

## PERSPECTIVAS DE UTILIZAÇÃO DE BIODIESEL COMO SUBSTITUTO PARCIAL DO ÓLEO DIESEL EM MOTORES AUTOMOTIVOS

**Guilherme Pianovski Júnior**

Centro Federal de Educação Tecnológica - CEFETPR – Departamento de Engenharia Mecânica  
Av Sete de Setembro 3165 – Curitiba, PR - 80230-901  
[guilherme@cefetpr.br](mailto:guilherme@cefetpr.br)

**José Antonio Velásquez**

Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUCPR – Departamento de Engenharia Mecânica  
R. Imaculada Conceição 1155 – Curitiba, PR – 80215-901  
[velasqz@rla01.pucpr.br](mailto:velasqz@rla01.pucpr.br)

**Resumo.** No artigo é feita uma avaliação das perspectivas de utilização do biodiesel como combustível automotivo, levando-se em conta diversas considerações técnicas, ambientais e socio-econômicas. É apresentada uma revisão bibliográfica sobre as tecnologias de produção de biodiesel a partir de diferentes óleos vegetais e utilizando tanto metanol como etanol. Além disso, é feita uma compilação de dados da literatura sobre as propriedades termofísicas do biodiesel obtido a partir de vários tipos de óleos vegetais. Alguns dos valores reportados na literatura são comparados com dados medidos em amostras de biodiesel, produzidas em nosso laboratório a partir de óleo de soja e etanol hidratado. Finalmente, são apresentados resultados de ensaios de desempenho realizados em dinamômetro, utilizando um motor diesel turboalimentado de seis cilindros. Durante os ensaios foram testadas diversas misturas biodiesel/diesel, sendo que os testes confirmaram a viabilidade técnica de utilização do biodiesel como substituto parcial do óleo diesel.

**Palavras chave:** Motores diesel, Combustíveis alternativos, Ésteres de óleo vegetal, Biodiesel, Transesterificação.

### 1. Introdução

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.

Desde a Revolução Industrial a demanda de energia no mundo cresceu a um ritmo assustador chegando a níveis tão elevados que, durante as primeiras duas décadas do século XX, a humanidade consumiu mais energia do que em toda sua existência anterior. A partir de então, constatações similares puderam ser feitas para cada período subsequente de 20 anos (Leite, 1997). A partir da segunda metade do século XIX, o petróleo começou a entrar em cena na economia mundial para vir a se tornar a fonte de energia mais importante durante o século XX. A variedade e a versatilidade de seus derivados, bem como a facilidade de seu manuseio e transporte, determinaram a sua crescente aceitação diante das outras fontes de energia. Mas, além disso, a principal causa de sua crescente importância relativa como insumo energético esteve no fato que, apesar do aumento da demanda no século XX, foi possível manter o suprimento em escala mundial sempre satisfatório e a preço relativamente estável. Assim, fundamentado em grandes ofertas e preços convenientes, o mundo moderno se voltou ao uso de derivados do petróleo para o atendimento de uma grande parcela de suas necessidades energéticas e praticamente todos os segmentos industriais desenvolveram tecnologias calcadas na utilização desses derivados.

Como se sabe, este panorama de tranquilidade e conveniência econômica começou a mudar a partir de 1973, com o embargo do petróleo decretado pelos países árabes. Em 1979, a revolução iraniana provocou a segunda alta nos preços do petróleo causando uma nova recessão mundial. Como resultado destes choques ocorreram significativos ajustes na economia mundial, contudo o petróleo continua tendo um papel fundamental na economia mundial. Prova disto são as conseqüências econômicas da deterioração das relações políticas no Oriente Médio que estamos vivendo nos dias atuais.

Segundo dados da Agência Nacional de Petróleo, referentes ao ano de 1999, as reservas mundiais provadas de petróleo são de  $1040 \times 10^9$  barris, e a produção mundial diária é de  $71460 \times 10^3$  barris (Agência Nacional de Petróleo, 2000). A partir desses números pode-se fazer uma estimativa grosseira do horizonte de disponibilidade de petróleo, admitindo que tanto as reservas como o nível de consumo permaneçam invariáveis. O resultado que se obtém dessa maneira indica que o petróleo se esgotaria em aproximadamente 40 anos. Borman e Ragland (1998) citam estimativas mais precisas feitas em 1994 pela *Energy Information Administration*, segundo as quais o suprimento de petróleo estaria garantido até o ano 2060.

Mais ou menos a partir da década de 70 do século XX, acentuavam-se também as preocupações com os danos ambientais provocados pelo crescimento das populações, da industrialização e, em particular, pela intensificação do uso das energias fósseis (carvão e petróleo) e as inerentes emissões de gases tóxicos. Governos e organismos não governamentais foram compelidos a pronunciar-se e a agir no sentido de proteger o meio ambiente, fazendo com que este assunto definitivamente entrasse na ordem do dia.

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 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 (2000) 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 quota 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.

Embora os custos de produção e de transformação do biodiesel, calculados com base em culturas oleaginosas tradicionais de ciclo anual como a colza, o girassol e a soja, sejam atualmente desfavoráveis em comparação aos derivados de petróleo, não há dúvida de que os óleos vegetais extraídos de culturas perenes com alto teor de óleo, pouco ou ainda não exploradas no País — como a macaúba (4,0 - 6,0 t/ha), o pinhão-manso (1,5 - 4,0 t/ha) e o indaiá-rasteiro (1,5 - 3,0 t/ha) — poderão representar uma alternativa interessante para reduzir estes custos (Ministério da Indústria e Comércio, 1985). Além disso, não se pode deixar de considerar a possibilidade, que as tecnologias mais recentes nos oferecem, de explorar o desenvolvimento de culturas transgênicas com maiores teores de óleo, que permitiriam reduzir os custos de produção do biodiesel e proporcionariam maior rentabilidade para o produtor.

Além da seleção de espécies oleaginosas com maior produtividade de óleo por hectare/ano, os custos de produção dos combustíveis derivados de óleos vegetais também dependem do nível de complexidade de seu processamento industrial. Por isso, operações como a desodorização ou a clarificação, necessárias apenas na indústria de óleos comestíveis, devem ser descartadas. Um outro aspecto importante que deve ser levado em conta na avaliação do desempenho econômico dos combustíveis obtidos a partir de óleos vegetais é a possibilidade de produzi-los nos

próprios locais de utilização, o que permitiria reduzir substancialmente os custos de transporte que hoje oneram significativamente os derivados do petróleo.

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 o 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. Os combustíveis para motores de ignição por compressão

Os motores de ignição por compressão encontram aplicação em todos os setores econômicos. São motores que podem ser utilizados em ônibus e caminhões, em veículos leves, em geradores de energia elétrica, em navios de todos os portes, em equipamentos de mineração, etc. A principal razão para esta vasta diversidade de aplicações reside na sua elevada eficiência térmica que, por sua vez, é responsável pelo seu relativamente baixo consumo de combustível.

