

# Influência de ésteres de cadeia curta sobre o desempenho de um motor ciclo *diesel* operado com (bio)combustíveis

Ricardo Polisaitis Oliveira, Daniela Lotaif, Enzo Danilo Silva e Silva, Natália Regina Marques da Silva, Renata Cid Gaspar Serpa e José Alberto Domingues Rodrigues\*

\*Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia – Dep. de Engenharia Química e Alimentos Praça Mauá, 1 – São Caetano do Sul – SP – Brasil – CEP 09.580-900 – e-mail: [rodrigues@maua.br](mailto:rodrigues@maua.br)

## RESUMO

*Este trabalho apresenta o estudo do desempenho de um motor ciclo diesel operado com três combustíveis distintos, compostos por: 100% petrodiesel; 60% petrodiesel e 40% biodiesel; 60% petrodiesel, 30% biodiesel e 10% ésteres de cadeia curta. A inclusão desses ésteres na composição de um dos combustíveis está relacionada com a busca por fontes alternativas para a produção de biodiesel, visto que podem ser obtidos de uma reação de esterificação dos ácidos graxos livres extraídos do efluente de uma unidade de tratamento biológico anaeróbio de esgotos sanitários. Foram realizados ensaios de potência, torque e consumo, entre outros. Os resultados mostraram que o combustível que continha ésteres de cadeia curta em sua composição proporcionou maior potência e maior torque ao motor quando operado a baixas rotações em comparação com os outros combustíveis.*

**Palavras-chave:** biodiesel; ésteres de cadeia curta; motor ciclo *diesel*; petrodiesel.

## INTRODUÇÃO

A crise no mercado mundial de energia, causada pela elevação do preço do petróleo, pela incerteza da oferta em longo prazo desse e de outros combustíveis fósseis e pelo agravamento da poluição ambiental e do efeito-estufa, desencadeou uma busca incessante por combustíveis oriundos de fontes limpas e renováveis. No Brasil, o governo acabou apostando na cana-de-açúcar e nos óleos vegetais para alavancar o setor de biocombustíveis. O interesse pela cana vem da crescente demanda de etanol nos mercados nacional e internacional. Já o interesse pelos óleos vegetais decorre não só do consumo de biodiesel no mercado interno, mas também da produção descentralizada de energia, atuando com forte apoio à agricultura familiar e valorizando as potencialidades regionais (Amaral, 2006; Ramos *et al.*, 2003).

Além dos óleos vegetais, existem outras fontes de matérias-primas que podem ser usadas na produção de biodiesel, como óleo de fritura, sebo bovino e esgoto doméstico. Infelizmente, a maioria delas não é tratada com a devida importância em razão da pequena quantidade disponível e da baixa qualidade atribuída. O custo de aquisição desses insumos, entretanto, é baixo e sua disponibilidade, quase sempre imediata. É por isso que a seleção da matéria-prima não deve ser tratada como uma questão meramente política, e sim como uma decisão técnica em que critérios econômicos, sociais e ambientais sejam avaliados com atenção. Subestimar as margens de liberdade das quais se dispõe, fazendo a seleção por sobreposição de critérios, configura um equívoco estratégico e econômico. Em vez disso, deve-se considerar a implantação de um sistema integrado de produção de biodiesel (Oliveira, 2004; Saad *et al.*, 2006).

A Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) vem desenvolvendo alguns trabalhos com escuma, resíduo rico em ácidos graxos que sobrenada o esgoto sanitário. Segundo Oliveira (2004), os resultados têm sido bastante satisfatórios a ponto de ser firmada uma parceria com a Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro (CEDAE) para a

realização de testes em maior escala, visando comprovar a viabilidade de produção de biodiesel com base nesse insumo. Normalmente, a escuma constitui um problema para as empresas que gerenciam as estações de tratamento, pois os custos envolvidos desde sua remoção até a disposição final são bastante elevados.

