido este o combustível que teve o maior consumo mássico.

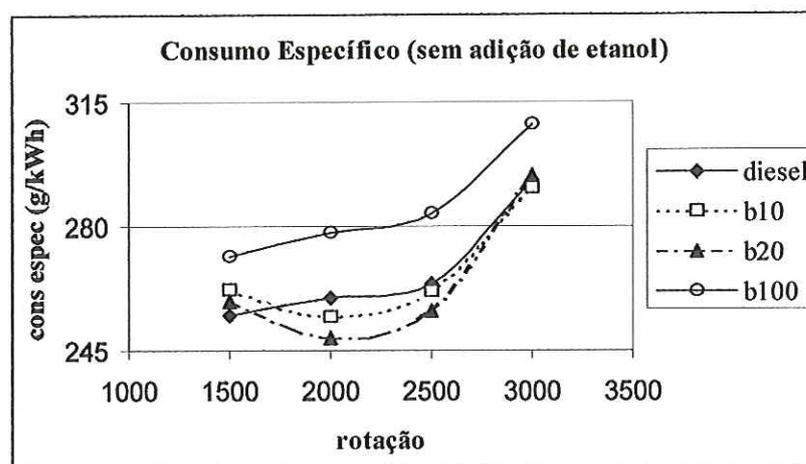


Figura 19: Consumo específico dos combustíveis sem a adição de etanol.

<sup>19</sup> que é a quantidade de calor absorvido pelas substâncias na sua mudança de estado, sem que haja aumento aparente da temperatura.

Analisando ainda a Figura 19, nota-se que o combustível que apresentou melhor consumo específico foi a mistura B20, seguida da B10. O que também já era esperado, uma vez que foram estas as misturas que deram a maior potência. As Figuras 20, 21, 22 e 23 mostram o consumo específico do diesel e das misturas B10, B20 e B100, em função da quantidade de etanol adicionado a estes combustíveis, nas rotações de 1500, 2000, 2500 e 3000 rpm.

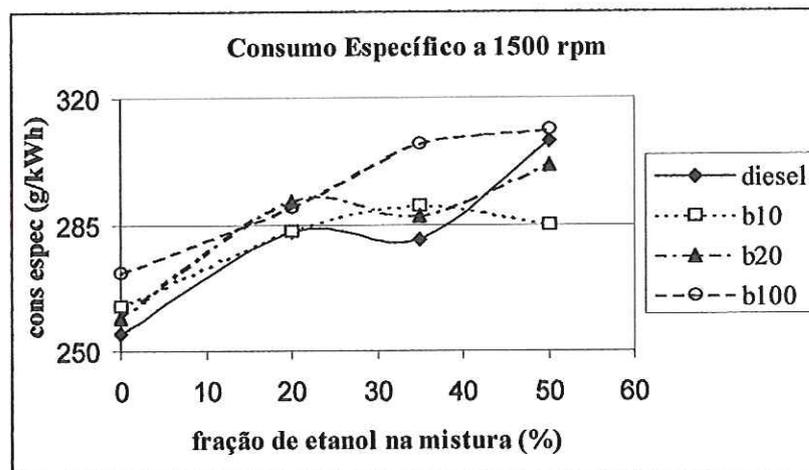


Figura 20: Consumo específico dos combustíveis com adição de etanol, a 1500 rpm.

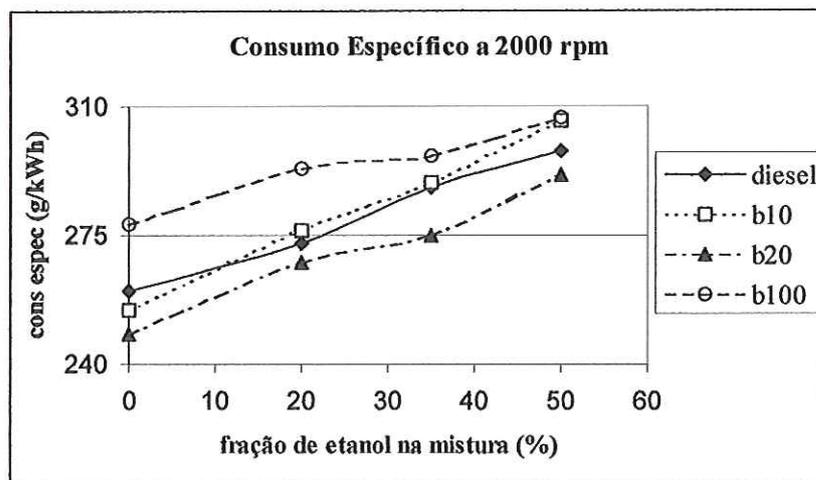


Figura 21: Consumo específico dos combustíveis com adição de etanol, a 2000 rpm.

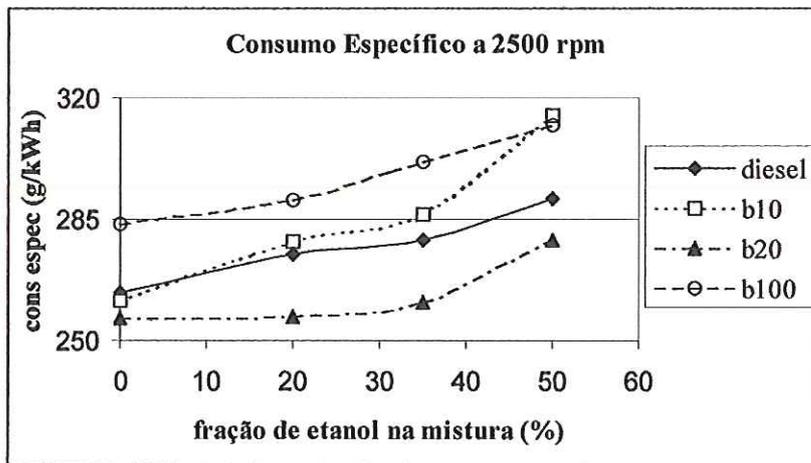


Figura 22: Consumo específico dos combustíveis com adição de etanol, a 2500 rpm.

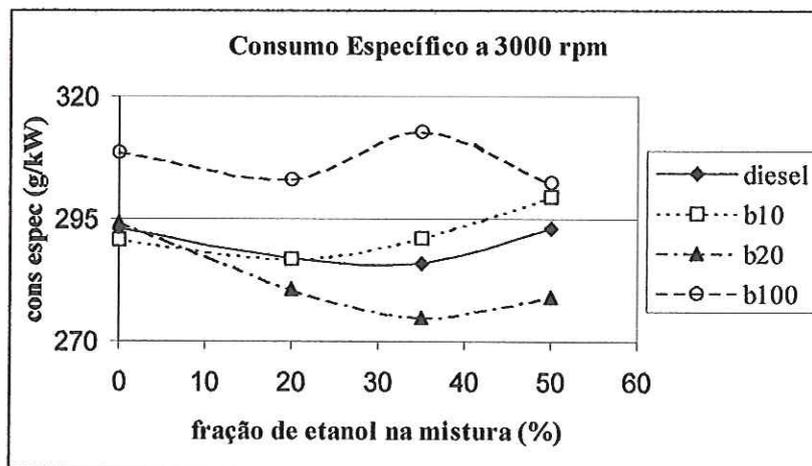


Figura 23: Consumo específico dos combustíveis com adição de etanol, a 3000 rpm.

A análise das Figuras 20, 21, 22 e 23 mostra que a substituição de diesel, B10, B20 ou B100 por etanol aumentou o consumo específico do combustível para as condições de 1500, 2000 e 2500 rpm, e chegou a diminuir em alguns pontos para 3000 rpm. O aumento do consumo específico nos primeiros casos pode ser explicado pela diferença dos poderes caloríficos dos combustíveis, já que o poder calorífico inferior do álcool é igual a 25700 kJ/kg, o do diesel é 43000 kJ/kg e o biodiesel (B100) é 37714 kJ/kg. Porém, isto não significa que o rendimento térmico do motor caia com a substituição de diesel ou biodiesel por etanol, como foi demonstrado nas Figuras 15, 16, 17 e 18.

Para o caso da condição de 3000 rpm, o incremento dado pela substituição do diesel ou biodiesel pelo etanol na potência foi mais significativo que o causado no consumo mássico total (do etanol mais a mistura B10, B20 ou B100) do motor. Isto levou a uma queda no consumo específico em alguns pontos, como pode ser visto na Figura 23. Este incremento mais significativo na potência pode ter sido causado pela maior pressão do turbo nesta rotação, o que ocasiona um aumento da energia fornecida ao ar comprimido quando se injeta álcool etílico finamente vaporizado. Neste processo, como descrito no item anterior, o líquido absorve energia do ar aquecido pelo compressor para mudar de fase (vaporizar-se), reduzindo a temperatura do gás admitido, retornando ao motor, na forma de calor latente, grande parte da energia que seria desperdiçada caso fosse utilizado um intercooler para tal finalidade.

#### **8.4 Pressão no Interior do Cilindro**

A pressão no interior do cilindro foi medida e analisada utilizando-se um sensor de pressão piezoelétrico instalado no cilindro nº 1 (Figuras 11), no local reservado para a vela aquecedora (equipamento opcional para este modelo). Dados sobre o sensor e sobre o sistema de aquisição dos sinais de pressão são mostrados no item 7.2, na pág 67.

As Figuras de 24 a 28 mostram as curvas da pressão em função do ângulo do girabrequim para o diesel, B10, B20 e B100, com e sem a substituição por etanol. As figuras mostram os dados obtidos no regime de 3000 rpm, uma vez que se fossem mostradas todas as curvas em todos os regimes ensaiados, seriam necessários muitos gráficos.

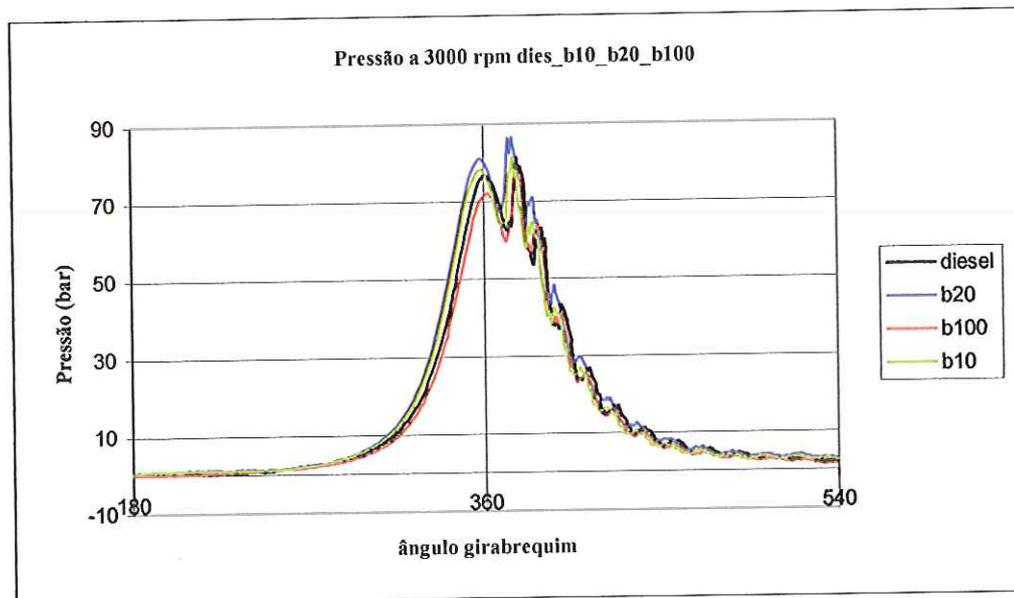


Figura 24: curvas de pressão do diesel, B10, B20 e B100, sem a substituição por etanol.

Numa primeira análise da figura acima se observa que existem dois picos de pressão. O primeiro causado pela compressão do ar e pelo início da combustão do combustível logo após sua injeção no cilindro, e o segundo causado pela combustão do restante do combustível vaporizado durante o intervalo entre os dois picos, onde se nota uma queda de pressão.

Analisando ainda a Figura 24, pode-se ver que o combustível que gera a maior pressão dentro da câmara de combustão é a mistura B20, seguida da B10, do diesel e, finalmente, a mistura B100. Esta seqüência é a mesma da Figura 12, que mostra a potência do motor utilizando estes combustíveis.

Essa maior pressão alcançada pelas misturas B20 e B10 é devida a uma melhor queima durante a combustão, já que a molécula de biodiesel possui oxigênio na sua composição química. E a menor pressão alcançada pelo B100 é justificada pelo baixo poder calorífico deste combustível.

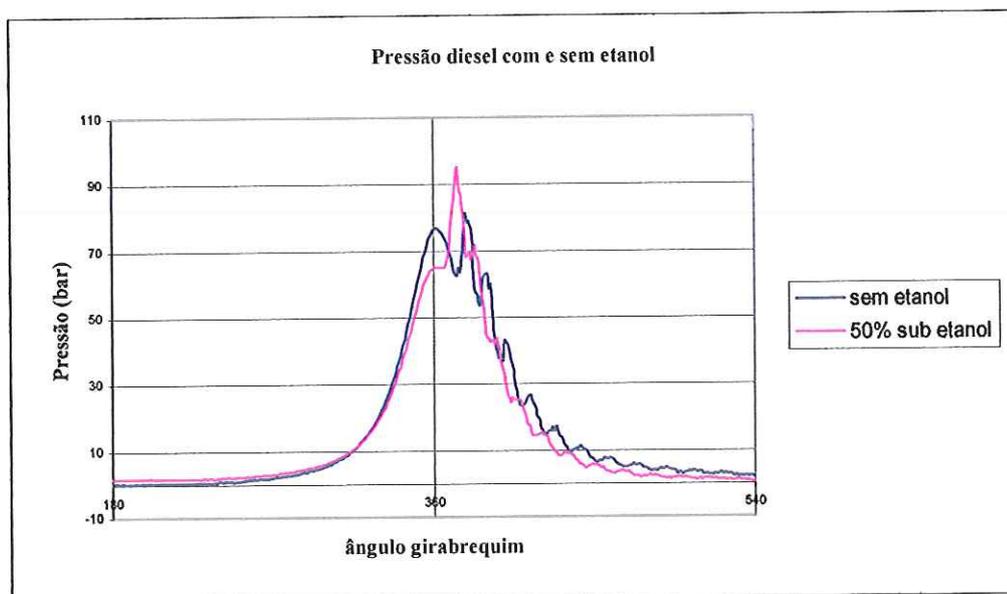


Figura 25: curvas de pressão do diesel, com e sem a substituição por etanol.

A Figura 25 mostra a curva da pressão em função do ângulo do girabrequim para o diesel puro e para a situação de substituição de 50% de diesel por etanol.

Observando-se esta Figura, nota-se que a substituição de diesel por etanol fez com que diminuísse o primeiro pico de pressão e aumentasse o segundo. Isto indica que uma maior parte do combustível está sendo queimada após o ponto morto superior.

Segundo FEITOSA (2003), essa aproximação do segundo pico de pressão ao PMS resulta em melhorias no rendimento térmico do motor. Este ganho no rendimento pode ser observado nas Figuras de 15 a 18, no item 8.2, que mostram o rendimento térmico do motor em função da fração de substituição de diesel ou biodiesel por etanol.

As Figuras 26, 27 e 28 mostram as curvas da pressão em função do ângulo do girabrequim para o B10, B20 e B100, com e sem a substituição de 50% destes por etanol.

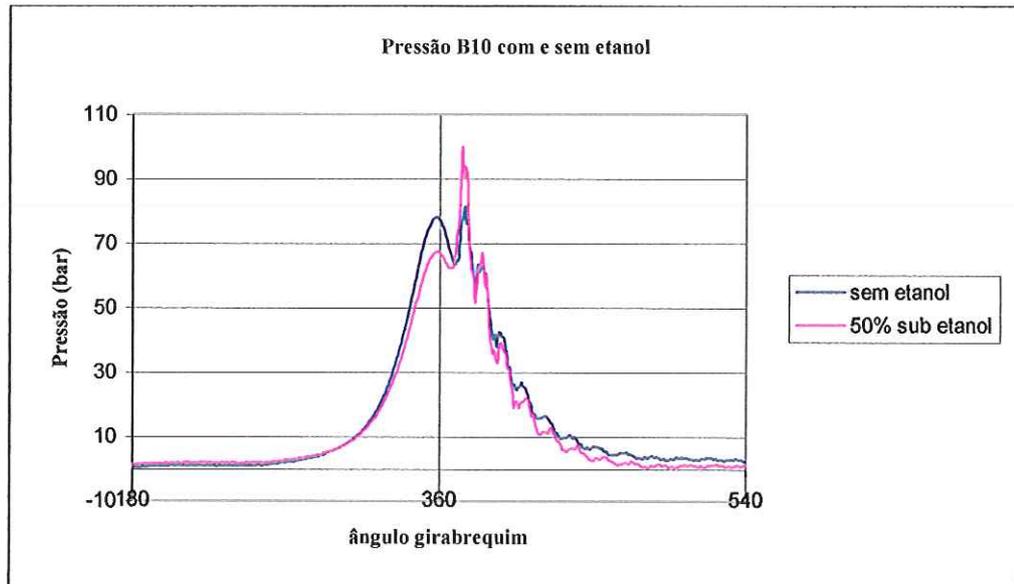


Figura 26: curvas de pressão do B10, com e sem a substituição por etanol.

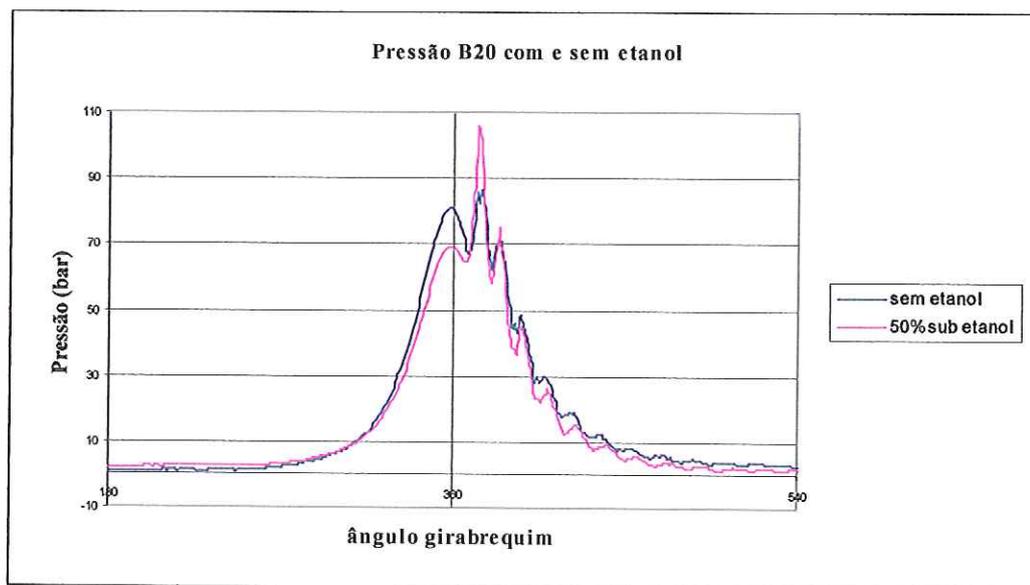


Figura 27: curvas de pressão do B20, com e sem a substituição por etanol.

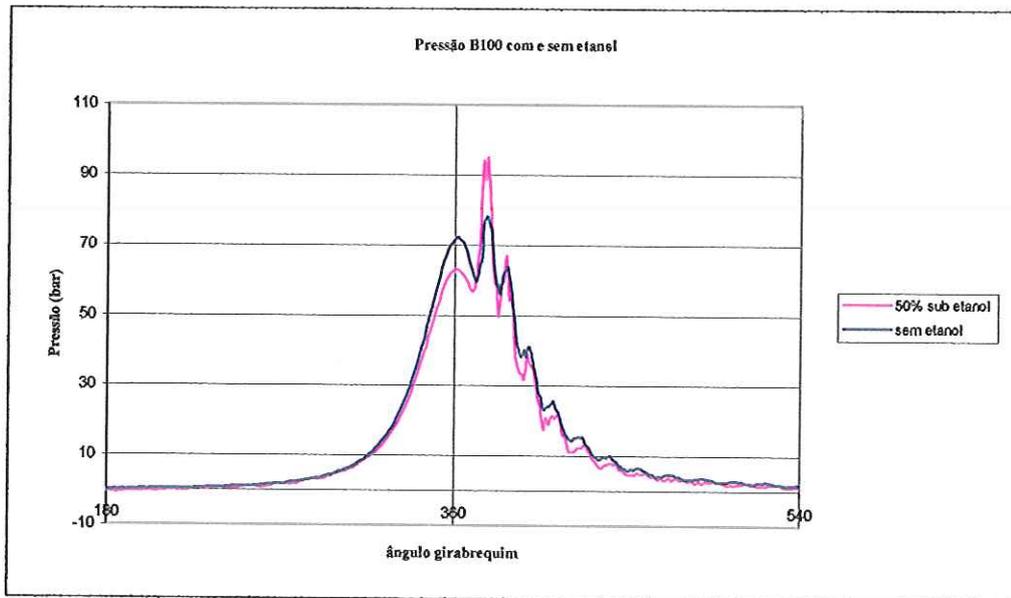


Figura 28: curvas de pressão do B100, com e sem a substituição por etanol.

Observando-se as Figuras 26, 27 e 28, nota-se o mesmo comportamento da Figura 25, ou seja, a substituição de B10, B20 ou B100 por etanol fez com que diminuísse o primeiro pico de pressão e aumentasse o segundo. Isto, como explicado anteriormente, indica que uma maior parte do combustível está sendo queimada após o ponto morto superior, o que resulta em melhorias no rendimento térmico do motor.

## 8.5 Liberação de Calor

Um dos setores que ainda propicia um largo campo de estudo e evolução nos motores é o processo da combustão, que pode ser considerado o núcleo do funcionamento do motor. E uma das ferramentas para se analisar a combustão é através da taxa de liberação de calor.

A liberação de calor foi simulada através de um programa elaborado a partir do equacionamento proposto por HEYWOOD (1988), e modificado neste trabalho para serem levados em consideração o uso dos combustíveis testados aqui e seus respectivos poderes caloríficos. A simulação foi realizada no programa Matlab.

A Figura 29 mostra a curva da taxa de liberação de calor em função do ângulo do girabrequim para o diesel, B10, B20 e B100, sem a substituição por etanol. Como no caso das curvas de pressão, mostrados no item anterior, as figuras para os casos com e sem etanol mostram os dados obtidos no regime de 3000 rpm, uma vez que se fossem mostradas todas as curvas em todos os regimes ensaiados, seriam necessários muitos gráficos, e os que são mostrados são similares aos obtidos para as outras rotações.

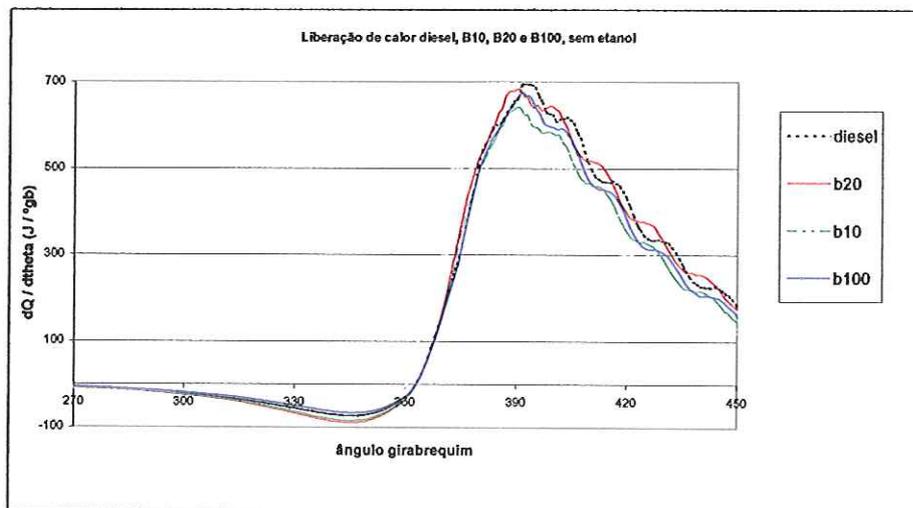


Figura 29: liberação de calor do diesel, B10, B20 e B100, sem a substituição por etanol.

Na Figura 29 nota-se que o diesel teve uma taxa de liberação de calor ligeiramente maior que as misturas de biodiesel, seguido pelo B20, B100 e pelo B10. Este

comportamento difere do apresentado nas curvas de pressão, que mostraram que o B20 e o B10 geraram picos de pressão dentro da câmara de combustão maiores que o diesel.