É possível ter uma noção do longo caminho percorrido durante o desenvolvimento e aperfeiçoamento dos motores diesel considerando-se o fato que em 1897, ao apresentar ao mundo o motor que desenvolvera, Rudolf Diesel obteve um índice de eficiência térmica de 26,2% (Hikosaka, 1997). Atualmente é possível deparar com motores diesel com eficiência térmica de aproximadamente 42% (Zima, 1997), sendo que existe um projeto nos Estados Unidos para elevar este valor até 55% (Hikosaka, 1997).

### 2.1. Os óleos vegetais *in natura*.

Por serem renováveis e apresentarem grandes quantidades de carbono, os óleos vegetais *in natura* possuem um grande potencial como combustíveis alternativos. Eles apresentam poder calorífico e índice de cetano semelhantes aos do óleo diesel, sendo que as maiores diferenças entre as propriedades físico-químicas referem-se à viscosidade, ao ponto de névoa e à taxa do resíduo de carbono (Sapuan et al, 1996; Graboski e McCormick, 1998).

Os óleos vegetais *in natura* têm sido usados como combustíveis para motores de ignição por compressão desde 1900 (Harwood, 1984; Lowry, 1990). O protótipo construído por Rudolf Diesel no final do século XIX utilizava óleo de amendoim *in natura*. Entretanto, a literatura deixa evidente que o emprego de óleos vegetais *in natura* nos motores de combustão interna ainda hoje está sujeito a muitas discussões e controvérsias.

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. Estudos realizados no Brasil tanto em centros de pesquisas como por fabricantes de motores, mostraram que, ao comparar-se motores funcionando com óleos vegetais *in natura* e com óleo diesel, verifica-se que as potências desenvolvidas são aproximadamente iguais, enquanto que o consumo específico é ligeiramente maior no caso dos óleos vegetais (Gunther, 1983).

A alta viscosidade dos óleos vegetais *in natura* 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 *in natura*.

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 (Graboski e McCormick, 1998). Sapuan et al. (1996), citam como exemplos de óleos vegetais que têm sido utilizados como combustíveis os óleos de coco, de semente de algodão, de amendoim, de girassol, de soja, de palma, de joboba, de colza, de linho e de oliva, entre outros.

Os óleos vegetais *in natura* se mostram como uma alternativa viável para aplicações rurais, nas regiões mais distantes dos grandes centros distribuidores de combustíveis, onde, muitas vezes, o preço e a dificuldade do transporte dos combustíveis tradicionais inviabilizam o uso dos motores de combustão interna.

A empresa Elsbett Technologie GmbH vem produzindo motores de ignição por compressão que utilizam com sucesso óleos vegetais *in natura* como combustível. A família Elsbett tem se dedicado a desenvolver um sistema de combustão denominado “duotérmico” que, em conjunto com um sistema de injeção modificado, cria as condições ideais para a queima de óleos vegetais *in natura*.

### 2.2. O etanol e o metanol

O etanol e o metanol são dois combustíveis alternativos que possuem um grande potencial de utilização no país. O etanol, largamente produzido no Brasil, é utilizado em veículos automotores de ignição por centelha desde o final dos anos setenta. O metanol, importado principalmente dos Estados Unidos devido a uma escassez temporária de etanol nos anos noventa, também já foi utilizado em automóveis movidos originalmente a álcool etílico hidratado. O problema é que os álcoois não são combustíveis adequados para o uso em motores de ignição por compressão devido ao seu baixo

índice de cetano e pobre lubricidade (Scholl e Sorenson, 1993). Na década de 80, a MWM, fábrica brasileira de motores diesel, desenvolveu e colocou à venda, motores com dois sistemas de injeção, o primeiro realizava uma injeção piloto de óleo diesel e o segundo fazia a injeção principal de etanol hidratado. Apesar de ter tido boa aceitação dos consumidores na época em que foi lançado, atualmente este motor não está mais disponível no mercado.

### 2.3. A combinação óleo vegetal – álcool

Para solucionar os inconvenientes do uso direto de óleos vegetais nos motores diesel, em 1940 foram iniciados estudos na Bélgica visando a produção em escala semi-industrial de ésteres etílicos de óleo de dendê. Como resultado de pesquisas mais recentes em diversos países, 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 (Scholl e Sorenson, 1993). O éster mais comum de ser encontrado e mais fácil de ser obtido é o éster metílico, produzido a partir da reação entre um óleo vegetal e o metanol. Este éster tem a particularidade de queimar de uma forma limpa e de ter um desempenho e modo de combustão equivalentes ao óleo diesel convencional (Choi et al, 1997). O uso de ésteres de óleos vegetais misturados com óleo diesel já foi estudado, no Brasil, no início da década de oitenta durante o programa OVEG 1, porém seu uso não progrediu devido ao alto custo, à baixa disponibilidade dos ésteres de óleos vegetais e por depender do metanol que não é produzido em grande escala no Brasil (Gunther, 1983).

## 3. O biodiesel

O biodiesel é definido pela *National Biodiesel Board* (NBB) como sendo uma substância composta de ésteres derivados de óleos oriundos de fontes biológicas renováveis (Bessee e Fey; 1997). O biodiesel é um substituto completamente natural para o óleo diesel. Apesar da palavra “diesel” fazer parte do seu nome, não existe em sua composição nenhuma parcela de petróleo ou outro combustível fóssil. Ele é produzido a partir de fontes renováveis tais como o óleo de soja, óleo de colza e óleo de palma, entre outros, que podem, inclusive, já ter sido utilizados na preparação de alimentos. O biodiesel é produzido em um processo químico a partir da combinação de qualquer óleo natural ou gordura, com um álcool. Atualmente o metanol é o álcool mais usado para a produção comercial de biodiesel.

Na Europa o biodiesel começa a ser utilizado tanto na sua forma pura (100% de biodiesel, também conhecido pela denominação B100) como formando misturas com o óleo diesel. O biodiesel europeu é produzido, principalmente, a partir do óleo de colza ou de girassol e metanol. Por serem os maiores produtores mundiais de óleo de soja, os Estados Unidos produzem biodiesel a partir desta matéria prima e, a exemplo das nações européias, utilizando principalmente o metanol. No sudeste da Ásia, principalmente na Malásia e Indonésia, o óleo de palma é a principal matéria prima utilizada, enquanto que nas Filipinas utiliza-se o óleo de coco..

### 3.1. Vantagens da utilização do biodiesel

O biodiesel pode ajudar o Brasil a reduzir a sua dependência do petróleo importado. Ele também pode ajudar na redução da emissão do gás CO<sub>2</sub>, que é um dos causadores do efeito estufa, bem como amenizar os riscos associados com a poluição do ar. É um combustível atóxico, biodegradável e que não possui enxofre ou compostos aromáticos em sua composição. 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.

