RONALD LEITE BARBOSA

DESEMPENHO COMPARATIVO DE UM MOTOR DE CICLO DIESEL UTILIZANDO DIESEL E MISTURAS DE BIODIESEL

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração Máquinas e Automação Agrícola, para a obtenção do título de "Mestre".

Orientador
Prof. Dr. Nilson Salvador

LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL
2006

Livros Grátis

http://www.livrosgratis.com.br

Milhares de livros grátis para download.

Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA

Barbosa, Ronald Leite
Desempenho comparativo de um motor de ciclo diesel utilizando diesel e misturas de biodiesel/Ronald Leite Barbosa. – Lavras: UFLA, 2006.
55 p. : il.

Orientador: Nilson Salvador.
Dissertação (Mestrado) - UFLA.
Bibliografia.

1. Motor diesel. 2. Desempenho. 3. Biodiesel. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD-621.436

RONALD LEITE BARBOSA

DESEMPENHO COMPARATIVO DE UM MOTOR DE CICLO DIESEL UTILIZANDO DIESEL E MISTURAS DE BIODIESEL

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração Máquinas e Automação Agrícola, para a obtenção do título de "Mestre".

APROVADA em 16 de junho de 2006

Prof. Dr. Fábio Moreira da Silva UFLA

Prof. Dr. Jackson Antônio Barbosa UFVJM

Prof. Dr. Nilson Salvador
UFLA
(Orientador)

LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, José Paulino Barbosa (*in memorian*) e Marlene Leite Barbosa, pelo apoio, carinho, amor e dedicação.

Aos meus irmãos, Fernando Antônio Leite Barbosa e Marcelo Leite Barbosa.

À minha amada Alexandra Aparecida de Oliveira, pelo apoio, carinho, amor e dedicação.

Aos meus tios Marcelo Furtado Leite, Celeste Leite, Maria do Carmo, João Baptista Leite, Antônio Furtado Leite, João Leonídio Barbosa, Rosa Paulino Barbosa e, em especial, Orlando Furtado Leite (*in memoriam*).

A minha grande amiga Valéria de Souza Oliveira, pelo companheirismo.

Em especial, também, ao grande amigo Dr. Sebastião Santiago, Médico Psiquiatra, que sempre me incentiva a nunca desistir dos meus sonhos e a quem, com todo esforço que fizer, não serei capaz de retribuir tudo de bom que já fez e tem feito por mim.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus.

À Universidade Federal de Lavras, em especial ao Departamento de Engenharia, pelo apoio e pela oportunidade de realizar este curso.

Aos professores Dr.Fábio Moreira da Silva e Dr. Nilson Salvador, pela amizade, pela orientação e pelos valiosos ensinamentos durante o curso.

Aos professores Dr. Roberto Alves Braga Júnior e Dr.Giovanni Rabelo, pela amizade e pelos valiosos ensinamentos na área de automação, eletricidade e eletrônica.

Ao professor Dr. Carlos Volpato, pela amizade e pelos valiosos ensinamentos.

Ao professor Dr. Pedro Castro Neto, pela amizade e pela valiosa colaboração na execução deste trabalho, cedendo, também, o biodiesel para o experimento.

Ao professor Dr. Jacinto de Assunção Carvalho, então Coordenador da Pós-Graduação quando do meu ingresso no Mestrado, pela amizade, pela compreensão, pelo incentivo e pela grande colaboração.

Ao professor Dr. Manoel Alves de Faria, atual Coordenador da Pós-Graduação, pela amizade e pelo incentivo.

Ao professor Dr. Antônio Moreira, da Escola de Engenharia de São Carlos-USP, pela gentileza nas análises dos combustíveis utilizados.

À Secretária da Pós-Graduação, Ana Daniela dos Santos, pela amizade, pela gentileza, pela simpatia e pelos excelentes trabalhos prestados.

Aos amigos Túlio Seabra, Ezequiel de Oliveira, Alexon do Prado Conde e Juliana Vilela Lourençoni Botega, pelo apoio e agradável convívio.

A todos que, direta ou indiretamente, colaboraram na execução deste trabalho.

“Não importa onde você parou...
em que momento da vida você cansou...
o que importa é que sempre é possível, é necessário "recomeçar"
Recomeçar é renovar as esperanças na vida e, o mais importante...
acreditar em você de novo.
Sofreu muito neste período? Foi limpeza da alma...
Ficou com raiva das pessoas? Foi para perdoá-las um dia...
Sentiu-se só por diversas vezes? É porque fechaste a porta até para os anjos...
Acreditou que tudo estava perdido? Era o início de tua melhora.
Onde você quer chegar? Ir alto?
Sonhe alto... queira o melhor do melhor...
Se pensamos pequeno... coisas pequenas teremos...
Mas se desejarmos fortemente o melhor e
principalmente lutarmos pelo melhor...
O melhor vai se instalar em nossa vida.
Porque sou do tamanho daquilo que vejo,
e não do tamanho da minha altura”.

Carlos Drummond de Andrade

SUMÁRIO

Página

RESUMO ..... **i**
ABSTRACT ..... **ii**
1 INTRODUÇÃO **1**
2 REFERENCIAL TEÓRICO **4**
2.1 Crise energética de 1973 ..... **4**
2.2 Impacto ambiental e sustentabilidade **4**
2.3 Protocolo de Kyoto **6**
2.4 Motores ciclo diesel **11**
2.4.1 Definições termodinâmicas **14**
2.4.1.1 Poder calorífico **14**
2.4.1.2Rendimento térmico **16**
2.4.1.3 Rendimento mecânico **16**
2.4.1.4 Rendimento termo-mecânico **16**
2.4.1.5 Torque **16**
2.4.1.6 Potência real ou efetiva **18**
2.5 Combustão e combustíveis **21**
2.6 Biodiesel **22**
Segundo dados da Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais (ABIOVE), apenas o excedente do óleo de soja já supera a quantidade necessária para a adição de 2% de biodiesel no combustível mais consumido no país (ESALQ, 2005). **29**
2.7 Ensaios com motores **31**
2.8 Desempenho **33**
3 MATERIAL E MÉTODOS **34**
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO **41**
5 CONCLUSÕES **48**
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS **49**

RESUMO

BARBOSA, Ronald Leite. **Desempenho comparativo de um motor de ciclo diesel utilizando diesel e misturas de biodiesel.** 2006. 55 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG*.

O Brasil é considerado um país de uma biodiversidade incomensurável, justificando-se, assim, sua enorme variedade em oleaginosas. Estima-se que, em um futuro próximo, as reservas de petróleo economicamente exploráveis tendam à escassez. Além disso, os atuais níveis exacerbados dos preços do barril de petróleo no mercado internacional, a possibilidade de geração de emprego e renda, com a conseqüente fixação do homem ao campo, as excelentes e variadas condições climáticas e os diferentes tipos de relevo fazem com que o país, com extensas áreas agricultáveis, se destaque no cenário mundial em relação à sua grande potencialidade de geração de combustíveis alternativos. A preservação ambiental, importantíssima questão da atualidade, vem, também, fazendo com que o ser humano trabalhe na busca do desenvolvimento de alternativas energéticas, principalmente aquelas oriundas de fontes renováveis e biodegradáveis de caráter eminentemente sustentável. Levando-se em consideração essa busca, o objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho de um motor ciclo diesel, funcionando em momentos distintos com diesel mineral e misturas de diesel mineral e biodiesel nas proporções equivalentes a B2 (98% diesel mineral e 2% biodiesel), B5(95% diesel mineral e 5% biodiesel), B20(80% diesel mineral e 20% biodiesel) e, finalmente, B100 (100% biodiesel). O experimento foi realizado nas dependências do Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras (UFLA), em Lavras, Minas Gerais, em julho de 2005.

---

* Comitê Orientador: Dr. Nilson Salvador – DEG-UFLA (Orientador); Dr. Fábio Moreira da Silva – DEG-UFLA.

ABSTRACT

BARBOSA, Ronald Leite. **The performance of a diesel engine using diesel and biodiesel mixtures.** 2006. 55 p. Dissertation (Master in Agricultural Engineering) – Federal University of Lavras, Lavras, Minas Gerais, Brazil.*

Brazil is considered a country of an incommensurable biodiversity, justifying in this way, its enormous variety in oleaginous. It is considered that, in a close future, the petroleum reservations economically viable will tend to the shortage. Beside it, the exacerbated current price levels of the petroleum barrel in the international market, the possibility of employment generation and income with the consequent fixation of the man in the country, the excellent and varied climatic conditions and several types of terrain do that the country, with extensive workable areas, stand out in the world scenery if considering its great potentiality on generation of alternative fuels. The environmental preservation, important subject nowadays, does, also, that the human being work in searches for the development of alternative energies, mainly those originating from renewable and biodegradable sources of sustentable character. Being taken in consideration those searches, the purpose of this work was to evaluate the performance of a diesel engine working in different moments with mineral diesel and mixtures of mineral diesel and biodiesel in the equivalent proportions B2 (98% mineral diesel and 2%biodiesel), B5 (95% mineral diesel and 5%biodiesel), B20 (80% mineral diesel and 20%biodiesel), and, finally, B100 (100% biodiesel). The experiment was accomplished in the dependences of the Engineering Department at UFLA - Federal University of Lavras, in Lavras, Minas Gerais, in July, 2005.

* Guidance Committee: Dr. Nilson Salvador – DEG-UFLA (Adviser); Dr. Fábio Moreira da Silva.

1 INTRODUÇÃO

O mundo despertou para a busca por formas alternativas de energia com a crise do petróleo, nos anos 70 do século XX. No Brasil, a crise culminou com a criação do Pró-Álcool, nos anos 1980 e outros programas de incentivo ao uso de combustíveis alternativos como óleos vegetais, gasogênio, gás natural, biogás, etc.

Segundo Grando (2005), a crescente demanda por combustíveis renováveis como alternativa aos combustíveis fósseis e a maior preocupação internacional com o aquecimento global, amplificada agora com a entrada em vigor do Protocolo de Kyoto, evidenciam os benefícios do combustível verde (biocombustível). Assim como o álcool, o biodiesel contribuirá também para melhorar as condições ambientais a partir da redução da emissão de gases poluentes, sobretudo nos grandes centros metropolitanos. Significa também melhorar a qualidade de vida da população e evitar gastos dos governos e dos cidadãos no combate aos males da poluição.

O biodiesel é um combustível renovável, biodegradável e ambientalmente correto, sucedâneo ao óleo diesel mineral, constituído de uma mistura de ésteres metílicos ou etílicos de ácidos graxos, obtidos da reação de transesterificação de qualquer triglicerídeo com um álcool de cadeia curta, metanol ou etanol, respectivamente (Parente, 2005).

Inicia-se um novo ciclo do setor energético e a diversificação da matriz energética nacional. Há uma inevitável tendência de modificação do sistema energético atual, isto é, do fóssil, para um sistema de energias renováveis.

Dispondo de extensas áreas agricultáveis, solo e clima favoráveis, de enorme biodiversidade, explica-se assim a riqueza do Brasil em oleaginosas.

A área destinada ao cultivo de oleaginosas para atender ao percentual de mistura de 2% de biodiesel ao diesel de petróleo é estimada em 1,5 milhão de

hectares. As regras permitem a produção a partir de diferentes oleaginosas e rotas tecnológicas, possibilitando a participação do agronegócio e da agricultura familiar (Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel, 2005).

Segundo Oliveira & Costa (2005), a implantação de um programa energético com biodiesel abre oportunidades para grandes benefícios sociais decorrentes do alto índice de geração de empregos por capital investido, culminando com a valorização do campo e a promoção do trabalhador rural, além das demandas por mão-de-obra qualificada para o processamento e, em muitos casos, beneficiamento do óleo vegetal. Salienta-se, entretanto, a reversão no fluxo internacional de capitais, uma vez que o aproveitamento do biodiesel permite uma redução das importações de diesel e a comercialização internacional de Certificados de Redução de Emissões de gases causadores do efeito estufa.

Estudos desenvolvidos pelo governo federal estimam que a cada 1% de substituição de óleo diesel por biodiesel produzido com a participação da agricultura familiar podem ser gerados cerca de 45 mil ocupações no campo, com uma renda média anual de, aproximadamente, R$4.900,00 por emprego. Admitindo-se que para cada emprego no campo são gerados 3 empregos na cidade, seriam criados, então, 180 mil empregos. Numa hipótese otimista de 6% de participação da agricultura familiar no mercado de biodiesel, seriam gerados mais de 1 milhão de empregos (D'Arce, 2005).