Comparando-se ainda as curvas de pressão, mostradas na Figura 24, pode-se ver que os primeiros picos do diesel e do B100 ficaram mais próximos do PMS que os picos do B20 e do B10. Essa proximidade com o PMS faz com que a energia gerada dentro da câmara de combustão seja mais bem aproveitada, pois não se perde uma parte da energia para vencer a compressão da mistura. Uma maneira de se visualizar isto é através do gráfico da pressão em função do ângulo de girabrequim mostrando a compressão e a expansão no mesmo lado do eixo do gráfico. As Figuras 30 e 31 mostram estes gráficos para o B10 e o B100, respectivamente.

Observando as Figuras, nota-se que para o caso do B10 o valor da pressão de compressão supera o da expansão na faixa de  $10^\circ$  próxima ao PMS. Isto faz com que se tenha um trabalho menor realizado neste trecho do processo. Este fato não ocorre para o B100, que tem sempre a curva de pressão de expansão acima da de compressão.

Este é um dos fatores que fez com que a taxa de liberação de calor do B100 subisse em relação ao B10, comparando-se com as curvas de pressão, mostradas no item 8.4. Explica também o porque a taxa de liberação de calor do diesel subiu, já que a curva de pressão deste comportou-se de maneira semelhante ao B100. O B20 teve um aspecto similar ao B10.

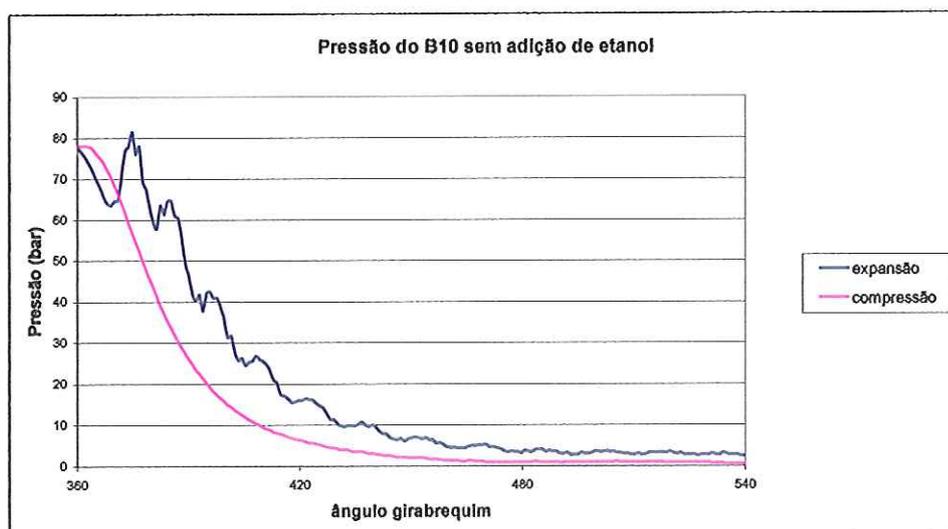


Figura 30: Pressão do B10 sem a adição de etanol.

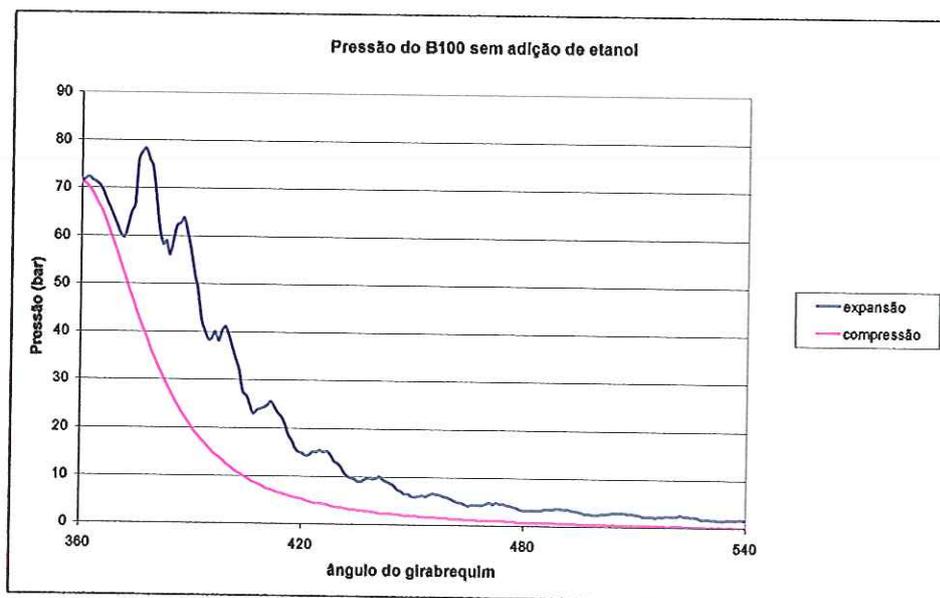


Figura 31: Pressão do B100 sem adição de etanol.

Outro fato que contribuiu para o diesel liberar mais calor, mesmo não tendo sido o combustível que gerou maiores picos de pressão na câmara de combustão, pode ser explicado pela taxa de variação da pressão em função do ângulo de girabrequim  $\left(\frac{dP}{d\theta}\right)$ , que no caso deste combustível atingiu valores com amplitudes pontuais maiores que os apresentados pelas misturas B10, B20 e B100. Isto influenciou positivamente no resultado da equação 15, elevando a taxa de liberação de calor do diesel. As Figuras 32 e 33 mostram o gráfico da taxa de variação da pressão em função do ângulo de girabrequim para o diesel e para o B10, respectivamente.

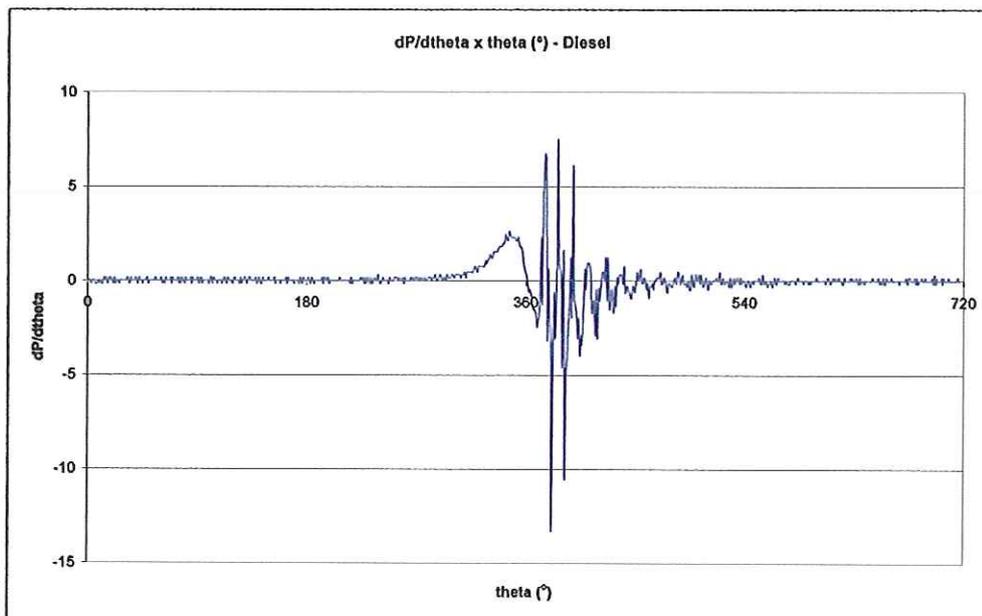


Figura 32: taxa de variação da pressão em função do ângulo de girabrequim para o diesel.

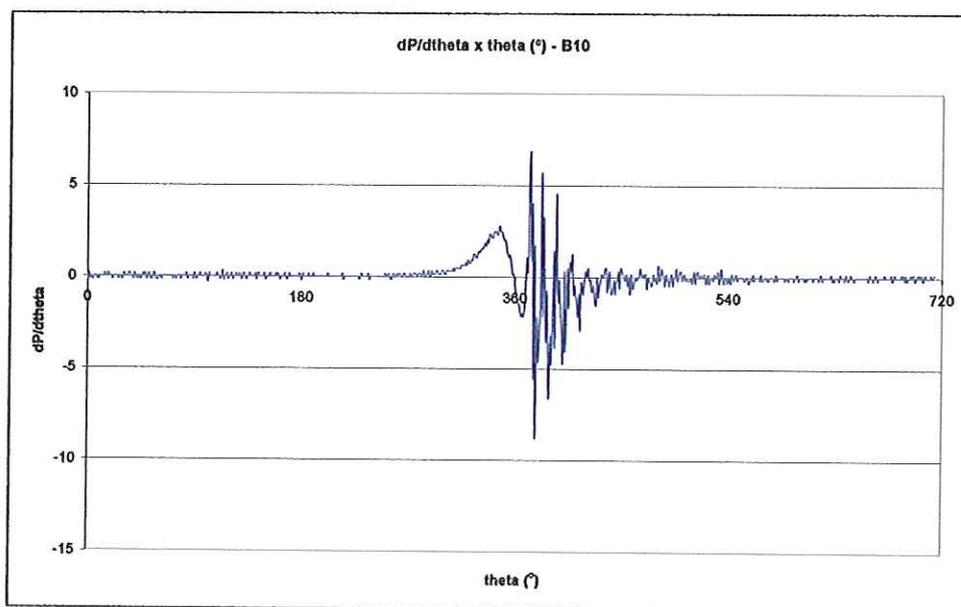


Figura 33: taxa de variação da pressão em função do ângulo de girabrequim para o B10.

Analisando as Figuras 32 e 33 pode-se notar que a taxa de variação da pressão em função do ângulo de girabrequim do diesel possui valores com amplitudes pontuais maiores que o do B10. Isto influenciou, como dito anteriormente, positivamente no resultado da equação 15, elevando a taxa de liberação de calor do diesel.

Segundo OBERT (1971), este gráfico de  $dP/d\theta$  em função do ângulo do girabrequim mostra o quanto um motor está detonando. Pela análise das figuras pode-se ver que o ciclo do diesel, neste regime, detonou mais que o B10. Este seria outro indicativo da liberação de calor do diesel ser maior que a dos outros combustíveis, mesmo não tendo gerado a maior potência, ou seja, neste caso o combustível que gerou maior detonação liberou mais calor, entretanto gerou menor potência.

Os valores da detonação destes ciclos e da média dos ciclos dos 4 combustíveis, com e sem etanol serão mostrados no próximo item.

Outro fato a se destacar é que a região que apresenta maior taxa de liberação de calor encontra-se após aos  $30^\circ$  depois do PMS. Nesta região a pressão gerada dentro da câmara de combustão pelo B10 foi a menor entre os combustíveis, e a do diesel e do B20 foram as maiores.

A Figura 34 mostra a curva da liberação de calor em função do ângulo do girabrequim para o diesel puro e para a situação de substituição de 50% de diesel por etanol.

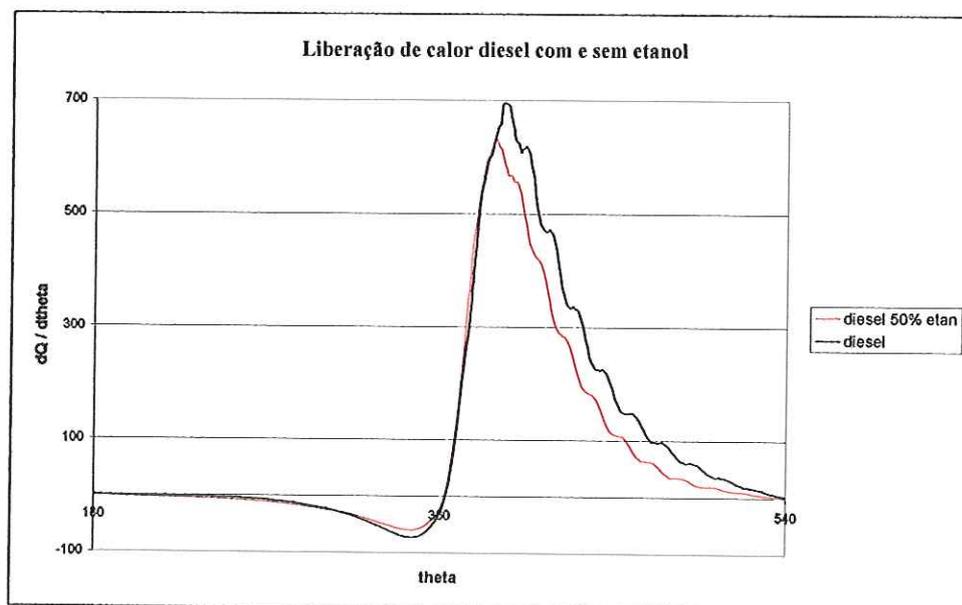


Figura 34: curvas de liberação de calor do diesel, com e sem a substituição por etanol.

Como se pode observar na figura, a substituição parcial de diesel por etanol diminuiu a liberação de calor durante a combustão. Um fator que contribuiu para essa queda na liberação de calor foi o aumento do índice de detonação com a substituição de diesel por

etanol, como será mostrado no próximo item. O baixo poder calorífico do etanol e a diminuição da temperatura de admissão causada pela injeção de etanol no coletor também contribuíram para a queda na liberação de calor.

É importante lembrar aqui que mesmo liberando menos calor durante a combustão, a adição de etanol resultou em um maior rendimento térmico do motor.

As Figuras 35, 36 e 37 mostram as curvas da liberação de calor em função do ângulo do girabrequim para o B10, B20 e B100, com e sem a substituição de 50% destes por etanol.

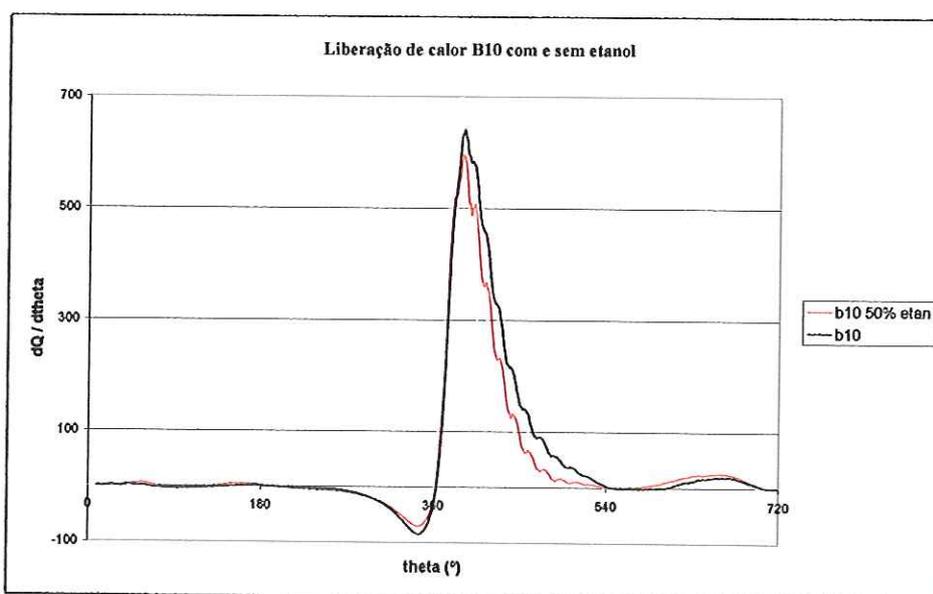


Figura 35: curvas de liberação de calor do B10, com e sem a substituição por etanol.

Como pode ser visualizado nas Figuras 35, 36 e 37, a substituição do combustível principal (B10, B20 ou B100) por etanol causou uma diminuição na liberação de calor em todos os casos. Como no caso do diesel, um fator que contribuiu para essa queda na liberação de calor foi o aumento do índice de detonação com a adição de etanol, aliado ao fato de o etanol possuir baixo poder calorífico.

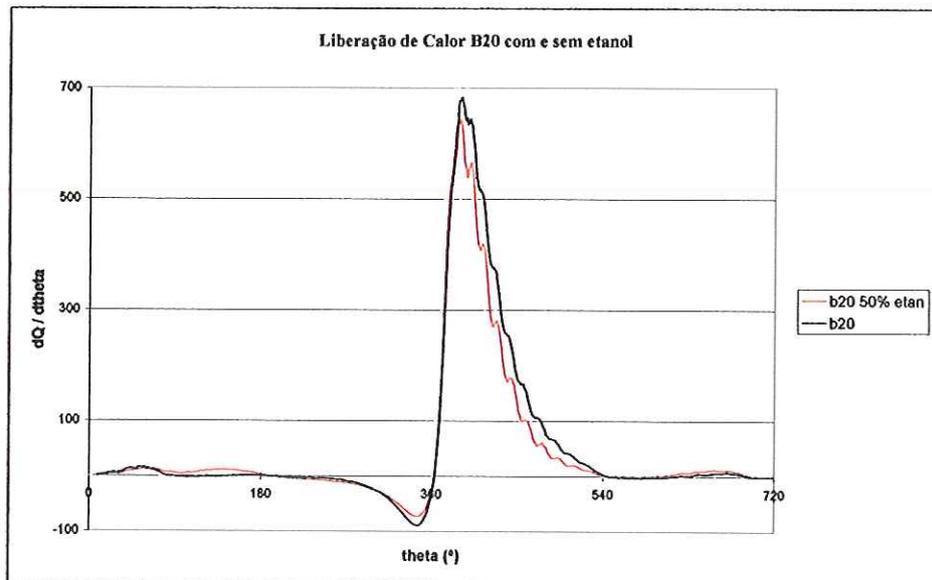


Figura 36: curvas de liberação de calor do B20, com e sem a substituição por etanol.

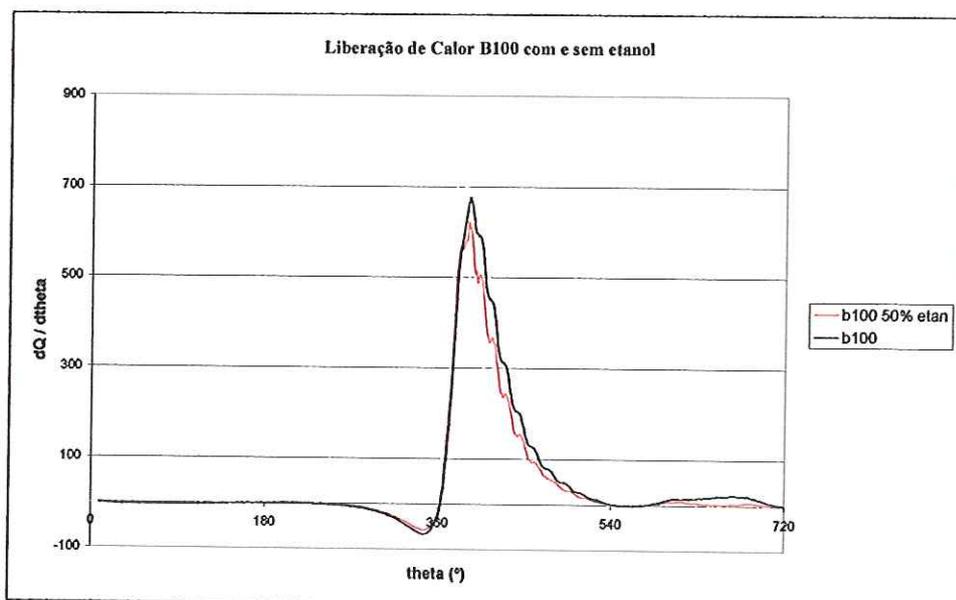


Figura 37: curvas de liberação de calor do B100, com e sem a substituição por etanol.

Outro estudo realizado neste trabalho é a modificação do equacionamento proposto por HEYWOOD (1988), no qual obtém-se a taxa de liberação de calor através do uso dos valores da pressão dentro da câmara de combustão.

O equacionamento proposto neste trabalho, mostrado no “Capítulo 6”, leva em consideração as características energéticas dos combustíveis utilizados simultaneamente em um motor de combustão interna. A seguir, na Figura 38, são mostradas a taxa de liberação de calor obtida a partir do equacionamento proposto por HEYWOOD (1988) e a obtida utilizando-se a equação proposta no trabalho.

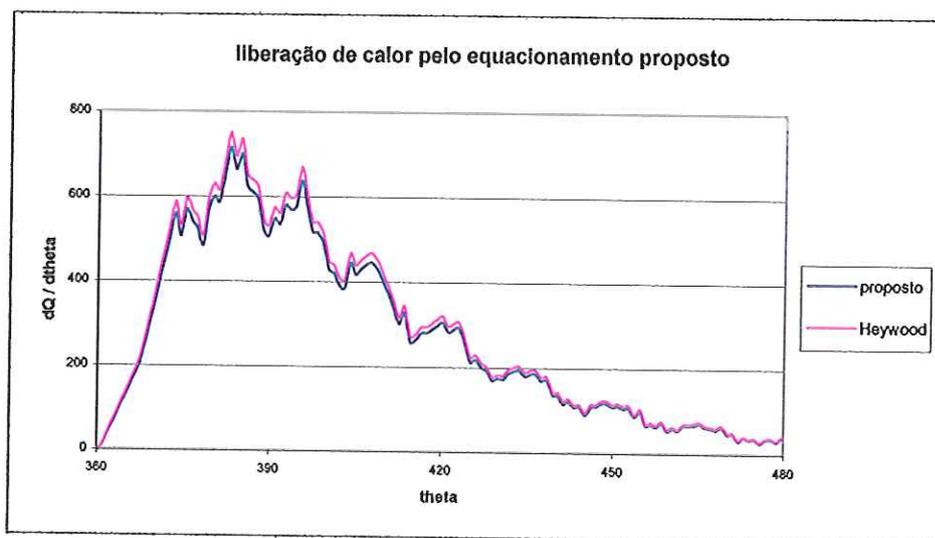


Figura 38: taxa de liberação de calor obtida a partir do equacionamento proposto por HEYWOOD (1988) e utilizando-se a equação proposta no trabalho, para o caso do diesel.

É possível observar-se na Figura 38 que, apesar de as curvas apresentarem comportamentos similares, existe uma diferença visível entre as duas curvas. Esta diferença fica na média em 4,8%, chegando a 6,7% em alguns pontos.

Com estes valores, pode-se concluir que o equacionamento apresentado neste trabalho correspondeu às expectativas, mostrando que há uma diferença considerável entre os valores obtidos pela equação de HEYWOOD e pela equação proposta aqui.

## 8.6 Detonação

Devido ao fato de um dos objetivos do trabalho ser analisar o desempenho de um motor do ciclo diesel, com a adição de etanol em misturas diesel/biodiesel, torna-se importante realizar um estudo sobre a detonação.

Dentre as várias causas de mau funcionamento de um motor de combustão interna, a detonação se destaca como um importante fator de perda de potência e durabilidade do motor. TAYLOR (1968) afirma que tem sido dedicada mais pesquisa para este fenômeno que para qualquer outro aspecto do motor de combustão interna.

A intensidade da detonação tem sido caracterizada quantitativamente de diferentes formas. Tradicionalmente, esta medida é obtida a partir do sinal de pressão na câmara de combustão, identificando-se componentes frequenciais típicos do fenômeno. Estes estão relacionados com a frequência ressonante da câmara, devido à propagação e reflexão das ondas de pressão, característica do fenômeno (SUN et al., 1996).

E foi a partir do sinal de pressão na câmara de combustão que se caracterizou quantitativamente a intensidade de detonação neste trabalho.

A aquisição foi realizada durante um intervalo de tempo suficiente para uma amostragem de pelo menos 20 ciclos completos do motor, para a obtenção de um índice médio de detonação, muito mais representativo do que a condição de um único ciclo.

A seguir, através de figuras, será feita uma análise da detonação encontrada no motor operando com diesel, B10, B20 ou B100, com e sem a substituição por etanol. O programa desenvolvido permite o cálculo do índice de detonação de cada ciclo individualmente e também efetua o cálculo da média dos 20 ciclos amostrados.

A Figura 39 mostra o índice de detonação do diesel sem a adição de etanol, e a Figura 40 mostra o efeito da substituição de diesel por etanol na detonação. Nas figuras são apresentados os valores do índice para cada ciclo e os valores das médias dos 20 ciclos.

