

ESTUDO DE DESEMPENHO DE COMBUSTÍVEIS CONVENCIONAIS ASSOCIADOS A BIODIESEL OBTIDO PELA TRANSESTERIFICAÇÃO DE ÓLEO USADO EM FRITURA

Ivan Darwiche Rabelo
Kazuo Hatakeyama
Carlos Marcus Gomes da Silva Cruz

1. INTRODUÇÃO

Desde a entrada da Mercedes Benz Caminhões no mercado brasileiro, em 1953, a política de transportes adotada foi a de priorizar rodovias, em detrimento de ferrovias ou hidrovias. Desde então, o consumo de diesel foi cada vez mais incrementado e hoje se encontra numa escala muito importante na economia do país. Em 1998, o óleo diesel correspondeu a 12,3% do consumo energético do Brasil (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 1999).

O Brasil tem um grande potencial para produzir biodiesel a partir de óleo vegetal por sua localização geográfica e vocação agrícola. Em cada parte do território nacional tem-se espécies de plantas ricas em óleo, adaptadas às suas condições de solo e de clima. Todas elas podem fornecer preciosa energia. Assim como o Proálcool, a produção de óleo vegetal virgem para uso em motores do ciclo diesel proporcionaria, a exemplo da Alemanha, uma redução da dependência do petróleo e ainda geraria empregos e divisas.

A energia é considerada questão estratégica de uma nação e a proporção de seu uso sempre esteve diretamente associada ao desenvolvimento dos povos. Ao longo da História, pode-se constatar que a disponibilidade e a acessibilidade que as pessoas tem à energia estão ligadas ao crescente conforto humano e à produção de bens.

Nesse sentido, GOLDEMBERG (1992) ressalta que os desafios para erradicar a pobreza e o subdesenvolvimento, em países com grande aumento de população, só poderão ser solucionados com a utilização de uma tecnologia avançada, a exemplo do que aconteceu, no passado, com os países hoje industrializados.

Assim, energia e tecnologia são dois fatores importantes para o desenvolvimento econômico. Graças a eles será possível sustentar uma população mundial estimada pela ONU em 8,9 bilhões de habitantes em 2075.

O atual colapso da falta de recursos hídricos no Brasil nos lembra da importância de políticas e estratégias voltadas para a questão energética. Na década de 70, com a crise do petróleo, a pesquisa de energias alternativas teve um rápido crescimento. Podem-se citar algumas, cujas matérias-primas são fontes renováveis ou alternativas que podem ser usadas direta ou indiretamente: álcool, óleo vegetal, carvão vegetal, usina termoeleétrica, usina hidroeleétrica, usina eólica, geotérmicas, maremotriz, usina solar, hidrogênio, células de combustíveis etc.

O uso do óleo vegetal em motores de combustão interna não constitui uma inovação recente. Rudolf Diesel (1858-1913), criador dos motores do ciclo diesel, utilizou óleo vegetal de amendoim para demonstrar seu invento em Paris-1900. Em 1912, Diesel disse: "O uso de óleos vegetais para combustível de máquinas pode parecer insignificante hoje. Porém, semelhantes óleos podem tornar-se ao decorrer do tempo tão importantes como o petróleo e o alcatrão mineral presentemente." Atualmente, sabe-se que o petróleo é uma fonte finita e que seu preço tende a aumentar exponencialmente conforme as reservas forem diminuindo.

Frente a este problema, a Alemanha desenvolveu o motor "Elsbett" para utilizar como combustível uma determinada gama de óleos com diferentes viscosidades. Há empresas que fazem a conversão de um motor convencional para um do tipo Elsbett. O valor dessa transformação depende do modelo mas ainda não é muito viável economicamente.

Para se utilizar óleo vegetal em um motor comum do ciclo diesel sem necessidade de transformações no motor, é preciso submeter este óleo degomado a uma reação química denominada de transesterificação ou alcoólise de triglicerídeos com o principal objetivo de baixar a viscosidade do óleo a valores próximos ao do diesel convencional. O éster assim obtido chama-se "biodiesel".

Embora o comportamento de um determinado combustível em motores de combustão interna seja muito semelhante, existem variações da qualidade da queima da mistura ar-combustível, não só devido às regulagens possíveis de um motor, mas pela sua própria geometria. Assim, WANG *et al.* (2000), ao realizarem ensaios com B35 (35% biodiesel e 65% de diesel) em dois motores diferentes, obtiveram algumas variações nos resultados, concluindo que novos testes em outros motores poderão trazer resultados satisfatórios.

Um motor do ciclo diesel com injeção indireta demonstra ter índices de emissões mais elevados. PURCELL *et al.* (1996) utilizaram um em seus ensaios com éster metílico de soja e constataram um acréscimo de 30% de N_xO_y comparado ao diesel convencional.

Da mesma maneira, pode-se obter biodiesel proveniente de óleo vegetal usado em fritura (COSTA NETO *et al.*, 2000). A reciclagem de um modo geral vem se mostrando nos tempos atuais cada vez mais necessária e vantajosa. Algumas empresas, no empenho de obter certificação ISO 9002 e principalmente a ISO 14000, por ser mais rigorosa na questão ambiental, precisam dar destinos adequados aos resíduos, ora por razões econômicas, ora por questões ambientais, na tentativa de reduzir o impacto ambiental causado pelo homem. No atual ritmo de degradação ambiental, é muito provável que as próximas gerações sejam privadas de diversas espécies animais e vegetais, hoje já ameaçadas de extinção por diversas razões. Há também outros problemas que aparentam ser de difícil solução, como o aquecimento médio global do planeta, os buracos na camada de ozônio etc.

Pensando no paradigma do desenvolvimento industrial sustentável e buscando como meta a eliminação de emissões líquidas, gasosas e sólidas, a Organização ZERI (*Zero Emissions Research Initiative*) vem apoiando projetos que visem ao aproveitamento de resíduos para utilização como matéria-prima em outro processo.