De acordo com a Rede Brasileira de Tecnologia de Biodiesel (2005), os testes e ensaios em motores são necessários para a validação do uso da mistura B5, juntamente com os fabricantes, visando assegurar ao consumidor final a manutenção da garantia de veículos e equipamentos. A validação do uso de outros percentuais (B10, B20, B50 e B100) também é importante para o uso em frotas cativas e para subsidiar decisões referentes à ampliação do uso do

biodiesel no país. As misturas de 10%, 20%, 50% e 100% de biodiesel ao diesel de petróleo são denominadas, respectivamente, de B10, B20, B50 e B100.

Este trabalho teve o objetivo geral de avaliar o desempenho de um motor ciclo diesel utilizando, em momentos distintos, diesel e misturas de diesel e biodiesel. As misturas utilizadas foram as equivalentes a B2 (98% diesel mineral e 2% biodiesel), B5 (95% diesel mineral e 5% biodiesel), B20 (80% diesel mineral e 20% biodiesel) e B100 (100% biodiesel).

Especificamente, o trabalho busca:

- avaliar a potência equivalente do motor na TDP ao utilizar diesel e as diferentes misturas de biodiesel com diesel;
- avaliar o torque equivalente do motor na TDP ao utilizar diesel e as diferentes misturas de biodiesel com diesel;
- avaliar o consumo energético do motor ao utilizar diesel e as diferentes misturas de biodiesel com diesel;
- avaliar a eficiência térmica do motor ao utilizar diesel e as diferentes misturas de biodiesel com diesel.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Crise energética de 1973

Os países árabes do Oriente Médio detêm o domínio da produção e comercialização mundial de petróleo desde o século XX. Em 1960, esses países criaram a Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP). Em 1973, essa organização, em represália aos Estados Unidos e às demais potências capitalistas e, consciente da importância e do valor de seu produto, elevou, inicialmente em cerca de 400%, o preço do barril de petróleo, gerando, assim, uma crise mundial energética (Tecbio, 2005).

Com essa crise, evidenciaram-se as limitações do petróleo e, a partir de então, no mundo todo, inclusive no Brasil, despertou o interesse pela busca de novas fontes alternativas de energia, e passou a realizar esforços para obter maior conservação de energia (Tecbio, 2005).

O modelo energético brasileiro recomenda a diversificação de fontes energéticas sob algumas premissas para sua seleção. Entre elas, considera a existência de tecnologia disponível no país (ou que possa vir a existir em curto prazo), a utilização de alto índice de geração de emprego por unidade de capital investido e minimização do impacto ambiental, além de se evitar, tanto quanto possível, a dependência externa (Silva, 1995).

2.2 Impacto ambiental e sustentabilidade

Em 1992, no Rio de Janeiro, representantes de vários países discutiram aspectos relacionados aos limites dos recursos da natureza. Um limite que compromete a própria existência da espécie humana. A palavra

“sustentabilidade” começou a ser assunto do dia-a-dia. Crescer é, sem dúvida, fundamental, mas, com a inteligência de percebermos os limites da Terra (Fonseca, 2005).

Nos últimos trinta anos, o homem tem detectado os efeitos danosos ao meio ambiente causados pelo crescimento econômico voluptuoso, especialmente pela emissão de carbono (CO_2) gerada pelo uso crescente dos combustíveis fósseis. Com o passar dos anos, essa emissão desenfreada revelou-se altamente danosa ao meio ambiente e, por essa razão, têm sido implementadas políticas públicas e privadas com a finalidade de reduzir as emissões de forma a amenizar os males já provocados e prevenir danos crescentes ao meio ambiente (Quintino, 2006).

A Agenda Global, para a construção de um desenvolvimento sustentável ampliado e progressivo no limiar do século XXI, conhecida como Agenda 21, foi assinada em 1992, por 179 chefes de estado e de governo, transformando-se na grande contribuição da Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, realizada no Rio de Janeiro, a “Rio 92”. Signatário do documento global, o Brasil iniciou, em 1997, o processo de construção da Agenda 21 brasileira, com a escolha de seis áreas temáticas: agricultura sustentável, cidades sustentáveis, infra-estrutura e integração regional, gestão de recursos naturais, redução das desigualdades sociais e ciência e tecnologia para o desenvolvimento sustentável (Fonseca, 2005).

A humanidade acumulou, ao longo de sua história, riqueza material e conhecimentos hoje suficientes para oferecer vida digna para todos. Isso, no entanto, não vem acontecendo. Os padrões de produção e de consumo dominantes ameaçam esgotar os recursos naturais, extinguem espécies e poluem a atmosfera. A cada ano, mais de 10 bilhões de toneladas de materiais (recursos naturais) entram na economia global. Se todos os habitantes do planeta tivessem o mesmo nível de consumo dos países industrializados, esse número teria que se

multiplicar por seis e, mesmo assim, não haveria recursos naturais suficientes. Além disso, a distância entre ricos e pobres aumenta, porque os benefícios do desenvolvimento econômico não são distribuídos igualmente (Compreendendo a Agenda 21 de Belo Horizonte, 2005).

Esse modelo de desenvolvimento não tem sustentabilidade social, ambiental e nem econômica, pois gerará uma crise global nas bases vitais da existência do nosso planeta e da continuidade da civilização. A Agenda 21 propõe um novo modelo (Compreendendo a Agenda 21 de Belo Horizonte, 2005).

Aprovada por 179 países, o documento lançou, para o século XXI, o desafio do desenvolvimento sustentável. Mais que um desafio, um compromisso que nenhuma nação poderá cumprir isoladamente. A transformação do modelo atual só será possível com cumplicidade e aliança entre os diversos grupos sociais, do âmbito local ao internacional. O desejo de mudança, impulsionado pela crise global de desenvolvimento, impõe novas formas de relação entre as nações, entre os homens e entre a humanidade e a natureza (Compreendendo a Agenda 21 de Belo Horizonte, 2005).

A Agenda 21 da Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e Desenvolvimento estabeleceu, em 1992, a substituição de 20% das fontes energéticas por renováveis até o ano 2000 e 50% até o ano 2020. Destaca-se aqui o fato de que os combustíveis alternativos e renováveis vêm à tona como uma das soluções para o desenvolvimento auto-sustentado (Silva, 1995).

2.3 Protocolo de Kyoto

Com a entrada em vigor do Protocolo de Kyoto, um enorme avanço para a humanidade, tem início o capítulo inicial do combate ao aquecimento da Terra causado pelas atividades humanas, o chamado efeito estufa. O esforço de cooperação multilateral, representado pela vigência do estatuto já no início de

2005, permitirá que praticamente todos os países atuem de modo efetivo na redução de emissões, para evitar a mudança global do clima (Campos, 2005).

Mais de 150 países assinaram a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima em junho de 1992, na "Cúpula da Terra", no Rio de Janeiro. Assim, reconheceram a mudança do clima como uma preocupação comum da humanidade. No Brasil, entrou em vigor em 1994, após ratificação pelo Congresso Nacional. Os signatários se comprometeram a tentar atingir o objetivo final, que é estabilizar as concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera (Abreu, 2006).

Responsáveis, desde a Revolução Industrial, pela maior parte das emissões de gases de efeito estufa, caberá a esses países desenvolvidos a liderança nesse processo. O Brasil, como a maioria dos países em desenvolvimento, por seu processo de industrialização recente, apresenta nível relativamente baixo de emissões *per capita*. Contudo, deverá ser um dos principais agentes na solução do problema (Campos, 2005).

Os gases que mais influenciam no processo de mudanças climáticas são os chamados gases de efeito estufa (GEE): vapor d'água (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), ozônio (O_3) e clorofluorcarbonos (CFCs). Ao todo, existem mais de setenta GEEs, com diferentes fórmulas químicas, tempo de vida e potencial de aquecimento global. O incremento na concentração do dióxido de carbono, do metano, do óxido nitroso e dos clorofluorcarbonos é responsável por cerca de 90% do aumento do efeito estufa ocorrido até hoje. Esta elevação deve-se ao crescimento da atividade humana, principalmente após a Revolução Industrial. Mantidas as expectativas de desenvolvimento de países de Terceiro Mundo, espera-se um aumento ainda maior dessas concentrações (Abreu, 2006).

Historicamente, o Brasil vem desenvolvendo ações importantes, como o uso de álcool combustível, maior programa mundial de uso de energia renovável

em larga escala, e com o predomínio da energia gerada por hidrelétricas. O Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel, estratégico por sua capacidade de geração de emprego e renda, contribui também para a redução de emissões. Estudos indicam que, comparativamente ao diesel mineral, o biodiesel é capaz de reduzir em 78% as emissões líquidas de CO_2. O uso exclusivo do biodiesel em veículos pode resultar em reduções de emissões de cerca de 27% de material particulado e de mais de 20% de enxofre (Campos, 2005).

O biodiesel, por ser obtido de um processo sustentável utilizando matérias-primas vegetais renováveis e que tem efeito sobre o ciclo do carbono, possibilita a quantificação do "crédito ambiental", que é a diferença entre o CO_2, que gera a combustão do biodiesel e o que se pode fabricar (fixar) no cultivo da matéria-prima. Essa relação sempre será maior que um combustível fóssil que, pela sua própria natureza, só gera gases de combustão sem ter, no seu processo de fabricação, a fase agrícola de fixação de carbono (Abreu, 2006).

Ações do governo incentivam a utilização de energia renovável, destacando-se a construção de pequenas centrais hidrelétricas, a geração eólica ou co-geração usando biomassa, com garantia da compra da energia gerada. Também a indústria nacional tem atuado no incentivo às fontes renováveis. São exemplos o lançamento, em 2003, do carro com flexibilidade para o uso do álcool ou outros combustíveis e o aumento da exportação do produto para fins combustíveis, devido ao interesse internacional pela solução alternativa brasileira (Campos, 2005).

O mercado de créditos de carbono, previsto no Protocolo de Kyoto, já vem realizando algumas operações. A vantagem consiste, basicamente, em financiar empreendimentos que contribuam para reduzir a emissão de gases causadores do efeito estufa, tais como o gás carbônico e o enxofre, dentre outros. Assim, os empreendimentos são financiados em condições especiais, como estímulo à sua contribuição para a melhoria das condições ambientais do

planeta. Para os empreendimentos, as vantagens são, portanto, indiscutíveis. Sob o ponto de vista do país, abre-se uma nova fonte de financiamento do processo de desenvolvimento, em condições muito vantajosas, permitindo que o governo redirecione recursos para outras áreas prioritárias, como educação, saúde, infra-estrutura e assim por diante. Não se pode deixar de mencionar, também, o impacto favorável sobre a imagem do país no exterior, na medida em que projetos brasileiros sejam beneficiados com número crescente de financiamentos no âmbito do mecanismo de desenvolvimento limpo. A atenção ao meio ambiente é uma das formas mais eficazes de projetar o nome de um país no cenário internacional, diante da visibilidade e da importância crescente do tema ambiental (Rede Brasileira de Tecnologia de Biodiesel, 2006).

Essas ações permitem antever uma importante participação brasileira no combate ao aquecimento global. Por meio do mecanismo de desenvolvimento limpo do Protocolo de Kyoto, o chamado MDL, projetos de reduções certificadas de emissão no Brasil poderão gerar créditos que serão utilizados pelos países industrializados para cumprir suas metas no protocolo. O chamado mercado de créditos de carbono é uma oportunidade para que o Brasil participe do esforço global de combate à mudança do clima, recebendo recursos externos e transferência de tecnologia, promovendo a formação de recursos humanos e geração de novos e melhores empregos, propiciando benefícios ambientais e mais qualidade de vida (Campos, 2005).

O MDL é um instrumento de flexibilização que permite a participação dos países em desenvolvimento ou sem compromisso de redução, como o Brasil. Os países desenvolvidos que não conseguirem atingir suas metas terão liberdade para investir em projetos MDL de países em desenvolvimento. Por meio deste mecanismo, comprariam créditos de carbono em tonelada de CO_2 equivalente, de países em desenvolvimento, os responsáveis por tais projetos. Os ganhos decorrentes da redução da emissão de CO_2, por queimar um combustível mais

limpo (biodiesel), pode ser estimado em 2,5 toneladas por tonelada de biodiesel. No mercado europeu, os créditos de carbono são negociados por volta de US9.25t^{-1}$. Portanto, 348 mil toneladas de biodiesel de mamona geram uma economia de 870 mil toneladas de CO_2, podendo ser comercializadas por US$8 milhões (Abreu, 2006).

