



Latin American Journal of Energy Research – Lajer (2023) v. 10, n. 1, pp. 57–66
<https://doi.org/10.21712/lajer.2023.v10.n1.p57-66>

Óleo de Crambe (*Crambe abyssinica*) pré-aquecido em motor ciclo Diesel *Crambe oil (Crambe abyssinica) preheated in diesel engine*

Bruna Martins Bomfati¹, Hevandro Colanhese Delalibera², Leandro Riyuiti Higashibara³, Jaime Alberti Gomes⁴ Pedro Henrique Weirich Neto^{5*}

¹ Mestre em Bioenergia, Universidade Estadual de Ponta Grossa – UEPG, Ponta Grossa, PR, Brasil

² Pesquisador Científico, Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná - IDR, Londrina, PR, Brasil

³ Mestre em Agronomia, Universidade Estadual de Londrina – UEL, Londrina, PR, Brasil

⁴ Professor do Curso de Agronomia, Laboratório de Mecanização Agrícola, UEPG, Ponta Grossa, PR, Brasil

⁵ Professor do Programa de Pós-Graduação em Bioenergia, Lama/UEPG, Ponta Grossa, PR, Brasil

*Autor para correspondência, E-mail: lama1@uepg.br

Received: 16 January 2023 | Accepted: 21 March 2023 | Published online: 10 June 2023

Resumo: Estudos apontam derivados de óleos vegetais e animais como substitutos ao petrodiesel (PD). Porém, o uso destes como combustível requerem transformações ou estratégias para reduzir sua viscosidade. Sendo assim realizou-se experimento utilizando óleo de crambe (CR) pré-aquecido a 100 °C em motor ciclo Diesel. Avaliou-se CR e PD, a cada 15h de funcionamento, em quatro regimes, até 100 h de trabalho. Os regimes foram, 1100 rpm sem carga, 1800 rpm sem carga, 1800 rpm com 51% e com 66% de potência nominal. Observou-se que o consumo de CR foi superior ao de PD, com diferença mais pronunciada nos regimes sob carga, observou-se perda de potência relativa maior no uso de CR quando da mudança de carga. Não houve diferença entre os dois combustíveis para a eficiência térmica. Para o fluido de arrefecimento e lubrificante, foram observadas temperaturas maiores para o CR, porém a temperatura dos gases de exaustão e a pressão do lubrificante foram maiores para o PD. Ao fim do ensaio, para CR, houve aumento das pressões de compressão e de abertura do injetor, e os elementos injetores apresentaram carbonização, de difícil remoção, desgaste e sinais de superaquecimento. Não houveram evidências de degradação do lubrificante.

Palavras-chave: biocombustível, óleo vegetal, consumo de combustível, bioenergia, desenvolvimento sustentável

Abstract: Studies indicate derivatives of vegetable and animal oils as substitutes for Diesel. However, the use of these as fuel has changed or strategies to reduce its adoption. Therefore, an experiment was carried out using crambe oil (CR) preheated to 100 °C in a Diesel engine cycle (PD). CR and PD are accommodated, every 15 hours of operation, in four regimes, up to 100 hours of work. The regimes were, 1100 rpm without load, 1800 rpm without load, 1800 rpm with 51% and 66% of nominal power. Note that the consumption of CR was higher than that of PD, with a more pronounced difference in regimes under load, with a greater loss of relative power being observed in the use of CR when changing the load. There was no difference between the two fuels for thermal efficiency. For the cooling fluid and lubricant, higher temperatures were observed for the CR, but the temperature of the exhaust gases and the lubricant pressure were higher for the PD. At the end of the test, for CR, there was an increase in pressure and opening pressure of the injector, and the injector elements showed carbonization, difficult to remove, wear and signs of overheating. There was no evidence of oil degradation.

Keywords: biofuel, vegetable oil, fuel consumption, bioenergy, sustainable development

1 Introdução

A emissão de gases do efeito estufa pelo uso de combustíveis fósseis faz parte da discussão científica mundial. Neste cenário, uma das alternativas é a substituição do petrodiesel (PD) pelos derivados de óleos vegetais (OV), pois estes, quando transformados, e/ou em *blends* possuem características interessantes para

utilização como combustíveis (Mat et al., 2018; Ramakrishnan et al., 2018; Prabu et al., 2018, Varuvel et al., 2018; Kothandan e Masimalai, 2018; Chidambaranathan et al., 2020 e Chidambaranathan et al., 2022).