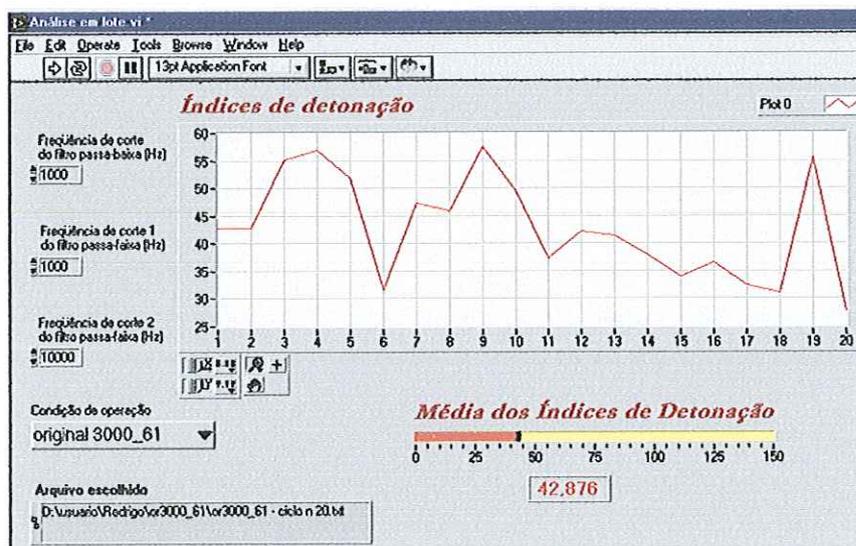


Figura 39: índice de detonação do diesel sem etanol.

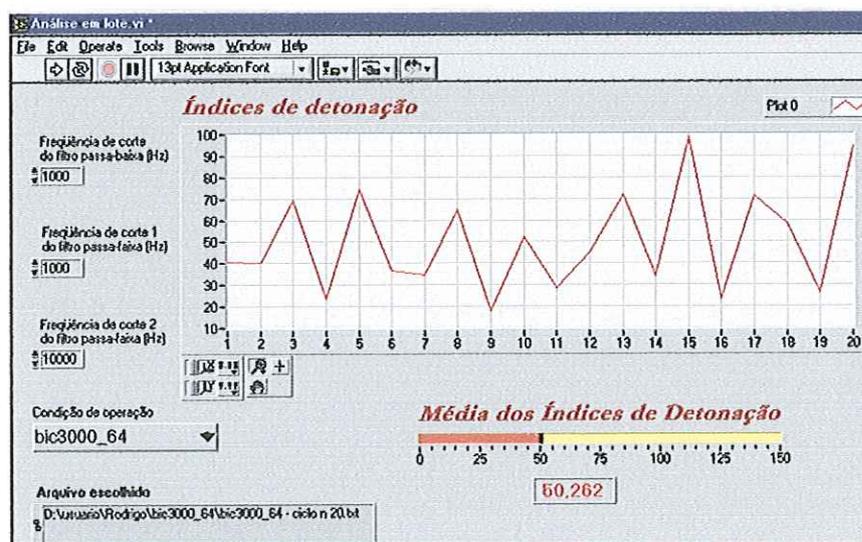


Figura 40: índice de detonação do diesel com adição de etanol.

A análise das Figuras 39 e 40 mostra que a adição de 50% de etanol, no coletor de admissão, aumentou o índice de detonação em cerca de 17% para diesel. Isto confere com o apresentado por LICHTY (1951), que afirma que muitos fatores tais como: aumento da temperatura do ar admissão, temperatura do cilindro, sobre-alimentação, e taxa de compressão podem tornar a detonação mais severa nos motores de ignição por centelha e reduzir ou até eliminar a detonação nos motores ciclo Diesel. Combustíveis com alta

qualidade antidetonante usados nos motores ciclo Otto assumem característica contrária quando usados para motores de ignição por compressão. A injeção indireta do etanol reduz portanto a temperatura da mistura admitida, aumentando o tempo de retardo da ignição favorecendo o aumento da detonação.

O mesmo comportamento apresentado pela adição de etanol no diesel aconteceu com as misturas B10, B20 e com o B100, mostrados nas Figuras 41 a 46.

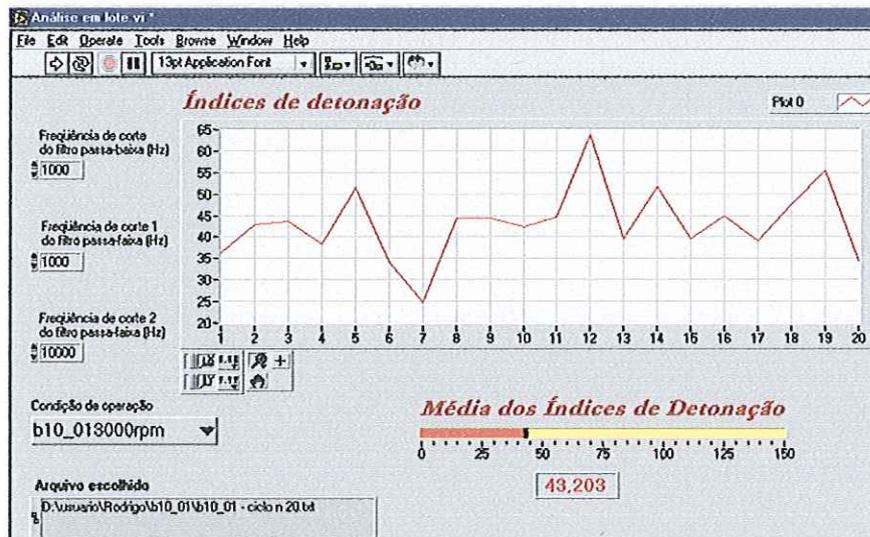


Figura 41: índice de detonação do B10, sem a adição de etanol.

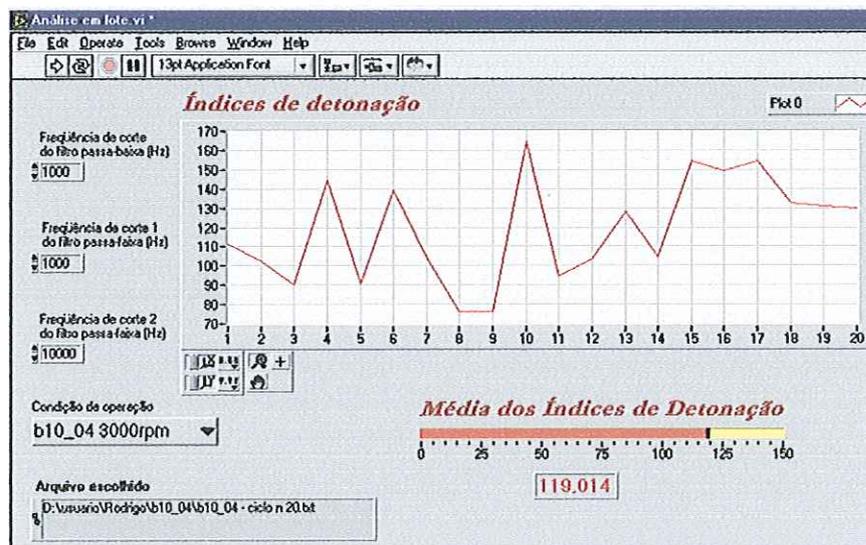


Figura 42: índice de detonação do B10, com a adição de etanol.

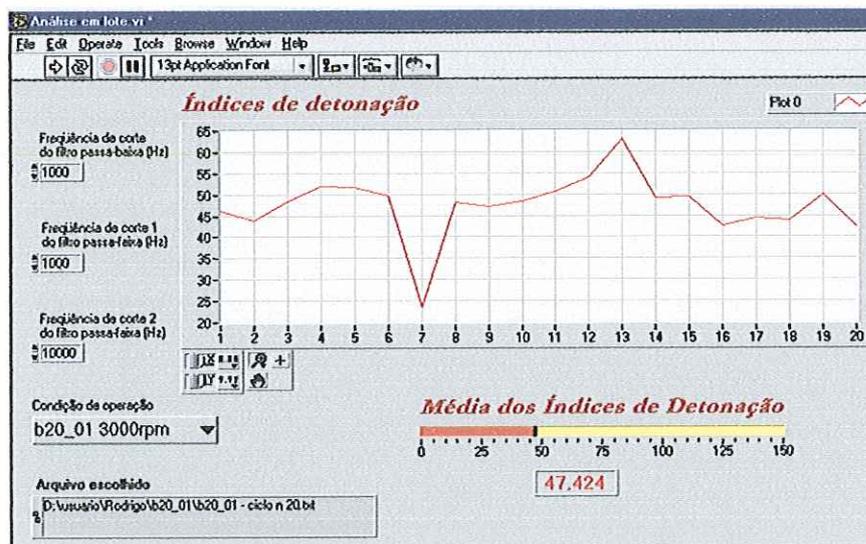


Figura 43: índice de detonação do B20, sem a adição de etanol.

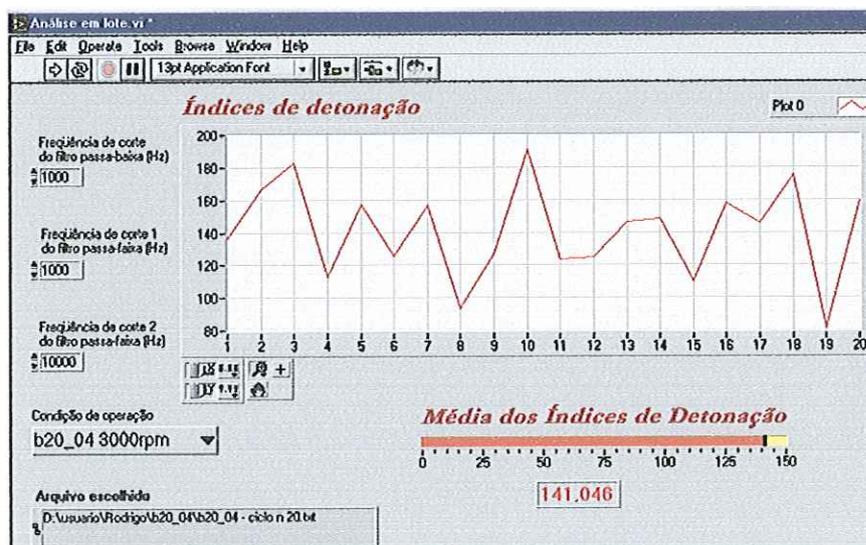


Figura 44: índice de detonação do B20, com a adição de etanol.

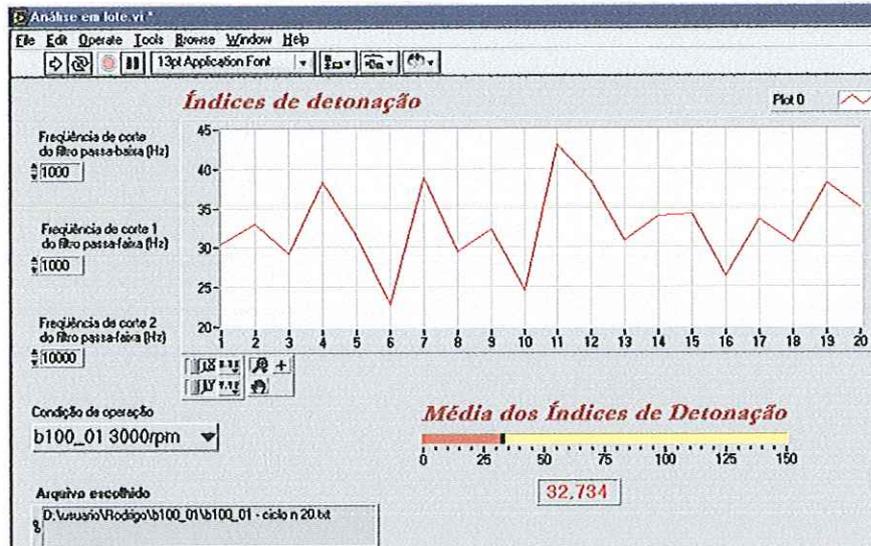


Figura 45: índice de detonação do B100, sem a adição de etanol.

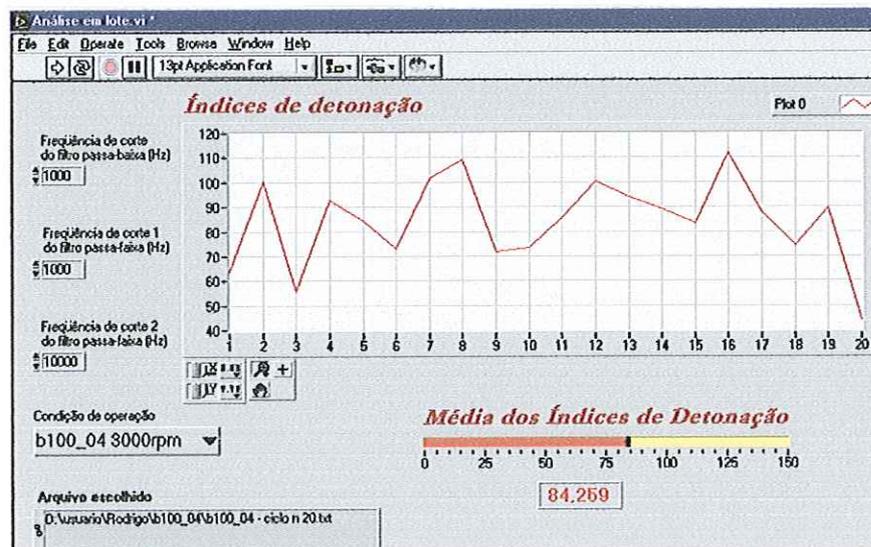


Figura 46: índice de detonação do B100, com a adição de etanol.

As Figuras 41 a 46 mostram que a adição de etanol aumentou o índice de detonação cerca de 2,7 vezes para a mistura B10, 3 vezes para o B20 e 2,5 vezes para o B100.

O combustível que apresentou a maior média do índice de detonação, com a adição de etanol foi o B20. Isto pode ser explicado pelo fato desta mistura ter apresentado o maior potencial detonante (47,424) das três misturas, ainda sem etanol. Esta adição, potencializou ainda mais a tendência à detonação da mistura B20. Justifica-se que a injeção do etanol diminuiu a temperatura da mistura fresca, pela sua vaporização, melhorando o rendimento

térmico que por consequência aumentou a potência. Esse mesmo comportamento ALI et al. (1995), também observaram, mas demonstraram que há um limite para tal, onde para misturas com 30% ou mais de biodiesel a potência já cai substancialmente, atribuindo-se este efeito à menor energia presente nestas misturas comparada ao diesel.

Analisando ainda as figuras, nota-se que sem a adição de etanol, o combustível menos susceptível a detonação foi o B100. Pode-se notar também que o combustível que sofreu menor influência da adição de etanol foi o diesel.

Outra constatação tirada das figuras é que, na média dos 20 ciclos amostrados, o B20 e o B10 obtiveram um índice de detonação maior que o do diesel: 47 para o B20, 43 para o B10 e 42 para o diesel. Esta ordem não foi a mesma mostrada no item anterior, onde o ciclo do diesel mostrou maior índice de detonação, seguido do B20, B100 e B10. A explicação para este fato está na escolha de um único ciclo de pressão utilizado na análise da liberação de calor, que seguiu um critério onde se optava por um ciclo com um valor médio de pico de pressão representativo de toda a amostra. Este tipo de escolha garantia que a análise seria realizada sobre um ciclo original, eliminando todos os amortecimentos na curva de pressão que seriam gerados na construção de um ciclo médio através de um programa qualquer que o construísse. Então o ciclo escolhido apresentou um valor do índice de detonação diferente do valor médio, mostrado nas figuras acima. Por exemplo, o valor do índice médio de detonação dos ciclos do diesel foi de 42,87, e a curva de pressão escolhida para a análise de liberação de calor deste combustível foi a 19ª entre as 20 amostradas. Esta curva apresentou um valor do índice de detonação de 55 (ver Figura 39), ou seja, acima do valor médio do índice. No caso do B10, a curva escolhida tinha um índice de detonação de 34, contra um valor médio de 43; para o B20, a curva escolhida teve um índice de 44, enquanto seu valor médio foi de 47; já o B100 que teve um valor médio de 32, apresentou um índice de 37 na curva escolhida.

Para ilustrar isto, a Figura 47 mostra a liberação de calor para o diesel utilizando dois ciclos de pressão diferentes, ambos com um valor aproximado de pico, porém com índices de detonação diferentes (um com índice 55 e outro 43). Analisando a figura é possível observar-se que, sem a adição de etanol, com menor índice de detonação houve menor liberação de calor.

Outra constatação a ser feita analisando os resultados, é que, dependendo do valor do índice de detonação, este tem influência positiva ou negativa na liberação de calor, ou seja, até um determinado valor do índice, a detonação auxilia no aumento da liberação de calor e além deste valor, a detonação diminui a liberação de calor.

É importante salientar aqui que, apesar de a detonação ter aumentado com substituição parcial de diesel por etanol, estes valores não foram significativos, uma vez que o fenômeno não era sequer audível. Isto mostra a relevância deste sistema de detecção da detonação, desenvolvido por SANCHES (2002), que consegue detectar o fenômeno antes que o mesmo seja audível, o que permite um controle mais eficiente evitando danos ao motor causados pela detonação.

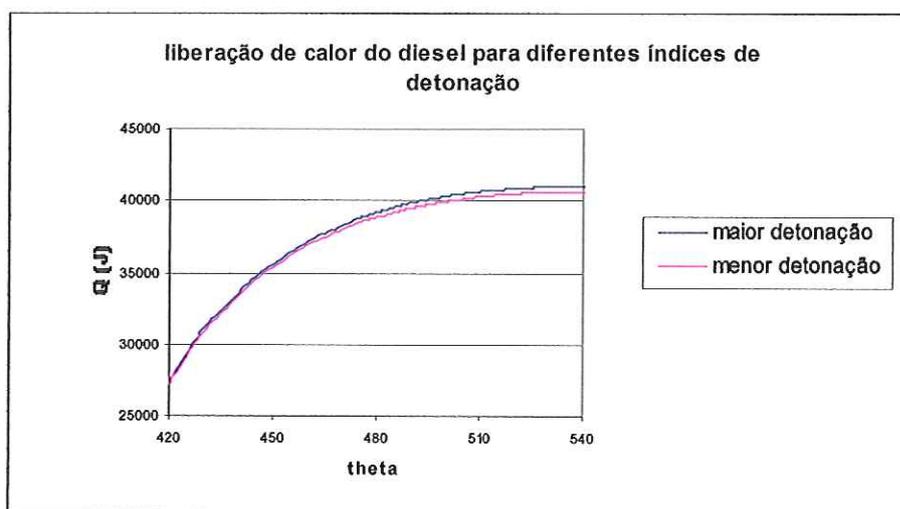


Figura 47: liberação de calor do diesel para diferentes índices de detonação.

SANCHES (2002) desenvolveu dois programas de análise de detonação (bibliotecas do *LabVIEW*<sup>®</sup>, que se constituem do(s) programa(s) principal(is) e sub-programas utilizados). O programa principal é baseado num algoritmo que efetua o cálculo do índice de detonação. Um deles calcula o índice de detonação de um único ciclo, enquanto o outro tem por objetivo o cálculo em lote dos índices de um conjunto de ciclos. O índice de detonação está relacionado com a energia do sinal em uma faixa de frequências definida pelo usuário, e é calculado como a integral do espectro de potência do sinal da pressão entre as frequências de corte do filtro passa-faixa.

O programa principal referido acima lê os dados de pressão em formato ASCII, previamente gravados pelos programas de tratamento inicial dos dados, e calcula um parâmetro indicativo da intensidade da detonação. Mostra gráficos do sinal de pressão adquirido e deste sinal processado por filtros, para eliminação de ruídos e para visualização das oscilações de pressão decorrentes da detonação (saída do filtro passa-faixa). Além disso, mostra o gráfico espectro de potência dos sinais filtrados e o valor calculado indicativo da intensidade de detonação.

## 8.7 Emissões

O motor de combustão interna é, atualmente, uma das principais fontes de poluição do ar. Os gases de exaustão destes motores, resultantes da queima da mistura ar-combustível, contém, entre outros, óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos (HC) não queimados ou parcialmente queimados. Existem outros gases resultantes da queima, porém estes citados são os que causam maiores danos ao meio ambiente e, conseqüentemente, à saúde. As quantidades relativas de cada gás dependem do tipo e das condições de operação de cada motor.

A seguir serão mostradas as emissões de HC, CO e  $\text{NO}_x$  obtidas nos ensaios realizados neste trabalho, sempre comparando o diesel com o biodiesel, com e sem a substituição em torque por etanol injetado no coletor de admissão do motor.

### 8.7.1 Emissões de Hidrocarbonetos – HC

Este grupo de poluentes é um dos mais difíceis de ser caracterizado devido à abundância de componentes que pode possuir. Aproximadamente 400 compostos orgânicos são identificáveis na exaustão de veículos, variando, em termos de toxicidade, desde substâncias atóxicas, como o metano, até aquelas altamente tóxicas, como o 4-hidroxibifenil (SHER, 1998). Existem cinco principais fontes de hidrocarbonetos em motores de ignição por compressão:

- 1) Queima incompleta nas regiões onde a mistura ar/combustível é extremamente pobre, muito além do limite de inflamabilidade;
- 2) Queima incompleta nas regiões onde a mistura ar/combustível é extremamente rica, muito além do limite de inflamabilidade;
- 3) penetração excessiva do combustível na câmara de combustão, resultando no impacto de gotículas de combustível com as paredes do cilindro;
- 4) redução repentina das reações de oxidação por resfriamento da mistura durante o processo de expansão;
- 5) vazamento de combustível pelos bicos após o término da injeção.

Nos motores de ignição por compressão (ICO), a primeira fonte é a mais significativa para marcha lenta e para baixas cargas, onde a mistura é excessivamente pobre. Emissões geradas por este tipo de fonte podem ser reduzidas diminuindo-se o atraso de ignição da mistura; isto ocorre conforme a carga aumenta, resultando em uma combustão mais limpa. Avanço no momento da injeção aumenta a temperatura e pressão no interior do cilindro, reduzindo a emissão de HC.

A segunda causa de emissão de HC é a superalimentação de combustível ou a mistura inadequada deste com o ar; com oxigênio disponível insuficiente, parte do combustível não irá oxidar totalmente, resultando em liberação de fumaça preta.

A penetração excessiva do combustível, mais influente em motores com cilindros de pequenos diâmetros, contribui para o aumento da emissão de HC, pois o combustível que se adere as paredes não queima.

O resfriamento excessivo da mistura tem contribuição significativa apenas sob condições específicas de operação do motor.

Finalmente, combustível pode ser retido nos furos do injetor após o término da injeção. Este entra na câmara tardiamente no ciclo, resultando em queima incompleta e aumento da emissão de HC.

Com relação aos motores que admitem misturas de ar e combustível pelo coletor de admissão (motores de ignição por centelha), pode-se ainda destacar outras fontes:

- resfriamento ou extinção da chama nas proximidades das paredes da câmara de combustão;
- extinção da chama nos espaços entre anéis, cilindro e pistão;

No primeiro caso, ao expandir-se pela câmara de combustão, a frente de chama encontra uma camada extremamente fina de gás adjacente às paredes (entre 0,05 e 0,4 mm de espessura). Nesta, as reações de oxidação são reduzidas e a chama se extingue, não queimando completamente a mistura de ar e vapor de combustível contida neste volume.

No segundo caso, ar e vapor de combustível retidos nos espaços entre anéis, cilindro e pistão não são queimados pois a chama é impedida de entrar nestas estreitas entradas. Esta seria a maior fonte de HC em motores de ignição por centelha.

O sistema de alimentação utilizado neste trabalho, envolve processos de admissão de combustível característico de motores de ignição por centelha e por compressão, logo a emissão de hidrocarbonetos parcialmente queimados e/ou não queimados tem característica de emissões associadas aos dois tipos de motores.

A Figura 48 mostra as emissões de hidrocarbonetos do diesel e do biodiesel em função da rotação do motor. E a Figura 49 mostra as emissões de HC do biodiesel sem e com a substituição de 20%, 35% e 50% da mistura por etanol.