O Protocolo de Kyoto determina que seus signatários, países desenvolvidos (chamados países do Anexo I), reduzam suas emissões de gases de efeito estufa em 5,2%, em média, relativas ao ano de 1990, entre 2008 e 2012. Para tanto, existem algumas alternativas para auxiliá-los no cumprimento de suas metas, chamadas de mecanismos de flexibilização. Esse período é também conhecido como primeiro período de compromisso. Para não comprometer as economias desses países, o protocolo estabeleceu que, caso seja impossível atingir as metas estabelecidas por meio da redução das emissões dos gases, os países poderão comprar créditos de outras nações que possuam projetos de MDL (BiodieselBR, 2006).

A crescente demanda por combustíveis renováveis como alternativa aos combustíveis fósseis e a maior preocupação internacional com o aquecimento global, amplificada agora com a entrada em vigor do Protocolo de Kyoto, evidenciam os benefícios do combustível "verde". O biodiesel contribuirá significativamente para melhorar as condições ambientais, tendo uma participação relevante na redução da emissão de gases poluentes, sobretudo nos grandes centros metropolitanos. Significa também melhorar a qualidade de vida da população e evitar gastos dos governos e dos cidadãos no combate aos males da poluição (Grando, 2005).

A produção de biodiesel também possibilita atender aos compromissos firmados no âmbito da Convenção do Clima e pleitear financiamentos internacionais em condições favoráveis no mercado de créditos de carbono, sob o enfoque do MDL, previsto no Protocolo de Kyoto (Grando, 2005).

Como combustível, o biodiesel possui características vantajosas em relação aos combustíveis derivados do petróleo, podendo ser citados: a condição de ser virtualmente livre de enxofre e de compostos aromáticos, o alto número de cetano, o teor médio de oxigênio, o maior ponto de fulgor, a menor emissão de partículas, HC, CO e de CO_2 e o caráter não tóxico e biodegradável, além de ser proveniente de fontes renováveis (D'Arce, 2005).

Os benefícios ambientais podem, ainda, gerar vantagens econômicas. Os óleos vegetais tiram mais CO_2 da atmosfera durante sua produção do que a quantidade liberada quando estes são queimados, o que ajudaria a aliviar o aumento da quantidade desses gases na atmosfera, causando um efeito estufa negativo (D'Arce, 2005).

O biodiesel permite que se estabeleça um ciclo fechado de carbono no qual o CO_2 é absorvido quando a planta cresce e é liberado quando o biodiesel é queimado na combustão do motor. Um estudo conjunto do Departamento de Energia e do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos mostra que o biodiesel reduz em 78% as emissões líquidas de CO_2 (D'Arce, 2005).

Além do mais, os benefícios ambientais podem gerar vantagens econômicas para o país. O Brasil poderia enquadrar o biodiesel nos acordos estabelecidos no Protocolo de Kyoto e nas diretrizes dos MDL. Existe, então, a possibilidade de venda de cotas de carbono por meio do Fundo Protótipo de Carbono (PCF), pela redução das emissões de gases poluentes e também de créditos de seqüestros de carbono, por meio do Fundo Bio de Carbono (CBF), administrados pelo Banco Mundial (D'Arce, 2005).

2.4 Motores ciclo diesel

O motor de combustão é uma fonte de potência mecânica em que a mistura admitida (ar e combustível) é queimada no interior do cilindro e o calor liberado provoca a expansão dos gases. A pressão originada dessa expansão é

recebida pelo êmbolo (pistão) contido no interior do cilindro e conectado, através da biela, à árvore de manivelas (virabrequim). O deslocamento alternativo do êmbolo ao longo do cilindro transforma-se em movimento de rotação por meio do mecanismo biela/manivela (Silva, 2003).

Os motores de ignição por compressão (ICO) são motores que admitem, para o interior do cilindro, apenas ar e o início do processo de combustão se dá por ignição espontânea, assim que o combustível é injetado no interior da massa de ar que foi altamente comprimida anteriormente e que atingiu uma temperatura superior à temperatura de ignição do combustível. Geralmente, esses motores usam como combustível o óleo diesel e os óleos vegetais (Silva, 2003).

Nos motores do ciclo diesel, o combustível é misturado ao ar no fim do tempo de compressão, através do bico injetor, pela pulverização do óleo diesel no interior da câmara de combustão. As gotículas de diesel em contato com o ar comprimido e aquecido entram em processo de combustão (Silva, 1995).

O Ciclo Termodinâmico Diesel é constituído de seis processos térmicos, e foram descritos por Silva (2003) como se segue:

a) processo isobárico denominado admissão: com a válvula de admissão aberta e o cilindro se deslocando do PMS para o PMI, o cilindro admite ar;

b) processo adiabático denominado compressão: com as válvulas fechadas e êmbolo se deslocando do PMI para o PMS, ocorre a compressão do ar;

c) processo isobárico denominado combustão: ocorre com a pulverização do óleo diesel na câmara de compressão. A queima do óleo diesel se dá espontaneamente e, à medida que a pressão vai se elevando, o êmbolo começa a se deslocar para o PMI;

d) processo adiabático denominado expansão: ocorre com a continuidade do deslocamento do êmbolo para o PMI, depois que termina a combustão;

e) processo isovolumétrico denominado escape (descarga): ocorre com a abertura da válvula de escapamento e a queda da pressão;

f) processo isobárico, também denominado escape (exaustão): ocorre com o deslocamento do êmbolo do PMI para o PMS, expulsando os gases queimados.

Silva (2003) descreve o ciclo de quatro tempos que se aplica ao diesel como correspondendo a quatro cursos do pistão, ou seja, a duas voltas do virabrequim. Sendo assim:

- primeiro tempo, do PMS ao PMI, admissão de ar puro;
- segundo tempo, do PMI ao PMS, compressão do ar puro acerca de 40 bares;
- terceiro tempo, do PMS ao PMI, injeção do combustível, combustão e repouso;
- quarto tempo, do PMI ao PMS, escapamento dos gases queimados.

O sistema de injeção dosa, distribui e pulveriza o combustível em direção aos cilindros. O combustível inflama-se ao entrar em contato com o ar fortemente aquecido pela compressão (Boulanger, 1978).

Enquanto que, em um motor a gasolina, o ar carburizado atinge um valor aproximado de 280°C em fim de compressão, esta temperatura é de cerca de 700°C para o ar puro comprimido em um motor diesel (Boulanger, 1978).

2.4.1 Definições termodinâmicas

2.4.1.1 Poder calorífico

O poder calorífico ou calor de reação representa a quantidade de calor transferida da câmara durante a combustão ou reação, à temperatura constante. No caso de pressão constante ou processo de escoamento em regime permanente, deduzimos, pela primeira lei da termodinâmica, que ela é igual à entalpia de combustão com o sinal contrário. Por isso, essa quantidade de calor transferido é chamada de poder calorífico à pressão constante, para os processos de combustão (Wylen & Sonntag, 1993).

No caso de um processo a volume constante, a quantidade de calor transferido é igual à energia interna de combustão com sinal contrário, isto é, algumas vezes designado como poder calorífico a volume constante no caso de combustão (Wylen & Sonntag, 1993).

O poder calorífico superior é a quantidade de calor transferido com H_2O líquido nos produtos e poder calorífico inferior é a quantidade de calor transferido quando, nos produtos o H_2O, se apresentar como vapor (Wylen & Sonntag, 1993).

Também, de acordo com Boulanger (1978), poder calorífico é quando a combustão de um quilograma de combustível qualquer em sua combustão com oxigênio liberta certa quantidade de calor avaliada em calorias. Como exemplo, tem-se o poder calorífico da gasolina igual a 11.000 calorias por kg (para um litro de gasolina, densidade 0,73, aproximadamente 8.000 calorias) e o poder calorífico do óleo combustível é de 10.800 calorias por quilo (para um litro de óleo combustível, densidade 0,85, aproximadamente 9.200 calorias.).

Segundo Moreira (2006), a fórmula química representativa do biodiesel é $C_6H_{30}O_2$.

A quantidade de energia liberada por unidade de massa do combustível, ou de volume, é o poder calorífico superior (PCS) e depende da composição de cada combustível.

A técnica usada, quando se aplica a primeira lei da termodinâmica às reações químicas, consiste em admitir que a entalpia de todos os elementos seja nula no estado de referência 25°C e 760 mm Hg.

Para combustíveis sólidos e líquidos, o poder calorífico pode ser calculado, com boa aproximação, pela equação:

$$PCS = 33900C+141800(H-O/8)+9200S$$

em que:

- PCS = poder calorífico superior (kJ kg^{-1})
- C = teor de carbono no combustível (kg(carbono) kg combustível^{-1})
- H = teor de hidrogênio no combustível (kg(hidrogênio)kg combustível^{-1})
- S = teor de enxofre no combustível (kg(enxofre) kg combustível^{-1})
- O = teor de oxigênio no combustível (kg(oxigênio) kg combustível^{-1})

O cálculo do poder calorífico inferior (PCI) é o PCS descontado o calor latente que acompanha o vapor d'água que sai pela descarga. Esse vapor d'água é decorrente da reação do hidrogênio com o oxigênio e da umidade presente no combustível.

$$PCI=PCS-2440(9H+W)$$

Em que:

- PCI = poder calorífico inferior (kJ.kg^{-1} de combustível)
- W = umidade do combustível (kg umidade.kg combustível^{-1})

A umidade é conhecida a partir da composição química do combustível e 9H representa a parcela de vapor d'água formada pela combustão do hidrogênio. O calor latente é tomado de acordo com pressão parcial do vapor d'água, nas condições normais de temperatura e pressão (CNTP) (Moreira, 2006).

2.4.1.2Rendimento térmico

Rendimento térmico é a relação entre a energia utilizada e a energia fornecida, e essa relação é sempre inferior a 1. No ciclo real ou ciclo prático, esse rendimento raramente ultrapassa 0,30 para os motores de ignição por centelha, ao passo que se aproxima de 0,45 para os motores a diesel modernos (Wylen & Sonntag, 1993).

2.4.1.3 Rendimento mecânico

Avalia-se, em média, em 15% o total de perdas por atrito, sendo o rendimento mecânico de aproximadamente 0,85 (gasolina e diesel rápido). Na verdade, o atrito dos pinhões, dos rolamentos, o movimento da árvore de cames e da bomba de injeção, etc. consomem do motor uma parte da energia recolhida sobre o pistão (Wylen & Sonntag, 1993).

2.4.1.4 Rendimento termo-mecânico

Rendimento termo-mecânico é o produto do rendimento térmico e do rendimento mecânico, que, em média ,nos dá:

- 0,30. 0,85 = 0,25 para os motores a gasolina
- 0,45. 0,85 = 0,38 para os motores ciclo diesel

No motor térmico, tem-se que tratar de forças particulares: a energia liberada pela combustão da mistura ar - combustível produz uma forte pressão que empurra o pistão em linha reta no cilindro. Depois, o movimento linear do pistão transforma-se em movimento rotativo pelo sistema de biela-manivela (Wylen & Sonntag, 1993).

2.4.1.5 Torque

A definição mecânica de torque é a seguinte: “o momento de um torque, por abreviação torque, é provocado por duas forças de intensidade igual agindo

paralelamente, mas em direções opostas, sobre um corpo que toma um movimento de rotação" (Wylen & Sonntag, 1993).

De acordo com Mialhe (1980), torque é um momento, conjugado ou binário, que tende a produzir ou que produz rotação; é o produto de uma força por um raio comumente denominado braço de torque.

A mensuração do torque consiste, basicamente, em determinar-se a intensidade de uma força que, atuando, na extremidade de um braço, tende a produzir ou produz movimento de rotação. Quando o movimento de rotação é limitado, como no caso de porcas e parafusos, essa mensuração é feita por meio da chave torquimétrica. No caso de movimento rotativo contínuo, como acontece nos motores, o torque é medido pelos dinamômetros de absorção ou freios dinamométricos.