O biodiesel é um combustível oxigenado, portanto tem uma queima mais completa, o que permite reduzir as emissões poluentes do motor. No caso de misturas biodiesel/diesel, verifica-se que quanto maior a porcentagem de biodiesel na mistura, maior será a redução destas emissões. O desempenho do motor, tanto com biodiesel puro como com as misturas biodiesel/diesel, é virtualmente o mesmo que o obtido com óleo diesel puro. Além disso, o poder calorífico do biodiesel se encontra muito próximo do do óleo diesel e, mesmo quando adicionado em pequenas quantidades, o biodiesel proporciona uma sensível melhora na lubricidade do combustível. Esta característica é particularmente importante quando se coloca como objetivo a utilização de óleo diesel de baixo teor de enxofre, que reconhecidamente apresenta baixa lubricidade (Graboski e McCormick, 1998). Estudos sobre o biodiesel sugerem tipicamente a utilização de misturas com óleo diesel, contendo 20% de biodiesel, em volume (B20). Entretanto, outras porcentagens podem ser utilizadas dependendo do custo do combustível e dos benefícios desejados.

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.

### 3.2. Composição dos óleos vegetais.

Os principais componentes dos óleos vegetais são os lipídeos. Os lipídeos são biomoléculas orgânicas insolúveis na água que podem ser extraídas de células e tecidos por solventes não-polares como, por exemplo, o clorofórmio, o éter ou o benzeno. Existem várias famílias diferentes ou classes de lipídeos, mas todas derivam as propriedades que os distinguem a partir da cadeia hidrocarbonada que constitui a porção principal de suas estruturas (Lehninger, 1975).

Vamos primeiramente considerar a estrutura e as propriedades dos ácidos graxos, componentes característicos de todos os lipídeos complexos. Embora os ácidos graxos ocorram em quantidades muito grandes como os blocos construtivos componentes dos lipídeos saponificáveis, eles ocorrem apenas em traços na forma livre (não-esterificada) nas células e tecidos. Mais de cem espécies diferentes de ácidos graxos foram isoladas a partir de vários lipídeos de animais, plantas e microrganismos. Todos possuem uma longa cadeia hidrocarbonada e um grupo carboxílico terminal. A cadeia hidrocarbonada pode ser saturada, como no ácido palmítico, ou pode possuir uma ou mais ligações duplas, como no ácido oléico. Alguns ácidos graxos contêm triplas ligações. Os ácidos graxos diferem uns dos outros primariamente no comprimento da cadeia hidrocarbonada e no número e as posições de suas ligações insaturadas.

Os ácidos graxos que ocorrem com mais freqüência na natureza são conhecidos pelos seus nomes comuns. Assim, por exemplo, entre os saturados podem ser mencionados os ácidos butírico, cáprico, láurico, mirístico, palmítico, esteárico, araquídico, behênico. Já como exemplos de ácidos graxos insaturados têm-se: oléico, linoléico, linolênico, araquidônico e erúico. A Tabela (1) mostra as estruturas e os símbolos de alguns ácidos graxos saturados e insaturados importantes, além da sua participação na composição de diversos óleos vegetais.

Os ácidos graxos mais abundantes têm um número par de átomos de carbono com cadeias entre 14 e 22 átomos de carbono de comprimento, mas aqueles com 16 ou 18 carbonos predominam. Os mais comuns entre os ácidos graxos saturados são o ácido palmítico (C16) e o ácido esteárico (C18) e, entre os ácidos graxos insaturados, o ácido oléico (C18). Os ácidos graxos insaturados predominam sobre os saturados. Ácidos graxos insaturados têm pontos de fusão mais baixos do que ácidos graxos saturados de mesmo comprimento de cadeia. Os ácidos graxos com um número ímpar de átomos de carbono ocorrem somente em quantidades muito pequenas nos animais terrestres.

Os ácidos graxos saturados e insaturados possuem conformações bastante diferentes. Nos ácidos graxos saturados, as caudas hidrocarbonadas são flexíveis e podem existir em um grande número de conformações porque cada ligação simples no esqueleto tem completa liberdade de rotação. A forma completamente estendida (a de energia mínima) é a conformação mais provável dos ácidos graxos saturados. Ácidos graxos insaturados, por outro lado, mostram uma ou mais dobras rígidas causadas pela(s) dupla(s) ligação(ões) não-rotatória(s). Como a ligação dupla impede a livre rotação dos átomos de carbono envolvidos, ela determina a formação de dois segmentos na cadeia hidrocarbonada os quais, como no caso do ácido oléico, podem situar-se no mesmo lado (configuração cis), gerando uma cadeia fortemente dobrada. No caso do ácido eláidico, esses dois segmentos situam-se em lados opostos (configuração trans) e isso, mantém a cadeia hidrocarbonada praticamente linear. Nos exemplos citados, pode-se constatar a influência marcante do comprimento da cadeia hidrocarbonada, das insaturações e da configuração cis ou trans no ponto de fusão dos ácidos graxos. Assim, enquanto o ácido caprílico, com 8 átomos de carbono apresenta ponto de fusão 16,7°C, o ácido palmítico, com o dobro de carbonos, funde-se a 63,1°C. O ácido oléico, por sua vez, apesar de possuir 18 carbonos, tem ponto de fusão drasticamente rebaixado, em relação ao palmítico, para 13,4°C. A presença de duas ligações duplas no ácido linoléico, justifica seu ponto de fusão -5,0°C. O ácido eláidico, que difere do oléico apenas pela configuração trans e, em conseqüência, apresenta uma cadeia hidrocarbonada quase linear, tem ponto de fusão elevado para 44,0°C.

Tabela 1. Composição química (porcentagem em peso) dos diferentes tipos de óleos.

ÁCIDOS GRAXOS			Ponto de solidificação (°C)	Óleos Tipo I Saturados (de amêndoas)						Óleos Tipo II Insaturados						Óleos Tipo III Poliinsaturados			
				Macaúba	Dendê	Indaia	Babaçu	Tucum	Cabeçudo	Macaúba	Dendê	Piqui	Indaia	Buriti	Pinhão	Coiteira	Linhaça	Soja	
Ácido Caprílico	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub>	saturado		6,2	2,7	9,0	6,8	11,7	8,8										
Ácido Cáprico	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O <sub>2</sub>	saturado		5,3	7,0	10,0	6,3	7,8	9,0										
Ácido Láurico	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub> O <sub>2</sub>	saturado	44,2	43,5	46,9	44,2	41,0	43,6	45,2										
Ácido Mirístico	C <sub>14</sub> H <sub>28</sub> O <sub>2</sub>	saturado	53,9	8,5	14,1	11,9	16,2	15,6	10,9		1,1						1,4		
Ácido Palmítico	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	saturado	63,1	5,3	8,8	6,7	9,4	6,0	5,8	18,7	39,7	34,4	22,6	16,3	14,3		7,3	5,0	11,0
Ácido Palmitoleico	C <sub>16</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub>	insaturado	-0,5							4,0	0,3	2,1		0,4	1,3			0,1	
Ácido Esteárico	C <sub>18</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>	saturado	69,6	2,4	1,3	2,9	3,4	3,4	4,7	2,8	4,5	1,8	7,5	1,3	5,1		3,1	3,5	2,4
Ácido Oleico	C <sub>18</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	insaturado	13,4	25,5	18,5	12,8	14,2	9,2	12,2	53,4	43,5	57,4	46,7	79,2	41,0		13,5	13,0	23,5
Ácido Linoleico	C <sub>18</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	2 insaturações	-5	3,3	0,7	2,0	2,5	2,6	3,4	17,7	10,9	2,8	21,0	1,4	38,1		71,8	17,5	51,2
Ácido Linolênico	C <sub>18</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub>	3 insaturações	-11							1,5		1,0	1,0	1,3	0,2		0,6	60,7	8,5
Outros																		0,2	3,4
Ácidos Saturados				71,2	80,8	84,7	83,1	88,1	84,4	21,5	45,3	36,2	30,1	17,6	19,4		11,8	8,5	13,4
Ácidos Insaturados				28,8	19,2	14,8	16,7	11,8	15,6	76,6	54,7	63,3	68,7	82,3	80,6		85,9	91,3	83,2
Índice de Saponificação				221	248	255	249	242	256	192	197	202	198	190	189		197	192	195
Índice de Iodo				20	18	16	16	12	15	84	58	54	73	72	97		125	185	136