As grandes indústrias do ramo alimentício vendem o óleo usado para a produção de sabão, processo que pode ser conjugado com a obtenção do biodiesel, massa de vidraceiro, e impropriamente aproveitado para o fabrico de ração animal. Contudo, os animais que se alimentam dessas rações são impróprios para o consumo humano. Experiências com cobaias mostram que a ingestão destas gorduras oxidadas trazem como conseqüência um aumento de peroxidação dos cromossomos (Lima *apud* COSTA NETO *et al.*, 2000).

Entretanto, grande parte deste óleo vegetal usado não é coletado e acaba sendo descartado na rede de esgoto ou diretamente no solo. Segundo o Centro de Saúde Ambiental da Prefeitura Municipal de Curitiba, estima-se que somente nos restaurantes industriais da cidade de Curitiba e região metropolitana, são descartados por mês aproximadamente 100 toneladas desse resíduo no meio ambiente (COSTA NETO *et al.*, 2000).

É crescente nas cidades a quantidade de pessoas que passam a viver em função da coleta de material reciclável como papel, latas de alumínio, vidros, metais e plásticos. Este fato pode ser visto sob a ótica de CAPRA (1996), em seu livro *A teia da vida*, onde organismos, a exemplo de uma cidade, desenvolvem mecanismos de ajustes e de auto-organização. A cidade de Curitiba tem programas pioneiros na reciclagem de resíduos urbanos, e como a população está cada vez mais consciente da necessidade de reciclar e preservar o meio ambiente, nunca é demais

sonhar com um programa de coleta de óleo usado, a começar pelos condomínios e, depois, nas residências.

Um maior conhecimento das características físico-químicas dos óleos vegetais usados em fritura e também uma padronização da produção destes óleos podem viabilizar economicamente este programa de coleta ao nível residencial. Este aspecto econômico certamente deve ser visto de forma ampla, não só pelo valor do litro de biodiesel, mas pelos valores agregados como criação de empregos, redução de despejos destes resíduos no ambiente e melhoria de qualidade de vida e do ar e geração de divisas (SILVA, 1997). O óleo usado em frituras de alimentos (OUF) passaria então a fazer parte do ciclo descrito na Figura 1.

Segundo o governador do Estado de Nebraska - EUA, Benjamin Nelson, é fundamental o papel dos biocombustíveis em programas estaduais de regulamentação de energia e meio-ambiente. Os países que passaram pelas dificuldades do primeiro choque mundial do petróleo, na década de 1970, tiveram como conseqüência oportunidades para o desenvolvimento de combustíveis alternativos como o etanol, o biodiesel e o gás natural. É preciso encontrar soluções para os problemas nacionais, sejam eles de poluição do ar, falta de recursos de combustíveis fósseis, necessidade de diversificar a economia ou agregar valores aos recursos locais.

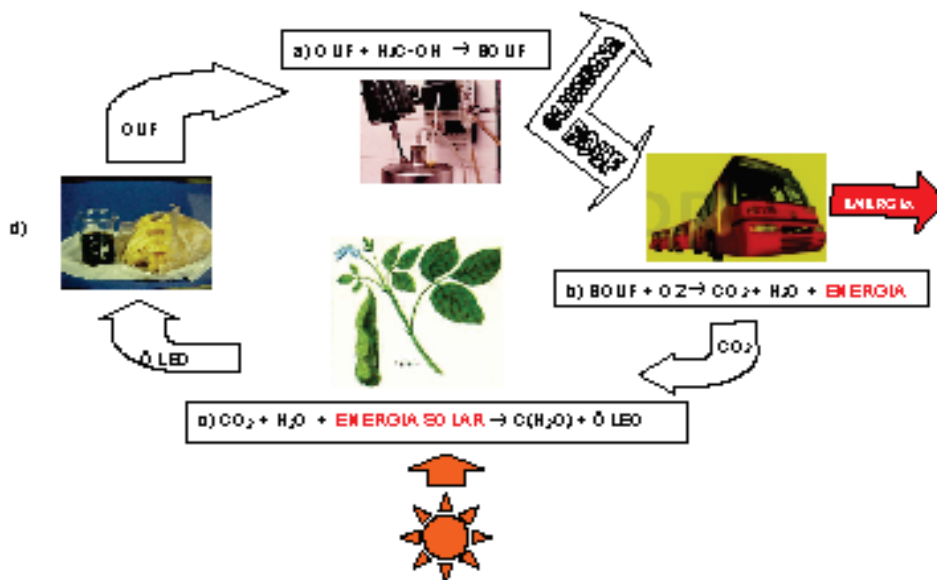


Figura 1 - Ciclo do Óleo Usado em Fritura

Notas:

(a) A reação de transesterificação com álcool metílico utiliza como matéria prima o OUF e dá como produto principal o BOUF e como subproduto a glicerina. O BOUF é então utilizado em motores de combustão interna.

(b) Na combustão, o motor consome oxigênio e libera dióxido de carbono, água e energia (E).

(c) As plantas oleaginosas utilizam o dióxido de carbono, água e energia solar (ES) para produzir carboidrato e óleo.

(d) O óleo é extraído e utilizado como meio de transferência de calor para alimentos diversos. Suas qualidades se perdem com o tempo de utilização e ao invés de ser descartado para o meio ambiente serve de matéria prima para a reação de transesterificação, fechando assim o ciclo.