O torque dos motores é expresso, comumente, em termos de metro x quilograma-força ou mkgf. É importante observar a ordem de apresentação das unidades: primeiro m (metro) e depois kgf, ou seja, mkgf. Isto, para não haver possibilidade de confusão com a unidade de trabalho kgm (quilogrâmetro).

O torque provocado pelo produto da força desenvolvida sobre os pistões por um braço de alavanca fictício passa por um máximo em um valor determinado de velocidade de rotação (Wylen & Sonntag, 1993).

Para medir o torque do motor, imprime-se-lhe um torque para que possa freiá-lo. Antigamente, essa medida era efetuada em um aparelho chamado "freio de Prony"; hoje, usa-se um freio hidráulico ou elétrico, sendo o torque determinado por:

$$C\ (m\ kg) = P.L$$

- C = torque
- P = força (peso)
- L = comprimento do braço de alavanca

2.4.1.6 Potência real ou efetiva

A bancada de prova é que fornece o valor do torque que permite calcular a potência efetiva do motor. Potência é igual ao trabalho produzido na unidade de tempo. A potência desenvolvida por um torque é igual ao produto do torque pelo deslocamento angular na unidade de tempo. O deslocamento angular mede-se, em radianos, para o cálculo do trabalho por uma volta e velocidade de rotação ou de funcionamento em rpm (Boulanger, 1978):

$Pe\ (kg.m.s^{-1}) = T.C.N.(60)^{-1}$.

- Pe = potência efetiva
- T = trabalho
- C = torque
- N = rotação

No sistema "sexagesimal", a circunferência é dividida em 360 graus. Em mecânica, emprega-se o cálculo da velocidade angular em que a circunferência é dividida em radianos e um arco de um radiano tem por comprimento o raio da circunferência. Portanto, uma circunferência tem 6,28 radianos ou um comprimento total de arco equivalente a 6,28 vezes o raio ou 3,14 vezes o diâmetro da circunferência (Wylen & Sonntag, 1993).

Para obter-se CV, multiplica-se por 75 ($1CV=75\ kg.m.s^{-1}$) e, daí para watts, multiplica-se pelo fator de conversão 745,7:

$Pe\ (W)= C.2.\pi.N.(60 \times 75)^{-1}.745,7$

De acordo com Taylor (1971), a eficiência de um processo cíclico é definida como:

$\eta= w.(JQ')^{-1}$

em que:

- η = eficiência
- w = trabalho útil fornecido pelo processo

- J = coeficiente da lei de Joule
- Q' = calor cedido ao sistema durante o processo.

Os motores de combustão interna operam pela queima do combustível em vez de adicionar calor ao meio, que não retorna ao estado original. É conveniente usar uma definição de eficiência baseada em uma quantidade de calor característica relacionada ao combustível. Assim sendo, o modo de determinação desse valor, chamado de poder calorífico do combustível, que é arbitrário, mas, é, geralmente, aceito no tratamento dos motores de combustão. Se o poder calorífico por unidade de massa de combustível é chamado Qc, a eficiência η, de qualquer motor de combustão, pode ser definida como (Taylor, 1971):

$$\eta = P.(J.Mf.Qc)^{-1}$$

onde:

- P = potência
- Mf = massa de combustível utilizada na unidade de tempo
- Qc = poder calorífico da unidade de massa do combustível

Se a potência P for a potência no freio, isto é, a potência medida no eixo de saída, a equação acima define a eficiência térmica no freio. Se a potência for calculada a partir do trabalho desenvolvido sobre os êmbolos, ela é chamada de potência indicada. A equação acima define a eficiência térmica indicada (Taylor, 1971).

A razão da potência no freio para a indicada é chamada eficiência mecânica, seguindo-se que a eficiência térmica no freio é igual ao produto das eficiências térmica indicada e mecânica (Taylor, 1971).

A potência é expressa como:

$P = J.Ma.F.Qc.\eta$, sendo:

- Ma a massa de ar suprido na unidade de tempo

- F a razão das massas de combustível e de ar

A potência desenvolvida em um dado torque é igual ao produto do torque pelo deslocamento angular na unidade de tempo. O deslocamento angular mede-se em "radianos" para o cálculo do trabalho por uma volta e velocidade de rotação ou de funcionamento em rotações/minuto, de onde a fórmula:

$Pe = C.\Theta$

$Pe\ (kg.m.s^{-1}) = T.C.N.(60)^{-1}$

$C = (kg.m) = F.L$

sendo:

- T = trabalho
- C = torque
- N = rotação
- F = força F (peso)
- L = comprimento do braço da alavanca
- Θ = velocidade angular

O dinamômetro é um instrumento para a determinação da potência, usualmente pela medição independente da força, do tempo e da distância em que ela atua. Pode ser classificado como de freio, de barra de tração ou de torção, de acordo com o modo pelo qual é aplicado o trabalho. Pode também ser dito de absorção ou transmissão, dependendo do destino que dá à energia (Barger et al., 1983).

O dinamômetro de absorção, hidráulico, também funciona sob o princípio da transformação do trabalho em calor. O meio de trabalho, normalmente a água, que circula no interior da carcaça e devido ao atrito, sai a uma temperatura mais alta do que a que possuía ao entrar. A carcaça exterior, que é livre para girar em torno da árvore, liga-se ao braço de torção de alavanca

e o conjugado obtido é igual ao que é entregue ao dinamômetro (Barger et al., 1983).

2.5 Combustão e combustíveis

Toda substância capaz de reagir com o oxigênio e liberar energia térmica é identificada como combustível. Os combustíveis podem apresentar-se na fase sólida, líquida ou gasosa. Os combustíveis são caracterizados pelas suas propriedades físico-químicas e são encontrados na forma natural ou artificial. Petróleo e carvão fóssil são exemplos de combustíveis naturais. Derivados de petróleo, coque e carvão vegetal são exemplos de combustíveis naturais (Moreira, 2006).

Combustível é a denominação dada a toda substância cuja reação de oxidação é altamente exotérmica, isto é, sua reação com o oxigênio gera grande desprendimento de calor. Por outro lado, toda substância que, ao combinar-se com outra, dá lugar à combustão, desta recebe a denominação de comburente. O oxigênio é, portanto, comburente, e não combustível (Barger et al., 1983).

Os combustíveis recebem também a denominação de hidrocarbonetos por constituírem-se de substâncias formadas de carbono (C) e hidrogênio (H). Mialhe (1980) classifica os combustíveis, de acordo com sua origem, em:

- vegetais, de madeira (lenha): resíduos vegetais, carvão vegetal (na forma sólida ou por gases provenientes de sua queima), metanol;
- minerais: de carvão mineral, petróleo e seus derivados (também denominados “combustíveis fósseis”);
- bioquímicos: álcool etílico (obtido por fermentação alcoólica e posterior destilação) e gás metano (obtido por fermentação anaeróbica de esterco e resíduos vegetais).

A combustão consiste na combinação química do oxigênio do ar com o carbono e o hidrogênio do combustível. Há liberação de calor, resultando em aumento da pressão. O resultado final, ou desejado, ocorre durante o curso de expansão de um pistão, quando tem lugar uma variação de volume e se realiza o trabalho (Barger et al., 1983).

Para que ocorra a combustão no interior dos cilindros dos motores, de forma a satisfazer certas condições básicas de funcionamento dessas máquinas, os seguintes requisitos devem ser preenchidos (Mialhe, 1980):

- disponibilidade de oxigênio, fornecido pelo ar admitido nos cilindros e de um combustível, representado comumente por uma mistura de hidrocarbonetos derivados do petróleo;
- que a proporção entre a quantidade de ar e de combustível se encontre dentro de certos limites;
- que se atinja uma temperatura suficiente, para que a mistura ar mais combustível entre em ignição e desenvolva-se a combustão;
- que a velocidade de propagação da combustão determine tempos de ocorrência do fenômeno compatíveis com o intervalo de duração dos tempos do ciclo de funcionamento do motor

2.6 Biodiesel

Tal como o álcool está para a substituição da gasolina nos motores de ignição por centelha, os óleos vegetais podem substituir o diesel nos motores de ignição por compressão, com a vantagem de não requererem profundas adaptações mecânicas e apresentarem alto rendimento energético (MIC I, 1985).

O panorama estratégico brasileiro caracterizou-se, nos últimos anos, por uma série de contingências de natureza técnica, econômica e política, pela necessidade de redução do petróleo importado. Nesse contexto, os combustíveis

alternativos têm-se apresentado como importantes componentes para a redução de consumo de derivados de petróleo (MIC - II, 1985).

A possibilidade de uso de óleos vegetais como combustível foi reconhecida desde os primórdios dos motores diesel. O próprio Rudolph Diesel utilizou vários óleos vegetais em seus motores e no prefácio escrito por ele, em 1990, para o livro intitulado Termodinâmica, afirmou:

"*O motor diesel pode ser alimentado com óleos vegetais e poderá ajudar consideravelmente o desenvolvimento da agricultura nos países onde ele funcionar. Isso parece um sonho do futuro, mas eu posso predizer com inteira convicção que esse modo de emprego do motor diesel pode, em dado tempo, adquirir uma grande importância*" (Sá Filho et al., 1979)."

Para isso, ele utilizou óleo de amendoim *in natura* em um motor Elko. No início da década de 1980, com a alta dos preços do petróleo, começou-se a discutir a viabilidade de encontrar-se um substituto renovável para o diesel. O dendezeiro foi a cultura cogitada para fornecer a matéria-prima, devido ao seu alto rendimento em óleo por área de plantio (D'Arce, 2005).

Os óleos vegetais são produtos naturais constituídos da mistura de ésteres derivados do glicerol. A aplicação direta dos óleos vegetais nos motores é limitada em virtude de algumas propriedades físicas dos mesmos, principalmente sua alta viscosidade, sua baixa volatilidade e seu caráter polisaturado, que implicam em alguns problemas nos motores, bem como uma combustão incompleta (D'Arce, 2005).

Assim, visando reduzir a viscosidade dos óleos vegetais, diferentes alternativas têm sido consideradas, tais como diluição, microemulsão com metanol ou etanol, craqueamento catalítico e reação de transesterificação com etanol ou metanol. Entre essas alternativas, a transesterificação tem se

apresentado como a melhor opção, visto que o processo é relativamente simples e promove a obtenção de um combustível, denominado biodiesel, cujas propriedades são similares às do óleo diesel (D'Arce, 2005; Kusy, 1982).

O maior problema a ser enfrentado quando consideram-se óleos vegetais como combustíveis é a reatividade do combustível não queimado no cilindro e no cárter, onde o combustível bruto e parcialmente não queimado pode aparecer de várias maneiras. O combustível não queimado ou parcialmente queimado no cilindro é a causa do envernizamento e da formação de crostas no bico injetor. Uma maneira de reduzir esse acúmulo de verniz na parede do cilindro e o estrago do bico injetor é reduzir a viscosidade do combustível e, assim, melhorar o desempenho do bico injetor. Um combustível bem atomizado, completamente queimado, não atrapalha ou estraga qualquer peça do motor. Reduzir a viscosidade pela formação de um éster metílico para melhorar o desempenho do bico injetor será uma solução parcial, se não total, para alguns problemas tão evidentes de estragos do motor quando óleos vegetais brutos são usados no lugar de diesel combustível (Hassett & Hasan, 1982).

A viscosidade de um fluido diz respeito à resistência que uma lâmina de partículas de um fluido impõe a outra a ela adjacente, quando existe movimento relativo. Para se definir a viscosidade, é necessário definir escoamento laminar como aquele em que as partículas se movem em lâminas planas bem definidas, sem que haja fuga de partícula de uma lâmina para outra. Neste caso, tudo ocorre como se as lâminas escorregassem umas sobre as outras.

A viscosidade é definida por meio da Lei de Viscosidade de Newton, que especifica que, para certos fluidos, denominados newtonianos, a tensão de cisalhamento numa interface paralela à direção do escoamento é diretamente proporcional à razão de variação de velocidade na direção normal à interface (Schiozer, 1996).

A alta viscosidade parece ser uma propriedade fundamental no cerne de muitos problemas associados com o uso direto de óleos vegetais como combustíveis. A alta viscosidade tem o efeito de aumentar o tamanho da gota na injeção dentro do cilindro e resulta em combustão pobre. Isso, por sua vez, resulta na formação de depósitos na câmara de combustão e a introdução de combustível não queimado no óleo lubrificante e o enfraquecimento do combustível. Por causa da insaturação deles, a diluição dos óleos vegetais resulta numa excessiva espessura do óleo lubrificante e, ao mesmo tempo, em problemas de acerto da lubrificação adequada numa gama de temperaturas (Kusy, 1982).