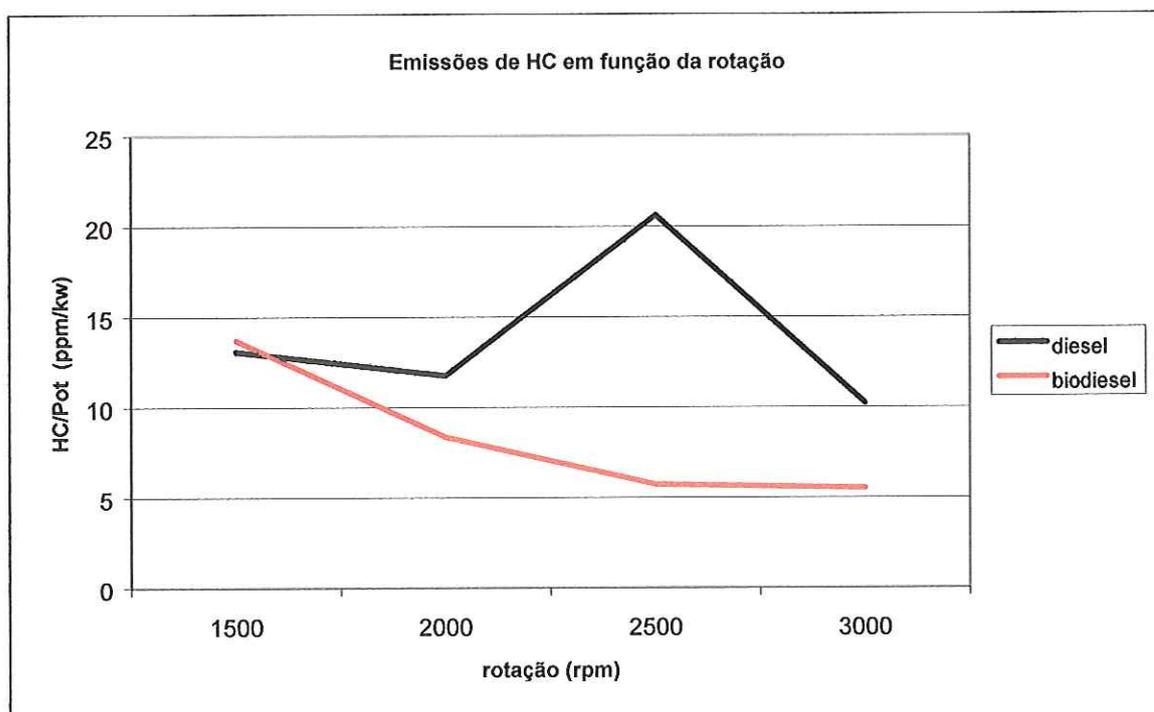


Figura 48: Emissões de HC do diesel e do biodiesel em função da rotação.

Analisando-se a Figura 48 pode-se ver claramente que a emissão de hidrocarbonetos caiu substancialmente quando o motor operou com biodiesel, chegando a 72% em regime de 2500 rpm (média de 36%). Isto se deve ao fato de que o biodiesel contém oxigênio em suas moléculas, o que melhora o processo de combustão fazendo com que sobre menos combustível não queimado na câmara, tornando a combustão mais completa. Somente no regime de 1500 rpm observa-se que há uma ligeira desvantagem do biodiesel em relação ao diesel. Isto se deve ao fato de, nesta situação, a maior viscosidade do biodiesel (item



4.3.1<sup>20</sup>), influenciou mais significativamente o processo de combustão, pois, por ser mais viscoso que o óleo diesel, produz gotas de maior diâmetro que atingem as paredes dos cilindros, extinguindo a chama.

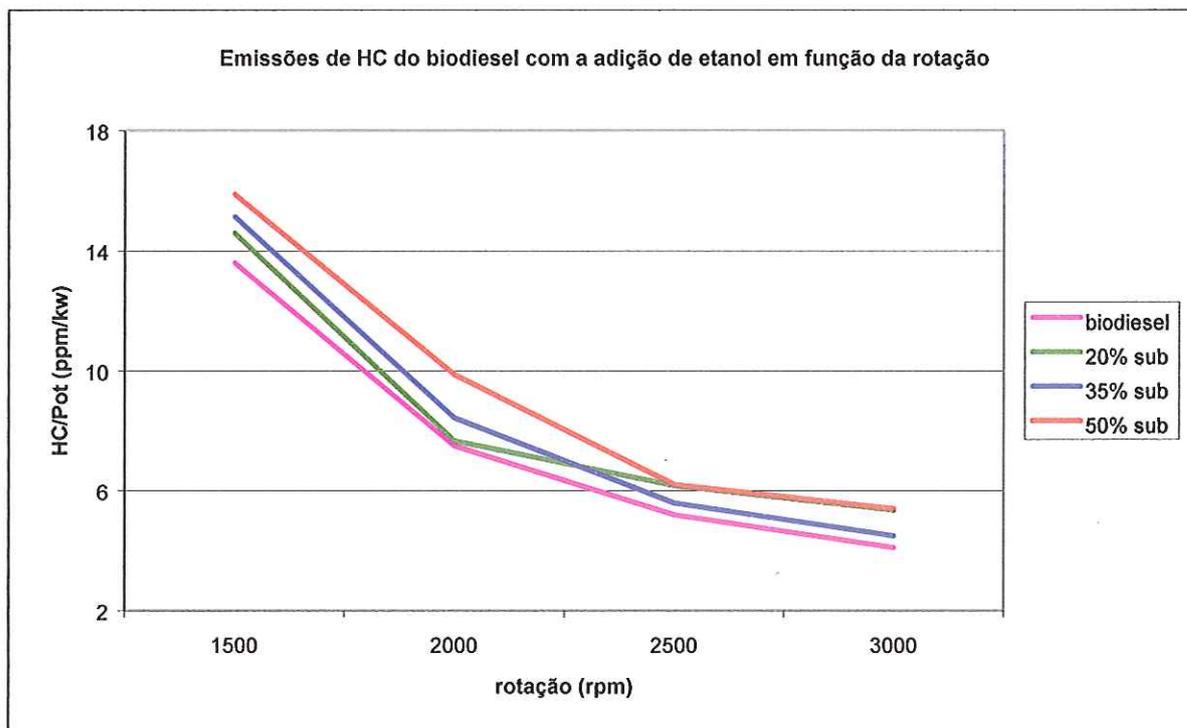


Figura 49: emissões de HC do Biodiesel sem e com a substituição por etanol.

A Figura 49 mostra que com a substituição do biodiesel por etanol, equivalente a 20, 35 e 50% do torque, observa-se uma elevação na emissão de HC, chegando à 32% entre o biodiesel sem etanol e com 50% de substituição, nos regimes de operação de 2000 e 3000 rpm (média de 25% entre estes dois combustíveis). Isto se explica pelo grande resfriamento da mistura ar-combustível e pelo fato de que parte da carga introduzida no processo de admissão ocupa os espaços estreitos tais como aqueles entre anéis, pistão e cilindro, onde a frente de chama se extingue como acontece nos motores de ignição por centelha.

<sup>20</sup> O biodiesel utilizado neste trabalho apresentou uma viscosidade de 5,4 mm<sup>2</sup>/s e o diesel 4,9 mm<sup>2</sup>/s.

### 8.7.2 Emissões de Monóxido de Carbono - CO

Em motores de combustão interna, as emissões de monóxido de carbono (CO) são controladas, principalmente, pela razão ar/combustível.

A concentração de CO aumenta prontamente com a diminuição da razão de equivalência (enriquecimento da mistura). O contrário acontece quando a mistura é empobrecida, tendendo a valores próximos a zero quando a razão de equivalência é maior que 1.

Como os motores de ignição por centelha geralmente operam em condições próximas à estequiométrica em cargas parciais, e com misturas ricas para plena carga, os níveis de emissões de CO são relativamente altos e devem ser controlados; por outro lado, em motores de ignição por compressão, a emissão de CO é baixa o suficiente para ser considerada menos crítica, isto porque os motores do ciclo Diesel trabalham com misturas muito pobres resultando em valores de emissões muito baixos.

A Figura 50 mostra as emissões de monóxidos de carbono do diesel e do biodiesel em função da rotação do motor. E a Figura 51 mostra as emissões de CO do biodiesel sem e com a substituição de 20, 35 e 50% do combustível por etanol.

A Figura 50 mostra que a emissão de monóxidos de carbono pelo motor funcionando com o biodiesel é bem inferior aquela emissão apresentada pelo motor funcionando com óleo diesel, chegando a apresentar uma queda de 75% no regime de 2500 rpm, com uma média geral de 63% de redução. Isto pode ser explicado pelo fato da molécula de biodiesel conter átomos de oxigênio em sua composição, o que contribui para um processo de combustão mais eficaz.

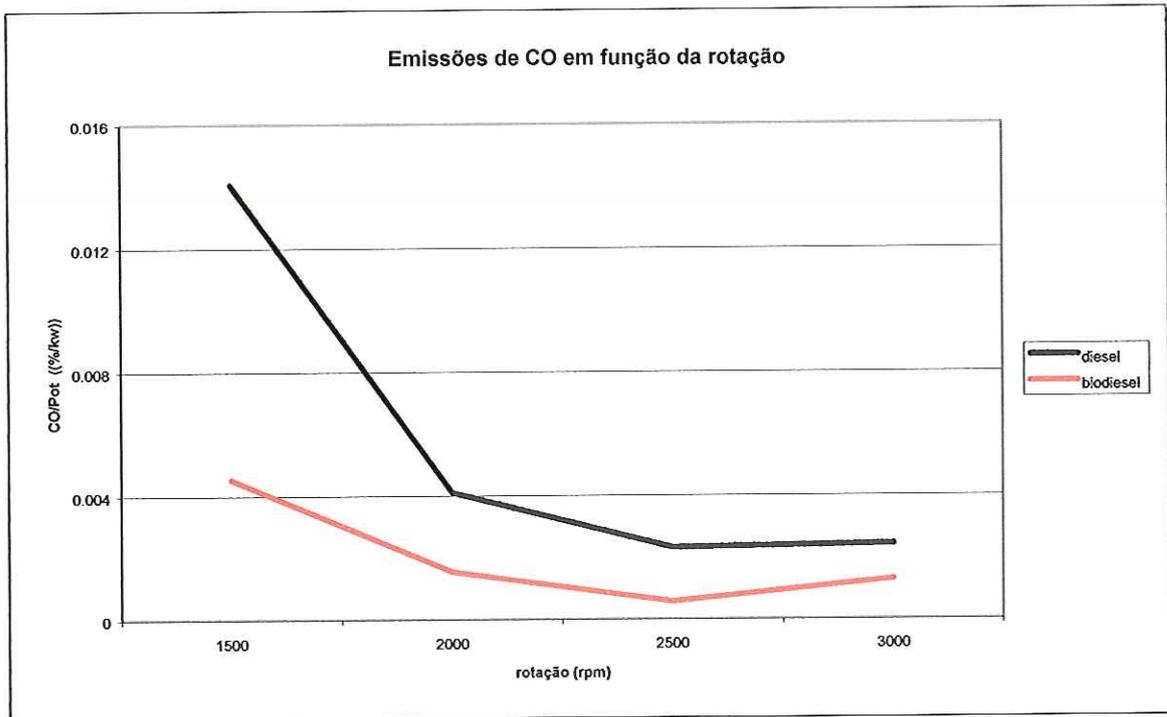


Figura 50: Emissões de CO do diesel edo Biodiesel em função da rotação.

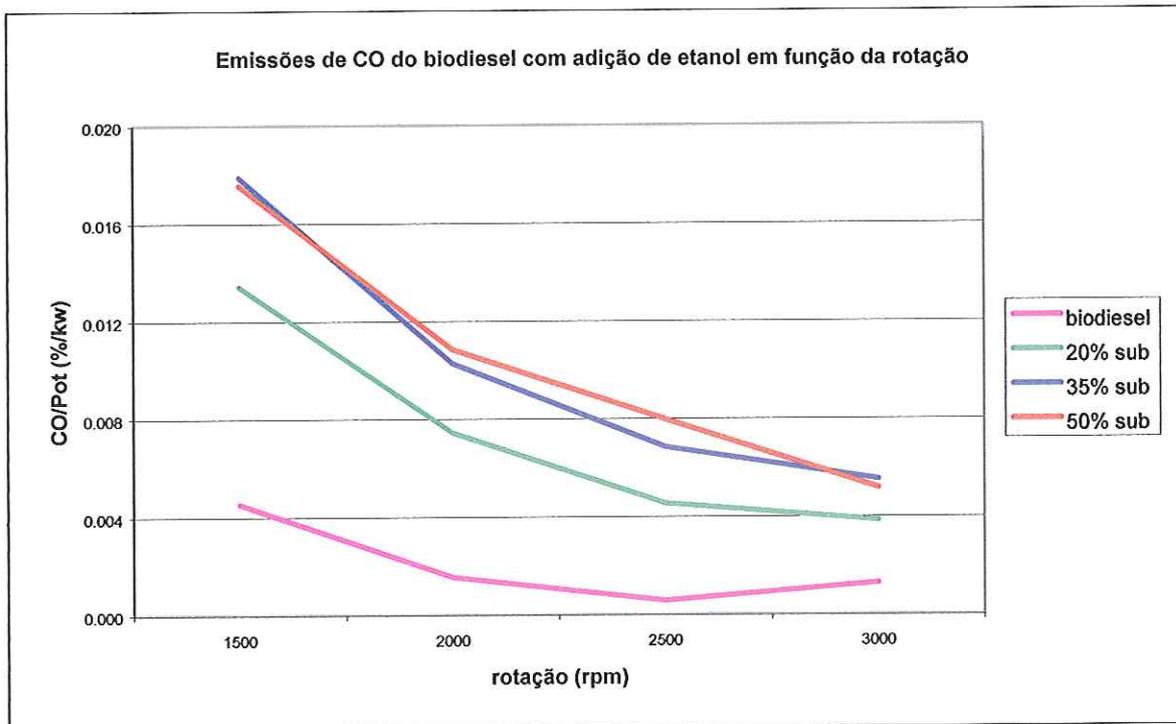


Figura 51: emissões de CO do Biodiesel sem e com a substituição de 20%, 35% e 50% da mistura por etanol.

A Figura 51 mostra que a adição de etanol ao biodiesel fez com que aumentassem em até 13 vezes as emissões de CO (no caso de 50% de substituição por etanol, em 2500 rpm), obtendo uma média de 7 vezes mais emissões com a adição de etanol. Isto pode ser explicado uma vez que o motor quando operava com a adição de etanol no coletor de admissão apresentava uma redução na temperatura da carga e trabalhava com uma relação ar/combustível em geral bem mais rica, o que leva a um aumento nas emissões de CO. Apesar do aumento da emissão de CO ser considerável, ainda está abaixo dos valores encontrados em motores de ignição por centelha, os quais, por trabalharem com misturas próximas da estequiométrica ou levemente ricas, apresentam emissões de CO superiores a 1% (o máximo emitido pelo biodiesel foi 0,08% em 1500 rpm).

De acordo com a literatura específica da área, a adição de etanol no coletor de admissão de um motor de ignição por compressão realmente faz com que se aumente a emissão de CO (FEITOSA, 2003).

### 8.7.3 Emissões de Óxidos de Nitrogênio – NO<sub>x</sub>

Apesar do óxido nítrico (NO) e do dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>) estarem normalmente agrupados na forma de emissão de óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), NO tem produção predominante no interior do cilindro. A principal fonte deste poluente é a oxidação de nitrogênio molecular da atmosfera; contudo, se o combustível contém nitrogênio, uma fonte adicional de NO é produzida durante a queima do mesmo. O mecanismo aceito para a formação deste poluente sugere que ocorra em uma combustão nas proximidades da razão estequiométrica (FEITOSA, 2003).

As reações de equilíbrio químico relacionadas à formação de NO<sub>2</sub> indicam que, para os gases queimados, sob as temperaturas normais de chama em motores de combustão interna, a razão NO<sub>2</sub>/NO é extremamente pequena. Enquanto dados experimentais mostram que isto é verdadeiro para motores de ignição por centelha, em motores diesel a emissão de NO<sub>2</sub> pode representar de 10 a 30% da emissão total de óxidos de nitrogênio.

O período crítico de formação ocorre quando a temperatura dos gases queimados é máxima, isto é, entre o início da combustão e logo após a ocorrência do pico de pressão.

Misturas que são queimadas logo no início do processo de combustão são comprimidas a uma maior temperatura, aumentando a taxa de formação de NO conforme a combustão continua e a pressão no cilindro aumenta. Após o pico de pressão, a temperatura dos gases queimados diminui, conforme se expandem. Esta redução de temperatura, que também pode ser provocada por diluição com mistura mais fria, causa redução das reações de formação de NO e de decomposição de NO<sub>2</sub>.

A Figura 52 mostra as emissões de óxidos de nitrogênio do diesel e do biodiesel em função da rotação do motor. E a Figura 53 mostra as emissões de NO<sub>x</sub> do B100 sem e com a substituição de 20, 35 e 50% do biodiesel por etanol.

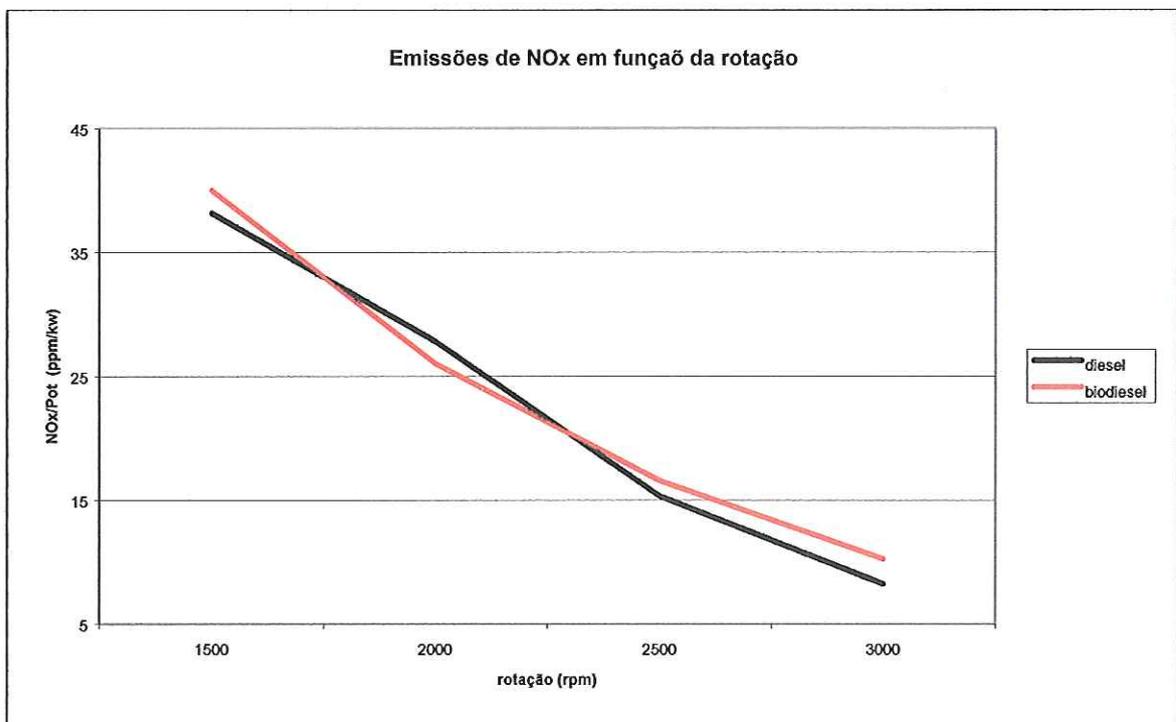


Figura 52: Emissões de NO<sub>x</sub> do diesel e Biodiesel em função da rotação.

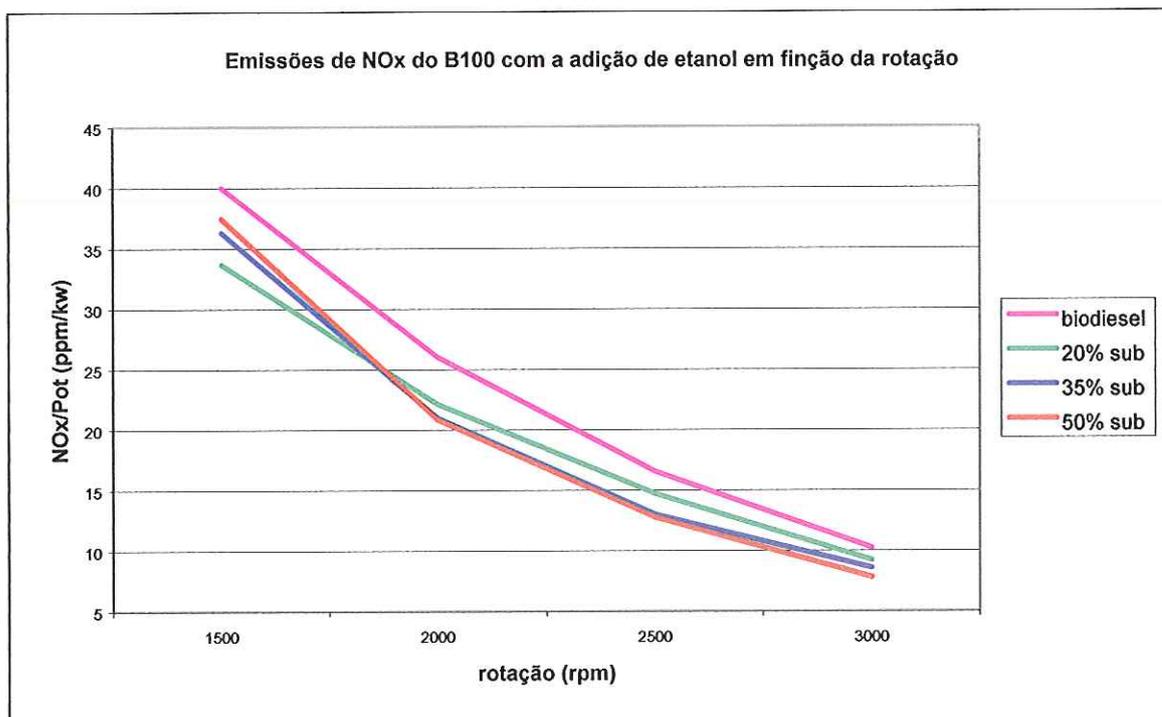


Figura 53: emissões de NO<sub>x</sub> do Biodiesel sem e com a substituição de 20%, 35% e 50% da mistura por etanol.

Analisando-se a Figura 52, pode-se observar que as emissões de NO<sub>x</sub> do diesel e do biodiesel são pouco diferentes. No geral, com exceção do regime de 2000 rpm onde o diesel emitiu 6,5% a mais de NO<sub>x</sub>, o biodiesel emitiu mais óxidos de nitrogênio (7,7% na média geral em todos os regimes de operação, chegando a 24% em 3000 rpm). CANAKCI & VAN GERPEN (2001), ALVES FILHO (2003) e LAFORGIA & ARDITO (1995), entre outros, dizem que a emissão de NO<sub>x</sub> para o biodiesel é maior do que para o diesel. Apesar de ter emitido mais NO<sub>x</sub> que o diesel na maior parte dos ensaios, essa variação não é tão grande, o que mostra que esta "desvantagem" do biodiesel não é tão evidente a ponto de se sugerir a não utilização deste combustível em motores de ignição por compressão.

Já a Figura 53 mostra que a adição de etanol através do coletor de admissão, no motor movido com o biodiesel (B100), fez com que diminuíssem as emissões de NO<sub>x</sub>, chegando a 23% de redução no caso de 50% de substituição por etanol em 3000 rpm, com uma média de 18% em todos os regimes de operação entre estes dois combustíveis. O resfriamento causado pela vaporização do etanol no coletor de admissão implica em redução equivalente da temperatura em todos os pontos do ciclo termodinâmico, reduzindo

a velocidade de formação de NO, provavelmente implicando em mesmo efeito de redução causado pelo uso de intercooler. Outro fator que influenciou positivamente a redução de emissão de NO<sub>x</sub> foi a melhor eficiência de conversão térmica apresentada pelo motor, tal como foi visto no item 8.2.

## 9. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados mostrados no trabalho são apresentadas algumas conclusões.

A adição de biodiesel aumentou a potência para as misturas B10 e B20, chegando a 7,5% de ganho para o B20 em relação ao diesel. Já para a mistura B100, a potência caiu abaixo da obtida somente com diesel. Este comportamento confere com o apresentado por ALI et al. (1995), que obtiveram um aumento de potência para misturas de 10 e 20% de biodiesel metílico de soja com 80% de diesel, e para misturas com a porcentagem de biodiesel acima de 20% houve uma queda da potência.

Considerando que o motor de ignição por compressão trabalha com excesso de ar, aproveitou-se a oportunidade para se fazer uma investigação rápida de quanto de potência é possível ser obtido a mais adicionando-se etanol pelo coletor de admissão. Observou-se que desse modo é possível obter-se cerca de 30% a mais de potência em relação ao motor operando somente com diesel, limite no qual os gases de escape começam a apresentar uma cor esbranquiçada e o motor dar sinal de estar muito solicitado.

As misturas B10, B20 e B100 obtiveram um melhor rendimento térmico que o diesel e a condição que deu maior rendimento térmico na situação sem etanol foi a de 2000 rpm para o B10 e o B20, e 1500 rpm para o B100 e o diesel. Na maioria dos testes realizados, houve aumento no rendimento térmico do motor com a substituição parcial do diesel ou biodiesel pelo etanol. Estes resultados conferem com os apresentados por FEITOSA (2003).