Os processos de transformação implicam em aumento de custo, gasto energético e contaminações. Alternativa seria o uso de OV sem transformações. Porém, devido à alta viscosidade, estes podem causar problemas de bombeamento atomização, combustão irregular, formação de depósitos, contaminação do lubrificante, emissão excessiva de gases e diminuição de durabilidade (Agraw et al., 2019; Bakthavathsalam et al., 2019).

O aquecimento dos OV, puros ou em blends com PD, reduz viscosidade, melhora as características de injeção e de atraso de ignição (aumento do número de cetano), favorecendo combustão (Pradhan et al., 2014; Bakthavathsalam et al., 2019). Há relatos de redução do consumo, da formação de depósitos e da contaminação do lubrificante e aumento da eficiência térmica, em comparação ao não aquecido (Almeida et al., 2002; Jain et al., 2017).

Também assume importância as características físico-químicas do OV (Hellier et al., 2015; Ramakrishnan et al., 2018). Em trabalho com os óleos de linhaça, crambe, pinhão-mansão e canola aplicados como combustível em motor Diesel, o crambe apresentou consumo, potência e emissão de particulados similar ao PD (Delalibera et al., 2017).

Neste trabalho, utilizou-se óleo de crambe pré-aquecido, avaliando-se consumo de combustível, perda de potência, eficiência térmica, temperaturas do motor e lubrificante em comparação ao PD.

2 Material e métodos

O experimento foi realizado no Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná (IDR), polo de Londrina – PR. Foram utilizados dois combustíveis: óleo vegetal de crambe (*Crambe abyssinica* Hochst) (CR) pré-aquecido a 100 °C e o combustível convencional, petrodiesel B5 e S500, como testemunha.

O OV do CR foi obtido por extração mecânica em prensa do tipo Expeller e filtrado (0,5 µm). Os combustíveis foram caracterizados quanto ao poder calorífico superior (PCS) (ASTM D240-17). Para o CR, estimou-se a viscosidade cinemática a 40 e a 100 °C, através de viscosímetro capilar do tipo Cannon-Fenske (ASTM D445-06).

A bancada de ensaios foi composta de motor estacionário ciclo Diesel, YANMAR® (B9C), monocilíndrico, quatro tempos, injeção mecânica e indireta e potência máxima de 5,88 kW@1.800 rpm, e gerador elétrico com capacidade nominal de 4 kW (Delalibera et al., 2017).

Previamente, realizou-se substituição do lubrificante, elementos de bomba e bico injetor, aferiu-se pressão de abertura do injetor, pressão de compressão e regulagem das válvulas.

A alternância entre os dois combustíveis foi realizada através de válvula manual de duas posições e três vias, posicionada na entrada da bomba injetora. O CR foi pré-aquecido por resistência elétrica, 450 W, em tubo de alumínio de 140 mm, no qual circula o OV. Para controle da temperatura, utilizou-se termostato digital (N321®, NOVUS) e sensor termopar do tipo K, inserido no aquecedor. Regulou-se sistema para OV entrar no sistema a 100 °C.

Para simular cargas, o gerador foi acoplado a banco resistivo de lâmpadas, que permitia a aplicação de dois regimes de absorção de potência, de 3,0 e 3,9 kW, respectivamente, a 51 e 66% da potência nominal do motor, a 1.800 rpm. Para mensurar a velocidade do motor acoplou-se no virabrequim, *encoder* incremental (1.024 pulsos por volta), com aquisição de 33,33 Hz.

A temperatura do ar ambiente de ensaio foi controlada com termostato (N321®) acoplado a um sensor PT100, com acionamento em temperaturas superiores a 25 °C.

A partida do motor era realizada com PD e, após aquecimento e estabilização da temperatura do sistema de arrefecimento, realizava-se a troca para CR. Antes de desligar o motor, retornava-se para PD, por 15 minutos. O motor funcionou por 8 h diárias, ininterruptas, até 100 h de teste.

No tempo zero e a cada 15 h de funcionamento do motor, foram realizadas avaliações de consumo e perda de potência nos dois tratamentos. Sendo assim, sete tempos de avaliações: 0, 15, 30, 45, 60, 75 e 90 horas. Entre as avaliações, o motor operou com CR sob regime de 51% de absorção da potência a 1.800 rpm.

Após 50 h de funcionamento, o ensaio foi interrompido para averiguações; de desgaste dos elementos do bico injetor e da bomba injetora, de pressão de abertura do injetor, de pressão de compressão e substituição do óleo lubrificante.