Outra limitação ao uso desses óleos vegetais como combustíveis é a tendência de eles se solidificarem em temperaturas normais de operação no inverno. Esse problema pode ser parcialmente solucionado por algum tipo de aquecimento ou diluição com diesel combustível. O óleo de soja se solidifica entre -10°C e -16°C e o óleo de girassol se solidifica a -18°C (Kusy, 1982).

O que tem sido denominado de biodiesel é um combustível renovável, biodegradável e ambientalmente correto, sucedâneo ao óleo diesel mineral, constituído de uma mistura de ésteres metílicos ou etílicos de ácidos graxos, obtidos da reação de transesterificação de qualquer triglicerídeo com um álcool de cadeia curta, metanol ou etanol, respectivamente (Parente, 2005).

Os óleos vegetais são constituídos, principalmente, por triglicerídeos, os quais decorrem da união de uma molécula de glicerina com três moléculas de ácidos graxos. A reação dos óleos vegetais com monoálcoois, em presença de catalisadores, à temperatura adequada, produz ésteres de ácidos graxos que se compõem devido à substituição da glicerina pelo álcool. Esse processo denomina-se transesterificação (MIC - I, 1985).

Segundo Queirós (2000), numa definição rápida e simples, ácidos graxos são ácidos carboxílicos formados por extensas cadeias carbônicas contendo 12 ou mais átomos de carbono. Eles estão presentes nos óleos e nas gorduras.

Os ésteres são formados por um tipo de reação conhecida como esterilização e envolvem reações de ácidos e moléculas de álcoois. Glicerídeos são ésteres obtidos da reação entre o glicerol, também conhecida como glicerina (trialcool) com ácidos graxos. Os óleos e gorduras animais e vegetais são misturas de glicerídeos (Queirós, 2000).

Nos óleos predominam glicerídeos de ácidos insaturados e, nas gorduras, predominam glicerídeos de ácidos saturados. As insaturações reduzem a temperatura de fusão dos ácidos graxos, por isso, os óleos são líquidos, enquanto as gorduras são sólidas, na temperatura ambiente (Queirós, 2000).

O álcool utilizado na reação pode ser de origem vegetal ou mineral. Quando de origem vegetal (rota etílica), a emissão de dióxido de carbono (CO_2) decorrente da combustão do biodiesel é reabsorvida na íntegra pela fotossíntese, durante o crescimento das próximas safras das biomassas das quais se produzem o álcool e o óleo. Quando o álcool é mineral (rota metílica), apenas o percentual do CO_2 produzido pela combustão do biodiesel referente à queima do óleo vegetal (no mínimo 78%) é absorvido (Oliveira & Costa, 2005).

Há redução de 78% nas emissões de gases do efeito estufa decorrente do uso de biomassa consorciado a 22% de metanol fóssil, redução comprovada de 50% das emissões de material particulado e de 98% de enxofre. Apenas os óxidos nitrogenados (NO_x), causadores de doenças nas vias respiratórias, têm aumento, na faixa de 13% (Oliveira & Costa, 2005).

Assim sendo, o biodiesel é um combustível alternativo para motores ciclo diesel produzido quimicamente pela reação de transesterificação de um óleo vegetal ou animal com um álcool de cadeia curta, metanol ou etanol. A reação requer um catalisador geralmente, uma base forte como hidróxido de

sódio ou de potássio e produz ésteres de alquila, conhecidos pelo termo "biodiesel" (Antolín et al., 2002; Dmytryshyn et al., 2004).

Apesar da quase totalidade do biodiesel produzido mundialmente ser do tipo metílico, em função da já existente e consolidada indústria do etanol no Brasil e da grande vocação agrícola brasileira, a substituição do metanol pelo etanol na produção do biodiesel é uma idéia que se fortalece, fazendo com que o combustível assim produzido possa ser considerado uma fonte de energia totalmente renovável (Carvalho & Otz, 2003; Vicente et al., 2004).

Dentre outras diversas vantagens, o biodiesel proveniente de óleo vegetal tem potencial para substituir combustíveis à base de petróleo, poder ser produzido localmente, além de trazer benefícios ambientais. O biodiesel é, praticamente, isento de enxofre e possui excelentes propriedades lubrificantes. Além disso, contribui para a diminuição do teor de dióxido de carbono na atmosfera. A principal vantagem econômica na utilização desse combustível "verde" está relacionada ao fato do país importar 18% de óleo diesel que consome, podendo, assim, diminuir esse percentual ou, quem sabe, num futuro próximo, reduzi-lo a zero (Seminário de Tecnologia de Motores, Combustíveis e Emissões, 2005).

Dessa forma, produzido a partir de fontes renováveis, tais como óleos vegetais (girassol, amendoim, algodão, soja, mamona, etc.), gorduras animais e óleos de frituras, o biodiesel surge como uma opção de substituição do diesel mineral nos motores de combustão por compressão (Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel, 2005).

Além das vantagens econômicas e ambientais, há o aspecto social de fundamental importância, sobretudo em se considerando a possibilidade de conciliar sinergicamente todas essas potencialidades (Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel, 2005).

A área cultivada necessária para atender ao percentual de mistura de 2% de biodiesel ao diesel de petróleo é estimada em 1,5 milhão de hectares. As regras permitem a produção a partir de diferentes oleaginosas e rotas tecnológicas, possibilitando a participação do agronegócio e da agricultura familiar (Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel, 2005).

O cultivo de matérias-primas e a produção industrial de biodiesel têm grande potencial de geração de empregos, promovendo, dessa forma, a inclusão social, especialmente quando se considera o amplo potencial produtivo da agricultura familiar. No semi-árido brasileiro e na região Norte, a inclusão social é ainda mais premente e pode ser alcançada com a produção de biodiesel de mamona e de palma (dendê) (Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel, 2005).

A mistura do biodiesel ao diesel na proporção de 2%, inicialmente prevista em caráter autorizativo até dezembro de 2007, tornou-se obrigatória em 2006, por meio de Resolução do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE). Essa obrigatoriedade é limitada à disponibilidade do combustível fornecido por usinas detentoras do selo "Combustível Social" e negociado em leilões públicos. O primeiro leilão foi realizado, com sucesso, em novembro de 2005. Foram arrematados 70 milhões de litros de biodiesel social, a serem entregues durante o ano de 2006, com 65 mil famílias de agricultores beneficiados, apenas com esse leilão. A obrigatoriedade dos 2% de biodiesel no diesel cria um mercado interno potencial nos próximos três anos de, pelo menos, 840 milhões de litros/ano. Em 2013, a obrigatoriedade passará para 5%, tornando assim a demanda crescente (Reunião Anual das Assembléias de Governadores 2006 – BID – CII, 2006).

2.6.1 Biodiesel de soja

A soja, única oleaginosa de grande disponibilidade no Brasil, com quase 60 milhões de toneladas colhidas este ano, oferece apenas 20% de óleo ao ser processada. Seria necessário ampliar em 20% a colheita nacional para produzir dois bilhões de litros de biodiesel que o país necessitará se adotar uma mistura de apenas 5% (B5). Contudo, as fontes podem ser diversificadas e tornar rentável a pequena agricultura em muitas regiões, promovendo desenvolvimento e inclusão social. Além disso, o Brasil pode converter-se no grande exportador de combustíveis renováveis (Osava, 2006).

Segundo dados da Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais (ABIOVE), apenas o excedente do óleo de soja já supera a quantidade necessária para a adição de 2% de biodiesel no combustível mais consumido no país (ESALQ, 2005).

De acordo com os dados econômicos fornecidos pela EMBRAPA (2005), na safra 2004/2005, a produção de soja no mundo foi de 216,3 milhões de toneladas, numa área cultivada de 92,8 milhões de hectares, movimentando, no complexo agroindustrial, a quantia de aproximadamente US$215 bilhões/ano. Nos EUA, maior produtor mundial do grão, a produção foi de 85,5 milhões de toneladas, numa área cultivada de 29,3 milhões de hectares, custo de produção de US$12.00/saca de 60 kg e produtividade de 2.880 $kg.ha^{-1}$. No Brasil, segundo maior produtor mundial do grão, a produção foi de 50,19 milhões de toneladas, numa área cultivada de 23,104 milhões de hectares, custo de produção de US$11.00/saca de 60 kg e produtividade média de 2.173 $kg.ha^{-1}$, movimentando, no complexo agroindustrial, a quantia de US$30 bilhões. A produtividade do Mato Grosso, maior produtor brasileiro, é de 2,810 mil $kg.ha^{-1}$ e produção de 16,927 milhões de toneladas, numa área cultivada de 6,024 milhões de ha, enquanto que, no Paraná, segundo maior produtor brasileiro, a produtividade é

de 2,300 mil $kg.ha^{-1}$ e a produção de 9,387 milhões de toneladas, numa área cultivada de 4,06 milhões de ha.

A Lei 11.097/05, também conhecida como Lei do Biodiesel, liberou a adição voluntária de 2% de biodiesel ao diesel distribuído em todo Brasil, até o ano de 2008, quando esse percentual se tornará obrigatório. A demanda de biodiesel para atender a esse percentual é da ordem de 800 milhões de litro por ano, o que, segundo especialistas do governo, equivale a 1,5 milhão de hectares de área cultivada de oleaginosas – cerca de 1% da área produtiva usada pela agricultura brasileira. Atualmente, existem oito usinas de biodiesel credenciadas pela Agência Nacional de Petróleo (ANP), com capacidade total de produção de, aproximadamente, 85 milhões de litros por ano. Após a realização de dois leilões, foram vendidos à Petrobras 240 milhões de litros, com preço médio de R$1,86/litro, para serem fornecidos até junho de 2007, o que representa, aproximadamente, 30% da demanda nacional para a mistura B2 (Marques, 2006).

A mesma lei estabelece o percentual obrigatório de 5% de adição de biodiesel ao diesel, a partir do ano de 2013. Este prazo poderá ser reduzido mediante Resolução do Conselho Nacional do Petróleo (CNPE), desde que satisfeitas as condições estabelecidas nesta lei (Rede Brasileira de Tecnologia de Biodiesel, 2005).

A realização de testes e ensaios em motores é necessária para a validação do uso da mistura B5, em conjunto com os fabricantes, com vistas a assegurar, ao consumidor final, a manutenção da garantia de veículos e equipamentos. Ademais, a validação do uso de outros percentuais (B10, B20, B50, B100) é importante também para o uso em frotas cativas e para subsidiar decisões referentes à ampliação do uso do biodiesel no país (Rede Brasileira de Tecnologia de Biodiesel, 2005).

2.7 Ensaios com motores

Goering et al. (1982) avaliaram combustíveis híbridos, formados pela microemulsificação aquosa do etanol no óleo de soja, em um motor ciclo diesel John Deere modelo 152 (3 cilindros, injeção direta naturalmente aspirado, 2,491 litros, 26,3 kW na velocidade de 2400 rpm.). Para terem uma linha de base, usaram, também, diesel. Uma microemulsão não iônica foi formada usando butanol-1. Concluíram que a microemulsão não iônica produziu praticamente a mesma potência que o diesel, apesar de ter um poder calorífico 16% mais baixo. A viscosidade maior dos combustíveis híbridos proporcionou um aumento de 16% na massa de cada injeção de combustível na potência máxima, mas, as injeções tiveram 6% menos energia do que com diesel. O oxigênio, nos combustíveis híbridos, produziu uma combustão melhor e propiciou um ganho de 6% na eficiência térmica em relação ao diesel na potência máxima. O consumo específico de combustível no freio foi 16% mais alto com combustíveis híbridos do que com diesel na potência máxima.

Vinyard et al. (1982) pesquisaram a viabilidade técnica de se usar álcool e quatro tipos de óleos vegetais (girassol cru, semente de algodão cru e refinado, soja e amendoim) misturados com óleo diesel como combustível em motores de ignição por compressão Peter Model AA1 diesel (1 cilindro, refrigerado a ar, 4 tempos com câmara de combustão Lanora, 219,6 cm^3, taxa de compressão de 17:1, 2,8 kW a 3600 rpm). As curvas de potência mostraram que os óleos vegetais variavam de 86% (óleo de soja refinado) a 97% (óleo de amendoim refinado) daquela potência obtida com diesel combustível. O óleo de girassol refinado mostrou decréscimo, no pico de potência, de apenas 7 % em relação ao diesel.