Ácidos graxos também podem ser obtidos da fase líquida do esgoto, caso o sistema de tratamento seja operado com essa finalidade. Em sistemas biológicos anaeróbios, os ácidos graxos são compostos intermediários da conversão de carboidratos, proteínas e lipídios a metano, de modo que sua obtenção dependeria de uma interferência no processo no momento em que a concentração desses ácidos no meio reacional alcançasse valores relativamente elevados. Os ácidos comumente encontrados são acético, propiônico, butírico, isobutírico, valérico, isovalérico e caproico. Chernicharo (1997) mostrou que as diversas características favoráveis da tecnologia anaeróbia, como baixa produção de sólidos, baixo consumo de energia, baixo custo de implantação e operação e tolerância à aplicação de cargas orgânicas elevadas, constituem um grande potencial de uso dessa tecnologia no tratamento de águas residuárias.

A separação dos ácidos graxos do esgoto poderia ser feita com o uso de membranas, resina de troca iônica e solventes orgânicos, dada a complexidade do efluente na saída da estação de tratamento, com os ácidos presentes na forma ionizada e misturados a microrganismos, sais inorgânicos e coloides (Playne, 1985; Leite, 2005). Uma outra possibilidade seria trabalhar com produção e extração de modo conjunto, por meio de uma técnica denominada fermentação extrativa. A aplicação dessa técnica minimiza a inibição que os ácidos causam sobre os microrganismos, garantindo melhores rendimentos de produção (Ozadali, Glatz e Glatz, 1996; Wu e Yang, 2003). Depois de removidos, os ácidos seriam esterificados visando à produção de biodiesel.

Nesse contexto, este trabalho tem por escopo a busca por fontes alternativas de biodiesel, como o esgoto doméstico, tirando o foco da escuma, fase sobrenadante de baixo volume de produção, e passando-o à fase líquida, mais expressiva quantitativamente. Por se tratar de um tema complexo, o estudo foi limitado à análise da aplicação parcial de ésteres de cadeia curta, potencialmente provenientes do tratamento biológico anaeróbio do esgoto, em motor ciclo *diesel*.

## MATERIAL E MÉTODOS

As substâncias usadas no preparo dos combustíveis foram: petrodiesel, biodiesel, acetato de etila, propionato de etila e butirato de etila. O acetato, o propionato e o butirato de etila foram adquiridos da empresa Megaporte Indústria e Comércio Ltda. (Arujá, SP), com pureza acima de 99,0% e massa específica de 0,902, 0,891 e 0,878 g/cm<sup>3</sup> (20°C), respectivamente. O biodiesel foi adquirido da empresa Indústrias Químicas Taubaté S.A. (Taubaté, SP), apresentando as seguintes características: índice de saponificação de 160 mgKOH/g, índice de acidez de 0,26 mgKOH/g, índice de iodo de 132 cgI<sub>2</sub>/g, ponto de fulgor de 180°C, umidade de 0,11% e densidade relativa de 0,888 g/cm<sup>3</sup> (20°C). O óleo diesel, tipo S-500, foi adquirido do consórcio CBPI/TEXACO/REPSOL, com massa específica de 0,856 g/cm<sup>3</sup> (20°C). As demais propriedades desse óleo estavam de acordo com as especificações da Portaria 310/2001 da ANP, conforme aprovação expedida pelo laboratório da empresa Ipiranga Química S.A. (Guarulhos, SP). Além disso, o motor utilizado foi o SPRINT-TCA-4.0-7, ciclo *diesel*, 4 tempos, turbo-alimentado, com injeção mecânica, de fabricação da empresa MWM Motores Diesel Ltda. (São Caetano do Sul, SP).

O preparo dos combustíveis foi realizado em três etapas sequenciais, com o auxílio de provetas e recipientes de polietileno de alta densidade. Na primeira etapa, preparou-se uma mistura de ésteres com 60% (v/v) acetato de etila, 20% propionato de etila e 20% butirato de etila. Os ésteres e a composição escolhida remetem a uma reação de esterificação com etanol dos ácidos graxos produzidos pela remoção de matéria orgânica do efluente de uma unidade de tratamento biológico anaeróbio de esgoto (Chernicharo, 1997). Na segunda etapa, foram preparados os biocombustíveis. Para facilitar sua identificação, foram separados em duas amostras distintas: a Amostra 1 constituída apenas de biodiesel e a Amostra 2 formada por 75% (v/v) de biodiesel e 25% de mistura de ésteres. Finalmente, na terceira etapa, foram preparados os combustíveis, de acordo com a relação 40% (v/v) biocombustíveis e 60% petrodiesel. A escolha da composição foi baseada em informações fornecidas pelo fabricante do biodiesel e em estudos de desempenho de motores ciclo *diesel* (Zanotto, 2006). Com a adição do petrodiesel, a Amostra 1 e a Amostra 2 passaram a ser identificadas como Combustível 1 e Combustível 2, respectivamente. Nos ensaios em motor ciclo *diesel*, um terceiro combustível, denominado Combustível 3, constituído apenas de petrodiesel, também foi testado, servindo de parâmetro para as análises desses ensaios. Na Tabela 1 apresenta-se a composição percentual completa de cada combustível.