Os ésteres de ácidos graxos do álcool glicerol são chamados de acilgliceróis ou glicerídeos. Quando todos os três grupos hidroxílicos do glicerol estão esterificados com ácidos graxos, a estrutura é chamada de triacilglicerol ou triglicerídeo. O ponto de fusão dos triacilgliceróis é determinado por seus ácidos graxos componentes, visto que eles correspondem a mais de 95% do seu peso molecular (Moretto e Fett, 1998). Em geral o ponto de fusão aumenta com o número e o comprimento de ácidos graxos saturados que compõem o triacilglicerol. Todos os triacilgliceróis são insolúveis em água e não possuem tendência própria a formar micelas altamente dispersas. Os acilgliceróis são solúveis em éter, em clorofórmio, em benzeno ou em etanol quente. Sua densidade é mais baixa do que a da água.

O constituinte básico dos óleos vegetais é o triacilglicerol. Os óleos vegetais contêm de 90% a 98% de triacilgliceróis e uma pequena quantidade de mono- e diacilgliceróis. Os triacilgliceróis são ésteres de três ácidos graxos cuja cadeia contém de 8 a 20 átomos de carbono. Tanto a composição química como o grau de insaturação desses compostos variam conforme a espécie oleaginosa. Assinale-se, a propósito, que alguns frutos, especialmente os de palmáceas, podem fornecer até dois tipos diferentes de óleo. As outras substâncias que se associam aos triacilgliceróis, mas em quantidades quase nunca superiores a 5% nos óleos vegetais brutos e a 2% nos óleos vegetais refinados, incluem os peróxidos, os ácidos graxos livres, os fosfatídeos, os carotenóides, os terpenos, os tocoferóis, as ceras e traços de água. Alguns óleos vegetais, incluindo os de milho, arroz e de soja, apresentam quantidades suficientes de ceras (cerca de 0,005%), para torná-los turvos quando a temperatura ambiente é baixa.

Dependendo do grau de insaturação, os óleos vegetais classificam-se em 3 grupos principais:

1. Óleos saturados, extraídos comumente das amêndoas de palmáceas como babaçu, tucum, indaiá e macaúba; os óleos desse grupo se constituem, sobretudo, de triacilgliceróis derivados do ácido láurico, e por isso, em geral, são sólidos à temperatura ambiente. Os índices de iodo e de saponificação caracterizam a incidência pouco significativa de grupos insaturados nas moléculas dos triacilgliceróis. Seus ésteres, metílicos ou etílicos, apresentam acentuada fluidez e um índice de cetano superior a 60.

2. Óleos de insaturação intermediária, cuja mistura engloba principalmente os glicerídeos derivados do ácido oléico e do ácido palmítico, ambos representado mais de 55% da mistura. Enquanto o índice de saponificação raramente excede a 200, o índice de iodo varia na faixa de 50 a 100. De modo geral, são líquidos nas condições normais de temperatura. Os ésteres obtidos na reação de transesterificação têm altos índices de cetano, de um modo geral superior a 50, o que atesta o poder carburante excelente da mistura.

3. Óleos poliinsaturados, pouco resistentes à oxidação, formados predominantemente de glicerídeos do ácido linoléico e do ácido linolênico, respectivamente, com 2 e 3 duplas ligações carbono-carbono, o que resulta nos altos índices de iodo. Os ésteres derivados dos óleos desse grupo possuem menor índice de cetano, em torno de 40, e sua combustão incompleta gera uma série de compostos que podem contaminar o lubrificante.

### 3.3. Propriedades dos óleos vegetais.

Como pode ser concluído da discussão precedente, existe uma estreita correlação entre a estrutura química do óleo vegetal e algumas de suas características físico-químicas. Por isso, a análise de composição dos óleos vegetais em ácidos graxos deve, certamente, constituir-se no primeiro procedimento para a avaliação preliminar da qualidade carburante do óleo bruto, ou de seus produtos de transformação.

O índice de saponificação de um óleo indica o peso, em miligramas, de hidróxido de potássio necessário para saponificar 1 g de óleo e sua medida constitui um dos critérios na avaliação do peso molecular do óleo. O índice de saponificação dos triacilgliceróis varia com a natureza dos ácidos graxos constituintes do óleo. Quanto menor for o peso molecular do ácido graxo, tanto maior será o índice de saponificação.

Por outro lado, o índice de iodo, determina a quantidade em gramas de halogênio, expresso em iodo, consumido por 100 g de óleo. Essa grandeza permite avaliar o grau de insaturação do óleo, pois cada dupla ligação de um ácido graxo pode incorporar dois átomos de halogênio. Por esta razão, quanto maior a insaturação de um ácido graxo, maior será o índice. Os valores do índice de iodo variam de modo geral entre 5 e 150; no entanto, podem atingir até 180, ou mais, em óleos de estrutura poliinsaturada, como a linhaça, cujos triacilgliceróis do ácido linolênico representam mais de 60% da mistura. Valores para o índice de iodo acima de 135 levam a produção de um biodiesel inaceitável para fins carburantes devido à tendência a formar depósitos de carbono (Graboski e McCormick, 1998). A remoção das insaturações, por exemplo através da hidrogenação, leva a uma sensível piora na viscosidade do óleo o que prejudica o seu escoamento em dias frios.

O índice de acidez ou a acidez livre do óleo é a medida, em miligramas, da quantidade de hidróxido de potássio necessária para neutralizar os ácidos livres contidos em um grama de amostra. A acidez livre de um óleo decorre da hidrólise parcial dos glicerídeos, por isso não é uma característica do óleo em si, mas é uma variável intimamente relacionada com a natureza e a qualidade da matéria-prima e com as condições de armazenamento. Altos índices de acidez têm um efeito bastante negativo sobre a qualidade do óleo, a ponto de torná-lo impróprio para a alimentação humana ou até mesmo para fins carburantes. Além disso, no caso do emprego carburante do óleo, a elevada acidez livre tem ação corrosiva sobre os componentes metálicos do motor.