Devido às diferentes propriedades dos vários combustíveis, o consumo foi comparado nas bases de massa e volume. Em todos os casos, o consumo específico diminuiu, com o óleo de amendoim refinado mostrando a maior

melhora (27% e 19%, respectivamente) e o óleo de semente de algodão cru a menor melhora (13% e 4%, respectivamente). O óleo de girassol refinado mostrou melhora de 27% e 11% em base de volume e massa. A eficiência térmica mostrou similar tendência. Apesar de todos os óleos vegetais terem mostrado melhora na eficiência do combustível sobre o diesel, os resultados são, de alguma forma, questionáveis. As melhorias na eficiência térmica são muito mais altas do que as esperadas. Considerando que a potência foi menor em cada um dos óleos do que com diesel, somente uma melhora significante na eficiência de combustão poderia acarretar a melhora da eficiência térmica. A alta viscosidade dos óleos, provavelmente, fornece melhor penetração na célula de ar da câmara de combustão Lanora, causando uma mudança no processo de combustão. A alta viscosidade pode mudar também o avanço no tempo de injeção, devido ao menor fluxo na bomba de injeção.

Testes preliminares em dinamômetro com motores (Perkins 4236 e Ford 6600) de trator, usando, como combustível, éster etílico de óleo de girassol e óleo diesel, revelaram que os ésteres causaram menos depósito de carvão que o óleo diesel, reduziu, em muito, a fumaça de exaustão e elevou a eficiência térmica. A pressão no cilindro foi praticamente igual à produzida pelo óleo diesel e a agulha apresentou tendências de colagem após a paralisação e esfriamento do motor. Bruwer et al. (1980) suspeitam que isso se dá em conseqüência do catalisador usado na transesterificação.

Nasr (1983) cita que combustíveis híbridos, adequados para motores a diesel, foram desenvolvidos por Boruff et al. (1982) e incorporaram álcool etílico hidratado e outros produtos derivados de recursos agrícolas renováveis. Foram desenvolvidas duas formulações: a primeira, uma microemulsão iônica, composta de quantidades equimolares de ácidos graxos de soja e álcool amino; a segunda, uma microemulsão não detergente, formulada com o butanol-1. Ambos os sistemas (formulações) foram testados e comparados com o óleo diesel,

usando um motor de ciclo diesel com injeção direta. Determinou-se que a eficiência térmica a toda potência foi de 4% a 5% superior com o uso dos combustíveis híbridos.

Salvador (1984) utilizou quatro níveis de misturas (0,0%, 33,0%, 67,0% e 100%) de éster metílico de óleo de Joannesia Princeps, Vell. com óleo diesel, num motor de injeção direta de um trator Agrale 4100 HSE (motor M-90-T, monocilíndrico vertical, 4 tempos, 668 cm^3, razão de compressão 1:19 e rotação 2750 rpm). Concluiu que: níveis de misturas com até 100% de éster metílico no diesel não causaram queda de potência no motor, com exceção do nível de torque 100% da potência efetiva máxima; o consumo específico de combustível para os níveis de misturas com até 67% no diesel não dependeu do nível de torque, exceto no nível de torque de 21,25% em que houve um aumento gradual no consumo à medida que se aumentou a quantidade de éster na mistura; a eficiência térmica não foi afetada em cada nível de torque e, durante os testes, não se identificaram irregularidades no funcionamento do motor. Após os testes, a câmara de combustão e adjacências mostraram-se com uma fina camada de resíduos de carbono, o bico injetor mostrou-se desprovido de depósitos de carvão e sem aparência de corrosão.

2.8 Desempenho

Todos os testes de desempenho dos ésteres metílicos feitos por Parente (2005) mostraram um resultado bastante satisfatório, com eficiência de queima superior à dos óleos vegetais "in natura". Registraram-se menores formações de resíduos no motor e um desempenho mais homogêneo. O rendimento dos motores e o consumo de combustível foram praticamente idênticos para o óleo mineral e os ésteres.

Verificou-se, porém, a combustão incompleta, como no caso dos óleos "*in natura*", revelada pela formação de fumaça branca e também um efeito

acentuado de lavagem do óleo lubrificante das paredes do cilindro do motor, aumentando seu desgaste. Este efeito de lavagem reduz a vida útil do lubrificante e do motor. Espera-se que, com os desenvolvimentos futuros, novas tecnologias surjam com relação à produção de óleos lubrificantes estáveis aos óleos transesterificados ou que novas pesquisas de processamentos de óleos vegetais produzam combustíveis que não contaminem os lubrificantes, isso, preferencialmente, a custos razoáveis (Parente, 2005).

3 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado nas dependências do Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras, na cidade de Lavras, Minas Gerais, em julho de 2005. Os valores médios de temperatura e de pressão atmosférica correspondentes aos dias dos ensaios são mostrados no Apêndice 1.

3.1 Material

3.1.1 Combustíveis

O diesel utilizado nos ensaios foi obtido na rede de abastecimento automotiva local, com massa específica de 0,856 $kg.L^{-1}$ e poder calorífico inferior de 41737,00 $kJ.kg^{-1}$. O biodiesel utilizado é resultante da transesterificação de óleo de soja, apresentando massa específica de 0,896 $kg.L^{-1}$ e poder calorífico inferior de 32.063,80 $kJ.kg^{-1}$, sendo o mesmo proveniente da BIOVAR, Usina de Biodiesel em operação na cidade de Varginha, MG.

3.1.2 Trator

Para os ensaios, foi utilizado um trator VALMET 85 id, com motor ciclo diesel, modelo MWM - D225 - 4TVA, de 4 tempos, injeção direta, refrigerado a água, camisas úmidas removíveis, com 4 cilindros em linha, cilindrada total de 3.778 cm^3 e taxa de compressão 18:1, com potência nominal, segundo o fabricante, de 78 cv (58,2 kW), a 2.300 rpm. O trator utilizado é destinado a serviços gerais próprios para pequenas e médias propriedades agrícolas.

3.1.3 Dinamômetro

O dinamômetro utilizado para se obter os valores de torque e potência foi o modelo NEB 200, marca AW Dynamometer, no qual há a transformação da energia mecânica em calor por meio da utilização de um freio hidráulico, sendo o calor gerado nesse freio dissipado pela passagem de água de arrefecimento.

FIGURA 1 Display do dinamômetro

3.1.4 Medidor de consumo de combustível

Para a medida do consumo de diesel e das misturas de diesel com biodiesel, durante os ensaios do motor do trator, foi empregado um medidor volumétrico do tipo descrito por Gamero et al. (1986), constando de uma proveta graduada e duas válvulas solenóides que têm a função de controlar o circuito do combustível. O medidor volumétrico de combustível pode ser visto na foto da Figura 2.

FIGURA 2 Medidor volumétrico de combustível

3.2 Métodos

No trabalho em questão, não foram avaliadas as condições dos componentes mecânicos internos do motor. A alimentação do motor deu-se em etapas; em cada uma delas, foi usado o diesel mineral puro e misturas deste com biodiesel em várias proporções, assim descritas: diesel puro, B2, B5, B20 e B100, sendo as mesmas equivalentes, respectivamente, a 100% de diesel, 98% de diesel e 2% de biodiesel, 95% de diesel e 5% de biodiesel, 80% de diesel e 20% de biodiesel e 100% de biodiesel.

Para a realização dos ensaios do motor, foi adotada a metodologia estabelecida pela norma NBR5484 da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (1985), em vigor desde fevereiro de 1985, que fornece os parâmetros a serem seguidos na realização de ensaios dinamométricos de motores de ciclo Otto e de ciclo Diesel, com as seguintes definições: potência observada (kW), potência reduzida (kW), torque (m.N), consumo horário ($kg.h^{-1}$), etc.

3.2.1 Determinação do torque e da potência

Para a realização dos ensaios e a obtenção dos valores de potência, torque e rotação, o dinamômetro foi devidamente acoplado à TDP (Tomada de Potência) do trator. A Figura 3 mostra o dinamômetro acoplado à TDP do trator.

FIGURA 3 Dinamômetro acoplado a TDP do trator

A potência para as condições de Lavras e o torque do motor foram mensurados por meio da TDP do trator, em regime de plena carga, para as rotações de 700, 600, 540 e 470 rpm da TDP equivalentes às rotações no motor de 2230, 1911, 1720 e 1497 rpm. Foram feitas quatro repetições para cada rotação. O display do dinamômetro no qual foram feitas as leituras de rotação (rpm), de potência (kW) e torque (m.N), todas na TDP do trator, pode ser visto na Figura 4. Essas leituras foram anotadas em uma tabela de dados.

3.2.2 Determinação do poder calorífico

O poder calorífico superior foi determinado no Laboratório de Termodinâmica da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade

de São Paulo (USP), utilizando-se uma bomba calorimétrica IKA2000. Já os valores de poder calorífico inferior foram determinados segundo Moreira (2006).

3.2.3 Determinação da massa específica

A massa específica de cada combustível foi determinada no Laboratório de Mecanização do Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras, utilizando-se uma balança analítica Sartorius – BP 221S e procedimentos rotineiros.

.

3.2.4 Determinação do consumo energético

O volume de combustível consumido pelo motor em funcionamento foi obtido pela diferença de nível do combustível na proveta graduada, para um determinado intervalo de tempo de funcionamento do motor. A escala graduada da proveta foi dividida em milímetros e a correspondência volumétrica é de 1,25663 $ml.mm^{-1}$.

O volume de combustível consumido pode ser definido em litros, pela seguinte relação:

$Vc = h.0,001256$

em que:

- Vc = volume de combustível consumido (L)
- h = diferença de nível na proveta (mm)

O consumo de combustível foi obtido durante os ensaios dinamométricos, medindo-se o volume consumido em função do tempo de funcionamento do motor para dado regime. A partir da quantidade de combustível consumida e do tempo de cada ensaio, calculou-se o consumo em litros por hora. Já o consumo energético foi calculado em função da massa específica e do poder calorífico inferior de cada combustível ou misturas dos mesmos.

3.2.5 Determinação da viscosidade e de densidade

A determinação das viscosidades dinâmicas foi baseada na norma ASTM D 2983, utilizando-se um viscosímetro rotativo Brookfield. A temperatura de cada amostra analisada foi mantida a 40°C, por banho termostatizado. Ainda foi calculada a viscosidade cinemática, conforme norma ASTM D 445, fazendo-se a medida de densidade em temperatura diferente de 40°C.

Esses valores foram determinados no Laboratório de Termodinâmica da EESC-USP.

3.2.6 Determinação da eficiência térmica

A eficiência térmica foi determinada considerando-se a potência na TDP e o poder calorífico inferior do combustível para o cálculo da potência teórica, desconsiderando-se as perdas por atrito, conforme Mialhe (1996), Obert (1973) e Wylen & Sonntag (1993).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de poder calorífico superior e inferior dos combustíveis são demonstrados na Tabela 1.

TABELA 1 Valores de poder calorífico superior e inferior dos combustíveis utilizados. USP, São Carlos, SP, 2005/2006.

Amostra	Poder calorífico superior	Poder calorífico inferior
	$kJ.kg^{-1}$	$kJ.kg^{-1}$
B100 soja	36895	32063,80
B20 soja	43379	39777,56
B5 soja	44587	41216,14
B2 soja	44828	41503,26
Diesel	45031	41737,00

Os valores de viscosidade dinâmica, densidade e viscosidade cinemática dos combustíveis são demonstrados na Tabela 2.

TABELA 2 Valores de viscosidade dinâmica, densidade e viscosidade cinemática dos combustíveis utilizados. USP, São Carlos, SP, 2005/2006.

Amostra	Viscosidade dinâmica	Densidade	Viscosidade cinemática
	(cP)	$(kg.m^{-1})$	(c.St)
B100 soja	7,0°C a 40°C	0,8960 a 17,4°C	7,8
B20 soja	5,5°C a 40°C	0,8752 a 17,4°C	6,3
B5 soja	5,5°C a 40°C	0,8713 a 17,6°C	6,3
B2 soja	5,5°C a 40°C	0,8705 a 17,6°C	6,3
Diesel	5,4°C a 40°C	0,8700 a 17,1°C	6,2

Os resultados obtidos durante os ensaios dinamométricos podem ser observados na Tabela 3, destacando-se cada uma das condições de alimentação preestabelecidas para o motor. O ganho médio de 4% observado na eficiência térmica, utilizando 100% biodiesel, em relação ao diesel mineral, também foi verificado nos ensaios feitos por Goering et al. (1982) e por Vinyard et al. (1982), conforme já apresentado no item 3.7.