Diante da necessidade de buscar alternativas energéticas para proporcionar o desenvolvimento sustentável e uma melhora da qualidade do ar, do solo e das águas nas regiões metropolitanas, resolveu-se pesquisar o biodiesel proveniente de óleo usado em frituras de alimentos. Este trabalho tem como objetivos:

- investigar a quantidade de catalisador e de álcool metílico, que resulte numa reação de transesterificação com um bom rendimento, a partir de óleo usado em frituras de alimentos (OUF);
- estudar a miscibilidade entre os combustíveis: biodiesel proveniente de óleo usado em fritura de alimentos (BOUF), diesel, álcool etílico hidratado (AEH) e álcool etílico anidro (AEA);
- obter a potência, o consumo específico e o rendimento do BOUF puro e suas misturas com diesel metropolitano (tipo D), AEH e AEA num motor do ciclo diesel sem adaptações na faixa de 1100 a 2400 rpm;
- comparar o atraso na ignição destes combustíveis com o atraso na ignição do diesel metropolitano.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Material: Para a obtenção do biodiesel utilizou-se óleo vegetal usado em fritura de alimentos (OUF) gentilmente cedido pela empresa Dalcin Santos Ltda do ramo de recuperação de óleos vegetais.

Produção do biodiesel: O biodiesel foi obtido através da reação de transesterificação. A reação ocorreu em um equipamento composto

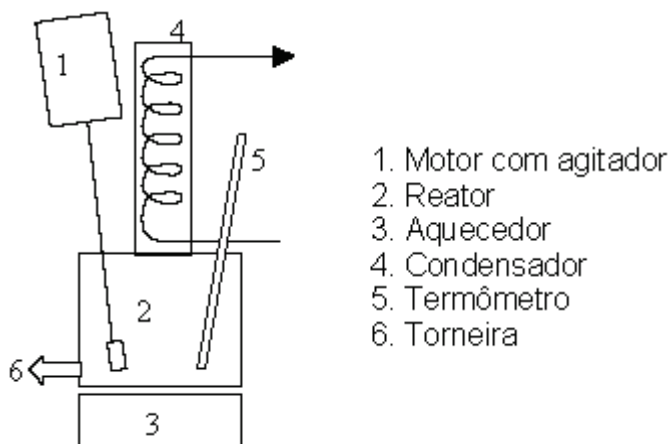
de um motor com agitador, um reator, um aquecedor, um termômetro, um condensador e uma torneira (Figura 2). Inicialmente foi obtido o metóxido de potássio, misturando-se 35% do volume de 2.500 ml de metanol (875 ml) com 1,5 g de KOH/100ml de OUF (27,5g) num bécher com agitador magnético aquecido à 40°C até a dissolução total do KOH. Colocou-se no reator de aço inox (capacidade de 3.000 ml) 2.500 ml de OUF e o metóxido de potássio obtido anteriormente (Figura 2 – n. 2). O reator foi aquecido durante 50 minutos por uma chapa de aquecedor elétrico com um potenciômetro que permitiu o ajuste da temperatura a 70°C (Figura 2 – n. 3). A temperatura no seu interior foi monitorada por um termômetro (Figura 2 – n. 5).

Ao mesmo tempo, os reagentes foram agitados por uma haste de ponta achatada por forjamento conectada a um eixo de um motor de ventilador (Figura 2 – n. 1). A velocidade de rotação do eixo do motor, medida por um tacômetro digital, foi igual a 1.600 rpm. As folgas do termômetro e do eixo do motor em relação ao reator foram preenchidas com buchas de *nylon* para não permitir as saídas dos vapores de álcool. Um fluxo contínuo de água passando pelo trocador de calor garantiu a condensação desses vapores (Figura 2 – n. 4). Logo após a finalização da reação de transesterificação, os produtos (glicerina e éster metílico) foram escoados do reator por uma torneira do equipamento representado na Figura 2 – n. 6. Separou-se o éster metílico (BOUF) da glicerina por decantação. Após o repouso de 12 horas, o sobrenadante (BOUF) foi escoado para outro bécher. O volume de BOUF foi medido. O BOUF produzido em cada batelada foi mantido numa estufa a temperatura de 60°C por 3 dias. Após este período, os BOUF adquiriram um aspecto translúcido. As cinco bateladas foram misturadas e armazenadas à temperatura ambiente, numa bombona de plástico.

Obtenção de bicombustíveis: Efetuou-se ensaios simplificados de miscibilidade para se obter combustíveis uniformes e estáveis com as misturas BOUF e D (diesel metropolitano) e BOUF e AEH-álcool etílico hidratado e BOUF e AEA- álcool etílico anidro. Uma pera e uma pipeta foram utilizadas para dosar os combustíveis depositados em tubos de ensaios. Agitou-se as misturas energicamente que posteriormente ficaram em repouso por 40 dias com registro de temperaturas máximas e mínimas. Para as diversas misturas, observou-se o aspecto opaco ou translúcido e a formação ou não de fases distintas.

Desempenho dos bicombustíveis: Os ensaios foram realizados com os combustíveis: OUF, BOUF, D, BOUF20D80, BOUF50D50, BOUF90AEH10, BUOF80AEH20 e BUOF80AEA20 na bancada

dinamométrica montada pela Didacta-Itália localizada no LACIT (Laboratório de Ciências Térmicas) do CEFET/PR (Figura 3). O elemento mais importante da bancada é o dinamômetro que fornece informações para o traçado das curvas de potência e torque em função da rotação (Figura 3 - n. 3). O motor diesel utilizado foi fabricado pela Lombardini e possui 1 cilindro, 4 tempos, injeção direta, curso do pistão de 68cm, diâmetro do pistão de 78cm, 325 cm³ de cilindrada, taxa de compressão de 18:1, 2 válvulas por cilindro e arrefecimento a ar (Figura 3 - n. 2). O acelerador foi mantido a 50% da capacidade, com rotação máxima de 2.600 rpm e a rotação de marcha lenta de 1.100 rpm.



1. Motor com agitador
2. Reator
3. Aquecedor
4. Condensador
5. Termômetro
6. Torneira



Motor, eixo agitador e termômetro



Condensador



Reator com torneira



Aquecedor

Figura 2 - Equipamento Usado para a Reação de Transesterificação

Revista EDUCAÇÃO & TECNOLOGIA

Periódico Técnico Científico dos Programas de Pós-Graduação em Tecnologia dos CEFETs-PR/MG/RJ

Para os ensaios efetuados, foram medidos os seguintes dados: torque, rotação, pressão atmosférica local, temperatura local, umidade relativa do ar, volume consumido de combustível, tempo de consumo deste combustível, consumo de ar pelo motor (Figura 3 - n. 6 e 8) e temperatura de escape (Figura 3 - n. 9).