O B100 foi o combustível que apresentou o maior consumo específico, o que já era esperado, já que o consumo mássico dos combustíveis foi semelhante e foi usando este

combustível que o motor produziu a menor potência. A substituição de diesel, B10, B20 ou B100 por etanol aumentou o consumo específico do combustível para as condições de 1500, 2000 e 2500 rpm, e chegou a diminuir em alguns pontos para 3000 rpm. O aumento do consumo específico nos primeiros casos pode ser explicado pela diferença dos poderes caloríficos dos combustíveis. Para o caso da condição de 3000 rpm, o incremento dado pela substituição do diesel ou biodiesel pelo etanol na potência foi mais significativo que o causado no consumo mássico total do motor.

O combustível que gerou a maior pressão dentro da câmara de combustão foi a mistura B20, seguida da B10, do diesel e, finalmente, a mistura B100. Esta seqüência é a mesma da mostrada na potência do motor utilizando estes combustíveis. A substituição de diesel por etanol fez com que diminuísse o primeiro pico de pressão e aumentasse o segundo. Isto indica que uma maior parte do combustível está sendo queimada após o ponto morto superior. Essa aproximação do segundo pico de pressão ao PMS resulta em melhorias no rendimento térmico do motor. O mesmo comportamento ocorreu com o B10, B20 e B100.

O diesel teve uma taxa de liberação de calor ligeiramente maior que as misturas de biodiesel, seguido pelo B20, B100 e pelo B10. Um fato que contribuiu para o diesel liberar mais calor, mesmo não tendo sido o combustível que gerou maiores picos de pressão na câmara de combustão, é explicado pela taxa de variação da pressão em função do ângulo de girabrequim  $dP/d\theta$ , que no caso deste combustível atingiu valores com amplitudes pontuais maiores que os apresentados pelas misturas B10, B20 e B100. Isto influenciou positivamente no resultado da equação 15, elevando a taxa de liberação de calor do diesel. Outro fato a se destacar é que a região que apresenta maior taxa de liberação de calor encontra-se após aos 30° depois do PMS. Nesta região a pressão gerada dentro da câmara de combustão pelo B10 foi a menor entre os combustíveis, e a do diesel e do B20 foram as maiores.

A substituição parcial de diesel por etanol diminuiu a liberação de calor durante a combustão. Um fator que contribuiu para essa queda na liberação de calor foi que a pressão após os 30° depois do PMS foi menor com a adição de etanol. O baixo poder calorífico do etanol também contribuiu para a queda na liberação de calor. O mesmo ocorreu com a substituição parcial do B10, B20 e B10o por etanol.

A adição de 50% de etanol, no coletor de admissão, aumentou o índice de detonação em cerca de 17% para diesel, cerca de 2,7 vezes para a mistura B10, 3 vezes para o B20 e 2,5 vezes para o B100. Isto confere com o apresentado por LICHTY (1951), que afirma que muitos fatores tais como: aumento da temperatura do ar admissão, temperatura do cilindro, sobre-alimentação, e taxa de compressão podem tornar a detonação mais severa nos motores de ignição por centelha e reduzir ou até eliminar a detonação nos motores ciclo Diesel. Combustíveis com alta qualidade antidetonante usados nos motores ciclo Otto assumem característica contrária quando usados para motores de ignição por compressão. A injeção indireta do etanol reduz portanto a temperatura da mistura admitida, aumentando o tempo de retardo da ignição favorecendo o aumento da detonação.

A emissão de hidrocarbonetos caiu substancialmente quando o motor operou com biodiesel no lugar do diesel, chegando a 72% em regime de 2500 rpm (média de 36%). Isto se deve ao fato de que o biodiesel contém oxigênio em suas moléculas, o que melhora o processo de combustão fazendo com que sobre menos combustível não queimado na câmara, tornando a combustão mais completa. Somente no regime de 1500 rpm observa-se que há uma ligeira desvantagem do biodiesel em relação ao diesel. Isto se deve ao fato de, nesta situação, a maior viscosidade do biodiesel influenciou mais significativamente o processo de combustão, pois, por ser mais viscoso que o óleo diesel, produz gotas de maior diâmetro que atingem as paredes dos cilindros, extinguindo a chama.

Com a substituição do biodiesel por etanol, equivalente a 20, 35 e 50% do torque, observa-se uma elevação na emissão de HC, chegando à 32% entre o biodiesel sem etanol e com 50% de substituição, nos regimes de operação de 2000 e 3000 rpm (média de 25% entre estes dois combustíveis). Isto se explica pelo grande resfriamento da mistura ar-combustível e pelo fato de que parte da carga introduzida no processo de admissão ocupa os espaços estreitos tais como aqueles entre anéis, pistão e cilindro, onde a frente de chama se extingue como acontece nos motores de ignição por centelha.

A emissão de monóxidos de carbono pelo motor funcionando com o biodiesel é bem inferior aquela emissão apresentada pelo motor funcionando com óleo diesel, chegando a apresentar uma queda de 75% no regime de 2500 rpm, com uma média geral de 63% de redução. Isto pode ser explicado pelo fato da molécula de biodiesel conter átomos de oxigênio em sua composição, o que contribui para um processo de combustão mais eficaz.

A adição de etanol ao biodiesel fez com que aumentassem em até 13 vezes as emissões de CO (no caso de 50% de substituição por etanol, em 2500 rpm), obtendo uma média de 7 vezes mais emissões com a adição de etanol. Isto pode ser explicado uma vez que o motor quando operava com a adição de etanol no coletor de admissão apresentava uma redução na temperatura da carga e trabalhava com uma relação ar/combustível em geral bem mais rica, o que leva a um aumento nas emissões de CO. Apesar do aumento da emissão de CO ser considerável, ainda está abaixo dos valores encontrados em motores de ignição por centelha, os quais, por trabalharem com misturas próximas da estequiométrica ou levemente ricas, apresentam emissões de CO superiores a 1% (o máximo emitido pelo biodiesel foi 0,08% em 1500 rpm).

Quanto às emissões de NO<sub>x</sub>, há pouca diferença entre o diesel e o biodiesel. No geral, com exceção do regime de 2000 rpm onde o diesel emitiu 6,5% a mais de NO<sub>x</sub>, o biodiesel emitiu mais óxidos de nitrogênio (7,7% na média geral em todos os regimes de operação, chegando a 24% em 3000 rpm). CANAKCI & VAN GERPEN (2001), ALVES FILHO (2003) e LAFORGIA & ARDITO (1995), entre outros, dizem que a emissão de NO<sub>x</sub> para o biodiesel é maior do que para o diesel. Apesar de ter emitido mais NO<sub>x</sub> que o diesel na maior parte dos ensaios, essa variação não é tão grande, o que mostra que esta "desvantagem" do biodiesel não é tão evidente a ponto de se sugerir a não utilização deste combustível em motores de ignição por compressão.

A adição de etanol através do coletor de admissão, no motor movido com o biodiesel (B100), fez com que diminuíssem as emissões de NO<sub>x</sub>, chegando a 23% de redução no caso de 50% de substituição por etanol em 3000 rpm, com uma média de 18% em todos os regimes de operação entre estes dois combustíveis. O resfriamento causado pela vaporização do etanol no coletor de admissão implica em redução equivalente da temperatura em todos os pontos do ciclo termodinâmico, reduzindo a velocidade de formação de NO, provavelmente implicando em mesmo efeito de redução causado pelo uso de intercooler. Outro fator que influenciou positivamente a redução de emissão de NO<sub>x</sub> foi a melhor eficiência de conversão térmica apresentada pelo motor, tal como foi visto no item 8.2.

## 10. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A fim de que a linha deste trabalho tenha continuidade, são apresentadas algumas sugestões para desenvolvimentos e pesquisas futuros.

- Fazer um estudo sobre a liberação de calor em um motor ICO operando com diferentes misturas de diesel e biodiesel, utilizando modelagem multidimensional para simulação de equações numéricas;
- Fazer um estudo comparativo sobre a combustão em motores ICO de injeção direta e indireta de combustível;
- Estudar o desempenho do motor operando com misturas de diesel e biodiesel, utilizando mais de uma variedade deste combustível (vários tipos de oleaginosas), usando inclusive o biodiesel obtido a partir de óleo residual de frituras;
- Realizar um estudo sobre a viabilidade econômica da substituição parcial ou total do diesel por biodiesel;
- Investigar o percentual máximo de adição de etanol via coletor de admissão em um motor ICO operando com misturas de diesel e biodiesel, visando-se obter a máxima potência, preservando-se a vida útil do motor.

## 11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIOVE - Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais. (2003).  
<http://www.abiove.com.br>

ALI, Y.; HANNA, M. A.; BORG, J. E. (1996). "Effect of alternative diesel fuels on heat release curves for Cummins N14-410 diesel engine". Transactions of the ASAE, vol. 39 (2), pág. 407-41.

ALI, Y.; HANNA, M. A.; LEVITICUS, L. I. (1995). "Emissions and power characteristics of diesel engines on methyl soyate and diesel fuel blends". Bioresource Technology 52, pág. 185-195.

ALKIDAS, A. C. (1986). "The influence of partial suppression of heat rejection on the performance and emissions of a divided chamber diesel engine". SAE Paper 860309.

ALMEIDA, S. C. A. (2001). "Viabilidade técnico-econômica da utilização de biodiesel em motores diesel". XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, p 540-546.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO - ANP (2004). “Dados Estatísticos – Publicações Governamentais – Consultas Públicas”. Ministério de Minas e Energia. <http://www.anp.gov.br/>.

ALVES FILHO, M. (2003). “Biodiesel reduz emissão de poluentes – testes comprovam eficácia de adição de combustível ecológico ao óleo diesel”. Universidade Estadual de Campinas.

BAYLEI, B. et al. (1997). “Diethyl Ether as a renewable diesel fuel”. Society of Automotive Engineers, paper nº 972878.

BRIGHAM, E. O. (1988). “The Fast Fourier Transform and its applications”. Englewood Cliffs, Prentice Hall.

BRACCO, F. V. (1974). “Introducing a new generation of more detailed and informative combustion models”. SAE Paper 741174.

CAMPOS, I. (2003). “Biodiesel e biomassa: duas fontes para o Brasil”. Revista Eco 21, ano 13, edição 80.

CANAKCI, M.; VAN GERPEN, J. H. (2001). “Comparison of Engine Performance and Emissions for Petroleum Diesel Fuel, Yellow Grease Biodiesel, and Soybean Oil Biodiesel”. Paper 016050 – Annual International Meeting. Sacramento, USA.

CHEUNG, H. M.; HEYWOOD, J. B. (1993) “Evaluation of a one-zone burn-rate analysis procedure using production SI engine pressure data”. SAE paper 932749.

CHUN, K. M.; HEYWOOD, J. B. (1987) "Estimating heat-release and mass-of-mixture burned from spark-ignition engine pressure data". *Combustion Science and Technology*. Vol. 54, p. 133-143.

INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO (1984). "Curso de informação sobre combustíveis e combustão". IBP, Rio de Janeiro.

CHRISTENSEN, M.; JOHANSSON, B.; EINEWALL, P. (1997). "Homogeneous charge compression ignition using isooctane, ethanol and natural gas – a comparison with spark ignition operation". Society of Automotive Engineers, paper nº 972874.

ECIRTEC Equipamentos e Acessórios Industriais Ltda (2003). "Biodiesel – história, vantagens, processos, equipamentos, tipos e utilidades". [www.biodiesel.ind.br](http://www.biodiesel.ind.br) - <http://www.ecirtec.com.br/index.htm>

FEITOSA, M.V. (2003). "Desenvolvimento do motor de ignição por compressão alimentado por injeção direta de óleo diesel e por etanol pós-vaporizado no coletor de admissão". Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Carlos, SP

FERGUSON, C. R. (1986). "Internal combustion engines - applied thermo sciences". New York, John Wiley.

FREEDMAN, B.; BUTTERFIELD, R. O.; PRYDE, E. H. (1986). "Transesterification kinetics of soybean oil". *Journal of the American Oil Chemists Society*. Ano 63, nº 1375.

GATOWSKI, J. A.; BALLEZ, E. N.; CHUN, K. M.; NELSON, F. E.; EKCHIAN, J. A.; HEIWOOD, J. B. (1984). "Heat release analysis of engine pressure data". SAE Paper nº 841359.

GONÇALVES, J. A. (2003). "Governo estuda lançamento comercial do biodiesel em 2005". *Agropauta – sítio de jornalismo rural*. [www.agropauta.com.br](http://www.agropauta.com.br).

- HEYWOOD, J. B. (1980). "Engine combustion modeling – an overview". In: MATTAVI, J. N. & AMANN C. A. ed. *Combustion Modeling in Reciprocating Engines*. New York, Plenum Press, p. 1-35.
- HEYWOOD, J. B. (1988). "Internal combustion engines fundamentals". McGraw-Hill. Estados Unidos.
- JOVAV, M. S.; MASLOV, G. S. (1978). "Motores de automóvil – teoria, cálculo y estructura de los motores de combustión interna". Editorial Pueblo y Educación, Havana, Cuba.
- KRIEGER, R. B.; BORMAN, G.L. (1966) "The computation of apparent heat release for internal combustion engines". ASME paper 66-WA/DGP-4.
- LAFORGIA, D.; ARDITO, V. (1995). "Biodiesel fueled IDI engines: performances, emissions and heat release investigation". Instituto di Macchine ed Energetica. Polytechnic of Bari, Italy.
- LICHTY; L.C. (1951). "Internal Combustion engines". McGraw – Hill, Tokio.
- MEIRELLES, F. S. (2003). "Biodiesel". Federação da Agricultura do Estado de São Paulo. Brasília, DF. <http://www.faespsenar.com.br/faesp/economico/EstArtigos/biodiesel.pdf> (set/03).
- MÓDOLO, D. L. (1998). "Desenvolvimento de um modelo matemático para simulação de sistema de injeção para motores do ciclo diesel com bomba rotativa utilizando ester metílico de óleo de soja". Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Carlos, SP.

- NATIONAL BIODIESEL BOARD (1998). "The official site of National Biodiesel Board".  
<http://www.biodiesel.org/>.
- NETO, P. R. C.; ROSSI, L. F. S.; ZAGONEL, G. F.; RAMOS, L. P. (2000). "Produção de biocombustível alternativo ao óleo diesel através da transesterificação de óleo de soja usado em frituras". *Revista Química Nova*, ano 4, vol. 23.
- NIGRO, F. E. B.; TRIELLI, M. A. (1983) "Determinação da razão de liberação de calor durante a combustão de ésteres de óleos vegetais em motores diesel". In: I Simpósio de Engenharia Automotiva. Anais. Brasília.
- NIGRO, R. B.; PIMENTA, M. M. (1994) "Análise de um simulador de motor de combustão interna de ignição por centelha". São Paulo. Trabalho de formatura -- Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- OBERT, E. F. (1971). "Motores de combustão interna". Editora Globo, Porto Alegre.
- PARENTE, J. S. (2003). "Biodiesel – uma aventura tecnológica num país engraçado". TECBIO - Tecnologias Bioenergéticas Ltda. Fortaleza. <http://www.tecbio.com.br>.
- PERALTA, E. G.; BARBOSA, C. R. F.; (2001) "Características de desempenho de um motor diesel funcionando com mistura ternária de combustíveis diesel-álcool-óleo de rícino". XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica. Cobem, pág. 521 a 529.
- PIANOVSKI JR, G. (2002); VELÁSQUEZ, J. A. (2002). "Perspectivas de utilização de biodiesel como substituto parcial do óleo diesel em motores automotivos". IX Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas. Paper CIT02-0053.
- PIANOVSKI JR, G. (2002); VELÁSQUEZ, J. A. (2002). "Análise da liberação de calor durante a combustão de misturas biodiesel/diesel". IX Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas. Paper CIT02-0064.

- POULOS, S.G.; HEYWOOD, J. B. (1983) "The effect of chamber geometry on spark-ignition engine combustion". SAE paper 830334.
- ROTSTEIN, J. (1996). "Brasil século vinte e um". Editora Espaço e Tempo Ltda, Rio de Janeiro.
- SANCHES, A. G. (2001). "Controle ativo de motores a álcool Pré-vaporizado". Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo – São Carlos.
- SAPUAN, S. M.; MASJUKI, H. M.; AZLAN, A. (1996). "The use of palm oil as diesel fuel substitute". Proceedings of Institutional Mechanical Engineers, vol. 210.
- SCHOOL, K. W.; SORENSON, S. C. (1993). "Combustion of soybean oil methyl ester in a direct injection diesel engine". Society of Automotive Engineers, paper nº 930934.
- SHER, E. (1998). "Handbook of air pollution from internal combustion engines – pollutant formation and control". Academic Press, Boston.
- SILVA, L. L. C. (1992). "Simulação dos processos termodinâmicos em motores de combustão interna – ciclo diesel". Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.
- SOTO PAU, F. (2003). "Análise experimental dos fenômenos da combustão e da emissão de gases em motores de combustão interna utilizando misturas de etanol e gasolina como combustível". Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Carlos, SP.
- SPICHER, U. et al. (1992). "Investigation into the applicability of an optical fiber sensor for knock detection and knock control system". SAE Paper 922370.

- SUN, Z.; BLACKSHEAR, P. L.; KITTELSON, D. B. (1996). "Spark ignition engine knock detection using in-cylinder optical probes". SAE Paper 962103.
- SRIVASTAVA, A.; PRASAD, R. (2000). "Triglycerides-based diesel fuels". Pergamon – Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- TABACZYNSKI, R. J.; FERGUSON, C.R.; RADHAKRISHNAN, K. (1977) " A turbulent entrainment model for spark-ignition engine combustion". SAE paper 770647.
- TAYLOR, C. F. (1968). "The internal-combustion engine in theory and practice". v.1. Cambridge, The M. I. T. Press.
- TAYLOR, C. F. (1968). "The internal-combustion engine in theory and practice". v.2. Cambridge, The M. I. T. Press.
- ULLMAN, T.; MASON, R.; MONTALVO, D. (1990). "Study of cetane number and aromatic content effects on regulated emissions from a heavy-duty engine". Southwest Research Institute Report nº 08-2940.
- VERGEL, O. A. (1998). "Diagnóstico experimental del proceso de combustión en motores diesel de inyección directa". Tese de Doutorado. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, Espanha.
- WOSCHNI, G. (1967). "A universally applicable equation for the instantaneous heat transfer coefficient in the internal combustion engine". SAE Paper nº 670931.
- ZABEU, C. B. (1999). "Análise da combustão em motores baseada na medição de pressão". Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.

## **ANEXOS**

Anexo I: Probiodiesel

Anexo II: Resolução ANP nº 42

Anexo III: Diretiva do Parlamento Europeu

**PROGRAMA BRASILEIRO DE BIOCOMBUSTÍVEIS**

**REDE BRASILEIRA DE BIODIESEL**  
***PROBIODIESEL***



Ministério da Ciência e Tecnologia  
PROGRAMA BRASILEIRO DE BIOCOMBUSTÍVEIS  
REDE BRASILEIRA DE BIODIESEL

## 1. CONCEITO

*Combustíveis obtidos a partir de misturas, em diferentes proporções, de Diesel e éster de óleos vegetais são chamados de BIODIESEL.*

No Brasil, neste PROBIODIESEL, será desenvolvida a tecnologia de produção e uso do BIODIESEL, éster etílico e metílico. Na primeira fase até 2003, serão testados éster etílico de soja e etanol, e éster metílico de soja. Na fase II, até 2005, serão desenvolvidas as cadeias produtivas do BIODIESEL produzido a partir de outros óleos vegetais e/ou óleos residuais

O BIODIESEL a ser testado até 2003 será produzido e desenvolvido pela ECOMAT e ABIOVE em parceria com as demais entidades da *Rede Brasileira de Biodiesel*.

## 2. CONTEXTO

Em 1859 foi descoberto petróleo na Pennsylvania tendo sido utilizado principalmente para produção de querosene de iluminação. Em 1895, Rudolf Diesel iniciou as pesquisas para utilização de subprodutos do petróleo como combustível para a sua invenção - motor com ignição por compressão. Durante a Exposição Mundial de Paris, em 1900, utilizou óleo de amendoim para demonstração de seu novo motor. Dizia ele: " *O motor a diesel pode ser alimentado com óleos vegetais e ajudar o desenvolvimento dos países que o utilizem*".

No Brasil, desde a década de 20 do século XX, o *Instituto Nacional de Tecnologia - INT* já estudava e testava combustíveis alternativos e renováveis, como por exemplo o álcool da cana-de-açúcar.

Mais recentemente, motivados pelas demandas da II Guerra Mundial e das crises de petróleo os Governos de diferentes países em parceria com a iniciativa privada e centros de pesquisa, vêm desenvolvendo e testando biocombustíveis em frotas municipais, especialmente em grandes centros urbanos.

O Brasil, desde a década de 70 do século XX, por intermédio do *INT*, do *IPT* e da *CEPLAC* vem desenvolvendo projetos de óleos vegetais como combustíveis, destacando-se entre eles o *DENDIESEL*.

Em 1983, o Governo brasileiro motivado pela elevação desproporcional dos preços de petróleo determinou a implementação do projeto (Projeto OVEG) no qual foi testada a utilização de Biodiesel e misturas combustíveis em veículos que rodaram mais de um milhão de quilômetros. Esta iniciativa coordenada pela Secretaria de Tecnologia Industrial contou com a participação da indústria automobilística, fabricantes de autopeças, produtores de lubrificantes e combustíveis, indústria de óleos vegetais e institutos de pesquisa.

Foi constatada a viabilidade técnica da utilização do combustível, aproveitando a logística de distribuição existente. Entretanto, naquele momento, os custos do Biodiesel eram muito mais elevados do que o Diesel, desta forma não foi implementado a produção do Biodiesel em escala comercial.

Desde 2000 foi instalada, em Ilhéus, no campus da Universidade Estadual de Santa Cruz, uma planta piloto de produção de Biodiesel de éster metílico, com capacidade diária de produção de 1400 litros, podendo ser adaptada para produção de éster etílico (torre destilação e/ou centrífuga para separação do éster da glicerina).

A UFPR vem desenvolvendo a tecnologia de produção de ésteres de óleo de soja, visando a suas misturas ao diesel, desde 1983 até os dias de hoje.

No período de janeiro a março de 1998, sob a coordenação da **TECPAR**, realizou-se em Curitiba uma experiência de campo do uso monitorado de Biodiesel B20 - USA, mistura de 20% de éster de soja ao Diesel metropolitano do Paraná, para uma frota de vinte ônibus urbanos que operaram normalmente com o novo combustível.

A década de 90 se caracterizou pela produção comercial e instalação de plantas em escala industrial, visando atender a preocupação ambiental e estimulada pela competitividade relativa de preços do petróleo e óleos vegetais.

No ano 2000, foi instalada a fábrica de biocombustíveis da ECOMAT no Estado do Mato Grosso, que produz atualmente o AEP 102, que é um éster de soja aditivo especial da mistura álcool diesel, além de biodiesel de éster metílico e etílico (em batelada).

Desde 1991 o MCT vem coordenando projetos de desenvolvimento tecnológico para combustíveis renováveis, como por exemplo a biomassa de madeira, de cana-de-açúcar e folhas, inclusive contando como o apoio do GEF/Banco Mundial e, mais recentemente, da União Européia.

As misturas combustíveis álcool e diesel, assim como e álcool e gasolina estão em desenvolvimento permanente.

Atualmente no Brasil, o PROBIOAMAZON, Programa gerenciado pelo MDA e MCT é o maior *programa de óleos vegetais* em implantação com perspectiva de produção de cerca de 500 mil toneladas ano de dendê na Região Norte a partir da produção em assentamentos do INCRA.

As reservas de combustíveis fósseis, como por exemplo o petróleo, estão concentradas em 65% no Oriente Médio.

Os aumentos recentes no preço da gasolina no Brasil, cerca de 20% ainda neste ano 2002, ampliam a necessidade de desenvolvimento de alternativas de complementação aos combustíveis fósseis, especialmente para minimizar a importação e desonerar o balanço de pagamentos.

Igualmente importante, a utilização de óleos vegetais nos combustíveis líquidos permite uma menor emissão de gases poluentes pelos sistemas de transporte urbano. O resultado é imediato no nível de poluição das cidades, melhorando a qualidade de vida de seus habitantes.

O *Biodiesel* surge como uma alternativa de diminuição da dependência dos derivados de petróleo e um novo mercado para as oleaginosas. O *Biodiesel* deve atender às especificações técnicas como sendo um produto único, sem necessidade da definição da origem do óleo vegetal ou qual o tipo de álcool a ser usado na produção, mas sim um conjunto de propriedades físico-químicas para o produto final que garanta a sua adequação ao uso em motores do ciclo diesel.

A mistura do éster vegetal ao óleo diesel em diferentes proporções (ou a utilização pura do éster) permitirá uma redução do consumo do derivado de petróleo com perspectivas de redução da emissão de poluentes. A introdução do Biodiesel no mercado representará uma nova dinâmica para a agroindústria e conseqüente efeito multiplicador nos demais segmentos da economia: transporte, distribuição entre outros, envolvendo óleos vegetais, álcool, óleo diesel e mais os insumos e subprodutos da produção do éster vegetal.