TABELA 3 Ensaio dinamométrico do trator com motor a plena carga para os diferentes combustíveis utilizados (com Potência Reduzida). UFLA, LAVRAS/MG, 2005/2006.

Rotação na TDP	Rotação equivalente no motor	Potência Reduzida na TDP	Torque	Consumo energético	Eficiência térmica
(rpm)	(rpm)	(kW)	(m.N)	($kJ.h^{-1}$)	(%)
		100% diesel			
700	2230	40,25	501,50	439839,54	32,93
600	1911	38,79	567,00	403186,25	34,63
540	1720	36,65	594,75	370745,97	35,57
470	1497	33,70	619,75	350596,73	34,59
		98% diesel e 2% biodiesel			
700	2230	39,70	497,25	438215,50	32,60
600	1911	37,75	540,75	401697,54	33,82
540	1720	36,12	565,50	369377,05	35,19
470	1497	32,82	582,00	349302,21	33,81
		95% diesel e 5% biodiesel			
700	2230	39,81	490,5	442548,77	32,37
600	1911	37,80	528,75	381806,78	35,63
540	1720	36,84	553,25	368790,64	35,95
470	1497	34,53	576,00	343429,97	36,18
		80% diesel e 20% biodiesel			
700	2230	39,76	502,25	411926,24	34,73
600	1911	38,77	526,75	376800,75	37,02
540	1720	36,78	548,00	360054,05	36,76
470	1497	32,79	568,00	307641,12	38,36
		100% biodiesel			
700	2230	38,60	502,75	376469,59	36,90
600	1911	37,78	528,50	343603,20	39,56
540	1720	35,68	551,75	324299,64	39,60
470	1497	32,08	560,50	300652,80	38,39

Para facilitar a visualização e a análise dos resultados, foram traçadas as curvas de potência, torque e consumo energético. Determinou-se, ainda, a eficiência térmica do motor, considerando, para isso, o motor trabalhando a

plena carga. Os valores apresentados representam a média de quatro repetições para cada tomada de tempo.

Como se observa na Figura 4, com o uso de óleo diesel, a curva de potência foi ligeiramente superior, sendo 1,31% maior que a curva de potência utilizando biodiesel. Nota-se que, com as mistura B5 e B20, a potência utilizando estas misturas chegou a superar a potência com diesel em rotações específicas.

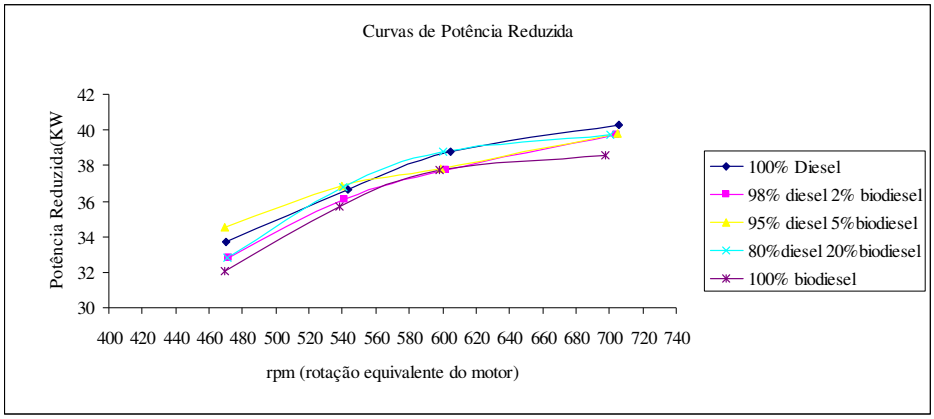

FIGURA 4. Curvas de potência do motor do trator a plena carga, para os combustíveis utilizados.

O gráfico da Figura 5 demonstra o comportamento do torque, destacando-se os maiores valores para o motor operando com diesel.

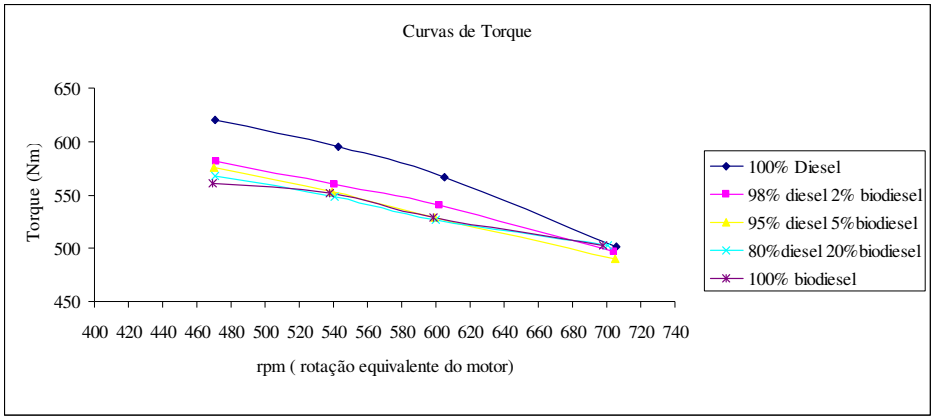

FIGURA 5 Curvas de torque do motor do trator a plena carga, para os combustíveis utilizados.

O consumo energético, como se observa na Figura 6, cresce à medida que aumenta a rotação do motor, pois, dessa forma, exige-se maior potência do motor. O uso do combustível 100% diesel e da mistura B2 não apresentou diferenças de consumo, pois a proporção da mistura de biodiesel ao diesel é muito pequena, isto é, apenas 2% de biodiesel e os 98% restantes de diesel mineral. À medida que se adiciona biodiesel ao diesel, a quantidade de combustível consumida vai diminuindo, isso acontece devido ao fato de o biodiesel apresentar características de menor poder calorífico que o diesel mineral puro. Ao utilizar o biodiesel puro, o motor apresentou menor consumo energético em relação às demais misturas de combustível e, também, em relação ao diesel mineral puro.

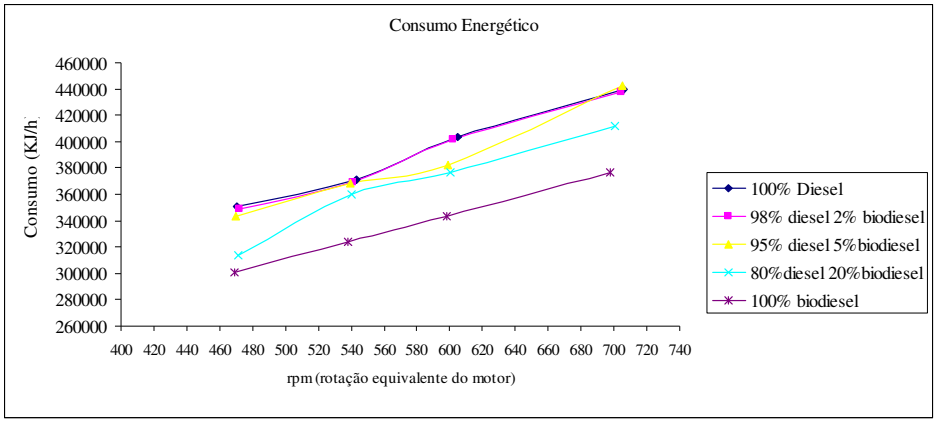

FIGURA 6 Curvas de consumo energético do motor do trator a plena carga, para os combustíveis utilizados.

De acordo com a Figura 7, a maior eficiência térmica obtida foi ao se usar biodiesel puro e a menor foi ao se utilizar a mistura B2. Esses resultados concordam com aqueles encontrados por Bruwer et al. (1980) quando usaram óleo de girassol; Goering et al. (1982), quando usaram óleo de soja e Vinyard et al. (1982) quando usaram óleos de algodão, soja, amendoim e girassol. Valores maiores de eficiência térmica também foram encontrados quando utilizaram-se misturas de álcool amino e óleo de soja (Boruff et al., 1982).

A melhor eficiência térmica foi obtida em torno da rotação do motor equivalente a 540 rpm da TDP, isto é, entre 500 e 600 rpm, para todas as misturas de combustíveis.

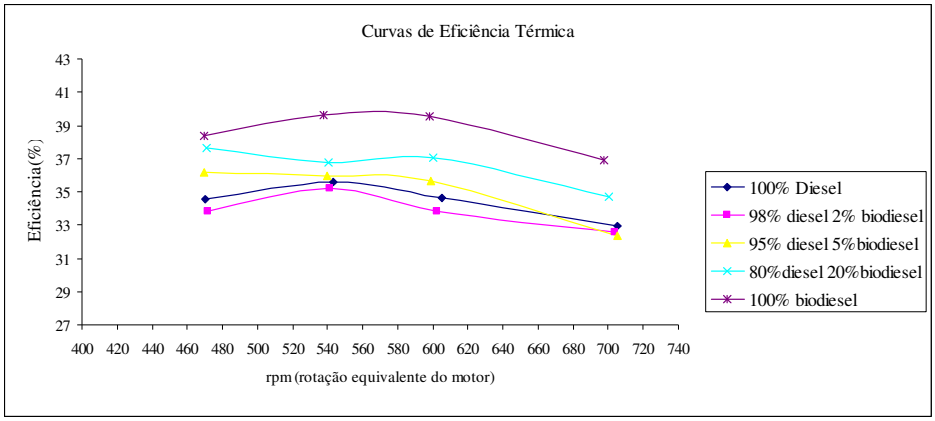

FIGURA 7: Curvas de eficiência térmica do motor do trator, para os combustíveis utilizados.

5 CONCLUSÕES

- A potência do motor com o uso de biodiesel em 100% ou, em misturas com diesel, foi pouco inferior à potência apresentada com diesel, chegando a uma redução média de 1,31%. Em alguns regimes de rotação, as misturas B5 e B20 apresentaram potência superior ou igual ao diesel.
- Os valores obtidos de torque, quando se utilizou diesel, foram, em média, 7% maiores do que quando se utilizou 100% biodiesel.
- A eficiência térmica do motor aumentou quando foram utilizadas misturas de biodiesel com diesel, tendo, em média, a maior eficiência sido observada nas rotações em torno de 540 rpm da TDP equivalente a 1720 rpm do motor, rotação esta a de trabalho indicada pelo fabricante do motor. Os valores de eficiência térmica ao se utilizar 100% de biodiesel foram, em média, 4% maiores do que quando se utilizou diesel mineral.
- O consumo energético obtido foi diminuindo seus valores nas misturas de combustíveis utilizadas, à medida que se aumentava a quantidade de biodiesel misturada ao diesel.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, Y. **Protocolo de Quioto e o Biodiesel**. CONPET – Programa Nacional da Racionalização do uso de derivados do petróleo. Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <http://www.conpet.gov.br/artigos>. Acesso em: 21 abr. 2006.

ANTOLÍN, G.; TINAUT, F. V.; BRICENÕ, Y. Optimisation of biodiesel production by sunflower oil transesterefication. **Bioresource Technology,** Oxford, v. 83, n. 2, p. 111-114, June 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Motores alternativos de combustão interna de ignição por compressão (diesel) ou ignição por centelha (Otto) de velocidade angular variável – ensaio:** NBR 5484. Rio de Janeiro, 1985.

ASTM D 445. **Method of Viscosity Determination – Method A – Kinematic Viscosity.** Disponível em: <http://webstore.ansi.org/ansidocstore>. Acesso em: 20 mar. 2006.

ASTM D 2983. **Standard Test Method for Low – Temperature Viscosity of Lubricants Measured by Brookfield Viscometer.** Disponível em: <http://webstore.ansi.org/ansidocstore>. Acesso em: 20 mar. 2006.

BARGER, E. L.; LILJEDAHL, J. B.; CARLETON, W. M.; McKIBBEN, E. G. **Tratores e seus motores**. Tradução de V. L. Schilling. São Paulo: Edgard Blucher, 1983. Título original: Tractors and Their Power Units.