Tabela 1 – Composição percentual dos combustíveis

Produtos	Combustível 1	Combustível 2	Combustível 3
Acetato de etila	-	6 %	-
Propionato de etila	-	2 %	-
Butirato de etila	-	2 %	-
Biodiesel	40 %	30 %	-
Petrodiesel	60 %	60 %	100 %

Os testes em motor ciclo *diesel* usaram como referência a norma ISO 1585 e foram realizados em banco de prova. O levantamento de dados dos testes foi feito por meio do *software* Automação®, desconsiderando-se os fatores de correção relativos à temperatura, à pressão e à umidade locais. Entre os dados levantados, destacam-se: potência, torque, pressão de saída do compressor, consumo e consumo específico. O intervalo de rotação escolhido para a realização dos testes foi de 200 a 200 rpm, dentro do limite regular de operação do motor de 1000 a 4000 rpm. Também foram feitos ensaios físico-químicos de densidade, viscosidade e sólidos totais com os biocombustíveis com o propósito de predizer seu comportamento em motor ciclo *diesel* depois de misturados ao petrodiesel.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos ensaios físico-químicos são apresentados na Tabela 2. Nesses ensaios, além da Amostra 1, constituída apenas de biodiesel, e da Amostra 2, formada por 75% (v/v) biodiesel e 25% mistura de ésteres, havia uma terceira amostra, identificada como Amostra 3, constituída apenas por petrodiesel.

Tabela 2 – Valores médios de densidade, viscosidade e concentração de sólidos totais

Ensaios	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	0,876 (25°C)	0,874 (25°C)	0,827 (25°C)
Densidade teórica (g/cm <sup>3</sup> )	0,888 (20°C)	0,890 (20°C)	0,856 (20°C)
Viscosidade média (cP)	9,27	3,45	4,84

Sólidos Totais (g/L)	45,70	34,30	14,70
----------------------	-------	-------	-------

Os ensaios de densidade das Amostras 1, 2 e 3 resultaram em valores diferentes dos teóricos devido à perda de massa por volatilização. A diferença entre as temperaturas de referência pouco influenciou os resultados. Os valores teóricos foram determinados em função dos dados dos fabricantes, levando-se em conta as frações volumétricas das substâncias usadas no preparo das amostras. Analisando esses valores, observa-se que a adição da mistura de ésteres ao biodiesel não interferiu na densidade. Os resultados dos ensaios de viscosidade, porém, sugerem que a adição dos ésteres diminuiu sensivelmente o valor da viscosidade. Na Amostra 1, obteve-se 9,27 cP, enquanto na Amostra 2, o valor foi de apenas 3,45 cP. A viscosidade é uma das propriedades mais importantes na avaliação do uso de biodiesel em motores, pois controla o estágio inicial da combustão, ou seja, o processo de atomização do combustível nos bicos injetores. Portanto essa diminuição de viscosidade, obtida com a adição da mistura de ésteres ao biodiesel, reduziu as chances de cristalização de ésteres graxos saturados que eventualmente poderiam causar o entupimento do filtro de óleo e do sistema de injeção. Por fim, os resultados dos ensaios de concentração de sólidos totais mostraram que a adição da mistura de ésteres também colaborou para a redução dos valores médios de concentração, afastando ainda mais o risco de entupimento dos bicos injetores. Para se ter uma ideia, o petrodiesel não deve apresentar mais que 1% (m/v) de sólidos em suspensão para que o sistema de injeção do motor funcione apropriadamente.