Uma planilha do *Microsoft Excel* foi preparada para receber estes dados e calcular o consumo específico de combustível, a potência corrigida para a atmosfera padrão e o rendimento térmico para cada rotação. Os valores da temperatura ambiente, pressão atmosférica e umidade local foram colhidos por instrumentos e utilizados para determinar uma potência corrigida para a atmosfera-padrão (pressão de 760 mm Hg e temperatura de 15°C), conforme normas de ensaio. Este procedimento permite comparar potências obtidas em locais com condições ambientais diferentes. O consumo de combustível no motor foi medido através da variação do volume de combustível consumido e do intervalo de tempo correspondente. O volume foi medido pelo tubo graduado de capacidade 10 cm³ representado na Figura 3- n. 7. A partir dos valores lidos nos instrumentos do dinamômetro, pode-se calcular através de expressões a potência com a devida correção para a atmosfera padrão, o consumo específico de combustível também corrigido, a vazão consumida de ar e de combustível, o coeficiente Lambda de excesso de ar e o rendimento térmico (TAYLOR, 1971; DIDACTA ITALIA, 1979).

O rendimento térmico ou a eficiência global vem a ser a relação entre a energia útil fornecida no eixo pelo motor e a energia disponível no combustível (Eq. 1).

$$\eta = \frac{\tau}{m_c \cdot PCI} \quad (\text{Eq. 1})$$

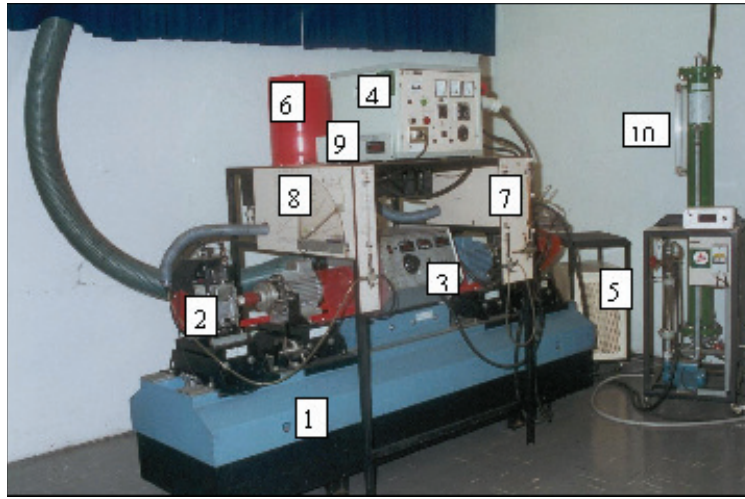
Onde: τ = Trabalho útil [kcal]

m_c = massa de combustível [kg]

PCI = Poder calorífico Inferior [kcal/kg]

Revista EDUCAÇÃO & TECNOLOGIA

Periódico Técnico Científico dos Programas de Pós-Graduação em Tecnologia dos CEFETs-PR/MG/RJ



1. Unidade de Controle
2. Unidade de Suporte
3. Acoplamento magnético
4. Quadro Elétrico da Unidade de Controle
5. Unidade de Dissipação
6. Unidade Auxiliar de resfriamento
7. Dinamômetro Elétrico
8. Motor Ensaiado
9. Unidade de Medição de Consumo de Combustível
10. Micromanômetro
11. Tanque de Admissão de Ar

Figura 3 – Bancada de Ensaio Dinamométrico

Obtenção do atraso de ignição: Utilizou-se um transdutor de pressão do tipo piezoelétrico instalado na câmara de combustão. Tal sensor possui uma escala máxima de 300 bar, sensibilidade de 45 pc/bar, resolução de 0,0006 bar e conexões para entrada e saída de água para o arrefecimento. A rotação fixada para se comparar os combustíveis foi de 2.000 rpm e a posição do acelerador foi a mesma para todo o levantamento de dados, 50% da capacidade.

3. RESULTADOS

Produção do biodiesel: A produção de BOUF através da reação de transesterificação foi realizada em cinco bateladas de 2.500 ml de OUF. O volume médio obtido do produto BOUF foi de 2.450 ml, alcançando

98% de rendimento. As análises por ressonância magnética nuclear de prótons mostraram que a conversão do OUF para BOUF ocorreu de forma bastante eficiente. A viscosidade dinâmica do OUF reduziu de 63,3 mPa.s para 7,38 mPa.s após a reação de transesterificação.

Obtenção de bicombustíveis: As misturas de BOUF/D ficaram estáveis e uniformes nas quantidades v/v: 10/90, 20/80, 30/70, 40/60 e 50/50. As misturas de BOUF/AEH ficaram estáveis e uniformes nas quantidades v/v: 10/90, 20/80, 30/70, 40/60 e 50/50, o mesmo ocorrendo com as misturas de BOUF/AEA nas quantidades v/v: 10/90, 20/80, 30/70. Não houve separação de camadas e o aspecto permaneceu translúcido por 40 dias a temperatura ambiente entre 13 e 26 °C. Os bicombustíveis escolhidos para os ensaios no dinamômetro foram: BOUF20D80, BOUF50D50, BOUF90AEH10, BOUF80AEH20 e BOUF80AEA20.

Desempenho dos bicombustíveis: potência, consumo específico e rendimento. O motor desenvolveu mais potência com os combustíveis BOUF20D80, BOUF50D50 e BOUF do que com o diesel metropolitano para rotações abaixo de 2200 rpm (Gráfico 1). O maior valor da potência do combustível BOUF50D50 foi 4,37cv e o maior valor para o D foi de 4,04cv. O BOUF50D50 foi 7,6% mais potente que o D. Os combustíveis BOUF20D80 e BOUF possibilitaram ao motor desempenhar 2,7% e 3,2% mais potência do que o D, respectivamente.