BELO HORIZONTE. Secretaria Municipal Adjunta de Meio Ambiente. **Compreendendo a Agenda 21 de Belo Horizonte**. 3. ed. Belo Horizonte: PBH, 2005. 27 p. Cartilha.

BIODIESELBR. **Crédito de Carbono – MDL**. Disponível em: <http://www.biodieselbr.com>. Acesso em: 21 abr. 2006.

BORUFF, P. A.; SCHWAB, A. W.; GOERING, C. E.; PRYDE, E. H. Evaluation of diesel fuel-ethanol microemulsions. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, USA, v. 25, n. 1, p. 47-53, Jan. 1982.

BOULANGER, P. **Motores Diesel**. Tradução de Joshuah de Bragança Soares et al. São Paulo: Hemus, 1978. 661 p. Título original: Moteurs Diesel.

BRUWER, J. J.; BOSHOFF, B. V. D.; HUGO, F. J. C.; FULS, J.; HAWKINS, C.; WALT, A. N. Van der ENGELBRECHT, A.; PLESSIS, L. M. du. The utilization of sunflower seed oil – a renewable fuel for diesel engines. In: **Agricultural energy:** biomass energy crop production. St. Joseph: ASAE, 1980. v. 2, p. 385-390.

CAMPOS, E. **O Brasil e Kyoto**. Agência CT – Ministério da Ciência e Tecnologia. Disponível em: http://agenciact.mct.gov.br>. Acesso em: 24 ago. 2005.

CARVALHO, C. E. G.; OTZ, E. P. Catalização. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CATALIZAÇÃO, 12., São Paulo, 2003. **Anais...** São Paulo, 2003. p. 1-2.

D'ARCE, M. A. B. R. **Grãos e óleos vegetais:** matérias primas. Disponível em: http://www.esalq.usp.br>. Acesso em: 24 ago. 2005.

DMYTRYSHYN, S. L.; DALAI, A. K.; CHAUDHARI, S. T.; MISHRA, H. K.; REANEY, M. J. Synthesis and characterization of vegetable oil derived esters: evaluation for their diesel additive properties. **Bioresource Technology,** Oxford, v. 92, n. 1, p. 55-64, Mar. 2004.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Soja – dados econômicos**. 2005. Disponível em: <http://www.cnpso.embrapa.br>. Acesso em: 26 abr. 2006.

ESALQ – USP. ESALQ pesquisa biodiesel a partir de óleos vegetais. Disponível em: <http://www.esalq.usp.br>. Acesso em: 26 abr. 2006.

FONSECA, S. B. da. **A construção do futuro sustentável**. Agência CT – Ministério da Ciência e Tecnologia. Disponível em: http://agenciact.mct.gov.br. Acesso em: 24 ago. 2005.

GAMERO, C. A.; BENEZ, S. H.; FURLANI Jr., J. A. Consumo de combustível em diferentes tipos de mobilização do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 15., 1986, Botucatu. **Anais...** Botucatu: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1986. p. 1-9.

GOERING, C. E.; CAMPION, R. M.; SCHWAB, A. W.; PRYDE, E. H. Evaluation of soybean oli-aqueous ethanol microemulsions for diesel engines. In: VEGETABLE OIL FUELS – PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON PLANT AND VEGETABLE OILS AS FUELS, 1982, Michigan. **Proceedings...** Michigan: American Society of Agricultural Engineers, 1982.

GRANDO, F. A força do combustível verde. **Revista do CONFEA,** Brasília, v. 9, n. 22, p. 14-17, jun. 2005.

HASSETT, D. J.; HASAN, R. A. Sunflower oil methyl ester as diesel fuel. In: VEGETABLE OIL FUELS – PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON PLANT AND VEGETABLE OILS AS FUELS, 1982, Michigan. **Proceedings...** Michigan: American Society of Agricultural Engineers, 1982. p. 123-126.

KUSY, P. F. Transesterification of vegetables oils for fuels. In: VEGETABLE OIL FUELS – PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON PLANT AND VEGETABLE OILS AS FUELS, 1982, Michigan. **Proceedings...** Michigan: American Society of Agricultural Engineers, 1982. p. 127-137.

MARQUES, G. G. Biodiesel, bom para o campo e cidade. **Informativo da Rede Baiana de Biocombustíveis**, Salvador, n. 111, p. 1-2, abr. 2006.

MIALHE, L. G. **Máquinas agrícolas:** ensaios & certificação. Piracicaba, SP: Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, 1996. 722p.

MIALHE, L. G. **Máquinas motoras na agricultura**. São Paulo: EPU. Editora da Universidade de São Paulo, 1980. 2 v.

MIC - MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA E DO COMÉRCIO. Secretaria de Tecnologia Industrial. **Obtenção de combustível de óleo vegetal em nível de propriedade rural**. Brasília, 1985. 98 p. (I)

MIC - MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA E DO COMÉRCIO. Secretaria de Tecnologia Industrial. **Óleos vegetais – experiência de uso automotivo desenvolvida pelo programa OVEG I: relatório executivo da comissão técnica**. Brasília, 1985. 344 p. (II)

MOREIRA, A. **Combustíveis**. São Carlos: USP – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. 8 p. Apostila. Disponível em: http://www.netef.eesc.usp.br>. Acesso em: 01 fev. 2006.

NASR, M. Y. **Desempenho de um motor do ciclo diesel utilizando misturas etanol/diesel ou butanol-1/diesel como combustível.** 1983. 59 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

OBERT, E. F. **Internal combustion engines and air pollution.** 3. ed. New York: Intext Educational Publishers, 1973. 740 p.

OLIVEIRA, L. B.; COSTA, A. O. da. **Biodiesel:** uma experiência de desenvolvimento sustentável. IVIG/COPPE/UFRJ. Disponível em: <http://www. biodieselecooleo.com.br/biodiesel/estudos>. Acesso em: 25 set. 2005.

OSAVA, M. **Arrancam as locomotivas a biodiesel**. Disponível em: <http://www.tierramerica.net/2003/1222/pacentos.shtml>. Acesso em: 25 abr. 2006.

PARENTE, E. J. de S. **Biodiesel:** uma aventura tecnológica num país engraçado. Disponível em: http://www.tecbio.com.br>. Acesso em: 10 fev. 2005.

PROGRAMA NACIONAL DE PRODUÇÃO E USO DE BIODIESEL. **Selo combustível social e agricultura familiar.** Disponível em: http://www.biodiesel.gov.br/selo.htm>. Acesso em: 05 out. 2005.

QUEIRÓS, T. R. **Mega pesquisa:** ensino fundamental e médio. São Paulo: Editora Rideel, 2000.

QUINTINO, F. A Legislação no terceiro setor. Disponível em: <http://www.integracao.fgvsp.br/ano9/04/colunalegal.htm>. Acesso em: 21 abr. 2006.

REDE BRASILEIRA DE TECNOLOGIA DE BIODIESEL. **Perguntas frequentes**. Disponível em: <http://www.biodiesel.gov.br/rede arquivos>. Acesso em: 21 abr. 2006.

REDE BRASILEIRA DE TECNOLOGIA DE BIODIESEL. **Testes e ensaios**. Disponível em: <http://www.biodiesel.gov.br/rede arquivos/testes.htm>. Acesso em: 05 out. 2005.

REUNIÃO ANUAL DAS ASSEMBLÉIAS DE GOVERNADORES 2006 – BID – CII- 3-5 abril 2006, Belo Horizonte – MG. Disponível em: <http://www.planejamento.gov.br/bid>. Acesso em: 20 abr. 2006.

SÁ FILHO, H. L.; ROTENBERG, B.; ALBUQUERQUE, S. F.; MENDONÇA, M. C. G.; MEDEIROS, P. R. S. Diagnóstico da viabilidade técnica de utilização dos óleos vegetais brasileiros como combustível/lubrificantes. **Informativo do INP**, Rio de Janeiro, v. 12, n. 22, p. 29-40, 1979.

SALVADOR, N. **Desempenho de um motor de ciclo diesel utilizando o éster metílico do óleo de Joannesia Princeps, Vell., em substituição e em misturas com o óleo diesel**. 1984. 54 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SCHIOZER, D. **Mecânica dos fluidos.** Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 1996.

SILVA, F. M. da. **Motores e tratores agrícolas.** Lavras: UFLA/FAEPE 2003. 68 p. (Curso de Pós-graduação "Lato Sensu" (Especialização) à distância; Máquinas Agrícolas: Projetos, Aplicações e Regulagem).

SILVA, F. M da. **Sistema de alimentação de motores com duplo combustível – metano e diesel.** 1995. 121 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos.

TAYLOR, C.F. **Análise dos Motores de Combustão Interna**. Tradução de Mauro Ormeu Cardoso Amorelli. São Paulo: Edgard Blucher, 1971. 517p. Título original: The Internal-Combustion Engine in Theory and Practice.

TECBIO. **A crise.** Disponível em: <http://www.tecbio.com.br/A%20crise>. Acesso em: 31 jan. 2005.

VICENTE, G.; MARTINEZ, M.; ARACIL, J. Integrated biodiesel production: a comparison of different homogeneous catalysts systems. **Bioresource Technology,** Oxford, v. 92, n. 3, p. 297-305, May 2004.

VINYARD, S.; RENOLL, E. S.; GOODLING, J. S.; HAWKINS, L.; BUNT, R. C. Properties and performance testing with blends of biomass alcohols, vegetable oils and diesel fuel. In: VEGETABLE OIL FUELS – PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON PLANT

AND VEGETABLE OILS AS FUELS, 1982, Michigan. **Proceedings...** Michigan: American Society of Agricultural Engineers, 1982. p. 287-293.

WYLEN, G. J. V.; SONNTAG, R. E. **Fundamentos da termodinâmica clássica.** Tradução de Alberto Hernandez Neto et al. São Paulo: Edgard Blucher, 1993. 318 p. Título original: Fundamentals of Classical Thermodynamics.

APÊNDICE I

.

TEMPERATURA E PRESSÃO ATMOSFÉRICA

Data: 02/07/2005	Horário	09:00h.	15:00h.	
Temperatura	Bulbo seco (^oC)	18,0	25,6	Máxima: 27,3
	Bulbo úmido(^oC)	16,8	18,0	
Pressão atmosférica	mm Hg	697,8	695,7	

Data: 05/07/2005	Horário	09:00h.	15:00h.	
Temperatura	Bulbo seco (^oC)	16,8	26,6	Máxima: 26,6
	Bulbo úmido(^oC)	14,6	18,4	
Pressão atmosférica	mm Hg	696,5	694,5	

Data: 06/07/2005	Horário	09:00h.	15:00h.	
Temperatura	Bulbo seco (^oC)	17,6	24,4	Máxima: 26,6
	Bulbo úmido(^oC)	15,8	18,6	
Pressão atmosférica	mm Hg	698,1	697,0	

Livros Grátis

(http://www.livrosgratis.com.br)

Milhares de Livros para Download:

Baixar livros de Administração
Baixar livros de Agronomia
Baixar livros de Arquitetura
Baixar livros de Artes
Baixar livros de Astronomia
Baixar livros de Biologia Geral
Baixar livros de Ciência da Computação
Baixar livros de Ciência da Informação
Baixar livros de Ciência Política
Baixar livros de Ciências da Saúde
Baixar livros de Comunicação
Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE
Baixar livros de Defesa civil
Baixar livros de Direito
Baixar livros de Direitos humanos
Baixar livros de Economia
Baixar livros de Economia Doméstica
Baixar livros de Educação
Baixar livros de Educação - Trânsito
Baixar livros de Educação Física
Baixar livros de Engenharia Aeroespacial
Baixar livros de Farmácia
Baixar livros de Filosofia
Baixar livros de Física
Baixar livros de Geociências
Baixar livros de Geografia
Baixar livros de História
Baixar livros de Línguas

Baixar livros de Literatura
Baixar livros de Literatura de Cordel
Baixar livros de Literatura Infantil
Baixar livros de Matemática
Baixar livros de Medicina
Baixar livros de Medicina Veterinária
Baixar livros de Meio Ambiente
Baixar livros de Meteorologia
Baixar Monografias e TCC
Baixar livros Multidisciplinar
Baixar livros de Música
Baixar livros de Psicologia
Baixar livros de Química
Baixar livros de Saúde Coletiva
Baixar livros de Serviço Social
Baixar livros de Sociologia
Baixar livros de Teologia
Baixar livros de Trabalho
Baixar livros de Turismo