Os resultados dos testes em motor ciclo *diesel*, realizados com os Combustíveis 1, 2 e 3, são apresentados nas Figuras 1 a 5. A Figura 1 mostra que a potência obtida no teste do Combustível 2 foi maior que as dos testes realizados com os Combustíveis 1 e 3 na faixa de rotação de 1200 a 2500 rpm e, no mínimo, manteve-se praticamente igual à potência obtida no teste do Combustível 3 ao longo do restante do ensaio. Esse resultado sugere que o uso da mistura de ésteres, em substituição ao biodiesel em 10% numa mistura B40, não compromete o desempenho do motor, sendo até indicada em operações com baixas rotações.

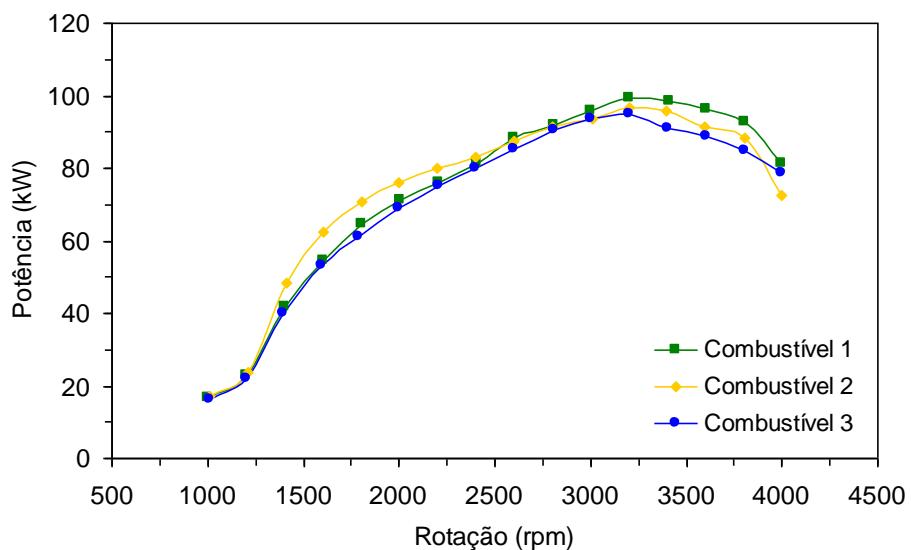


Figura 1 – Perfis de potência dos Combustíveis 1, 2 e 3

A Figura 2 mostra que o consumo do Combustível 2 foi maior que os dos Combustíveis 1 e 3 entre 1200 e 2500 rpm. Como a faixa de rotação é a mesma, fica claro que o aumento de potência observado no teste do Combustível 2 foi motivado justamente pelo aumento de consumo desse combustível, minimizando a vantagem de seu uso sobre os demais.