O índice de peróxido é uma medida da resistência à oxidação do óleo. A oxidação dos compostos olefinicos pelo oxigênio atmosférico, comumente descrita como auto-oxidação, constitui, na verdade, a causa das alterações observadas nos óleos vegetais, como por exemplo, o ranço ou os odores desagradáveis. A formação de peróxidos é a primeira etapa do processo de auto-oxidação dos óleos vegetais, seguindo-se a decomposição dos hidroperóxidos em diversos produtos, principalmente aldeídos e cetonas. Em relação aos óleos do tipo oléico, os triacilgliceróis do ácido linoléico

ou do ácido linolênico são mais susceptíveis à peroxidação e a reações secundárias, em vista da maior reatividade do grupo metilênico, o qual nesses compostos se apresenta duplamente ativado, limitando, por isso, o seu emprego como combustível em motores diesel. Os produtos da oxidação formados no biodiesel irão afetar a durabilidade do combustível e contribuirão para a formação de depósitos no tanque, sistema de combustível e filtros.

A presença de antioxidantes naturais, como os tocoferóis, inibe ou prolonga a estabilidade química dos óleos vegetais. No entanto, os processos de refino diminuem o teor desses compostos por adsorção em carvão ativado ou em terras descolorantes. A presença de fosfatídeos, como a lecitina, ou de ácidos orgânicos, como o ácido cítrico, tartárico ou fosfórico, reforçam a ação antioxidante dos tocoferóis (Graboski e McCormick, 1998).

De um modo geral, a avaliação da qualidade carburante dos óleos vegetais requer a determinação analítica das principais características do combustível: poder calorífico, índice de cetano, curva de destilação, viscosidade, ponto de névoa, peso específico e tensão superficial.

Enquanto o poder calorífico do óleo carburante permite estabelecer o calor máximo que pode ser liberado durante a combustão no motor em operação, o índice de cetano define o poder de auto-inflamação e de combustão do óleo, sendo que o seu valor condiciona o desempenho global do motor, refletindo-se de modo especial na partida a frio, no ruído e na taxa de elevação da pressão na câmara de combustão.

Comparado ao óleo diesel, os óleos vegetais apresentam menor poder calorífico, em torno de 40 MJ/Kg contra os cerca de 42,5 MJ/kg do combustível derivado do petróleo (Srivastava, 2000), devido à presença de oxigênio em suas moléculas.

O índice de cetano para ambos os combustíveis se mantém em faixas ao redor de 40, ressalte-se, no entanto, que o índice de cetano é maior para os óleos vegetais saturados, do tipo láurico, palmítico ou esteárico.

A viscosidade constitui outra importante propriedade intrínseca dos óleos vegetais, de considerável influência no mecanismo de atomização do jato de combustível, afetando por isso o funcionamento do sistema de injeção e refletindo no processo de combustão, de cuja eficiência dependerá a potência máxima desenvolvida pelo motor. Em relação ao diesel de petróleo, os óleos vegetais apresentam valores de viscosidade bastante altos, podendo exceder em 10 vezes a do óleo diesel; e, em alguns casos, como no óleo de mamona, essa relação pode atingir índices 100 vezes maior. Estes valores elevados para a viscosidade são decorrentes da elevada massa molecular e da estrutura química dos óleos vegetais. Os pesos moleculares destes óleos são da ordem de 600 a 900 kg/kmol, valores três vezes maiores que o encontrado para o óleo diesel, sendo que a viscosidade aumenta com o comprimento das cadeias dos ácidos graxos dos triacilgliceróis e diminui quando aumenta a insaturação, aumentando portanto com a hidrogenação.

Outra característica física dos óleos vegetais, de fundamental importância na avaliação da qualidade carburante, diz respeito ao ponto de névoa, que corresponde à temperatura inicial de cristalização do óleo. Tal efeito influencia negativamente o sistema de alimentação do motor bem como o filtro do combustível, sobretudo quando o motor é utilizado sob condições de baixa temperatura. Para evitar a solidificação do óleo, mesmo parcial, conforme se verifica com os óleos do tipo láurico ou palmítico, deve-se proceder ao pré-aquecimento do óleo (o que poderá ser efetuado com a própria água de arrefecimento do motor) ou, então, à sua diluição com outros óleos insaturados, de modo a assegurar a completa fluidez do combustível.

O peso específico é a relação entre o peso de um volume qualquer de óleo e o peso de um volume igual de água destilada, a uma temperatura padrão. Os óleos possuem peso específico menor do que a unidade e a variação deste índice é pequena, entre 0,910 e 0,970. É importante levar em conta que o peso específico dos ácidos graxos decresce com o aumento do número de átomos de carbono e cresce com a insaturação.

A tensão superficial é outra propriedade que influencia na atomização do jato de combustível e no tamanho das gotículas. Os valores sobre a tensão superficial do biodiesel, tanto na forma pura como formando misturas, são muito limitados. Um valor típico para o óleo diesel é de  $22,5 \cdot 10^{-5}$  N/cm a 100°C. Para o éster metílico de óleo de soja temos um valor de  $34,9 \cdot 10^{-5}$  N/cm a 60°C e para o éster metílico de óleo de colza a tensão superficial é de  $25,4 \cdot 10^{-5}$  N/cm a 100°C (Graboski e McCormick, 1998).

São também importantes os pontos de fulgor e de inflamação, propriedades determinantes do grau de inflamabilidade e de volatilidade do combustível. Enquanto o ponto de fulgor indica a temperatura mínima na qual o óleo forma com o ar uma mistura inflamável, o ponto de inflamação é a temperatura em que o óleo queima durante um tempo mínimo de 5 segundos.

### 3.4. Produção de biodiesel.

A literatura reporta estudos realizados com o objetivo de desenvolver derivados de óleos vegetais com viscosidade e volatilidade mais próximas às do óleo diesel (Graboski e McCormick, 1998). Existem vários caminhos para se atingir este objetivo, porém o mais comumente empregado é a transesterificação. Os outros métodos existentes são a pirólise, a microemulsificação e a diluição.

A transesterificação, também chamada de alcoólise, é a substituição do radical de um éster por um radical de um álcool em um processo semelhante a hidrólise, exceto pelo fato de ser usado um álcool no lugar de água. É um processo largamente utilizado para reduzir a viscosidade dos triacilgliceróis. A reação de transesterificação é representada pela equação geral:



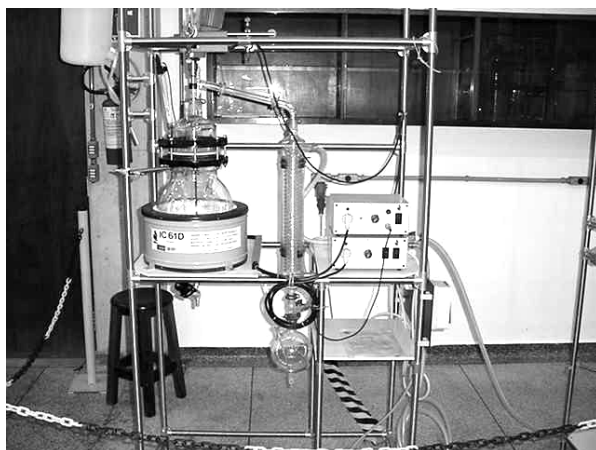


Figura 1. Reator utilizado para produção de biodiesel a partir do etanol hidratado

Se o álcool metanol for utilizado na reação acima ela será chamada metanolise ao passo que se o álcool escolhido for o etanol a reação será denominada etanolise. Para aumentar a velocidade da reação são utilizados catalisadores. Os ésteres metílicos ou etílicos de ácidos graxos assim obtidos são então o que se denomina de biodiesel.