O combustível BOUF90AEH10 permitiu ao motor desenvolver um pouco mais de potência do que o D para rotações inferiores a 2000 rpm. Para valores acima desta rotação, não houve diferença considerável entre o BOUF90AEH10 e o D. Entretanto, a mistura BOUF90AEH20 e BOUF80AEA20 possibilitou ao motor realizar menos potência do que o diesel para rotações acima de 1700 rpm e 1900 rpm, respectivamente (Gráfico 1).

Na rotação de 2000 rpm, não ocorreu diferença no consumo específico dos combustíveis BOUF, D, BOUF mais D e BOUF mais álcool. Para as rotações inferiores a 2000 rpm, o consumo específico dos combustíveis BOUF, BOUF20D80 e BOUF50D50 foi um pouco mais elevado do que o diesel metropolitano. Entretanto, para rotações superiores a 2000 rpm o consumo específico do diesel passa a ser mais elevado que o BOUF20D80 e BOUF50D50 (Gráfico 2).

Esse quadro inverte quando comparamos o consumo específico entre o D e as misturas de BOUF mais AEH ou AEA. O consumo específico do BOUF90AEH10, BOUF80AEH20 e BOUF80AEA10 foi menor que o diesel metropolitano para rotações inferiores a 2000 rpm. No entanto, essas misturas obtiveram valores do consumo específico maiores do que

o D para rotações superiores a 2000 rpm (Gráfico 2).

O melhor rendimento para os combustíveis D, BOUF, BOUF20D80 e BOUF50D50 ocorreu entre 2000 e 2400 rpm, sendo o valor máximo de aproximadamente 26,7% para o D e 29% para a mistura BOUF50D50 (Gráfico 3). Portanto, a maior diferença de potência foi de 8% entre o BOUF50D50 e o D. Neste intervalo de rotações, o BOUF, BOUF20D80 e BOUF50D50 foram mais eficientes do que o D e o BOUF50D50 apresentou maior rendimento em relação ao BOUF e ao BOUF20D80. No entanto, não houve diferença de eficiência entre os combustíveis BOUF e BOUF20D80 para a mesma faixa de rotação. Para rotações inferiores a 2000 rpm, não ocorreu diferença considerável de rendimento para os combustíveis D, BOUF, BOUF20D80 e BOUF50D50 (Gráfico 3).

Diferentemente dos combustíveis BOUF, BOUF20D80 e

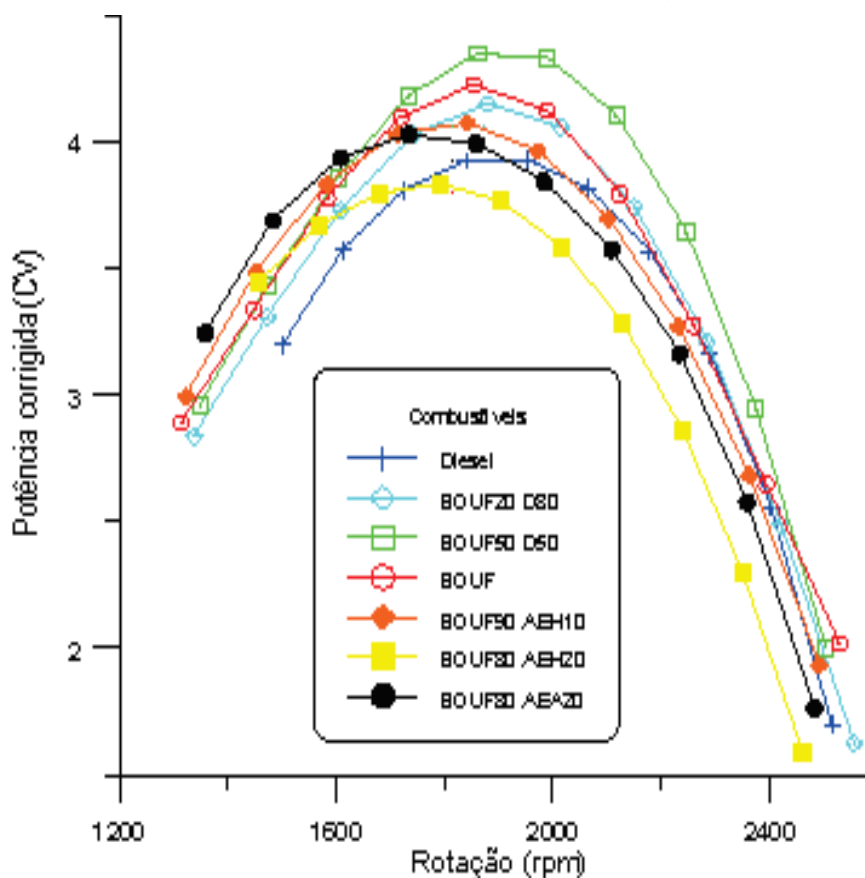


Gráfico 1 - Potência Corrigida em Função da Rotação para Misturas de Biodiesel e Diesel

BOUF50D50, a faixa de maior eficiência dos combustíveis BOUF90AEH10, BOUF80AEH20 e BOUF80AEA20 foi entre 1800 e 2200 rpm com pico máximo de aproximadamente 30,5% para o BOUF80AEA20. O BOUF80AEA20 foi 12,5% mais eficiente que o D. Para rotações inferiores a 2200 rpm o BOUF90AEH10, BOUF80AEH20 e BOUF80AEA20 foram mais eficientes que o BOUF e o D (Gráfico 3). Pode-se observar no Gráfico 3 que o BOUF80AEH20 apresenta maior rendimento que o BOUF90AEH10 até aproximadamente 2050 rpm e que, para rotações mais elevadas (até 2400 rpm), o BOUF90AEH10 mostra-se ligeiramente mais eficiente. O mesmo ocorre entre as misturas BOUF80AEH20 e BOUF80AEA20, ou seja, o BOUF80AEH20 é mais eficiente que o BOUF80AEA20 até aproximadamente 1900 rpm, passando este último a possuir maior rendimento. As misturas BOUF90AEH10, BOUF80AEH20 e BOUF80AEA20 apresentaram maior eficiência que o diesel metropolitano para a maioria das rotações.