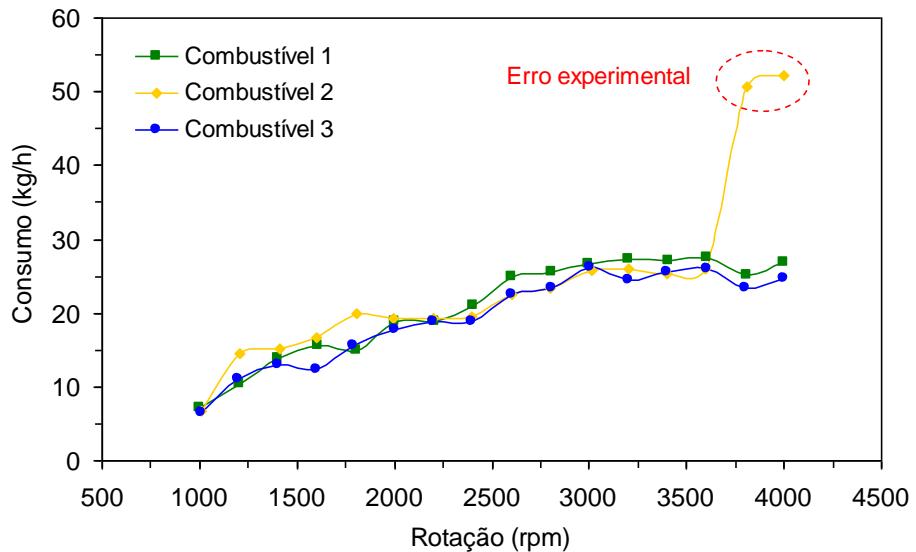


Figura 2 – Perfis de consumo dos Combustíveis 1, 2 e 3

Os resultados dos perfis de consumo específico são apresentados na Figura 3. Observa-se que, na faixa de rotação de 2000 a 3600 rpm, o consumo específico foi praticamente o mesmo nos testes realizados com os Combustíveis 1, 2 e 3, em torno de 265,2 g/kWh. Isso sugere não apenas que o desempenho proporcionado pelo uso dos três combustíveis é semelhante, mas também e principalmente que o aumento de potência observado no teste do combustível 2 foi proporcional ao aumento de seu consumo.

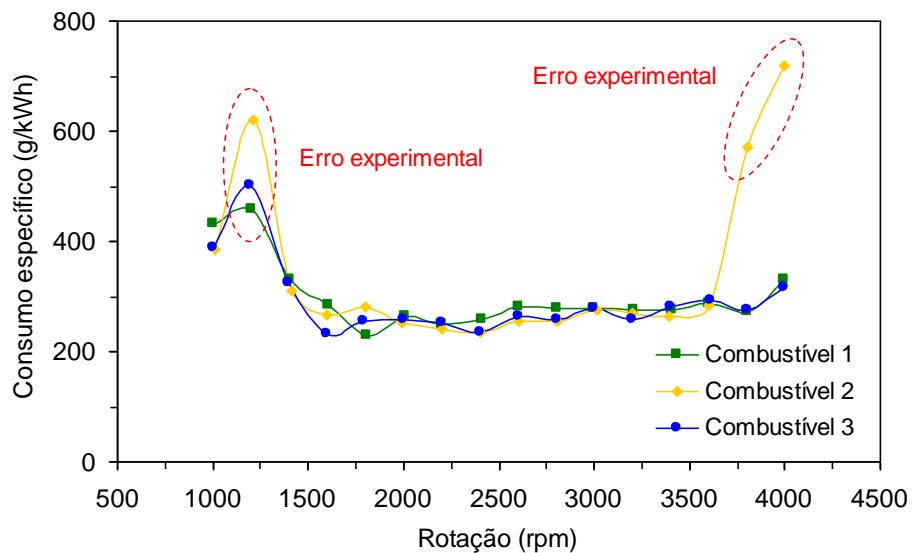


Figura 3 – Perfis de consumo específico dos Combustíveis 1, 2 e 3

Para se fazer uma estimativa da eficiência de um determinado combustível, deve-se avaliar suas propriedades. O Combustível 2, por exemplo, apresentou maior densidade e menor viscosidade em comparação aos outros combustíveis, de acordo com os resultados dos ensaios físico-químicos realizados com as Amostras 1, 2 e 3 e extrapolados para os Combustíveis 1, 2 e 3. Tais informações sugerem que a quantidade de Combustível 2 injetada no motor foi comparativamente maior que a dos Combustíveis 1 e 3, gerando maior consumo e proporcionando maior potência ao motor. No entanto o Combustível 2 apresenta ésteres de

cadeia curta em sua composição, o que faz dele um combustível de baixo poder energético quando comparado aos outros combustíveis, constituídos por moléculas de cadeia carbônica longa. Como a energia liberada por unidade de massa do Combustível 2 foi menor que a dos Combustíveis 1 e 3, a potência gerada no motor deveria ser menor, não fosse o maior consumo de combustível.

A Figura 4 mostra que a pressão na saída do compressor, obtida no teste do Combustível 2, foi maior que as pressões obtidas nos testes dos outros combustíveis, na faixa de rotação de 1400 a 2400 rpm. Esse resultado reforça a ideia de que o consumo do Combustível 2 foi realmente maior que o dos Combustíveis 1 e 3, pois, quanto maior a pressão na saída do compressor, maior a quantidade de ar impelida para dentro do motor, o que provoca a admissão de mais combustível e, consequentemente, o aumento de potência.