A alcoólise consiste, por exemplo, na reação de um mol de triacilglicerol com 3 mols de etanol obtendo-se 3 mols de éster etílico e 1 mol de glicerol. Em massa isto corresponde a adicionar aproximadamente 100 g de álcool para cada 1000 g de óleo processado.

É de extrema importância que o meio reacional seja isento de água para evitar a ocorrência de reações de hidrólise dos triacilgliceróis com a formação de sabões.

A temperatura é a variável que mais influencia a velocidade da reação. Normalmente a reação é conduzida a baixas temperaturas, tendo como limite superior a temperatura do ponto de ebulição do álcool utilizado à pressão atmosférica. Outra variável de grande importância no rendimento da reação é a relação molar entre o álcool e o óleo vegetal. Como já vimos anteriormente, estequiometricamente são necessários 3 mols de álcool para cada mol de triacilglicerol com a obtenção de três mols de ésteres e um mol de glicerol. Existem duas possibilidades para aumentar o rendimento da reação, obtendo a maior quantidade possível de ésteres, a primeira é utilizando-se álcool em excesso como reagente e a segunda é removendo um dos produtos da mistura de reagentes e produtos. A adição de álcool na reação não pode ser feita a vontade pois o mesmo interfere na separação do glicerol além de ser necessário a sua retirada posterior, um valor limite seria 100% de excesso de álcool, ou seja uma relação molar de 6:1.

A terceira variável importante para se obter bons rendimentos na reação de transesterificação é o tipo de catalisador utilizado. A catálise pode ser ácida ou alcalina. Na catálise ácida podemos utilizar uma solução de ácido clorídrico anidro a 5% em volume em metanol absoluto, com meio de reação totalmente isento de água para evitar a hidrólise dos triacilgliceróis. Uma solução de  $H_2SO_4$  concentrado a 1,5% em volume com metanol anidro também pode ser utilizada. Na produção industrial os catalisadores ácidos são evitados pois corrompem os equipamentos utilizados.

A transesterificação dos lipídeos ocorre mais rapidamente na presença de catalisadores alcalinos, sendo os hidróxidos de sódio e potássio os mais utilizados. Concentrações de 0,6% a 1% de solução etanólica de NaOH ou de KOH produzem resultados satisfatórios, convertendo de 94% a 99% dos triacilgliceróis em ésteres. Outra vantagem do uso de catalisadores alcalinos é a facilidade com que eles são eliminados do meio reacional por neutralização com ácidos orgânicos, por exemplo, o ácido fórmico, com a conseqüente formação de sais insolúveis.

Com óleos neutros ou levemente ácidos a catálise alcalina apresenta um bom comportamento porém, se um catalisador alcalino for utilizado com um óleo com elevado índice de acidez, ocorrerá a neutralização dos ácidos graxos livres e a conseqüente formação de sabões. Os catalisadores mais eficientes são os alcóxidos metálicos e, entre eles, o alcóxido de sódio se destaca. No início da reação de transesterificação os reagentes não se misturam entre si e formam um sistema líquido bifásico. Nesta fase inicial é necessário que os reagentes sejam vigorosamente agitados para melhorar a difusão entre as fases. À medida que o éster é produzido ele passa a agir como um solvente para ambos os reagentes formando um sistema monofásico. Por este motivo a agitação somente é relevante no início da reação, sendo desnecessária após a formação de um sistema monofásico.

A pureza dos reagentes também é um fator importante que afeta grandemente o rendimento da conversão. Sob as mesmas condições da reação somente de 67% a 84% de um óleo vegetal in natura é convertido em ésteres, valor muito inferior ao rendimento de até 97% obtido com o uso de um óleo vegetal refinado (Srivastava, 2000).

Considerando as desvantagens inerentes ao uso do metanol, principalmente devido à sua toxicidade e ao fato de não ser produzido em larga escala no País, foi desenvolvido um método para a produção de biodiesel com base no uso do álcool etílico hidratado e óleo de soja degomado. A produção deste biodiesel foi realizada na Usina Piloto da PUCPR utilizando-se o reator mostrado na Fig. (1). O biodiesel produzido foi analisado pelo Centro de Pesquisa e



Processamento de Alimentos (CEPPA) da Universidade Federal do Paraná, que atestou a seguinte composição média: 12% de ésteres etílicos do ácido palmítico, 0,2% do ácido palmitoleico, 4,3% do ácido esteárico, 26% do ácido oléico, 51% do ácido linoléico e 6,2% do ácido linolênico.

#### 4. Os ensaios de desempenho e consumo

Uma parte significativa deste trabalho consistiu em avaliar a influência que o uso de misturas de óleo diesel com biodiesel exerce sobre o desempenho de um motor de ignição por compressão. Isto foi feito a partir dos ensaios dinamométricos do motor. Para a realização da parte experimental da pesquisa utilizou-se um motor diesel MWM 6.07T GMT400 de quatro tempos. Este motor pertence à série SPRINT e dispõe de seis cilindros em linha, injeção direta de combustível, turboalimentação, dezoito válvulas (três por cilindro, sendo duas válvulas de admissão e uma de escape), sistema de fluxo cruzado dos gases na câmara de combustão e 4.2 litros de volume deslocado. A rotação máxima livre deste motor é de 4340 rpm, sendo que a potência máxima segundo a norma ISO1585 é de 160 cv (123 kW) a 3400 rpm e o torque máximo é de 375 Nm (38,3 kgfm), a 2000rpm. O motor estava equipado com bicos injetores Bosch com 5 furos. Este motor, quando novo, apresenta uma pressão de compressão mínima de 28 bar, um consumo específico 187 g/CVh no caso de rotação de potência máxima, e de 160 g/CVh na rotação de torque máximo. A pressão de abertura dos bicos injetores é de 220 bar para o primeiro estágio e de 300 bar para o segundo estágio, sendo que a pressão máxima de trabalho é de 1000 bar.

O motor foi ensaiado no Laboratório de Termodinâmica Aplicada da PUCPR, utilizando-se um dinamômetro da marca ZOLLNER, modelo ALFA 160. O motor foi ensaiado em uma ampla faixa de velocidades e aplicando-se diferentes níveis de carga. Assim, para os níveis de carga correspondentes a 60% e 100% do acionamento total da bomba injetora, foram efetuadas medições nas rotações de 900, 1000, 1300, 1400, 1700, 2000, 2300, 2600, 2900, 3200, 3500 e 3800 rpm. Os ensaios foram repetidos para o óleo diesel puro e para misturas de óleo diesel com biodiesel, contendo 10%, 20% e 30%, em volume, de biodiesel.

Os valores medidos de torque, consumo de combustível e temperatura do ar de admissão corresponderam à média de duas leituras consecutivas, com o motor operando em regime permanente, cuja variação não excedesse 2%, sendo que a segunda leitura era feita aproximadamente 1 minuto após a primeira e sem efetuar qualquer alteração do regime de funcionamento do motor. A temperatura do combustível na entrada da bomba injetora era mantida a 40°C, conforme recomendado pela norma NBR ISO 1585.