As avaliações de massa de combustível foram realizadas por sistema de leitura e gravação automatizada, que determinava as massas de CR, PD e retorno de combustível, conforme reservatórios. Foi

mensurado apenas o retorno do bico injetor, pois o retorno da bomba injetora volta para sua própria entrada. A frequência de leitura foi de 0,5 Hz.

As avaliações foram realizadas em quatro regimes de operação do motor: velocidade de 1.100 rpm (marcha lenta), velocidade de 1.800 rpm sem carga (aceleração livre), 1.800 rpm com 51% da potência do motor e, 1.800 rpm com 66% da potência. Para as avaliações, cada regime e combustível operou por 15 min, com leitura da massa de combustível consumida a cada 150 s (seis repetições).

Para análise da massa de combustível consumida, foram testadas a normalidade e a homocedasticidade. Após realizou-se análise de variância com delineamento em blocos e em esquema de parcela subdividida (2x4x7; combustíveis, regimes e tempo de uso), inserindo-se erros de não casualização para todos os fatores. Para comparação de médias, utilizou-se Tukey a nível de 5% de probabilidade. O consumo específico foi calculado para os regimes sob carga (Pradhan et al., 2014).

Para avaliação de perda de potência utilizou-se a variação na rotação provocada pela alternância de cargas (Delalibera et al., 2017). Calculou-se esta variável através da diferença entre área sob curva de rotação no tempo com demanda de potência inicial e curva com nova demanda submetida. As avaliações de perda de potência relativa (PPR) foram realizadas em três condições de demanda de potência na velocidade de 1.800 rpm. As cargas utilizadas foram 51% da potência nominal (3,0 kW), 66% (3,9 kW) e aplicação de 0,9 kW sobre o regime de carga de 3,0 kW, isto é, a adição de 15% da potência total.

Para esta variável realizaram-se dez repetições a cada 10 s, entre cada condição de submissão e retirada de carga. Para cálculo da PPR, utilizou-se o intervalo de 5 s posterior à aplicação da carga, pois este foi o tempo máximo necessário entre o pico de queda da velocidade, retomada e início de estabilização da rotação. A subtração da área sob curva da velocidade em potência inicial, nos 5 s antes da entrada da carga, e da área abaixo da curva de retomada da aceleração, resulta em uma terceira área. Quanto maior este valor, maior a perda relativa de potência.

A eficiência térmica foi determinada como a razão entre a potência de saída do motor e a potência teórica fornecida pelo combustível (Wander et al., 2011; Pradhan et al., 2014). Calculou-se a potência teórica, considerando o consumo (tratamentos com trabalho sob carga) e o poder calorífico superior obtidos experimentalmente. Para comparação das médias de potência teórica realizou-se análise pelo teste t.

Para determinação das temperaturas foram utilizados sensores termopar do tipo K. Para o líquido de arrefecimento, o sensor foi disposto no bloco do motor, imerso no fluido de arrefecimento, o sensor para o lubrificante foi imerso no centro do cárter, e sensor para os gases de exaustão foi disposto no centro da janela de escape. Foram realizadas leituras a cada 15 horas de funcionamento, sempre de forma comparativa entre CR e PD. Todas as temperaturas foram monitoradas com aquisição de 0,05 Hz.

De posse dos resultados testou-se normalidade e a homocedasticidade, para variáveis paramétricas, realizou-se análise de variância com delineamento em blocos com esquema de parcela subdividida no tempo 2x4x7, estimando-se os erros da não casualização de todos os fatores, seguido de teste de comparação de médias por Tukey ($p < 0,05$). Para as não paramétricas, realizou-se análise de Friedman ($p < 0,05$).

Para avaliação do lubrificante, monitorou-se a pressão de trabalho do sistema de lubrificação, com frequência de aquisição de 0,5 Hz. A cada 15 horas de funcionamento, retirou-se amostra do lubrificante para análise laboratorial. Foi também analisado lubrificante novo (tempo zero), totalizando sete amostras. Quando necessário houve reposição. O lubrificante aplicado no motor foi do tipo mineral multiviscoso, SAE 15W40 (Ambra Super Gold). Ao completar 50 h, realizou-se a substituição do lubrificante.