A viabilização do *Biodiesel*, porém, requer a implementação de estrutura organizada para produção e distribuição, de forma atingir com competitividade os mercados potenciais. A introdução do *Biodiesel*, portanto, vai requerer investimentos ao longo desta cadeia para assegurar a oferta do produto e a

perspectiva de retorno de capital empregado no desenvolvimento e para a sustentabilidade no longo prazo.

Neste processo, é importante lembrar, há questões tecnológicas em etapas pré-comerciais, a serem resolvidas nas etapas de testes em laboratório, bancada e de campo. Como fato mais relevante a rota tecnológica a ser desenvolvida da produção do *Biodiesel* com o uso do etanol.

O MCT e a Petrobrás, por intermédio do CTPetro, apoiam projeto com a participação das Universidades Federal do Rio Grande do Sul, Federal de Pelotas e a Regional do Alto Uruguai com a finalidade básica de adequar e implantar os métodos de análise físico-química, como propostos pela ASTM, para o *Biodiesel* nacional; e, também, avaliar as propriedades das misturas de biodiesel ao diesel em diferentes proporções.

Necessário se faz ampliar o escopo de avaliação quando se trata da responsabilidade e introduzir um novo combustível no País. Para tanto, esta sendo proposto este Programa em âmbito nacional.

A produção mundial de óleos vegetais cresceu de cerca de 70 milhões de toneladas em 1997 para 90 milhões de toneladas em 2001.

Vários países estão produzindo Biodiesel comercialmente, estimulando o desenvolvimento em escala industrial, dentre eles destacam-se: Argentina, EUA, Malásia e União Européia ( Alemanha, França, Itália, Austria e outros).

O uso do Biodiesel na União Européia - UE recebe incentivo a produção através de uma forte desgravação tributária e alterações importantes na legislação do meio ambiente. Em 2005, 2% dos combustíveis consumidos na UE terão de ser renováveis e, em 2010, 5%.

Os fabricantes europeus de motores apoiam a mistura de 5% de Biodiesel. Na mistura até 30% ou Biodiesel puro (Alemanha) muitos fabricantes dão garantia: VW, Audi, Seat, Skoda, PSA, Mercedes, Caterpillar e Man garantem alguns modelos. Na Alemanha, mais de 800 postos de combustíveis vendem *Biodiesel* puro.

O Biodiesel na Argentina tem estímulo através do Decreto 1.396, de novembro de 2001, que cria o "Plan de Competitividad para el Combustible Biodiesel", propiciando a desoneração tributária do Biodiesel por 10 anos. A Resolução 129/2001 definiu as especificações do Biodiesel.

Nos EUA não há desgravação tributária para a produção de Biodiesel, cerca de 126.000 toneladas por ano. Atualmente, o Biodiesel está sendo usado em frotas de ônibus urbanos, serviços postais e órgãos do governo e é considerado **Diesel Premium** para motores utilizados na mineração subterrânea e embarcações.

A produção agrícola de etanol está prosperando e já alcançou 7 bilhões de litros por ano. No Brasil a capacidade instalada de produção de etanol é da ordem de 16 bilhões de litros por ano.

Em Minnesota acaba de ser aprovada uma lei que estabelece: 2% de mistura - de imediato - e, 5% de mistura com biodiesel após 5 anos de sua aprovação. Isto levará a um grande incremento na produção de Biodiesel naquele País.

A denominada "conta de defesa" que resulta da proteção americana ao petróleo no Oriente Médio para garantir o fluxo ininterrupto de óleo cru, é da ordem de bilhões de dólares por ano. Este fato demonstra a instabilidade de abastecimento, a fragilidade da política de preços, uma vez que o custo real do barril de óleo e, por conseguinte, dos combustíveis nos USA é sensivelmente mais alto do que os preços praticados nos postos de abastecimento.

Na Malásia está sendo implementado programa para a produção de Biodiesel a partir de óleo de palma (dendê). A primeira fábrica deve entrar em operação em 2004, com capacidade de produção de 500 mil toneladas ao ano. A perspectiva tecnológica de extração das vitaminas A e E permitirá reduzir os custos do Biodiesel produzido

No mercado internacional, o Biodiesel produzido tem sido usado em: veículos de passeio, transporte de estrada e off road, frotas cativas, transporte público e geração de eletricidade.

#### *Capacidade de Produção e Disponibilidade de Biodiesel no Brasil*

O Brasil, segundo produtor e exportador mundial de óleo de soja, poderá tornar-se gradualmente um importante produtor e consumidor de Biodiesel, acrescida da oportunidade de utilizarmos outros óleos vegetais típicos das diferentes regiões do país.

Também reduziríamos a dependência atual de importação de óleo diesel, da ordem de 6 milhões de metros cúbicos por ano, desonerando o balanço de pagamentos e criando riqueza no interior.

A disponibilidade de produção de Biodiesel a partir de soja concentra-se na produção de cerca de 42,5 milhões de toneladas previstas para o ano 2002, sendo 47% no Centro-Oeste e 40% na Região Sul.

O Brasil poderá expandir significativamente sua produção de soja e óleo, considerando uma fronteira agrícola de 80 milhões de hectares, para 240 milhões de toneladas ano.

A capacidade instalada de esmagamento de soja é de 32,4 milhões de toneladas ano. Em 2001 foram esmagadas cerca de 22,8 milhões de toneladas (ociosidade de 30%). O Brasil é um produtor muito competitivo e ocupa a posição de segundo produtor mundial.

A competitividade da produção nacional de etanol em diferentes regiões do Brasil - PROALCOOL, a infra-estrutura de produção e distribuição já existente, o know how e o desempenho das tecnologias desenvolvidas para a cadeia produtiva da cana e setor automotivo, a oportunidade de substituir o diesel importado e contribuir para a economia de divisas, a geração de renda, uma vez que 35% do petróleo processado no país é transformado em diesel, para um mercado de 35 bilhões de litros por ano, a perspectiva de melhorar a qualidade do diesel consumido, os excedentes de produção de óleo de soja, as vantagens econômicas e sócio-ambientais decorrentes da produção e consumo de combustível renovável, a segurança para provisão de combustível produzido diretamente nas diferentes regiões do Brasil, as novas e alteradas políticas agrícolas internacionais, o fortalecimento da indústria nacional de biocombustíveis, quer seja para transporte pesado e de massa ou para geração de eletricidade, especialmente em sistemas isolados, motivaram e recomendam iniciar de imediato Programa Nacional de Biodiesel.

#### *Características e Propriedades do Biodiesel*

A produção de *Biodiesel* nacional, especialmente para modernos carros a diesel, apresenta as seguintes oportunidades:

- ❖ *redução de gás carbônico*
- ❖ *economia de combustível*
- ❖ *performance superior, uso de motores cada vez menores*
- ❖ *mercado em grande expansão - especialmente na Europa, vantagem na exportação de veículos, motores e componentes*
- ❖ *tecnologia atual permite aos veículos Diesel atender a norma EURO III, dispositivos de retenção de particulados - filtros regenerativos (com B100 poderão operar melhor pela ausência de enxofre e material particulado)*

- ❖ *novas oportunidades de negócios e geração de emprego e renda*
- ❖ *carga tributária dos combustíveis foi definida*
- ❖ *perspectiva de exportação de Biodiesel como aditivo de baixo conteúdo de enxofre, especialmente para a União Européia onde o teor de enxofre está sendo reduzido paulatinamente de 2000 ppm em 1996, para 350 ppm em 2002, e 50 ppm em 2005*
- ❖ *liberação da importação de Diesel em janeiro de 2002, demanda crescente de Diesel no Brasil, dependência de importação, balanço de pagamentos e qualidade do combustível*
- ❖ *perspectiva de uso de combustível e insumo de fonte renovável*
- ❖ *potencialização de ganhos ambientais*
- ❖ *novas oportunidades de negócios na agro-indústria*
- ❖ *redução do teor de enxofre do combustível quando comparado ao Diesel*
- ❖ *melhora o número de cetano (melhoria no desempenho da ignição) e lubrificidade (redução de desgaste, especialmente do sistema de ignição).*

**Vantagens do Biodiesel em relação ao Diesel (resumo):**

- Redução das emissões de poluentes
  - Monóxido de carbono CO grande redução
  - Hidrocarbonetos HC redução significativa, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos
  - Fumaça preta grande redução
  - redução mutagenicidade pela eliminação dos compostos aromáticos
- Teor de enxofre e de aromáticos praticamente nulos, permite ampliar a vida útil do catalisador do sistema de escapamento de automóveis
- Melhora a lubrificidade do motor, número de cetano mais elevado que o Diesel (maior 50)
- Biodegradável
- Combustível renovável
- Diversificação da matriz energética
- Melhoria da logística de transporte
- Pontos de combustão e fulgor apropriados (mais seguro para manipular)
- Não é tóxico.

O desenvolvimento deste **PROBIODIESEL** permitirá desenvolver a competitividade técnica e econômica do biodiesel, potencializando ganhos ambientais e gerando novos negócios para agroindústria, montadoras e setores de autopeças. Existe ainda a perspectiva de redução de cerca de 2,5 toneladas de gás carbônico por metro cúbico de *Biodiesel* utilizado.

***O sucesso para implantação de Biodiesel depende:***

- Redução da carga tributária
- Disponibilidade local de óleos vegetais
- Garantia de Conformidade quanto à Qualidade (padrão e controle)
- Apoio para iniciativas ecologicamente corretas
- Sensibilização e motivação da sociedade para alternativas ecologicamente corretas
- Competitividade relacionada com estímulo e incentivo ao uso, e a CIDE diferenciada para biocombustível em relação ao similar fóssil
- Garantia de desempenho dos motores e veículos alimentados a Biodiesel
- Novos usos para a glicerina, em novos mercados

O cenário atual se mostra também bastante oportuno, tendo em vista a prática do livre mercado para combustíveis, a redução das barreiras, a política energética praticada, o perfil de produção e consumo de diesel, a necessidade de se reduzir a poluição atmosférica, em particular nos grandes centros urbanos, e o grande interesse e competitividade da indústria local.

Além destes aspectos trata de uma excelente oportunidade para que o Brasil venha a ingressar no bloco de países detentores da tecnologia de biocombustíveis, tornando-se efetivamente exportador de tecnologia e de produtos com maior valor agregado.

### 3. OBJETIVOS E ESTRATÉGIAS

O **PROBIODIESEL** tem por objetivo desenvolver as tecnologias de produção e o mercado de consumo de biocombustíveis; estabelecer Rede Nacional de BIODIESEL, para congregar e harmonizar as ações de especialistas e entidades responsáveis pelo desenvolvimento deste setor da economia; desenvolver e homologar as especificações do novo combustível para o Brasil; e atestar a viabilidade e competitividade técnica, econômica, social e ambiental a partir da investigação em testes de laboratório, bancada e campo.

A principal estratégia é a de desenvolver o biocombustível a partir da produção de oleaginosas e etanol nacional, gerando emprego e renda nas diferentes regiões do País. Assegurar maior autonomia no suprimento de combustíveis líquidos, contribuir para melhorar a inserção internacional do Brasil nas questões ambientais globais, estabelecer vanguarda no desenvolvimento de mercados novos para produtos potenciais subaproveitados (agricultura), criar mercados alternativos de expressão para commodities brasileiras (petróleo/gás, complexo soja, setor sucro-alcooleiro) com excesso de ofertas no mercado externo, desenvolver tecnologias nacionais para produção de combustíveis.

O **PROBIODIESEL** contribuirá para tornar o *Brasil líder mundial em biocombustível* através da atualização das tecnologias atuais e do desenvolvimento de novas em todos os elos da cadeia produtiva multi-setorial (setor automotivo, sucroalcooleiro, óleos vegetais, Sindipecas, Sindicom, Centros de Pesquisa, entre outros) sempre em benefício do consumidor final, da qualidade de vida e da promoção do desenvolvimento do País, .

O **PROBIODIESEL** não deve se limitar a oferecer apenas um produto a preço atrativo, aspecto este meramente circunstancial face aos hidrocarbonetos em geral. Será necessário destacar as qualidades diferenciadas do BIODIESEL como combustível renovável para o consumidor e estimular a demanda por ações promocionais adequadas. O fato é que o êxito deste Programa depende do grau de aceitação e da adoção continuada deste produto pelo consumidor e pelo mercado em geral por este tipo de combustível. Isto é, os fatores determinantes serão a atitude e o comportamento de compra do consumidor final e o seu coeficiente de satisfação com o álcool como combustível.

Nestas últimas décadas o consumidor brasileiro vem demonstrando evolução na sua atuação frente ao livre mercado, tornou-se mais informado e tem se comportado com liberdade diante de várias opções de oferta. É capaz de avaliar a vantagem competitiva e a qualidade do desempenho de cada oferta.

Atualmente, o consumidor está em permanente atualização, condição diferente de quando foi lançado o Proálcool. É necessário considerar o atendimento permanente das necessidades, desejos e expectativas do consumidor e conseqüentemente diminuir os riscos e garantir o desenvolvimento continuado do mercado de biocombustíveis, no Brasil e exterior.

O esforço governamental deve estar concentrado em fomentar o “**saber fazer um bom combustível**” e o “**fazer valer**” o preço e as garantias de seu uso. O desenvolvimento das tecnologias e dos processos de produção e usos do BIODIESEL deve estar sempre acompanhado com a demonstração da viabilidade econômica e sócio-ambiental, da competitividade e, também, da promoção da aceitação pelo mercado consumidor.

Afinal, no sistema econômico em que se vive, sem estas duas condições comerciais não há como implantar e implementar nenhuma tecnologia auto sustentável.

#### 4. RESULTADOS ESPERADOS

- Estabelecer **Rede Brasileira de Biocombustíveis**
- Implementar Sistema de Informações, cooperação e parcerias
- Desenvolver as especificações técnicas do biodiesel nacional, garantia de qualidade do combustível e aspectos legais
- Desenvolver normas e métodos de análise e controle de qualidade do biocombustível
- Analisar a viabilidade e competitividade técnica do biocombustível: compatibilidade e estabilidade, corrosividade, lubrificidade, ponto de fulgor entre outras
- Desenvolvimento do uso de subprodutos: glicerina
- Otimização e desenvolvimento tecnológico do Biodiesel B5, B10, B20 e B100 a partir de: soja, dendê, etanol, mamona e babaçu
- Critérios de avaliação da produção como éster metílico e etílico
- Análise e teste de combustíveis e lubrificantes
- Testes em bancada dinamométrica: 4 tecnologias de sistema de injeção e tecnologias de motores de fabricantes diversos - IPT, LACTEC e UFRJ
- Testes de campo
- Viabilidade e competitividade sócio-ambiental, análise do ciclo de vida, avaliação dos créditos de carbono
- Viabilidade e competitividade econômica, estudos de mercado, preços, tributos, incentivos e desoneração de impostos
- Capacitar e treinar técnicos em laboratório, bancada, campo e distribuidores
- Participar em eventos, reuniões, seminários e congressos
- Promover visitas técnicas às plantas de processo em operação no exterior
- Propriedade Intelectual
- Adequar o Biodiesel para uso comercial
- Homologar o Biodiesel para uso no Brasil

## **5. METAS E PLANO DE AÇÃO**

O planejamento e a programação das atividades do PROBIODIESEL estão apresentadas no ANEXO I.

A viabilidade e competitividade técnica, sócio-ambiental e econômica do Biodiesel de ester etílico (soja e etanol) e metílico está prevista para ser concluída em outubro de 2003, se os testes de campo puderem ser iniciados em agosto de 2002, a partir da liberação dos recursos financeiros.

O desenvolvimento do Biodiesel com novas rotas tecnológicas, que inclui o desenvolvimento de toda a cadeia produtiva, fase agrícola e industrial, para diferentes oleaginosas está programado até 2005.

## **6. COMPETÊNCIA E INFRA-ESTRUTURA**

A implementação do PROBIODIESEL está sendo coordenada pelo MCT com a participação efetiva de mais de 200 especialistas e organizações interessadas no desenvolvimento do mercado de biocombustíveis do Brasil, que constituem a Rede Brasileira de Biodiesel.

As atividades de efetivação do trabalho coordenado e complementar dos membros da Rede Brasileira de BIODIESEL compreende, ainda, (i) implementação de sistema de informação em âmbito internacional, (ii) atualização permanente do estado da arte das tecnologias de produção e uso de BIODIESEL, (iii) a divulgação e disseminação dos conhecimentos em debates públicos, através de reuniões e seminários nacionais e internacionais, (iv) a implantação de programa de capacitação e treinamento, (v) propriedade intelectual das inovações tecnológicas de correntes do PROBIODIESEL.

As atividades de desenvolvimento e competitividade técnica do BIODIESEL estão sendo previstas para serem conduzidas junto aos laboratórios e centros de pesquisa, de governo e/ou privados, pela atuação em redes como a seguir identificadas: (i) rede cat - desenvolvimento de tecnologia de catalisadores - INT/TECPAR/UFPR/UFRJ/UESC/IME, (ii) rede de laboratórios de caracterização físico-química de BIODIESEL, álcool, catalisadores, diesel e misturas combustíveis - INT/TECPAR/UFPR/UFRJ/CENPES/IPT/CTC, (iii) rede de testes de pesquisa desempenho de motores, de sistema de injeção e de controle de emissões - IPT/UFRJ/LACTEC/TECPAR/PUCPR, (iv) rede de análise e testes de combustíveis e lubrificantes - INT/CENPES/TECPAR e (v)

rede de monitoramento de testes de frota em campo -  
TECPAR/URBS/ANFAEA/BOSCH/DELPHI/IPT/SINDICOM.

A viabilidade e competitividade sócio-ambiental desenvolverá competências quanto a definição de parâmetros, hipóteses e premissas, inventário das cadeias produtivas, análise de sensibilidade de misturas e desenvolvimento de modelo de análise de ciclo de vida de biocombustíveis, em parceria do CENBIO/COPPE com entidades internacionais.

## **7. FORMAÇÃO DE RECURSOS HUMANOS**

Além da capacitação e treinamento prevista para os membros da Rede Brasileira de BIODIESEL, os seminários nacionais e internacionais, bem como as palestras em cursos de graduação e pós-graduação, os eventos da AEA, as dissertações e as teses encomendadas e orientadas, as visitas técnicas e o acompanhamento do PROBIODIESEL proporcionarão a permanente divulgação e o debate competente sobre o tema.

## **8. RECURSOS E PRAZOS**

Um programa com a estrutura e objetivos propostos só poderá oferecer todos os benefícios se puder ser financiado por um longo período, de no mínimo 3 a 5 anos ininterruptos. Após, os resultados obtidos até dezembro de 2003, a coordenação do PROBIODIESEL deverá apresentar uma nova proposta de financiamento ao Comitê Gestor dos Fundos Setoriais. Dessa forma, uma vez aprovado o novo financiamento, o programa proporcionará solução de continuidade, pela manutenção das equipes executoras e o desenvolvimento continuado das redes de pesquisa e a implementação de BIODIESEL em função das peculiaridades produtivas e de origem dos óleos vegetais das diferentes regiões do País.

## **9. FONTES DE FINANCIAMENTO E INTEGRAÇÃO COM DIFERENTES SETORES DA ECONOMIA**

O PROBIODIESEL deverá estar inserido no âmbito do Fundo Setorial CTPETRO e/ou Fundo Verde Amarelo e, portanto, no momento, este será o principal agente financiador do programa. Outras fontes de financiamento, no entanto, já apoiam projetos relacionados ao programa e deverão ser consideradas como, por exemplo: ANEEL e companhias de energia, MME, CNPq, FINEP, fundações estaduais de amparo à pesquisa, organismos internacionais, entre outros.

Para que o PROBIODIESEL possa funcionar adequadamente e de maneira sustentável, deverão ser implementadas ações de governo e outros agentes que garantam a criação de um mercado inicial para os biocombustíveis. Dessa forma, prevê-se que PROBIODIESEL deverá estar aberto à colaboração com outros fundos e organismos de fomento, inclusive com respeito à interação de redes de pesquisa já existentes com as novas redes a serem criadas pelo programa.

Um aspecto essencial a ser observado é que as atividades desenvolvidas devem ser estrategicamente organizadas com o objetivo de otimizar todos os investimentos realizados. Por esse motivo, deverá haver um esforço dos participantes que deverão comprometer-se a manter a coordenação do programa informada e atualizada acerca dos financiamentos obtidos junto a outros organismos de fomento para projetos relacionados ao programa.

Simultaneamente, a Coordenação Geral deverá levantar junto aos órgãos do Governo as iniciativas de financiamento a projetos em células a combustível. Conhecendo o volume total de recursos investidos em cada tema e projeto, a coordenação geral poderá determinar as estratégias a serem seguidas e corrigir os rumos a fim de atingir plenamente os objetivos do programa.

## **10. REDE BRASILEIRA DE BIODIESEL**

### **GT 1– ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA E HOMOLOGAÇÃO DO BIODIESEL**

ANP, INT, IPT, USP/RP, TECPAR, ABIOVE, PETROBRÁS, CEPTEL

### **GT 2– VIABILIDADE E COMPETITIVIDADE TÉCNICA**

INT, CENPES, IPT, TECPAR, USP/RP, UFPR, UESC, UFRJ / COPPE, ANFAVEA, SINDIPEÇAS, COPPE, ECOMAT, ABIOVE, LACTEC

### **GT 3 – VIABILIDADE E COMPETITIVIDADE SÓCIO-AMBIENTAL – ANÁLISE DO CICLO DA VIDA / CAPACITAÇÃO E TREINAMENTO / AVALIAÇÃO DE CRÉDITOS DE CARBONOS E DE ENERGIA LIMPA**

CENBIO, INT, UNICAMP / NIPE, ABIOVE, USP, USP/RP, UESC, ANEEL, ECOMAT, PETROBRÁS, COPPE, MMA, IBAMA

### **GT 4 – VIABILIDADE E COMPETITIVIDADE ECONÔMICA / ESTUDOS DE MERCADO / PREÇOS, TRIBUTOS, INCENTIVOS E DESONERAÇÃO DE IMPOSTOS**

CNA, ABIOVE, FGV, USP/RP ANEEL, ECOMAT, COPPE, PETROBRÁS, MAPA

## 11. PLANO DE AÇÃO 2002-2005 EM ANEXO

### 1. REDE BRASILEIRA DE BIOCOMBUSTÍVEIS

Implementação da gestão executiva do PROBIODIESEL, coordenação dos Grupos Técnicos com todo o Plano de Ação de responsabilidade, administração dos recursos técnicos, logísticos e financeiros, coordenação de reuniões palestras e seminários especializados, preparação de material de divulgação autorizada, estabelecimento de parcerias.

Implementação de Sistema de Informação - MCT/INT - CENBIO - AEA  
Revisão Bibliográfica e Estado da Arte - INT - TECPAR/UFPR  
Disseminação do PROBIODIESEL em eventos - MCT/INT - AEA  
Capacitação e Treinamento - MCT/INT - TECPAR  
Propriedade Intelectual - MCT/INT - ABIOVE

### 2. ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS E HOMOLOGAÇÃO DO BIODIESEL

Desenvolvimento de Especificação Técnica com base nas normas internacionais, em consonância com as características físico-químicas dos óleos vegetais do Brasil e as exigências técnicas e motores e sistemas de injeção para distribuição comercial de larga escala  
ANP - INT - IPT - TECPAR - ABIOVE - PETROBRÁS - ANFAVEA

### 3. VIABILIDADE E COMPETITIVIDADE TÉCNICA

Avaliação da Capacidade Produtiva Nacional Atual - MCT/INT - TECPAR/UFPR - ABIOVE - ECOMAT  
Desenvolvimento de Normas e Métodos Analíticos - INT - TECPAR/UFPR - UFRJ - UESC - IBP - ABNT - CENPES  
Projeto de Adequação da Produção - INT - ECOMAT - TECPAR/UFPR - ABIOVE  
Desenvolvimento de Tecnologia de Catalisadores - RedeBiocat - INT - TECPAR/UFPR - UFRJ - UESC - IME  
Caracterização Físico Química (Biodiesel/Álcool/Catalisadores/Diesel/Misturas) - INT - TECPAR/UFPR - UFRJ - CENPES - IPT  
Avaliação da Biodegradabilidade - UESC  
Avaliação da Miscibilidade e estabilidade das Misturas - INT - TECPAR - CENPES  
Desenvolver Novas Aplicações para Subprodutos - INT - UFRJ - TECPAR/UFPR  
Testes em Bancada Dinamométrica - TECPAR/LACTEC - IPT - UFRJ  
Análises e Testes de Combustíveis e Lubrificantes - INT - CENPES - TECPAR  
Avaliação da Compatibilidade e Corrosividade Materiais - INT

Testes de Campo - TECPAR/URBS - ANFAVEA - BOSCH - DELPHI - IPT - SINDICOM

Desenvolvimento Biodiesel Novas Rotas Tecnológicas - INT - UFRJ - UESC - UFCE - CEFET/RN - TECPAR /UFPR - CENBIO

3. *VIABILIDADE E COMPETITIVIDADE SÓCIO-AMBIENTAL-  
CENBIO/COPPE*

Definição Parâmetros, Hipóteses e Premissas

Inventário das Cadeias Produtivas

Avaliação dos Efeitos Ambientais

Análise de Sensibilidade de Misturas

Desenvolvimento Modelo Análise de Ciclo de Vida de Biocombustíveis

Análise Viabilidade e Competitividade

Certificação para Obtenção de Créditos de Carbono

4. *VIABILIDADE E COMPETITIVIDADE ECONÔMICA*

Análise Preliminar da Viabilidade e Competitividade - CNA - ABIOVE - FGV

Definição do Mercado - CNA - ABIOVE - FGV

Análise dos Custos de Produção

Análise de Investimentos

Estudo da Formação de Preços - Mecanismos de Ajustes

Análise Final da Viabilidade e Competitividade

5. *HOMOLOGAÇÃO DO BIODIESEL*

Homologação do Biodiesel para Uso Comercial no Brasil - ANP/MME -

MCT/INT - MAPA - IBAMA - MF - MDIC

Garantia da qualidade e Aspectos Legais - ANP/ MME - MCT/INT - MAPA -

MMA - IBAMA - MF - MDIC

6. *LANÇAMENTO DO BIODIESEL NO MERCADO*

Introdução do Biodiesel no Mercado de Combustíveis Nacional - ANP -

MCT/INT - SINDICOM – FGV

## **12. PROPRIEDADE INTELECTUAL**

O grupo de especialistas, responsáveis pelas estratégias de proteção de propriedade intelectual e assessoramento na comercialização dos produtos e serviços resultantes do desenvolvimento deste Programa, irá contribuir para a ampliação da competência das entidades envolvidas.