##### 4.1. Análise do desempenho do motor

Nas Figuras (2a) e (3a) pode-se notar que a potência e o torque do motor são maiores quando o combustível utilizado é o óleo diesel puro e a aceleração é mantida em 100%. Este fato decorre da existência de aproximadamente 10% (em massa) de oxigênio, na molécula do biodiesel. Esta característica do biodiesel é responsável pelo menor poder calorífico desse combustível pois significa uma menor quantidade de carbono para a combustão.

Na Figura (4a) observa-se que o consumo específico do combustível contendo 30%, em volume, de biodiesel resultou ser sensivelmente maior que o valor correspondente à operação com óleo diesel puro. Isto se deve ao fato que o motor produz uma potência menor quando funciona com este combustível.

É importante mencionar que, se por um lado o biodiesel possui um menor poder calorífico (que leva a uma diminuição da potência máxima do motor), por outro lado, ele possui uma maior densidade, o que compensa em parte esta desvantagem.

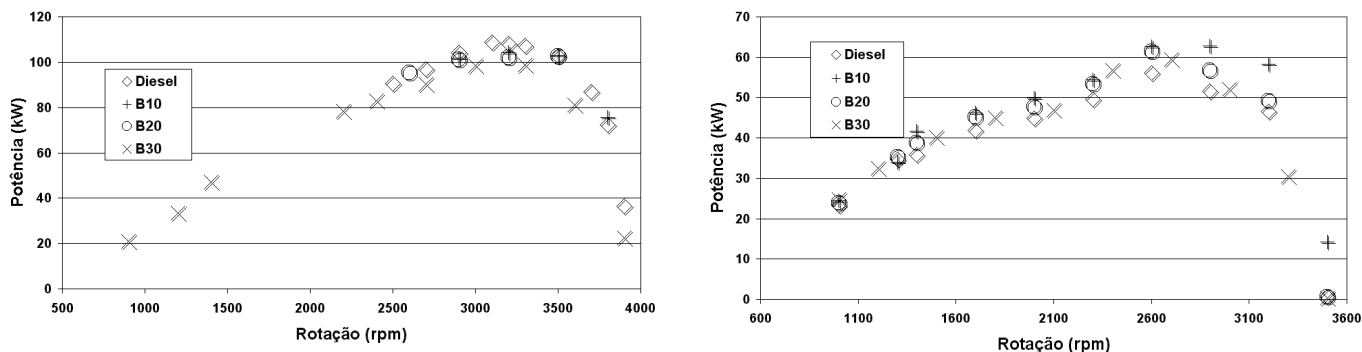


Figura 2. (a) Potência do motor a plena carga. (b) Potência do motor com 60% de carga.

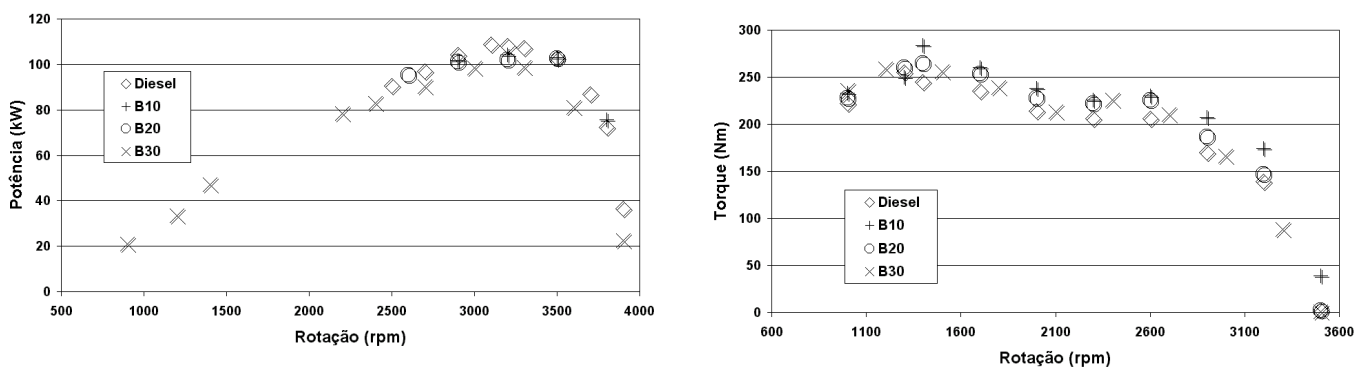


Figura 3. (a) Torque do motor com 100% de carga. (b) Torque do motor, com 60% de carga.

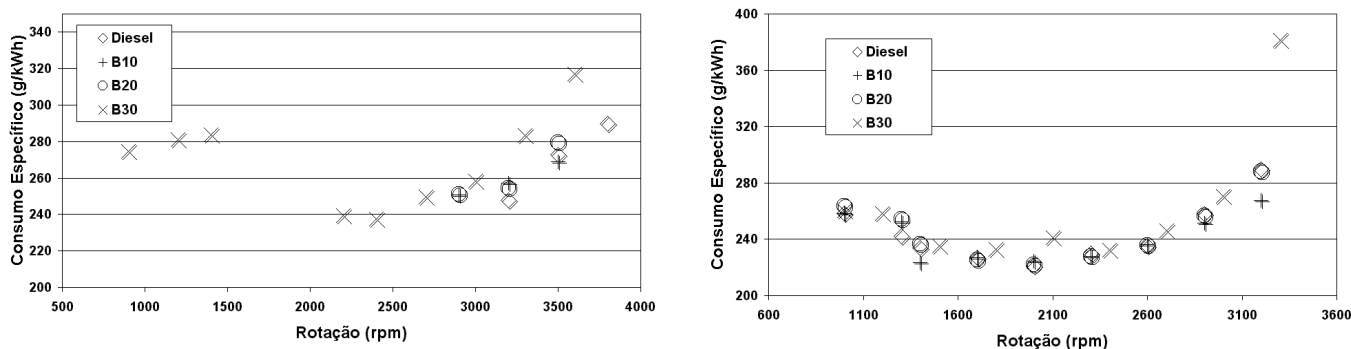


Figura 4. (a) Consumo específico à plena carga. (b) Consumo específico com 60% de carga.

Já no caso de acionamentos parciais da bomba injetora observa-se que tanto a potência como o torque, não apresentam diferenças significativas para os diferentes combustíveis, como pode ser observado nas Fig. (2b) e (3b). Isto se deve ao funcionamento do governador da bomba injetora. Em um motor diesel não existe uma única posição da cremalheira que permita ao motor manter a velocidade de rotação constante. Em marcha lenta, por exemplo, sem a presença do governador, a velocidade do motor iria cair até que o motor apagasse, ou, caso fosse levemente acelerado, a velocidade do motor iria subir sem limites, causando a sua autodestruição. Ao acelerar um motor diesel não se age diretamente sobre a cremalheira (que tem por função a regulagem do débito da bomba injetora) e sim sobre o governador, que irá acionar a cremalheira levando em consideração a velocidade do motor. Dessa maneira, uma posição fixa do acelerador não significa um fluxo constante de combustível. Este fato explica a existência de valores dispersos para o torque, potência e consumo específico, quando o motor opera em cargas parciais.