No lubrificante foram analisados; de teor de fuligem (ASTM D7686), viscosidade a 40 °C (ASTM D445), diluição por combustível (ASTM D3524), teor de água, índice de precipitação (ASTM D91), número de basicidade total (TBN) (ASTM D4739), insolúveis de pentano (ASTM D4055), dispersância (ASTM D7899), índice de contaminação (ASTM D7900), perda ponderada (ASTM D7901), oxidação, nitratação e sulfatação (ASTM D7889), elementos contaminantes (ASTM D5185), fuligem e produtos de oxidação, óxido de silício e ligas ferrosas (ASTM 7684) e índice de partículas ferrosas (IPF).

As variáveis foram registradas por datalogger Campbell Scientific (CR 5.000). Os softwares utilizados para visualização, tratamento e análises estatísticas foram o Catman Easy-AP 3.3.5® (HBM), Microsoft Office Excel, BioEstat 5.0 e SisVar 5.6.

3 Resultados e discussão

Os valores de viscosidade cinemática do CR foram de 49,41 e 9,96 mm² s⁻¹ para 40 e 100 °C, respectivamente, redução de 79,84%. Apesar de decrescer significativamente, a viscosidade ainda é superior as máximas recomendadas, ANP 50/2013 (Brasil, 2013) e 45/2014 (Brasil, 2014), que são de 5,0 e 6,0 mm² s⁻¹ a 40 °C, para PD S500 e biodiesel, respectivamente.

O poder calorífico superior (OCS) obtido para o CR foi de $41,79 \text{ MJ kg}^{-1}$ ($\pm 0,36$), 8,62% menor que o do PD, que foi de $45,73 \text{ MJ kg}^{-1}$ ($\pm 0,72$). Devido ao oxigênio presente em suas moléculas, o poder calorífico dos óleos vegetais é inferior ao do PD (Balakrishna, 2012).

Apesar da interação significativa entre tempo e consumo, optou-se por desconsiderar o fator tempo, pois, este não apresentou ajuste de modelos estatísticos significativos que indicasse tendência. Em todos os regimes houve diferença significativa entre os consumos para os combustíveis, no qual o CR apresentou valores maiores, em média, 8,84% superior no regime de lenta, 3,46% em 1.800 rpm livre de carga, 8,20% para $3,0 \text{ kW}@1.800 \text{ rpm}$ (51%) e 9,34% para $3,9 \text{ kW}@1.800 \text{ rpm}$ (66% da potência nominal) (Tabela 1).

Tabela 1. Consumo horário (g h^{-1}) dos combustíveis CR $100 \text{ }^\circ\text{C}$ e PD conforme regime.

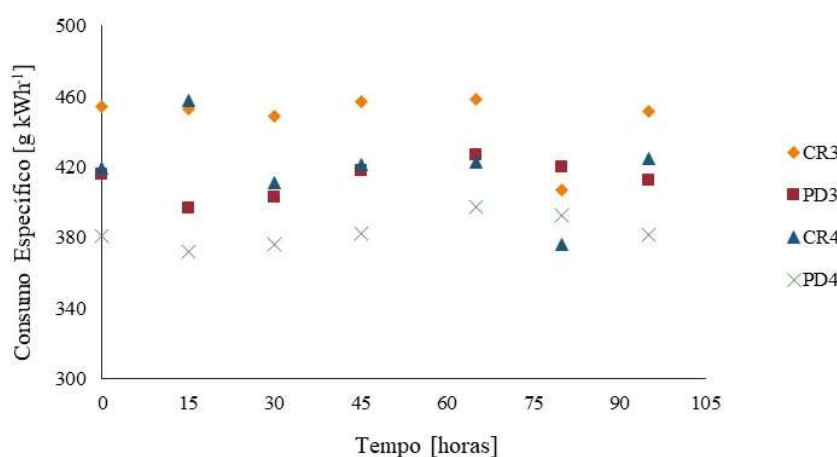
Regime	Tratamento*	Média (g h^{-1})**
Marcha lenta	CR $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 1	410,16 b
	PD1	376,85 a
1.800 rpm livre de carga	CR $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 2	635,88 b
	PD2	614,64 a
1.800 rpm com carga de 51%	CR $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 3	1342,10 b
	PD3	1240,37 a
1.800 rpm com carga de 66%	CR $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 4	1635,34 b
	PD4	1495,66 a

*CR1 – óleo de crambe na condição de marcha lenta; PD1 – Petrodiesel na condição de marcha lenta; CR2 – óleo de crambe em aceleração livre de carga a 1.800 rpm; PD2 – Petrodiesel em aceleração livre de carga a 1.800 rpm; CR3 – óleo de crambe com aplicação de carga de $3,0 \text{ kW}@1.800 \text{ rpm}$; PD3 – Petrodiesel com aplicação de carga de $3,0 \text{ kW}@1.800 \text{ rpm}$; CR4 – óleo de crambe com aplicação de carga de $3,9 \text{ kW}@1.800 \text{ rpm}$; PD4 – Petrodiesel com aplicação de carga de $3,9 \text{ kW}@1.800 \text{ rpm}$