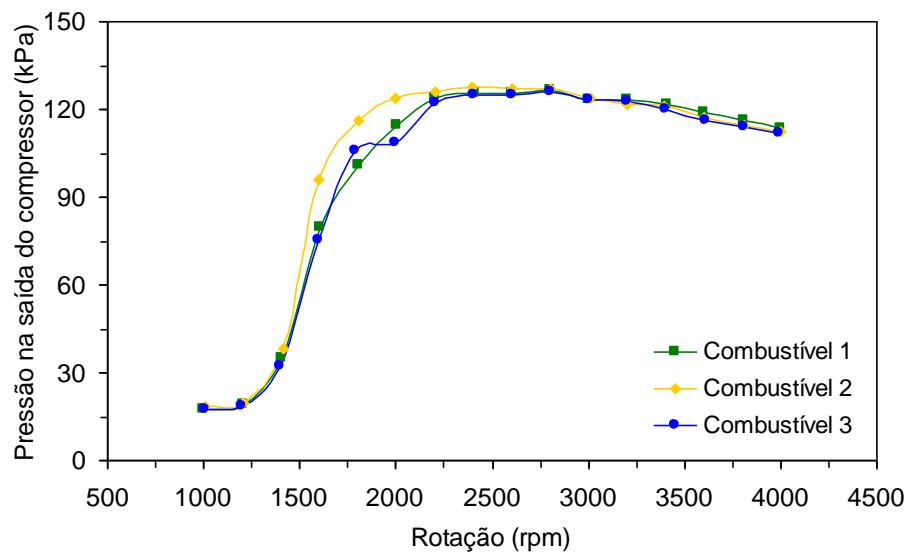


Figura 4 – Perfis da pressão na saída do compressor dos Combustíveis 1, 2 e 3

Deve-se observar, porém, os resultados de consumo de combustível do teste realizado com o Combustível 2, apresentados na Figura 2. Os dados a 3808 e 3999 rpm constituem erro experimental, devido a um problema na bomba de injeção de combustível. Esse problema, na verdade, decorreu do ataque da mistura de ésteres, contida na formulação do Combustível 2, sobre o material polimérico componente da bomba injetora. Assim, o combustível que seguiria para a câmara de combustão, acabou sendo parcialmente desviado para o cárter, contaminando o óleo lubrificante do motor. Por esse motivo, não é possível afirmar que os dados de consumo de combustível, de modo geral, não estejam superestimados e que o Combustível 2 não seja mais eficiente que os Combustíveis 1 e 3. Sugere-se, portanto, a realização de novos testes com uma bomba injetora adaptada para esse combustível. Outras alterações de peças ou mudanças na operacionalidade do motor também são interessantes uma vez que o motor utilizado foi projetado para operar apenas com petrodiesel.

Para finalizar, a Figura 5 mostra que o torque obtido no teste do Combustível 2 foi maior que os dos testes realizados com os Combustíveis 1 e 3 na faixa de rotação de torque máximo, de 1400 a 2400 rpm. Como essa faixa foi mais alta para o teste do Combustível 2, o motor acabou ganhando agilidade nas retomadas, se comparado ao desempenho proporcionado pelos outros combustíveis.