Obtenção do atraso da ignição: Foi possível verificar que, para todas as misturas de combustíveis ensaiados, o atraso na ignição foi ligeiramente inferior ao combustível de referência, o diesel tipo D.

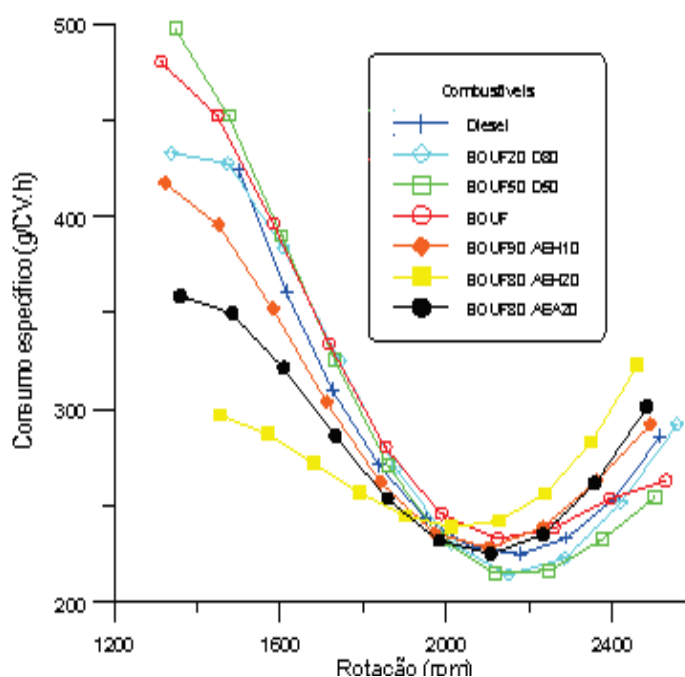


Gráfico 2 - Consumo Específico em Função da Rotação para Mistura de Biodiesel e Diesel

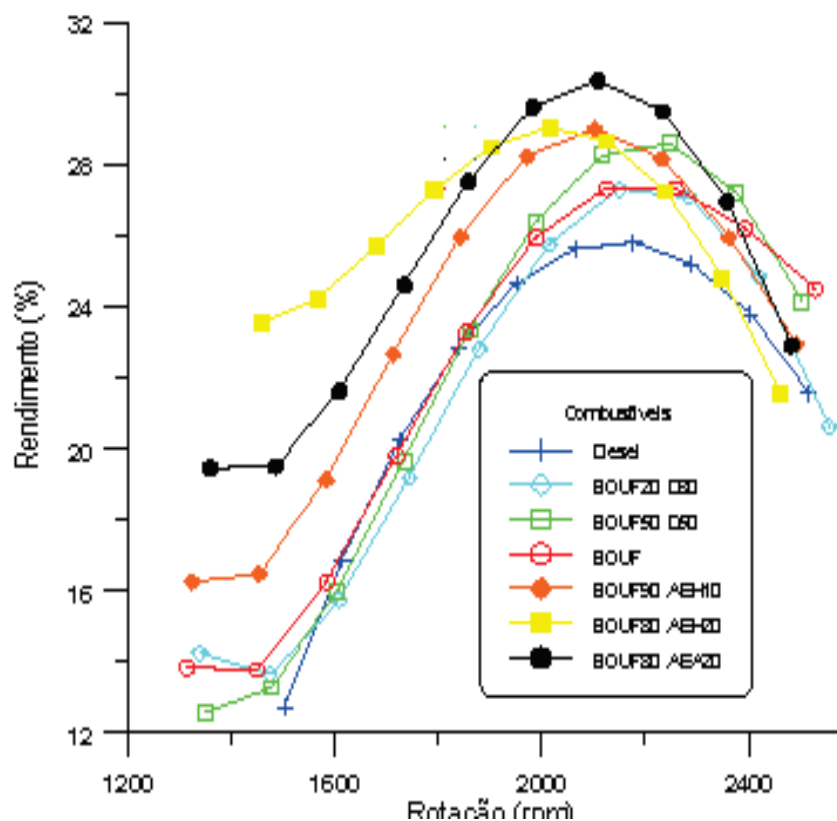


Gráfico 3 – Rendimento Térmico em Função da Rotação para Mistura de Biodiesel e Diesel e Biodiesel e Álcool Etilico Hidratado

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Apesar do grande número de variáveis que afetam o processo de obtenção do biodiesel, demonstrou-se com esse estudo que é possível realizar a reação de transesterificação do óleo usado em frituras de alimentos sem equipamentos de controle e monitoramento mais sofisticados. Essas constatações enriquecem a possibilidade do aproveitamento de óleo usado ou mesmo óleo virgem como uma fonte de energia renovável e que pode ser produzida por pequenas comunidades locais, promovendo um desenvolvimento autosustentável, social e econômico.

A reação de transesterificação abaixou a viscosidade dinâmica do OUF a valores muito próximo ao do diesel. Assim, o BOUF obtido pode ser usado em motores do ciclo diesel, como ocorreu com MITTELBAACH & FRANZENS (1996), MASJUKI *et al.* (1993), SIL *et al.* (1995) e ÖZAKTAS (2000), sem adaptações no motor.