**Médias seguidas por letras distintas no mesmo regime diferem entre si pelo teste de Tukey ($p>0,05$)

Os resultados são semelhantes aos já relatados, com consumo superior para o CR pré-aquecido a $100 \text{ }^\circ\text{C}$ em relação ao PD quando sob carga (Delalibera et al., 2017). Com utilização de OV de mamona em blends com PD e butanol, observou-se maior consumo específico com diminuição da proporção de PD (QI et al., 2021). Porém em condições de baixa carga, não foi encontrada diferença nos consumos de OV de colza e PD (Nwafor, 2003). Para o retorno de combustível não foi realizada análise estatística, pois este foi considerado desprezível, $< 1 \%$.

As médias gerais do consumo específico foram de $447,37 \text{ g kW}^{-1} \text{ h}^{-1}$ para o CR e $413,46 \text{ g kW}^{-1} \text{ h}^{-1}$ para o PD, no regime sob carga de 51% e de $419,32$ e $383,50 \text{ g kW}^{-1} \text{ h}^{-1}$ para a carga de 66% da nominal (Figura 1).



CR3 – óleo de crambe com aplicação de carga de $3,0 \text{ kW}@1.800 \text{ rpm}$; PD3 – petrodiesel com aplicação de carga de $3,0 \text{ kW}@1.800 \text{ rpm}$; CR4 – óleo de crambe com aplicação de carga de $3,9 \text{ kW}@1.800 \text{ rpm}$; PD4 – petrodiesel com aplicação de carga de $3,9 \text{ kW}@1.800 \text{ rpm}$

Figura 1. Consumo específico ($\text{g kW}^{-1} \text{ h}^{-1}$) do conjunto motor-gerador com CR $100 \text{ }^\circ\text{C}$ e PD nos regimes sob carga a cada 15 horas de ensaio.

As tendências de redução do consumo específico com o aumento da carga e do maior consumo específico de OV em relação ao PD já foram relatadas (Martini et al., 2012; Pradhan et al., 2014; Jain et

al., 2017). Observa-se ainda, variação dos valores dimensionadas no tempo 80 horas, porém não houve não se identificou discrepância estatística dos mesmos, bem houve diferença significativa para os parâmetros representados conforme tempo de utilização dos combustíveis.

A perda de potência relativa (PPR) aumentou significativamente com o aumento da carga aplicada, para e entre os dois combustíveis (Tabela 2).

Tabela 2. Perda de potência relativa (diminuição relativa no número de rotações em 5 s após a aplicação da carga).

Tratamento	Carga aplicada		
	51% + 15%	51%	66%
Crambe 100 °C (CR)	0,66 b	1,48 b	1,74 a
Petrodiesel (PD)	0,51 a	1,43 a	1,92 b

Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$)

Os valores de PPR foram maiores para o CR, exceto para a aplicação da carga de 66% da potência nominal, onde CR teve melhor desempenho. As menores variações com PD indicam maior estabilidade de funcionamento. Em estudo, também com CR, o pré-aquecimento aumentou a PPR (Delalibera et al., 2017). O trabalho citado foi de curta duração, podendo não refletir exatamente o efeito cumulativo da utilização do combustível.

Para potência teórica, não houve diferença significativa entre os combustíveis, sendo a variação média entre as potências de 1,1% para aplicação de carga de 51% da potência nominal e 0,08% para a carga de 66% (Tabela 3). Esta semelhança entre potências teóricas se deve à compensação do menor poder calorífico do CR através do aumento no consumo, de forma que a combustão nos dois casos fornece teoricamente a mesma quantidade de energia.

Tabela 3. Potência teórica média fornecida e eficiência térmica estimada dos combustíveis CR 100 °C e PD para o conjunto motor-gerador conforme regimes de carga.