Outro ponto importante será estabelecer apoio do governo para internacionalização da propriedade intelectual brasileira, relacionada com os produtos e serviços resultantes deste Programa.

## ANEXO II

### AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO

#### RESOLUÇÃO ANP Nº 42, DE 24.11.2004 - DOU 9.12.2004

O DIRETOR-GERAL da AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO - ANP, em exercício, no uso das atribuições que lhe foram conferidas pela Portaria ANP nº 139, de 14 de julho de 2004, com base nas disposições da Lei nº 9.478, de 06 de agosto de 1997 e na Resolução de Diretoria nº 499, de 18 de novembro de 2004 e

biodiesel

Considerando o interesse para o País em apresentar sucedâneos para o óleo diesel;

Considerando a Medida Provisória nº 214, de 13 de setembro de 2004, que define o biodiesel como um combustível para motores a combustão interna com ignição por compressão, renovável e biodegradável, derivado de óleos vegetais ou de gorduras animais, que possa substituir parcial ou totalmente o óleo diesel de origem fóssil;

Considerando as diretrizes emanadas pelo Conselho Nacional de Política Energética - CNPE, quanto à produção e ao percentual de biodiesel na mistura óleo diesel/biodiesel a ser comercializado;

Considerando a necessidade de estabelecer as normas e especificações do novo combustível para proteger os consumidores; resolve:

**Art. 1º.** Fica estabelecida, através da presente Resolução, a especificação de biodiesel, consoante as disposições contidas no Regulamento Técnico nº 4/2004, parte integrante desta Resolução que poderá ser adicionado ao óleo diesel em proporção de 2% em volume, comercializado pelos diversos agentes econômicos autorizados em todo o território nacional.

**Art. 2º.** Para efeitos desta Resolução define-se:

I - biodiesel - B100 - combustível composto de alquilésteres de ácidos graxos de cadeia longa, derivados de óleos vegetais ou de gorduras animais conforme a especificação contida no Regulamento Técnico nº 4/2004, parte integrante desta Resolução;

II - mistura óleo diesel/biodiesel - B2 - combustível comercial composto de 98% em volume de óleo diesel, conforme especificação da ANP, e 2% em volume de biodiesel, que deverá atender à especificação prevista pela Portaria ANP nº 310 de 27 de dezembro de 2001 e suas alterações;

III - mistura autorizada óleo diesel/biodiesel - combustível composto de biodiesel e óleo diesel em proporção definida quando da autorização concedida para testes e uso experimental conforme previsto pela Portaria ANP nº 240, de 25 de agosto de 2003;

IV - Distribuidor de combustíveis líquidos - pessoa jurídica autorizada pela ANP para o exercício da atividade de distribuição de combustíveis líquidos derivados de petróleo, álcool combustível, biodiesel, mistura óleo diesel/biodiesel especificada ou autorizada pela ANP e outros combustíveis automotivos;

V - Batelada - quantidade segregada de produto que possa ser caracterizada por um "Certificado da Qualidade".

**Art. 3º.** O biodiesel só poderá ser comercializado pelos Produtores de biodiesel, Importadores e Exportadores de biodiesel, Distribuidores de combustíveis líquidos e Refinarias.

Parágrafo único. Somente os Distribuidores de combustíveis líquidos e as Refinarias, autorizados pela ANP poderão proceder a mistura óleo diesel/biodiesel - B2, contendo 98% em volume de óleo diesel, conforme a especificação da ANP, e 2% em volume de biodiesel, respectivamente, para efetivar sua comercialização.

**Art. 4º.** Os Produtores e Importadores de biodiesel deverão manter sob sua guarda, pelo prazo mínimo de 02 (dois) meses a contar da data da comercialização do produto, uma amostra-testemunha do produto co-comercializado, armazenado em embalagem cor âmbar de 1 (um) litro de capacidade, fechada com batoque e tampa inviolável, mantida em local refrigerado em torno de 4 C em local protegido de luminosidade e acompanhada de Certificado da Qualidade.

§ 1º O Certificado da Qualidade referente à batelada do produto deverá ser emitido antes da liberação do produto para co-comercialização, firmado pelo responsável técnico pelas análises laboratoriais efetivadas, com indicação legível de seu nome e número da inscrição no órgão de classe e indicação das matérias-primas utilizadas para obtenção do biodiesel. Após a emissão do Certificado da Qualidade, se o produto não for comercializado no prazo máximo 3 meses, deverá ser reanalisada a estabilidade à oxidação para co-comercialização.

§ 2º Durante o prazo assinalado no caput deste artigo a amostra-testemunha e o respectivo Certificado da Qualidade deverão ficar à disposição da ANP para qualquer verificação julgada necessária.

§ 3º Os Produtores de biodiesel deverão enviar à ANP para o e-mail: [cerbiodiesel@anp.gov.br](mailto:cerbiodiesel@anp.gov.br) até 15 dias após o final de cada trimestre civil os resultados de uma análise completa (considerando todas as características e métodos da especificação) de uma amostra do biodiesel comercializado no trimestre correspondente e, em caso de neste período haver mudança de tipo de matéria-prima, o produtor deverá analisar um número de amostras correspondente ao número de tipos de matérias-primas utilizadas no formato de planilha eletrônica, devendo conter:

- I - codificação ANP do produtor de biodiesel;
- II - trimestre e ano de referência dos dados certificados;
- III - codificação ANP da matéria-prima;
- III - quadro de resultados em conformidade com o modelo abaixo:

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	MÉTODO DE ENSAIO	RESULTADO
----------------	---------	------------------	-----------

onde:

Característica - item da especificação do produto

Método de ensaio - referência do método de ensaio utilizado para determinação laboratorial

2.1. Métodos ABNT Resultado - valor encontrado na determinação laboratorial

**Art. 5º.** Os Produtores de biodiesel deverão enviar os dados de qualidade do produto comercializado à ANP conforme Resolução ANP nº 17, de 01 de setembro de 2004 ou legislação que venha substituí-la.

**Art. 6º.** A documentação fiscal referente às operações de comercialização e de transferência de biodiesel realizadas pelos Produtores e Importadores de biodiesel deverá ser acompanhada de cópia legível do respectivo Certificado da Qualidade, atestando que o produto comercializado atende à especificação estabelecida no Regulamento Técnico. No caso de cópia emitida eletronicamente, deverá estar indicado, na cópia, o nome e o número da inscrição no órgão de classe do responsável técnico pelas análises laboratoriais efetivadas.

**Art. 7º.** Para o uso automotivo só poderá ser comercializada mistura óleo diesel/biodiesel - B2, observado o estabelecido na Portaria ANP nº 310, de 27 de dezembro de 2001, e suas alterações.

Parágrafo único. Para a mistura autorizada óleo diesel/biodiesel deverá ser atendida a Portaria ANP nº 240, de 25 de agosto de 2003. **Art. 8º** A ANP poderá, a qualquer tempo e às suas expensas, submeter os Produtores e Importadores de biodiesel à auditoria de qualidade sobre os procedimentos e equipamentos de medição que tenham impacto sobre a qualidade e a confiabilidade dos serviços de que trata esta Resolução, bem como coletar amostra de biodiesel para análise em laboratórios contratados.

**Art. 8º.** É proibida a adição de corante ao biodiesel.

**Art. 9º.** O não atendimento ao disposto nesta Resolução sujeita o infrator às penalidades previstas na Lei nº 9.847, de 26 de outubro de 1999, e no Decreto nº 2.953, de 28 de janeiro de 1999.

**Art. 10.** Esta Resolução entra em vigor na data de sua publicação no Diário Oficial da União.

**Art. 11.** Ficam revogadas a Portaria ANP nº 255, de 15 de setembro de 2003, e as disposições em contrário.

## ANEXO A

### REGULAMENTO TÉCNICO Nº 4/2004

#### 1. Objetivo

Este Regulamento Técnico aplica-se ao biodiesel - B100, de origem nacional ou importada a ser comercializado em território nacional adicionado na proporção de 2% em volume ao óleo diesel conforme a especificação em vigor.

#### 2. Normas Aplicáveis

A determinação das características do biodiesel será feita mediante o emprego das normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), das normas internacionais "American Society for Testing and Materials" (ASTM), da "International Organization for Standardization" (ISO) e do "Comité Européen de Normalisation" (CEN).

Os dados de incerteza, repetitividade e reprodutibilidade fornecidos nos métodos relacionados neste Regulamento devem ser usados somente como guia para aceitação das determinações em duplicata do ensaio e não devem ser considerados como tolerância aplicada aos limites especificados neste Regulamento.

A análise do produto deverá ser realizada em uma amostra representativa do mesmo obtida segundo métodos ABNT NBR 14883 - Petróleo e produtos de petróleo - Amostragem manual ou ASTM D 4057 - Prática para Amostragem de Petróleo e Produtos Líquidos de Petróleo (Practice for Manual Sampling of Petroleum and Petroleum Products) ou ISO 5555 (Animal and vegetable fats and oils - Sampling) .

As características constantes da Tabela de Especificação deverão ser determinadas de acordo com a publicação mais recente dos seguintes métodos de ensaio:

HAROLDO BORGES RODRIGUES LIMA

MÉTODO	TÍTULO
NBR 7148	Petróleo e produtos de petróleo - Determinação da massa específica,

	densidade relativa e API - Método do densímetro
NBR 14065	Destilados de petróleo e óleos viscosos - Determinação da massa específica e da densidade relativa pelo densímetro digital.
NBR 10441	Produtos de petróleo - Líquidos transparentes e opacos - Determinação da viscosidade cinemática e cálculo da viscosidade dinâmica
NBR 14598	Produtos de petróleo - Determinação do Ponto de Fulgor pelo aparelho de vaso fechado Pensky-Martens
NBR 9842	Produtos de petróleo - Determinação do teor de cinzas
NBR 14359	Produtos de petróleo - Determinação da corrosividade - método da lâmina de cobre
NBR 14747	Óleo Diesel - Determinação do ponto de entupimento de filtro a frio
NBR 14448	Produtos de petróleo - Determinação do Índice de acidez pelo método de titulação potenciométrica

## 2.2. Métodos ASTM

MÉTODO	TÍTULO
ASTM D 1298	Massa Específica, Densidade Relativa e Grau API de Petróleo e Produtos Líquidos de Petróleo pelo Método do Hidrômetro Density, Relative Density (Specific Gravity) or API Gravity of Crude Petroleum and Liquid Petroleum Products by Hydrometer Method
ASTM D 4052	Massa Específica e Densidade Relativa pelo Densímetro Digital Density and Relative Density of Liquids by Digital Density Meter
ASTM D 445	Viscosidade Cinemática de Líquidos Transparentes e Opacos Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and the Calculation of Dynamic Viscosity)
ASTM D 2709	Água e Sedimentos nos Combustíveis Destilados Médios por Centrifugação Water and Sediment in Middle Distillate Fuels by Centrifuge
ASTM D 93	Ponto de Fulgor pelo Vaso Fechado Pensky-Martens Flash Point by Pensky-Martens Closed Cup Tester
ASTM D 1160	Destilação de Produtos de Petróleo a Pressão Reduzida Distillation of Petroleum Products at Reduced Pressure
ASTM D 4530	Determinação de Resíduo de Carbono (Método Micro) Determination of Carbon Residue (Micro Method)
ASTM D 189	Resíduo de Carbono Conradson de Produtos de Petróleo Conradson Carbon Residue of Petroleum Products
ASTM D 874	Cinzas Sulfatadas de Óleos Lubrificantes e Aditivos Sulfated Ash from Lubricating Oils and Additives
ASTM D 4294	Enxofre em Produtos de Petróleo por Espectrometria de Fluorescência de Raios X- Energia Dispersiva

	Sulfur in Petroleum Products by Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectroscopy
ASTM D 5453	Enxofre Total em Hidrocarbonetos Líquidos, Combustíveis para Motor e Óleos por Fluorescência de Ultravioleta Total Sulfur in Light Hydrocarbons, Motor Fuels and Oils by Ultraviolet Fluorescence
ASTM D 4951	Determinação de Elementos de Aditivos em Óleos Lubrificantes por Espectrometria de Emissão de Plasma Determination of Additive Elements in Lubricating Oils by Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry
ASTM D 130	Detecção da Corrosividade ao Cobre de Produtos de Petróleo pelo Teste de Lâmina de Cobre Detection of Copper Corrosion from Petroleum Products by the Copper Strip Tarnish Test
ASTM D 613	Número de Cetano de Óleo Diesel Cetane Number of Diesel Fuel Oil
ASTM D 6371	Ponto de Entupimento de Filtro a Frio de Óleo Diesel e Óleos de Aquecimento Cold Filter Plugging Point of Diesel and Heating Fuels
ASTM D 664	Índice de Acidez dos Produtos de Petróleo por Titulação Potenciométrica Acid Number of Petroleum Products by Potentiometric Titration
ASTM D 6584	Determinação da Glicerina Livre e Total em Biodiesel Metil Ésteres por Cromatografia Gasosa Determination of Free and Total Glycerine in Biodiesel Methyl Esters by Gas Chromatography

### 2.3. Métodos ISO/EN

MÉTODO	TÍTULO
EN ISO 3104	Produtos de Petróleo - Líquidos opacos e transparentes - Determinação de viscosidade cinemática e cálculo de viscosidade dinâmica Petroleum Products - Transparent and opaque liquids - Determination of kinematic viscosity and calculation of dynamic viscosity
EN ISO 12937	Produtos de Petróleo - Determinação de água - Método de Titulação Karl Fischer Petroleum Products - Determination of water - Coulometric Karl Fischer Titration Method
EN ISO 12662	Produtos Líquidos de Petróleo - Determinação de contaminação em destilados médios Liquid Petroleum Products - Determination of contamination in middle distillates
ISO/CD 3679	Produtos de Petróleo - Determinação de ponto de fulgor - Equilíbrio de fases em vaso fechado

	Petroleum Products - Determination of flash point - Rapid equilibrium closed cup
EN 14103	Gorduras e Derivados de Óleo - Ésteres Metílicos de Ácidos Graxos - Determinação de teor de éster e ácido linolênico metil éster Fat and oil derivatives - Fatty acid methyl esters (FAME) - Determination of ester and linolenic acid methyl ester contents
EN ISO 10370	Produtos de Petróleo - Determinação de Resíduo de Carbono (Método Micro) Petroleum Products - Determination of carbon residue - Micro Method
ISO 3987	Produtos de Petróleo - Óleos Lubrificantes e Aditivos - Determinação de Cinzas Sulfatadas Petroleum Products - Lubricating oils and additives - Determination of sulfated ash
EN ISO 14596	Produtos de Petróleo - Determinação de Enxofre - Espectrometria de Fluorescência de Raio X Petroleum Products - Determination of sulfur content - Wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrometry
EN 14108	Gorduras e Derivados de Óleo - Ésteres Metílicos de Ácidos Graxos - Determinação de Sódio por Espectrometria de Absorção Atômica Fat and oil derivatives - Fatty acid methyl esters (FAME) - Determination of sodium content by atomic absorption spectrometry
EN 14109	Gorduras e derivados de óleo - Ésteres Metílicos de Ácidos Graxos - Determinação de Potássio por Espectrometria de Absorção Atômica Fat and oil derivatives - Fatty acid methyl esters (FAME) - Determination of potassium content by atomic absorption spectrometry
EN ISO 3679	Determinação do ponto de fulgor - Método do vaso fechado equilíbrio rápido Determination of flash point - Rapid equilibrium closed cup method
EN 14108	Gorduras e Derivados de Óleo - Ésteres Metílicos de Ácidos Graxos - Determinação de Sódio por Espectrometria de Absorção Atômica Fat and oil derivatives - Fatty acid methyl esters (FAME) - Determination of sodium content by atomic absorption spectrometry
EN 14109	Gorduras e derivados de óleo - Ésteres Metílicos de Ácidos Graxos - Determinação de teor de Potássio por Espectrometria de Absorção Atômica Fat and oil derivatives - Fatty acid methyl esters (FAME) - Determination of potassium content by atomic absorption spectrometry
EN 14538	Gorduras e Derivados de Óleo - Ésteres Metílicos de Ácidos Graxos - Determinação de teor de Ca e Mg por Espectrometria de Emissão de Plasma Fat and oil derivatives - Fatty acid methyl esters (FAME) - Determination of Ca and Mg content by optical emission spectral analysis with inductively coupled plasma(ICP OES)
EN 14107	Gorduras e Derivados de Óleo - Ésteres Metílicos de Ácidos Graxos - Determinação de Fósforo por Espectrometria de Emissão de Plasma Fat and oil derivatives - Fatty acid methyl esters (FAME) - Determination of phosphorous content by inductively coupled plasma (ICP) emission spectrometry
EN ISO 2160	Produtos de Petróleo - Corrosividade ao Cobre - Teste de Lâmina de Cobre Petroleum Products - Corrosiveness to copper - Copper strip test

EN ISO 5165	Óleo Diesel - Determinação de Qualidade de Ignição - Método Cetano Diesel fuels - Determination of the ignition quality of diesel fuels - Cetane engine method
EN 14104	Gorduras e Derivados de Óleo - Ésteres Metílicos de Ácidos Graxos - Determinação do Índice de Acidez Fat and oil derivatives - Fatty acid methyl esters (FAME) - Determination of acid value
EN 14105	Gorduras e Derivados de Óleo - Ésteres Metílicos de Ácidos Graxos - Determinação de Glicerina livre e mono-, di- e triglicerídeo - (Método de Referência) Fat and oil derivatives - Fatty acid methyl esters (FAME) - Determination of free glycerol and mono-, di- and triglyceride content - (Reference Method)
EN 14106	Gorduras e Derivados de Óleo - Ésteres Metílicos de Ácidos Graxos - Determinação de Glicerina Livre Fat and oil derivatives - Fatty acid methyl esters (FAME) - Determination of free glycerol content
EN 14110	Gorduras e Derivados de Óleo - Ésteres Metílicos de Ácidos Graxos - Determinação de Metanol Fat and oil derivatives - Fatty acid methyl esters (FAME) - Determination of methanol content
EN 14111	Gorduras e Derivados de Óleo - Ésteres Metílicos de Ácidos Graxos - Determinação de Índice de Iodo Fat and oil derivatives - Fatty acid methyl esters (FAME) - Determination of iodine value
EN 14112	Gorduras e Derivados de Óleo - Ésteres Metílicos de Ácidos Graxos - Determinação da estabilidade à oxidação (teste de oxidação acelerada) Fat and oil derivatives - Fatty acid methyl esters (FAME) - Determination of oxidation stability (accelerated oxidation test)

Tabela I: Especificação do biodiesel B100

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITE	MÉTODO		
			ABNT NBR	ASTM D	EN/ISO
Aspecto	-	LII (1)	-	-	-
Massa específica a 20°C	kg/m <sup>3</sup>	Anotar (2)	7148, 14065	1298, 4052	-, -
Viscosidade Cinemática a 40°C,	mm <sup>2</sup> /s	Anotar (3)	10441	445	EN ISO 3104
Água e sedimentos, máx. (4)	% volume	0,050	-	2709	-
Contaminação Total (6)	mg/kg	Anotar	-	-	EN 12662
Ponto de fulgor, mín.	°C	100,0	14598	93	-

			-	-	EN ISO3679
Teor de éster (6)	% massa	Anotar	-	-	EN 14103
Destilação; 90% vol. recuperados, máx.	°C	360 (5)	-	1160	-
Resíduo de carbono dos 100% destilados, máx.	% massa	0,10	-	4530, 189	EN ISO 10370, -
Cinzas sulfatadas, máx.	% massa	0,020	9842	874	ISO 3987
Enxofre total (6)	% massa	Anotar	-	4294 5453 -	- EN ISO 14596
Sódio + Potássio, máx	mg/kg	10	-	-	EN 14108 EN 14109
Cálcio + Magnésio (6)	mg/kg	Anotar	-	-	EN 14538
Fósforo (6)	mg/kg	Anotar	-	4951	EN 14107
Corrosividade ao cobre, 3h a 50 °C, máx.	-	1	14359	130	EN ISO 2160
Número de Cetano (6)	-	Anotar	-	613	EN ISO 5165
Ponto de entupimento de filtro a frio, máx.	°C	(7)	14747	6371	-
Índice de acidez, máx.	mg KOH/g	0,80	14448	664	- EN 14104 (8)
Glicerina livre, máx.	% massa	0,02	-	6584 (8) (9)	- EN 14105 (8) (9) EN 14106 (8) (9)
Glicerina total, máx.	% massa	0,38	-	6584 (8) (9)	- EN 14105 (8) (9)
Monoglicerídeos (6) .	% massa	Anotar	-	6584 (8) (9)	- EN 14105 (8) (9)
Diglicerídeos (6)	% massa	Anotar	-	6584 (8) (9)	- EN 14105 (8) (9)
Triglicerídeos (6)	% massa	Anotar	-	6584 (8) (9)	- EN 14105 (8) (9)
Metanol ou Etanol, máx.	% massa	0,5	-	-	EN 14110 (8)

Índice de lodo (6)		Anotar	-	-	EN 14111 (8)
Estabilidade à oxidação a 110°C, mín	h	6	-	-	EN 14112 (8)

Nota:

(1) LII – Límpido e isento de impurezas.

(2) A mistura óleo diesel/biodiesel utilizada deverá obedecer aos limites estabelecidos para massa específica a 20°C constantes da especificação vigente da ANP de óleo diesel automotivo.

(3) A mistura óleo diesel/biodiesel utilizada deverá obedecer aos limites estabelecidos para viscosidade a 40°C constantes da especificação vigente da ANP de óleo diesel automotivo.

(4) O método EN ISO12937 poderá ser utilizado para quantificar a água não dispensando a análise e registro do valor obtido para água e sedimentos pelo método ASTM D 2709 no Certificado da Qualidade.

(5) Temperatura equivalente na pressão atmosférica.

(6) Estas características devem ser analisadas em conjunto com as demais constantes da tabela de especificação a cada trimestre civil. Os resultados devem ser enviados pelo produtor de biodiesel à ANP, tomando uma amostra do biodiesel comercializado no trimestre e, em caso de neste período haver mudança de tipo de matéria-prima, o produtor deverá analisar número de amostras correspondente ao número de tipos de matérias-primas utilizadas.

(7) A mistura óleo diesel/ biodiesel utilizada deverá obedecer aos limites estabelecidos para ponto de entupimento de filtro a frio constantes da especificação vigente da ANP de óleo diesel automotivo.

(8) Os métodos referenciados demandam validação para as oleaginosas nacionais e rota de produção etílica.

(9) Não aplicáveis para as análises mono-, di-, triglicerídeos, glicerina livre e glicerina total de palmiste e coco. No caso de biodiesel oriundo de mamona deverão ser utilizados, enquanto não padronizada norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT para esta determinação, os métodos: do Centro de Pesquisas da Petrobrás - CENPES constantes do ANEXO B para glicerina livre e total, mono e diglicerídeos, triglicerídeos.