Na Figura (4b) vemos que o consumo específico do motor, quando ensaiado sob a carga parcial de 60%, não apresentou variações relevantes ao alterar o combustível utilizado. É conveniente ressaltar que o motor não estava modificado de forma alguma para funcionar com biodiesel. Assim, a alteração no avanço do ponto de início de injeção pode ser estudada como forma de aproveitar o maior índice de cetano do biodiesel.

Um dos fatores que mais afetaram o funcionamento do motor, foi a viscosidade do combustível. Misturas acima de 40% de biodiesel, em volume, não foram consideradas porque as tentativas de utilizar essas misturas mostraram que nesses casos, ocorria um aumento significativo do ruído da bomba injetora.

## 5. Conclusões

Este trabalho mostra que o biodiesel possui um grande potencial para ser utilizado em grande escala como combustível para motores diesel. A facilidade de sua utilização, principalmente devido ao fato de não necessitar de alterações substanciais no motor, faz dele um combustível alternativo impar, apropriado para o Brasil, onde existem grandes extensões de terras cultiváveis e altas taxas solarimétricas durante o ano todo.

Foram colocados em evidência os benefícios que podem ser obtidos com a redução do uso de combustíveis derivados do petróleo, destacando-se a possibilidade de estabilizar ou até mesmo de reduzir a produção de CO<sub>2</sub> de

origem fóssil no setor de transportes. Dessa maneira, se torna mais fácil atender às determinações do protocolo de Quioto.

Os ensaios realizados em bancada dinâmométrica utilizando um motor que não tinha sido modificado para funcionar com misturas de biodiesel e óleo diesel, permitiram concluir que:

1. Embora o biodiesel exiba poder calorífico menor que o óleo diesel (em parte devido ao fato que cerca de 10% de sua massa é constituída de oxigênio), a sua maior densidade ajuda a compensar parcialmente esta diferença.

2. Para acionamentos parciais da bomba injetora, a potência, o torque e o consumo específico não apresentaram diferenças significativas entre os diversos combustíveis testados. Isto se deve, principalmente, à ação do governador da bomba injetora.

3. No caso de carga máxima observou-se uma redução da potência máxima desenvolvida pelo motor da ordem de 10%.

4. As diferenças de desempenho do motor operando com os combustíveis estudados não foram, em geral, significativas.

## 6. Referências

- Agência Nacional de Petróleo, 2000, “Anuário Completo”, Sítio <http://www.anp.gov.br>.
- Bailey, B. et al., 1997, “Diethyl Ether (DDE) as a Renewable Diesel Fuel”, Society of Automotive Engineers, Inc., 972878.
- Bessee, G. B., Fey, J. P., 1997, “Compatibility of elastomers and metals in biodiesel fuel blends”, Society of Automotive Engineers, Inc. 971690.
- Borman, G. L., Ragland, K. W., 1997, “Combustion Engineering”, McGraw Hill International Edition, Singapura.
- Choi, C. Y., Bower, G. R., Reitz, R. D., 1997, “Effects of biodiesel blended fuels and multiple injections on D. I. diesel engines”, Society of Automotive Engineers, Inc. 970218.
- Christensen, M., Johansson, B., Einewall, P., 1997, “Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Using Isooctane, Ethanol and Natural Gas – A Comparison With Spark Ignition Operation”, Society of Automotive Engineers, Inc., 972874.
- Graboski, M. S., McCormick, R. L., 1998, “Combustion of Fat and Vegetable Oil Derived Fuels in Diesel Engines”, Prog. Energy Combust. Sci. Vol. 24.
- Gunther, A. et al, 1983, “Alternativas energéticas para o motor ciclo diesel”, MWM Motores Diesel LTDA.
- Harwood, H., 1984, “Oleochemicals as a fuel: mechanical and economic feasibility”, J. Am. Oil Chemists’ Soc. (JAOCs).
- Hikosaka, N., 1997, “A View of the Future of Automotive Diesel Engines”, Society of Automotive Engineers, Inc., 972682.
- Lehninger, A. L., 1975, “Biochemistry”, Worth Publishers.
- Leite, A. D., 1997, “A Energia do Brasil”, Editora Nova Fronteira, Rio de Janeiro.
- Lowry, J. P. A., 1990, “Alternative fuels for automotive and stationary engines in developing countries”, Proceedings of ImechE Seminar on Fuels for automotive and industrial diesel engines, London.
- Ministério da Indústria e Comércio, 1985, “Produção de Combustíveis Líquidos a Partir de Óleos Vegetais”.
- Moretto, E., Fett, R., 1998, “Tecnologia de Óleos e Gorduras Vegetais na Indústria de Alimentos”, Livraria Varela, São Paulo.
- Rotstein J., 1996, “Brasil Século XXI”, Editora Espaço e Tempo Ltda., Rio de Janeiro.
- Sapuan, S. M., Masjuki, H. M., Azlan, A., 1996, “The use of palm oil as diesel fuel substitute”, Proc. Instn. Mech. Engrs., Vol 210.
- Scholl, K. W., Sorenson, S. C., 1993, “Combustion of soybean oil methyl ester in a direct injection diesel engine”, Society of Automotive Engineers, Inc. 930934.
- Srivastava, A., Prasad, R., 2000, “Triglycerides-based Diesel Fuels”, Pergamon – Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- Zima, P., 1997, “Diesel Engines: One Option to Power Future Personal Transportation Vehicles”, Society of Automotive Engineers, Inc., 972683.

## **PERSPECTIVES FOR USING BIODIESEL IN SUBSTITUTION TO DIESEL FUEL IN AUTOMOTIVE COMPRESSION IGNITION ENGINES**

**Guilherme Pianovski Júnior**

Centro Federal de Educação Tecnológica - CEFETPR – Departamento de Engenharia Mecânica  
Av Sete de Setembro 3165 – Curitiba, PR - 80230-901  
[guilherme@cefetpr.br](mailto:guilherme@cefetpr.br)

**José Antonio Velásquez**

Pontificia Universidade Católica do Paraná – PUCPR – Departamento de Engenharia Mecânica  
R. Imaculada Conceição 1155 – Curitiba, PR – 80215-901  
[velasqz@rla01.pucpr.br](mailto:velasqz@rla01.pucpr.br)

**Abstract.** *Use of biodiesel in automotive compression ignition engines in order to substitute diesel fuel is considered in this work. Technical, environmental, social and economical concerns support such substitution. It is presented a comprehensive literature review on biodiesel production technologies using several vegetable oils and either methanol or ethanol. Additionally, thermo-physical data related to biodiesel obtained from several vegetable oils were compiled from literature. Finally, overall engine performance was evaluated by testing in a dynamometer a turbocharged, six-cylinder diesel engine. Several blends of biodiesel and diesel fuel were studied during the tests. These tests allowed to confirm technical feasibility of using biodiesel as a partial substitute to diesel fuel.*

**Keywords.** *Diesel engines, Alternative fuel, Vegetable oil ester, Biodiesel, Transesterification*