Regime	Tratamento	Potência teórica (kW)	Significância do teste "t"	Eficiência térmica (%)
3,0 kW@1.800 rpm (51% da potência nominal)	Crambe 100 °C (CR)	15,580	p=0,5524	19,26
	Petrodiesel (PD)	15,756		19,04
3,9 kW@1.800 rpm (66% da potência nominal)	Crambe 100 °C (CR)	18,983	p=0,9599	20,54
	Petrodiesel (PD)	18,999		20,53

Comparação de médias pelo teste "t" em que $p > 0,05$ não representa diferença significativa

A utilização de OV reduz a potência efetiva dos motores (Altin et al., 2001). Relatou-se redução de 4% na potência para óleo de soja a 30 °C e de 1,7% para óleo de soja a 60 °C (Wander et al., 2011). A redução de potência pode ser ocasionada pela maior viscosidade e menor poder calorífico dos OV (Altin et al., 2001). Entretanto, em motor de injeção indireta, o óleo de soja aquecido a 68 °C apresentou potência 6,7% superior ao PD e, em altas rotações obteve-se potência 12,7% superior (SCHLOSSER et al., 2007).

Apesar das energias de entrada do PD e do CR serem similares, há diferença no rendimento do motor, como pode ser observado pela PPR. Adicionalmente, combustíveis diferentes necessitam de condições diferentes para a combustão completa, devido a viscosidade e composição físico-química do combustível, razão de compressão e mistura ar-combustível ideais, entre outros, gerando consequentemente desempenhos distintos.

Devido às potências teóricas similares, as eficiências térmicas foram similares. O aumento da eficiência térmica com o uso de OV em comparação ao PD, já foi observado para diferentes OV pré-aquecidos (Nwafor, 2003). Por outro lado, alguns estudos relatam redução da eficiência térmica. Eficiência térmica de 28,51% para o PD e de 27,69% para o óleo de pinhão-manso a 100 °C (Chauhan et al., 2010), também utilizando pinhão-manso (70 °C), observou-se redução na eficiência térmica em 5,18%, em condição de potência máxima (Pradhan et al., 2014). Com utilização de óleo de sapoti (*Manilkara zapota*), foi relatado eficiência térmica de 88% em relação ao PD (Prabu et al., 2021).

As divergências nos resultados comprovam que a composição físico-química dos OV e o tipo de tecnologia do motor utilizados influenciam desempenho. No caso de tecnologia, relatou-se maior eficiência

térmica, com blend de 20% de OV, quando do revestimento do êmbolo com cerâmica (multi-lantânio) (Bakthavathsalam et al., 2019).

Não houve tendência significativa dos valores das temperaturas dos sistemas conforme tempo de funcionamento. Sendo assim não se desdobrou os fatores dentro do tempo, comparando-se somente as médias obtidas no tempo total de ensaio (Tabela 4).

A temperatura do sistema de arrefecimento para a utilização do CR foi maior que o PD para todos os regimes, porém observa-se que a diferença entre os combustíveis foi pequena.

Tabela 4. Temperaturas dos gases de exaustão, líquido de arrefecimento, lubrificante e pressão de lubrificante do motor de acordo com combustível e regime de trabalho.

Sistema do motor	Tratamento	Marcha lenta	1.800 rpm livre	51%@1.800 rpm	66%@1.800 rpm
*Gases de exaustão (°C) ¹	Crambe	138,10 a A	166,30 a B	301,21 a C	366,25 a D
	Petrodiesel	144,68 b A	179,12 b B	320,31 b C	389,22 b D
*Arrefecimento (°C) ¹	Crambe	96,59 b A	97,07 b B	97,37 b C	97,75 b D
	Petrodiesel	95,70 a A	96,17 a B	96,59 a C	96,62 a C
**Lubrificante (°C) ²	Crambe	59,05 b A	62,13 a AB	62,12 a BC	63,89 b C
	Petrodiesel	58,78 a A	59,61 a AB	60,35 a BC	62,81 a C
*Pressão do Lubrificante (MN m ⁻²) ¹	Crambe	1,01 a A	1,86 a C	1,79 a BC	1,69 a B
	Petrodiesel	1,23 b A	2,03 b C	1,86 a B	1,78 b B

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e maiúsculas na linha não diferem entre si onde ¹ - as diferenças são dadas por Tukey (p<0,05) e ² - por Friedman (p<0,05); * médias; ** medianas

A temperatura do lubrificante foi maior para o CR nos regimes de marcha lenta e com carga de 66%. A temperatura dos gases aumentou com o aumento da velocidade e da carga em ambos combustíveis, o que era esperado, porém o CR apresentou menor temperatura.