## ANEXO B

### Metodologias para análise de biodiesel de mamona

Autores: Danielle Sant Anna Gonçalves, Emmanuelle Sales Retori, Fátima Regina Dutra Faria, Gláucia Pires Leal, Klaire de Oliveira Cerqueira, Manoel J. R. Guimarães Neto, Marco Antonio Gomes Teixeira, Rosimery Souza do Carmo, Rosana Cardoso Lopes Pereira e Simone de Brito Araújo (Fundação Gorceix) CENPES/PDEDS/QM

Novembro /2004 I - Introdução

A especificação do biodiesel a ser produzido no Brasil consta da Portaria 255/03 da Agência Nacional de Petróleo. Com relação às análises de glicerina livre, monoglicerídeos, diglicerídeos e triglicerídeos, o método ASTM D6584 é indicado. Porém, em testes realizados no CENPES, foi verificado que esta metodologia não era adequada ao biodiesel de mamona, sendo necessário desenvolvimento de novos métodos de análise.

Assim após alguns testes, desenvolveram-se as metodologias descritas neste documento tanto para acompanhamento do processo de produção de biodiesel, bem como para atendimento aos requisitos de qualidade do produto final.

**Capítulo 1:**

DETERMINAÇÃO DE GLICERINA LIVRE EM BODIESEL POR CROMATOGRAFIA EM FASE GASOSA

**Capítulo 2:**

DETERMINAÇÃO DE MONOGLICERÍDEOS, DIGLICERÍDEOS E ÉSTERES TOTAIS EM BODIESEL DE MAMONA POR CROMATOGRAFIA EM FASE GASOSA

**Capítulo 3:**

DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE METANOL E/OU ETANOL EM BODIESEL POR CROMATOGRAFIA EM FASE GASOSA

**Capítulo 4:**

DETERMINAÇÃO DE GLICERINA TOTAL E DO TEOR DE TRIGLICERÍDEOS EM BODIESEL DE MAMONA 1. OBJETIVO

**DIRECTIVA 2003/30/CE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO**  
**de 8 de Maio de 2003**  
**relativa à promoção da utilização de biocombustíveis ou de outros combustíveis renováveis nos transportes**

O PARLAMENTO EUROPEU E O CONSELHO DA UNIÃO EUROPEIA,

Tendo em conta o Tratado que instituiu a Comunidade Europeia e, nomeadamente, o n.º 1 do artigo 175.º,

Tendo em conta a proposta da Comissão <sup>(1)</sup>,

Tendo em conta o parecer do Comité Económico e Social Europeu <sup>(2)</sup>,

Tendo em conta o parecer do Comité das Regiões <sup>(3)</sup>,

Deliberando nos termos do artigo 251.º do Tratado <sup>(4)</sup>,

Considerando o seguinte:

- (1) O Conselho Europeu, realizado em Gotemburgo em 15 e 16 de Junho de 2001, adoptou uma estratégia da União Europeia em favor do desenvolvimento sustentável que consiste numa série de medidas, entre as quais o desenvolvimento dos biocombustíveis.
- (2) Os recursos naturais e a sua utilização prudente e racional, que o n.º 1 do artigo 174.º do Tratado refere, incluem o petróleo, o gás natural e os combustíveis sólidos, que são fontes de energia essenciais mas também as principais fontes de emissão de dióxido de carbono.
- (3) Existe, contudo, um amplo leque de biomassa que pode ser utilizada para a produção de biocombustíveis derivados de produtos agrícolas e florestais bem como de resíduos e detritos da silvicultura e das indústrias silvícola e agroalimentar.
- (4) O sector dos transportes é responsável por mais de 30 % do consumo final de energia na Comunidade e encontra-se em expansão, tendência que, tal como acontece com as emissões de dióxido de carbono, deverá acentuar-se. Esta expansão será maior, em termos percentuais, nos países candidatos, após a adesão à União Europeia.
- (5) No livro branco da Comissão, intitulado «A política europeia de transportes no horizonte 2010: a hora das opções», parte-se do pressuposto de que, entre 1990 e 2010, as emissões de CO<sub>2</sub> com origem no sector dos transportes sofrerão um aumento de 50 %, passando a 1 113 milhões de toneladas, fenómeno pelo qual são sobremaneira responsáveis os transportes rodoviários, aos quais são imputadas 84 % das emissões de CO<sub>2</sub> originadas pelos transportes. Por razões ecológicas, no livro branco exige-se, por conseguinte, a diminuição do grau de dependência do petróleo (presentemente de 98 %) por parte do sector dos transportes através da utilização de combustíveis alternativos, como os biocombustíveis.

(6) Uma utilização mais intensa de biocombustíveis nos transportes faz parte do pacote de medidas necessárias para dar cumprimento ao Protocolo de Quioto e de qualquer pacote de políticas para o cumprimento de novos compromissos nesta matéria.

(7) A utilização acrescida de biocombustíveis nos transportes, a par de outros combustíveis alternativos, incluindo o GPL e o GNC, constitui um dos instrumentos com os quais a Comunidade poderá reduzir a dependência das importações de energia e influenciar o mercado dos combustíveis para transportes e, desse modo, a segurança do abastecimento energético a médio e a longo prazo. Tal não diminui, todavia, a importância do cumprimento da legislação comunitária em matéria de qualidade dos combustíveis, emissões dos veículos e qualidade do ar.

(8) Em consequência dos progressos tecnológicos a maior parte dos veículos actualmente em circulação na União Europeia é capaz de usar sem qualquer problema uma mistura com baixo teor de biocombustível. Os recentes avanços tecnológicos permitem utilizar maiores percentagens de biocombustível na mistura. Há países em que se utilizam já misturas com percentagens de 10 % ou mais de biocombustíveis.

(9) As frotas cativas oferecem a possibilidade de utilizar uma concentração mais elevada de biocombustíveis. Em algumas cidades existem já frotas cativas que funcionam com biocombustíveis puros, que, em certos casos, contribuíram para melhorar a qualidade do ar nas zonas urbanas. Os Estados-Membros poderão, pois, dar prioridade ao fomento do uso de biocombustíveis nos meios de transporte público.

(10) A promoção do uso de biocombustíveis nos transportes constitui um passo no sentido de uma mais vasta utilização da biomassa, o que permitirá um desenvolvimento mais extenso dos biocombustíveis no futuro, sem pôr, no entanto, de parte outras opções e, em particular, a do hidrogénio.

(11) A política de investigação levada a efeito pelos Estados-Membros em torno de uma maior utilização dos biocombustíveis deverá integrar, em grau significativo, o sector do hidrogénio, e promover esta opção, tendo em conta os programas-quadro comunitários pertinentes.

<sup>(1)</sup> JO C 103 E de 30.4.2002, p. 205 e JO C 331 E de 31.12.2002, p. 291.

<sup>(2)</sup> JO C 149 de 21.6.2002, p. 7.

<sup>(3)</sup> JO C 278 de 14.11.2002, p. 29.

<sup>(4)</sup> Parecer do Parlamento Europeu de 2 de Julho de 2002 (ainda não publicado no Jornal Oficial), posição comum do Conselho de 18 de Novembro de 2002 (JO C 32 E de 11.2.2003, p. 1) e decisão do Parlamento Europeu de 12 de Março de 2003 (ainda não publicada no Jornal Oficial).

- (12) O óleo vegetal puro produzido a partir de plantas oleaginosas, por pressão, extracção ou métodos comparáveis, em bruto ou refinado, mas quimicamente inalterado, pode também ser utilizado como biocombustível em casos específicos, quando a sua utilização for compatível com o tipo de motores e os respectivos requisitos relativos às emissões.
- (13) Os novos tipos de combustíveis devem respeitar as normas técnicas aceites se se pretende que passem a ser mais usados pelos consumidores e fabricantes de automóveis, aumentando a sua penetração no mercado. As normas técnicas são também a base dos requisitos relativos às emissões e respectivo controlo. Poderá ser difícil assegurar o cumprimento por parte dos novos tipos de combustível das actuais normas técnicas, que, em grande medida, foram desenvolvidas para os combustíveis fósseis convencionais. A Comissão e as entidades de normalização devem acompanhar a evolução e ajustar-se a ela com dinamismo, desenvolvendo normas, em particular os parâmetros de volatilidade, que permitam a introdução de novos combustíveis e preservem os requisitos de desempenho ambiental.
- (14) O bioetanol e o biodiesel, quando utilizados para veículos, em estado puro ou em mistura, devem cumprir as normas de qualidade estabelecidas para assegurar um desempenho óptimo dos motores. É de referir que, no caso do biodiesel para os motores diesel, sempre que se optar pelo processo de esterificação, pode ser aplicada a norma prEN 14214 do Comité Europeu de Normalização (CEN), relativa aos ésteres metílicos de ácidos gordos (FAME). O CEN deveria, por conseguinte, estabelecer normas adequadas para outros produtos biocombustíveis para os transportes na União Europeia.
- (15) A promoção do uso de biocombustíveis no respeito de práticas agrícolas e florestais sustentáveis, prevista na regulamentação que rege a Política Agrícola Comum (PAC), poderá criar novas oportunidades para um desenvolvimento rural sustentável numa PAC mais virada para o mercado e orientada em mais larga medida para o mercado europeu, respeitando uma ruralidade que está viva e uma agricultura multifuncional, e poderá abrir um novo mercado para produtos agrícolas inovadores nos actuais e nos futuros Estados-Membros.
- (16) Na sua resolução de 8 de Junho de 1998 <sup>(1)</sup>, o Conselho aprovou a estratégia e o plano de acção da Comissão para as fontes de energia renováveis e exigiu medidas específicas para o sector dos biocombustíveis.
- (17) O livro verde da Comissão intitulado «Para uma estratégia europeia de segurança do abastecimento energético» fixa como objectivo a substituição de 20 % dos combustíveis convencionais por combustíveis alternativos no sector dos transportes rodoviários até 2020.
- (18) Os combustíveis alternativos só poderão penetrar no mercado se tiverem uma disponibilidade generalizada e forem competitivos.
- (19) Na sua resolução de 18 de Junho de 1998 <sup>(2)</sup>, o Parlamento Europeu apelou a que a quota de mercado dos biocombustíveis fosse aumentada para 2 % ao longo de cinco anos mediante um pacote de medidas, incluindo isenções fiscais, ajuda financeira à indústria transformadora e a imposição de uma percentagem obrigatória de biocombustíveis às companhias petrolíferas.
- (20) O método óptimo para aumentar a parte dos biocombustíveis nos mercados nacionais e comunitário depende da disponibilidade de recursos e matérias-primas, das políticas nacionais e comunitárias de promoção dos biocombustíveis e das disposições fiscais, bem como do envolvimento adequado de todos os intervenientes/partes interessadas.
- (21) As políticas nacionais de promoção da utilização de biocombustíveis não devem conduzir à proibição da livre circulação de combustíveis que cumpram as especificações ambientais harmonizadas constantes da legislação comunitária.
- (22) A promoção da produção e do uso de biocombustíveis poderá contribuir para uma redução da dependência das importações de energia e das emissões de gases com efeito de estufa. Além disso, os biocombustíveis, em estado puro ou em mistura, podem, em princípio, ser utilizados nos veículos automóveis existentes e usar a infra-estrutura de distribuição de combustível actualmente instalada. A mistura de biocombustível com combustíveis fósseis poderá facilitar uma eventual redução de custos em relação ao sistema de distribuição na Comunidade.
- (23) Atendendo a que o objectivo da acção encarada, designadamente a introdução de princípios gerais no sentido da comercialização e distribuição de uma percentagem mínima de biocombustíveis, não pode ser suficientemente realizado pelos Estados-Membros devido à dimensão dessa acção e pode, pois, ser melhor alcançado ao nível comunitário, a Comunidade pode tomar medidas em conformidade com o princípio de subsidiariedade consagrado no artigo 5.º do Tratado. Em conformidade com o princípio de proporcionalidade, consagrado no mesmo artigo, a presente directiva não excede o necessário para atingir aquele objectivo.
- (24) Deve-se promover a investigação e o desenvolvimento tecnológico no domínio da sustentabilidade dos biocombustíveis.
- (25) A utilização acrescida de biocombustíveis deve ser acompanhada por uma análise aprofundada do respectivo impacto ambiental, económico e social, de modo a poder-se decidir se é aconselhável aumentar a quota-parte dos biocombustíveis em relação aos combustíveis convencionais.

<sup>(1)</sup> JO C 198 de 24.6.1998, p. 1.

<sup>(2)</sup> JO C 210 de 6.7.1998, p. 215.

- (26) Deve ser prevista a possibilidade de adaptar rapidamente a lista de biocombustíveis, a percentagem de conteúdos renováveis e o calendário para a introdução dos biocombustíveis no mercado dos combustíveis para transportes ao progresso técnico e aos resultados de uma avaliação do impacto ambiental na primeira fase do programa de introdução.
- (27) Importa tomar medidas com vista ao rápido desenvolvimento de normas de qualidade para os biocombustíveis a utilizar no sector automóvel, tanto em estado puro como enquanto componentes de uma mistura com combustíveis convencionais. Embora a fracção biodegradável dos resíduos constitua uma fonte potencialmente útil para a produção de biocombustíveis, a norma de qualidade deve ter em conta a possível contaminação presente nos resíduos, a fim de evitar que componentes especiais possam danificar o veículo ou degradar as emissões.
- (28) A promoção do uso de biocombustíveis deve ser consentânea com os objectivos ambientais e de segurança do abastecimento bem como com as medidas e objectivos políticos afins de cada Estado-Membro. Ao proceder a essa promoção, os Estados-Membros poderão estudar formas rentáveis de dar publicidade às possibilidades de utilização dos biocombustíveis.
- (29) As medidas necessárias à execução da presente directiva serão aprovadas nos termos da Decisão 1999/468/CE do Conselho, de 28 de Junho de 1999, que fixa as regras de exercício das competências de execução atribuídas à Comissão <sup>(1)</sup>,
- c) «Outros combustíveis renováveis», os combustíveis renováveis que não sejam biocombustíveis, obtidos a partir de fontes de energia renováveis tal como se encontram definidas na Directiva 2001/77/CE <sup>(2)</sup>, utilizados para efeitos de transporte;
- d) «Teor energético», o poder calorífico inferior de um combustível.

2. São considerados biocombustíveis pelo menos os produtos a seguir indicados:

- a) «Bioetanol»: etanol produzido a partir de biomassa e/ou da fracção biodegradável de resíduos, para utilização como biocombustível;
- b) «Biodiesel»: éster metílico produzido a partir de óleos vegetais ou animais, com qualidade de combustível para motores diesel, para utilização como biocombustível;
- c) «Biogás»: gás combustível produzido a partir de biomassa e/ou da fracção biodegradável de resíduos, que pode ser purificado até à qualidade do gás natural, para utilização como biocombustível, ou gás de madeira;
- d) «Biometanol»: metanol produzido a partir de biomassa, para utilização como biocombustível;
- e) «Bioéter dimetílico»: éter dimetílico produzido a partir de biomassa, para utilização como biocombustível;
- f) «Bio-ETBE (bioéter etil-ter-butílico)»: ETBE produzido a partir do bioetanol; A percentagem volumétrica de bio-ETBE calculada como biocombustível é de 47 %;
- g) «Bio-MTBE (bioéter etil-ter-metílico)»: combustível produzido com base no biometanol. A percentagem volumétrica de bio-MTBE calculada como biocombustível é de 36 %;
- h) «Biocombustíveis sintéticos»: hidrocarbonetos sintéticos ou misturas de hidrocarbonetos sintéticos produzidos a partir de biomassa;
- i) «Biohidrogénio»: hidrogénio produzido a partir de biomassa e/ou da fracção biodegradável de resíduos, para utilização como biocombustível;
- j) «Óleo vegetal puro produzido a partir de plantas oleaginosas»: óleo produzido por pressão, extracção ou métodos comparáveis, a partir de plantas oleaginosas, em bruto ou refinado, mas quimicamente inalterado, quando a sua utilização for compatível com o tipo de motores e os respectivos requisitos relativos a emissões.

ADOPTARAM A PRESENTE DIRECTIVA:

#### Artigo 1.º

A presente directiva promove a utilização de biocombustíveis ou de outros combustíveis renováveis, em substituição do gasóleo ou da gasolina para efeitos de transporte, em cada Estado-Membro, por forma a contribuir para o alcance de objectivos tais como o cumprimento dos compromissos relativos às alterações climáticas, à segurança do abastecimento de forma que não prejudique o ambiente e à promoção das fontes de energia renováveis.

#### Artigo 2.º

1. Para efeitos da presente directiva, entende-se por:

- a) «Biocombustível», o combustível líquido ou gasoso para transportes produzido a partir de biomassa;
- b) «Biomassa», a fracção biodegradável de produtos e resíduos provenientes da agricultura (incluindo substâncias vegetais e animais), da silvicultura e das indústrias conexas, bem como a fracção biodegradável dos resíduos industriais e urbanos;

#### Artigo 3.º

1. a) Os Estados-Membros deverão assegurar que seja colocada nos seus mercados uma proporção mínima de biocombustíveis e de outros combustíveis renováveis, e estabelecem metas indicativas nacionais para o efeito;
- b) i) o valor de referência dessas metas, calculado com base no teor energético, é de 2 % de toda a gasolina e de todo o gasóleo utilizados para efeitos de transporte colocados no mercado, até 31 de Dezembro de 2005,

<sup>(1)</sup> Directiva 2001/77/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 27 de Setembro de 2001, relativa à promoção da electricidade produzida a partir de fontes de energia renováveis no mercado interno da electricidade (JO L 283 de 27.10.2001, p. 33).

<sup>(2)</sup> JO L 184 de 17.7.1999, p. 23.

ii) o valor de referência dessas metas, calculado com base no teor energético, é de 5,75 % de toda a gasolina e de todo o gasóleo utilizados para efeitos de transporte colocados no mercado, até 31 de Dezembro de 2010.

2. Os biocombustíveis podem ser disponibilizados sob uma das seguintes formas:

- a) Biocombustíveis puros ou em concentração elevada em derivados do petróleo, em conformidade com normas específicas de qualidade para os transportes;
- b) Biocombustíveis misturados com derivados do petróleo, em conformidade com as normas comunitárias que estabelecem as especificações técnicas aplicáveis aos combustíveis para transportes (EN 228 e EN 590);
- c) Líquidos derivados de biocombustíveis, como o ETBE (éter etil-ter-butílico), em que a percentagem de biocombustível é a especificada no n.º 2 do artigo 2.º

3. Os Estados-Membros seguem os efeitos da utilização de biocombustíveis misturados com gasóleo em percentagens superiores a 5 % em veículos não adaptados e, se necessário, tomam medidas para garantir o cumprimento da legislação comunitária pertinente em matéria de normas de emissão.

4. Os Estados-Membros tomam em consideração, nas medidas que adoptarem, o balanço geral climático e ambiental dos vários tipos de biocombustíveis e outros combustíveis renováveis e podem dar prioridade à promoção dos combustíveis cujo balanço ambiental apresentar uma melhor relação custo/eficácia, sem deixarem de atender simultaneamente à competitividade e à segurança do abastecimento.

5. Os Estados-Membros asseguram que o público seja informado da disponibilidade de biocombustíveis e outros combustíveis renováveis. É obrigatória uma rotulagem específica, nos postos de venda, quando as percentagens de biocombustíveis, misturados com derivados do petróleo, excedam o valor-limite de 5 % de ésteres metílicos de ácidos gordos (FAME) ou de 5 % de bioetanol.

#### Artigo 4.º

1. Os Estados-Membros comunicam à Comissão, antes de 1 de Julho de cada ano:

- as medidas tomadas para promover a utilização dos biocombustíveis, ou de outros combustíveis renováveis, na substituição do gasóleo ou da gasolina no domínio dos transportes,
- os recursos nacionais atribuídos à produção de biomassa para fins energéticos que não os dos transportes, e
- as vendas totais de combustíveis para transportes e a parte de biocombustíveis, puros ou em mistura, e de outros combustíveis renováveis colocados no mercado durante o ano anterior. Se necessário, os Estados-Membros informam de quaisquer condições excepcionais no fornecimento de petróleo bruto ou de produtos do petróleo que tenham afectado a comercialização dos biocombustíveis e outros combustíveis renováveis.

No seu primeiro relatório após a entrada em vigor da presente directiva, os Estados-Membros indicam o nível das respectivas metas indicativas nacionais para a primeira fase. No relatório referente a 2006, os Estados-Membros indicam as respectivas metas indicativas nacionais para a segunda fase.

Nesses relatórios, a diferença entre as metas nacionais e os valores de referência mencionados na alínea b) do n.º 1 do artigo 3.º deve ser justificada, podendo ser tomados como base os seguintes elementos:

- a) Factores objectivos, tais como o potencial nacional limitado para a produção de biocombustíveis a partir de biomassa;
- b) A quantidade de recursos nacionais atribuídos à produção de biomassa para outras utilizações da energia que não os transportes e as características específicas do mercado nacional no que se refere aos combustíveis destinados aos transportes;
- c) Políticas nacionais que atribuam recursos similares à produção de outros combustíveis para os transportes baseados em fontes de energia renováveis e consentâneas com os objectivos da presente directiva.

2. Até 31 de Dezembro de 2006 e, a partir dessa data, de dois em dois anos, a Comissão elabora um relatório de avaliação destinado ao Parlamento Europeu e ao Conselho sobre os progressos registados na utilização de biocombustíveis e de outros combustíveis renováveis nos Estados-Membros.

Esse relatório deve contemplar pelo menos os seguintes aspectos:

- a) A rentabilidade das medidas adoptadas pelos Estados-Membros com vista a promover a utilização dos biocombustíveis e de outros combustíveis renováveis;
- b) Os aspectos económicos e o impacto ambiental de um novo aumento na quota-parte dos biocombustíveis e de outros combustíveis renováveis;
- c) A perspectiva do ciclo de vida dos biocombustíveis e de outros combustíveis renováveis, tendo em vista indicar possíveis medidas para a futura promoção dos referidos combustíveis que não prejudiquem o clima e o ambiente e que potencialmente se possam tornar competitivos e economicamente viáveis;
- d) A sustentabilidade das culturas utilizadas para a produção de biocombustíveis, e especialmente a utilização dos solos, o grau de intensidade do cultivo, a rotação das culturas e o uso de pesticidas;
- e) A avaliação das incidências diferenciadoras da utilização de biocombustíveis e outros combustíveis renováveis em matéria de alterações climáticas e do seu impacto sobre a redução das emissões de CO<sub>2</sub>;
- f) Um estudo de outras opções a mais longo prazo em matéria de medidas relacionadas com a eficiência energética no sector dos transportes.

Com base nesse relatório, a Comissão apresenta, quando adequado, ao Parlamento Europeu e ao Conselho propostas sobre a adaptação do sistema de metas definido no n.º 1 do artigo 3.º. Se nesse relatório se concluir que as metas indicativas podem não ser atingidas por razões não justificadas e/ou não relacionadas com novos dados científicos, essas propostas deverão incidir nas metas nacionais, incluindo eventualmente metas obrigatórias, na forma apropriada.

#### Artigo 5.º

A lista constante do n.º 2 do artigo 2.º pode ser adaptada ao progresso técnico nos termos do n.º 2 do artigo 6.º Na adaptação dessa lista deve ter-se em conta o impacto ambiental dos biocombustíveis.

#### Artigo 6.º

1. A Comissão é assistida por um comité.
2. Sempre que se faça referência ao presente número, são aplicáveis os artigos 5.º e 7.º da Decisão 1999/468/CE, tendo-se em conta o disposto no seu artigo 8.º

O prazo referido no n.º 6 do artigo 5.º da Decisão 1999/468/CE é de três meses.

3. O comité aprovará o seu regulamento interno.

#### Artigo 7.º

1. Os Estados-Membros devem pôr em vigor as disposições legislativas, regulamentares e administrativas necessárias para dar cumprimento à presente directiva até 31 de Dezembro de 2004 e informar imediatamente a Comissão desse facto.

Quando os Estados-Membros aprovarem essas disposições, estas devem incluir uma referência à presente directiva ou ser acompanhadas dessa referência aquando da sua publicação oficial. As modalidades dessa referência serão aprovadas pelos Estados-Membros.

2. Os Estados-Membros devem comunicar à Comissão o texto das disposições de direito interno que aprovarem nas matérias reguladas pela presente directiva.

#### Artigo 8.º

A presente directiva entra em vigor no dia da sua publicação no *Jornal Oficial da União Europeia*.

#### Artigo 9.º

Os Estados-Membros são os destinatários da presente directiva.

Feito em Bruxelas, em 8 de Maio de 2003.

*Pelo Parlamento Europeu*

*O Presidente*

P. COX

*Pelo Conselho*

*O Presidente*

M. CHRISOCHOÏDIS