Obteve-se para o BOUF e para as misturas BOUF50D50 e BOUF20D80, em relação ao D, um aumento de torque e potência desenvolvida pelo motor para rotações inferiores a 2.000 rpm. O BOUF e BOUF associado ao D possuem menor poder calorífico que o D. No entanto, permitiram ao motor desenvolver mais potência. Provavelmente pode-se explicar o fato pelo pequeno aumento do consumo destes combustíveis em cada ciclo do motor para rotações menores que 2.000 rpm. Todavia, a mistura BOUF50D50 desenvolveu maior potência e torque entre as rotações 2.000 e 2.400 rpm com menor consumo de combustível em relação ao diesel. O BOUF20D80 desempenhou praticamente a mesma potência e torque que o D para a faixa de 2000 a 2400 rpm, apresentando menor consumo específico que o diesel metropolitano.

Embora o ensaio de PETERSON *et al.* (1995) tenha sido realizado com éster etílico de óleo de soja hidrogenado, seus resultados foram contrários aos obtidos, pois obtiveram redução da potência e do torque em 5% quando comparado ao diesel D2. Esta divergência de resultados, no entanto, não se repete para o consumo específico dos combustíveis.

PETERSON *et al.* (1995) notaram um acréscimo de 7% no consumo específico com o biodiesel em comparação ao D2, enquanto que o BOUF deste trabalho apresentou um acréscimo de 5% no consumo específico para rotações entre 2.000 e 2.400 rpm. O BOUF50D50, embora tenha fornecido a maior potência, apresentou um consumo específico praticamente igual ao diesel para rotações entre 2.000 a 2.400 rpm. BRASIL-MDIC (1985, p.94) verificou ser mais elevado o consumo específico do B11 (11% de biodiesel e 89% de diesel) em comparação ao diesel.

Já KORUS & JAIDUK (1985), que compararam três tipos de biodiesel misturados a 50% com o diesel D2, biodiesel de canola de inverno, biodiesel de girassol com 74% de ácido oleico e biodiesel de girassol com 84% de ácido linoleico, não detectaram uma diferença significativa na potência desenvolvida. Para eles, o consumo específico de combustível foi de até 8% a mais para os combustíveis alternativos.

AJAV *et al.* (1999) obtiveram um acréscimo de 9% de consumo específico do combustível com 20% de álcool etílico hidratado para rotações mais elevadas. Todavia, quando o motor funcionou em rotações mais baixas ocorreu uma redução do consumo específico tendo como referência o diesel mineral. Esse mesmo quadro repete-se com o BOUF80AEH20, onde ocorreu um acréscimo de no máximo 7,8% no consumo específico para rotações mais elevadas e uma diminuição crescente do consumo específico para rotações mais baixas em relação ao diesel metropolitano.

Para rotações acima de 2.000 rpm, as misturas de BOUF e AEH desenvolveram menor potência do que o diesel metropolitano. Este fato pode ser provavelmente explicado pelo menor poder calorífico do BOUF e principalmente do AEH em relação ao diesel. O acréscimo de água no álcool etílico hidratado diminui seu poder calorífico e sua adição num combustível reduz a sua potência. Isto pode ser constatado nas curvas de potência do BOUF90AEH10 e BOUF80AEH20, que se apresentam decrescentes com o aumento do volume de AEH no combustível BOUF. A água presente nas misturas contendo AEH absorve a energia produzida na reação de combustão, aumentando a parcela de energia perdida pelos gases de escape em forma de calor.

O motor conseguiu utilizar com mais eficiência a energia contida nos combustíveis BOUF, BOUF20D80 e BOUF50D50 do que no diesel metropolitano para rotações superiores a 2.000 rpm. Nas rotações inferiores a 2.000 rpm não houve diferença de rendimento entre o D, o BOUF, o BOUF20D80 e o BOUF50D50, apesar do diesel possuir um poder calorífico maior que o BOUF. O aumento de BOUF na mistura com diesel diminui o poder calorífico do bicomcombustível em relação ao diesel.

As curvas de rendimento dos combustíveis BOUF90AEH10 e BOUF80AEH20 distanciaram-se consideravelmente uma da outra de forma crescente (Gráfico 3) para rotações inferiores a 2.000 rpm. A quantidade de álcool etílico hidratado destes combustíveis foi de 10% e 20% do volume total da mistura, aumentando assim a quantidade de oxigênio contida na mesma. O aumento de oxigênio proporcionou a eficácia da reação de combustão, elevando o rendimento da mistura BOUF80AEH20 para rotações abaixo de 2000 rpm.

As misturas BOUF80AEH20 e BOUF80AEA20 foram mais eficientes que o D, principalmente para rotações inferiores a 2.000 rpm. Nas rotações mais baixas, o ciclo do motor é mais lento, proporcionado mais tempo para efetivar a reação de combustão destas misturas, que possuem mais oxigênio que o diesel. A reação de combustão mais completa propiciou uma melhor curva de rendimento do combustível BOUF80AEH20. Para rotações mais elevadas, o ciclo do motor é mais rápido e conseqüentemente ocorre a redução do tempo para a reação de combustão das misturas de BOUF e AEH ou AEA. Mesmo assim, o BOUF80AEH20 e BOUF80AEA20 foram mais eficientes entre as rotações 2.000 a 2.400 rpm em relação ao diesel, provavelmente por causa da maior quantidade de oxigênio presente no álcool.

Nas rotações inferiores a 1800 rpm, o BOUF80AEH20 foi mais eficiente que o BOUF80AEA20, apesar da mistura do biodiesel com álcool

hidratado ter mais água do que a mistura do biodiesel com álcool anidro e conseqüentemente possuir um menor poder calorífico. Este fato pode ser provavelmente explicado através do coeficiente de excesso de ar, pois a quantidade de ar que entrou para a combustão foi significativamente maior para o BOUF80AEH20, contribuindo assim para uma combustão mais completa.

Embora a precisão do equipamento utilizado não tenha permitido uma quantificação muito precisa, foi possível verificar que, para todas as misturas de combustíveis ensaiadas, o atraso na ignição foi ligeiramente inferior ao combustível de referência, o diesel tipo D. Este atraso menor é reflexo de um número de cetano superior.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho permitiu converter o óleo usado em fritura de alimentos em biodiesel (BOUF) com um rendimento de 98%, adquirindo viscosidade de 7,38 mPa.s. O biodiesel obtido mostrou-se miscível ao diesel em todas as proporções analisadas. Quando misturado em até 50% com álcool etílico hidratado, manteve um aspecto translúcido sem apresentar fases distintas no período de 40 dias, no qual a temperatura ambiente oscilou entre 13°C e 26°C.