O uso de OV tende a aumentar a temperatura dos gases de exaustão do motor, quando comparados com PD (Pradhan et al., 2014; Delalibera et al., 2017; Jain et al., 2017, Chidambaranathan et al., 2020). Em motor com óleo de palma não houve alteração na temperatura dos gases de exaustão (Almeida et al., 2002). Menores temperaturas dos gases de exaustão indicam maior eficiência térmica (Chauhan et al., 2010; Pradhan et al., 2014).

Outro estudo, avaliando a adição de 5% de óleo de coco e 5% de óleo de palma em PD observou-se, respectivamente, redução de 1,58% e aumento de 1,42% na temperatura dos gases de exaustão em comparação ao PD. Este efeito foi atribuído a maior quantidade de ácidos graxos saturados no óleo de coco, que favorece a combustão em comparação ao óleo de palma (Kalam et al., 2011). Comparando óleo de punnai (*Calophyllum inophyllum*) e petrodiesel, relatou-se em carga máxima temperaturas 20,8% superiores para o óleo vegetal (Chidambaranathan et al., 2020). Diferentes viscosidades levam a diferentes velocidades de combustão (Venkatesan et al., 2019).

Para o sistema de lubrificação observou-se pressão menor para o CR entre os combustíveis nos regimes 1, 2 e 4. O CR apresentou tendência de maior temperatura que o PD, o que refletiu na menor pressão de lubrificação, provavelmente devido a redução da viscosidade.

As análises mostram variação de até 4% na viscosidade em relação ao lubrificante novo (Tabela 5). Com utilização de OV de girassol, sem pré-aquecimento, devido a combustão incompleta, foi relatado aumento acentuado na viscosidade do lubrificante (Maziero et al., 2007). A redução de viscosidade do lubrificante também já foi observada (Almeida et al., 2002, Delalibera et al., 2009). A diluição do lubrificante geralmente é causada por problemas de combustão, devido à atomização deficiente e baixa volatilidade dos óleos vegetais (Almeida et al., 2002). A presença de OV no lubrificante pode provocar polimerização com espessamento e formação de sólidos em suspensão (Sidibé et al., 2010).

Outro fator relevante foi a não contaminação por fuligem (produto da combustão) e, portanto, indicador de combustão satisfatória (Tabela 5). A fuligem no lubrificante pode ocasionar aumento da viscosidade (Hasannudin et al., 2016). Os resultados obtidos mostram que a combustão do CR tendeu a ser completa. Os motores de combustão indireta, por utilizarem maior taxa de compressão, podem apresentar menor tendência de carbonização dos injetores e de contaminação do lubrificante.

O número de basicidade total (TBN) indica boa condição do lubrificante, pois, recomenda-se substituí-lo caso o TBN atinja metade do valor inicial e, neste caso, apresentou variação máxima de 8,75% em relação à testemunha. A redução do TBN resulta em aumento da oxidação e da viscosidade (PEREIRA, 2018).

Tabela 5. Análise físico-química do lubrificante durante ensaio com óleo vegetal de crambe pré-aquecido.

Tempo corrido experimental	0 h	15 h	30 h	45 h	65 h	80 h	95 h
Referência na substituição do lubrificante	Novo	15 h	30 h	45 h	15 h	30 h	45 h
Fuligem (%)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Viscosidade 40 °C (cSt)	102,0	105,4	103,1	103,7	106,2	104,4	101,7
Diluição (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Água (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ind. Precipitação (%)	0,05	0,10	0,10	0,15	0,05	0,10	0,10
T B N (mg KOH g ⁻¹)	8,23	8,27	8,50	8,95	8,63	8,60	8,03
Insolúveis de Pentano	0,04	0,01	0,02	0,03	0,00	0,03	0,02
Dispersância	100	77	75	83	76	75	74
Índice contaminação	0,1	0,1	0,3	0,2	0,1	0,2	0,3
Perda Ponderada	0	2	8	3	2	5	8
Alumínio (ppm)	0,10	3,80	7,62	12,13	4,96	7,67	11,99
Cobre (ppm)	0,10	3,50	6,24	8,71	3,40	6,21	8,86
Cromo (ppm)	0,10	2,50	4,32	6,56	1,92	3,47	5,97
Ferro (ppm)	0,73	150,0	202,9	256,4	105,2	145,6	182,8
Silício (ppm)	7,47	8,43	10,04	12,60	8,88	9,88	12,38
Chumbo (ppm)	0,10	14,28	19,92	22,79	10,80	14,62	16,68
Zinco (ppm)	1385	1379	1375	1376	1427	1373	1396
Estanho (ppm)	0,10	0,44	1,70	3,19	0,13	1,26	2,54
Cálcio (ppm)	1288	1300	1316	1350	1356	1326	1378
Sódio (ppm)	0,10	0,25	0,58	1,15	0,60	0,78	0,97
Boro (ppm)	0,51	0,69	0,75	0,84	0,62	0,63	0,71
Magnésio (ppm)	1067	1076	1087	1106	1118	1088	1118
Manganês (ppm)	0,10	0,10	0,37	0,87	0,10	0,08	0,50
Fósforo (ppm)	1191	1180	1178	1189	1224	1171	1204
Oxidação (Abs)	5,861	7,054	8,366	9,746	7,177	8,684	10,110
Nitratação (Abs)	5,185	5,647	6,074	6,489	5,660	6,132	6,448
Sulfatação (Abs)	12,461	13,701	14,388	15,421	15,693	14,656	16,086
Fuligem/Por Oxidação	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
Óxido de Silício	Normal	Traços	Traços	Limite	Normal	Traços	Traços
Ligas Ferrosas >5<15 µm	Normal	Atenção	Atenção	Limite	Traços	Atenção	Atenção
Ligas Ferrosas >15<70 µm	-	-	Traços	Traços	-	-	-
Índice Partículas Ferrosas (IPF)	6	59	103	180	61	95	115