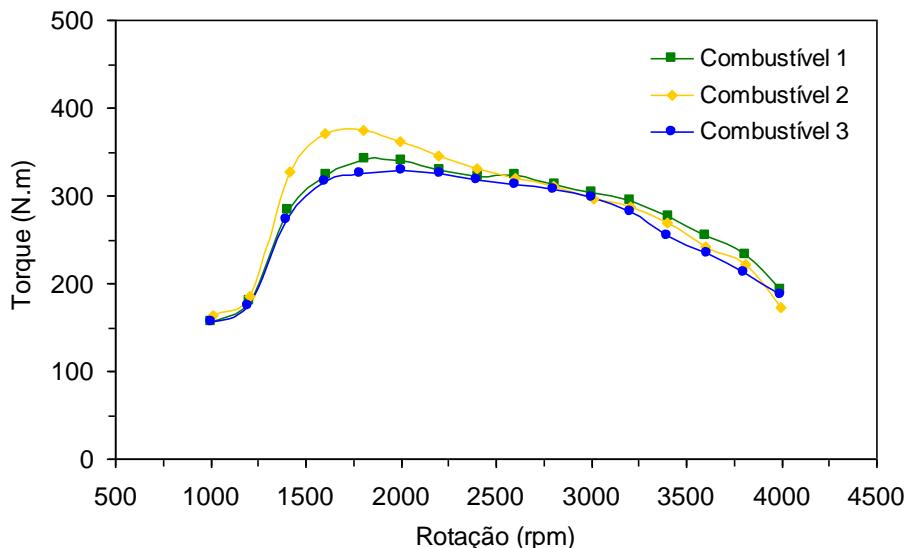


Figura 5 – Perfis de torque dos Combustíveis 1, 2 e 3

## CONCLUSÕES

Os resultados mostraram que o combustível com 60% petrodiesel, 30% biodiesel e 10% de uma mistura de acetato, propionato e butirato de etila proporcionou maior potência e maior torque ao motor ciclo *diesel*, quando operado numa faixa de rotação de 1200 a 2600 rpm, em comparação com o petrodiesel e outro combustível com 60% petrodiesel e 40% biodiesel. Contudo os ésteres de cadeia curta usados nos ensaios atacaram o material polimérico da bomba injetora, comprometendo o funcionamento do motor. Por isso sugere-se a realização de estudos complementares visando à determinação de materiais resistentes à corrosão provocada pela mistura de ésteres, para que novos testes possam ser realizados com uma bomba injetora já adaptada para esse combustível.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMARAL, W. A. N. (2006). Pólo Nacional de Biocombustíveis: missão e desafios para sustentabilidade da produção de biodiesel. *Anais do II Simpósio do Agronegócio de Plantas Oleaginosas: Matérias-Primas para Biodiesel*. Piracicaba: ESALQ/USP/LPV, p. 1-6.
- CHERNICHARO, C. A. L. (1997). Princípio do tratamento biológico de águas residuárias. v. 5. Reatores anaeróbios. Belo Horizonte: DESA/UFMG.
- LEITE, J. A. C. (2005). Produção de ácidos graxos voláteis por fermentação acidogênica em reator anaeróbio de leito fixo e extração em resina de troca iônica e com solvente orgânico. *Tese de Doutorado*, SHS/EESC/USP, 102 f.
- OLIVEIRA, L. B. (2004). Potencial de aproveitamento energético de lixo e de biodiesel de insumos residuais no Brasil. *Tese de Doutorado*, COPPE/UFRJ, 247 p.

OZADALI, F.; GLATZ, B. A.; GLATZ, C. E. (1996). Fed-batch fermentation with and without on-line extraction for propionic and acetic production by *Propionibacterium acidipropionici*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 44, p. 710-716.

PLAYNE, M. J. (1985). Propionic and butyric acids. In: *Moo-Young, M. (ed.). Comprehensive Biotechnology*, v. 3, Pergamon Press, Oxford, UK.

RAMOS, L. P.; DOMINGOS, A. K.; KUCEK, K. T.; WILHELM, H. M. (2003). Biodiesel: um projeto de sustentabilidade econômica e sócio-ambiental para o Brasil. *Biotecnologia: Ciência e Desenvolvimento*, v. 31, p. 28-37.

SAAD, E. B.; DOMINGOS, A. K.; CÉSAR-OLIVEIRA, M. A. F.; WILHELM, H. M.; RAMOS, L. P. (2006). Variação da qualidade do biodiesel em função da matéria-prima de origem vegetal. *Anais do II Simpósio do Agronegócio de Plantas Oleaginosas: Matérias-Primas para Biodiesel*. Piracicaba: ESALQ/USP/LPV, p. 193-225.

WU, Z.; YANG, S. (2003). Extractive fermentation for butyric acid production from glucose by *Clostridium tyrobutyricum*. *Biotechnology and Bioengineering*, v. 82, p. 93-102.

ZANOTTO, R. (2006). Avaliação técnica e econômica de tratores movidos a B5 em lavoura canavieira. *Anais do II Simpósio do Agronegócio de Plantas Oleaginosas: Matérias-Primas para Biodiesel*. Piracicaba: ESALQ/USP/LPV, p. 231-237.

**Revista Petróleo&Energia**  
Publicado em abril/2015