O combustível BOUF apresentou maior potência, maior torque e praticamente o mesmo consumo específico que o diesel metropolitano para rotações inferiores a 2.200 rpm. O BOUF foi mais eficaz que o D para rotações acima de 1.900 rpm.

A mistura BOUF50D50 mostrou maior potência e torque em relação ao D, BOUF e BOUF20D80 para a faixa de rotação entre 1.600 a 2.200 rpm. O consumo específico foi praticamente o mesmo para rotações inferiores a 2.000 rpm e menor para rotações superiores a 2.000 rpm em relação ao diesel metropolitano. O BOUF50D50 foi mais eficaz que o BOUF e o D para rotações acima de 1.900 rpm.

A mistura BOUF90AEH10 apresentou maior potência e maior torque para rotações acima de 1.400 rpm, maior consumo específico para rotações inferiores a 1.800 rpm e menor consumo específico para rotações superiores a 2.000 rpm em relação ao BOUF80AEH20.

Os combustíveis BOUF, BOUF50D50, BOUF20D80 e BOUF90AEH10 podem ser usados em motor do ciclo diesel, do tipo usado neste trabalho, sem alteração adicional, já que os referidos combustíveis experimentais ensaiados proporcionaram bom rendimento associado a um menor atraso na ignição.

Finalmente, apontam-se duas observações no mínimo curiosas e que devem ser fruto de trabalhos posteriores. A primeira diz respeito ao fato da mistura BOUF50D50 apresentar melhor desempenho do que o BOUF. Sabidamente, a adição de esteres ao diesel causa aumento de torque e potência, na maioria dos trabalhos observados. A segunda refere-se à queda absoluta de torque e potência, que se verifica quando se adiciona etanol ao BOUF. No caso do combustível ensaiado BOUF90AEH10, foi possível observar maior potência, relativamente ao diesel, para rotações abaixo de 2.000 rpm.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AJAV, E. A; SINGH, B.; BHATTACHARYA, T. K. Experimental study of some performance parameters of a constant speed stationary diesel engine using ethanol- diesel blends as fuel. **Biomass & Bioenergy**. Nigéria: Univ of Ibadan, v.17, n. 4, p. 357-365, 1999.
- BRASIL-MDIC Ministério do Desenvolvimento Indústria e Comércio Exterior. Secretaria de Tecnologia Industrial. **Obtenção de Combustível de Óleo Vegetal a Nível de Propriedade Rural**. Brasília: STI/CIT, 1985, 98 p.
- CAPRA, F. **A teia da vida: uma nova compreensão dos sistemas vivos**. Trad. Newton Roberval Eichenberg. São Paulo: Cultrix,. 256p, 1996.
- COSTA NETO, P. R. et al. Utilization of used frying oil for the production of biodiesel. **Química Nova** v.23, n.4, p.531-537, Jul/Ago, 2000.
- DIDACTA ITALIA. **Internal combustion engines test bed t-85d**. Torino, 157p, 1979
- GOLDEMBERG, J. Energy, Technology, DEVELOPMENT - AMBIO. v.21, n. 1, p.14-17, Feb. 1992.
- KORUS, R. A.; JAIDUK, J. O. A rapid engine test to measure injector fouling in diesel engines using vegetable oil fuels. **Journal of the American Oil Chemists' Society**. v. 62, n. 11, p. 1563-1564, Nov. 1985.
- MASJUKI, A.; ZAKI, A. M.; SAPUAN, S. M. A rapid test to measure performance, emission and wear of a diesel engine fueled with palm oil diesel. **Journal of the American Oil Chemists Society**. Local, v. 70, n. 10, p.1021-1025, Out. 1993.
- MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. **Balanco Energético Nacional**. Brasília: MME, 1999.
- MITTELBACH, M; FRANZENS, K. Diesel fuel derived from vegetable oils, VI: specifications and quality control of biodiesel. **Bioresource Technology**. Univ.

- Graz, Graz, Austria, v. 56, n. 1, p. 7-11, Apr. 1996.
- ÖZAKTAS, T. Compression ignition engine fuel properties of a used sunflower oil-diesel fuel blend. **Energy Sources**. Istanbul Technical Univ. Maslak-Istanbul, Turquia, v.22, n. 4, p. 377-382. 2000.
- PETERSON, C. *et al.* 1995 Making and testing a biodiesel fuel made from ethanol and waste french-fry oil. Site oficial da **National Biodiesel Board**. Jul. Disponível em: <http://www.biodiesel.org/default2.htm> Acesso em: 9 de abr. de 2001.
- PURCELL, D. L. *et al.* Transient testing of soy methyl ester fuels in an indirect injection, compression ignition engine. **Journal of the American Oil Chemists' Society**. Minnesota, v. 73, n. 3, p. 381-388. 1996.
- SIL, H. S.; MASJUKI, H.; ZAKI, A. M. Dynamometer evaluation and engine wear characteristics of palm oil diesel emulsions. **Journal of the American Oil Chemists' Society**. v. 72, n. 8, p. 905-909. 1995.
- SILVA, O. C. **Análise do aproveitamento econômico energético do óleo de palma na Guiné - Bissau na perspectiva do desenvolvimento sustentável**. São Paulo, Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade de São Paulo, 1997.
- TAYLOR, C.F. **Análise dos motores de combustão interna**. São Paulo: Edgard Bluecher, 1971.
- WANG, W. G. *et al.* Emissions from nine heavy trucks fueled by diesel and biodiesel blend without engine modification. **Environmental Science and Technology**. West Virginia Univ., Morgantown, WV, USA, v.34, n.6, p. 933-939, 2000.