Houve aumento de conteúdo da maioria dos elementos, os quais podem ser advindos de desgaste do motor, do ar de admissão ou do combustível (Tabela 5). Alumínio, cobre, cromo, ferro, chumbo e estanho são característicos de desgaste do motor (Hasannuddin et al., 2016).

O alumínio, o silício e o ferro também podem ter origem externa, pois, estão presentes em partículas (característicos nos solos da região) em suspensão no ar atmosférico (Hasannuddin et al., 2016). O motor utilizado possuía, como composição original, filtro de ar do sistema de admissão do tipo banho de óleo, sem filtro de lubrificante.

Observou-se presença elevada de elementos metálicos. Estas podem catalisar a oxidação do lubrificante. Sendo assim houve redução da vida útil do lubrificante com uso do CR pré-aquecido, apesar de as causas não estarem necessariamente ligadas ao combustível.

Alguns elementos estavam presentes em grandes concentrações no lubrificante como composição inicial, como o zinco, cálcio, magnésio e fósforo (maior que 1.000 ppm). Estes fazem parte dos aditivos que agem como protetores das superfícies metálicas (Hasannuddin et al., 2016; Pinheiro et al., 2017).

Ainda, os elementos fósforo, cálcio, magnésio e sódio, cujas concentrações aumentaram, estes como o potássio, podem provir do OV. A temperatura média do lubrificante foi 57,46 °C, sendo maior registro de 78,17 °C, inferior ao valor crítico de 120 °C.

No tempo zero, a pressão de compressão era de 1,52 MN m⁻² (15,5 kgf cm⁻²) e, após 100 horas, obteve-se valor médio de 1,70 MN m⁻² (17,38 kgf cm⁻²). Esta variação se encontra dentro de aceitável pelo fabricante. Sendo assim, considera-se que não houve danos na câmara de combustão proporcionados por desgaste e/ou carbonização.

Para o sistema de injeção, realizaram-se duas verificações, além do tempo zero. Em 50 h, a pressão de abertura diminuiu 0,49 MN m⁻² (5 kgf cm⁻²), dentro do aceitável pelo fabricante. No teste de estanqueidade, observaram-se valores adequados, porém, o teste de atomização apresentou formação de gotas grandes. Neste caso realizou-se nova regulagem da pressão de abertura do injetor. Na avaliação de 100 h, houve aumento da pressão de abertura do injetor de 14,2 para 15,6 MN m⁻².

O teste de estanqueidade também indicou excesso de retorno de combustível, provavelmente proporcionado por desgaste no corpo do elemento por excesso de pressão de abertura ou de temperatura de trabalho. O teste de atomização mostrou-se normal. Como foi verificado excesso de pressão de abertura do injetor, este foi calibrado novamente, porém, o teste de estanqueidade não se mostrou adequado. Houve desgaste e foi observado carbonização, de difícil remoção, e sinais de superaquecimento (Figura 2).



Figura 2. a) carbonização no bico injetor; b) indicativo de super aquecimento do bico injetor.

4 Conclusões

- O consumo do óleo de crambe pré-aquecido foi superior ao de petrodiesel e a diferença entre os tratamentos foi mais expressiva nos ensaios sob carga;
- A perda de potência relativa do óleo de crambe pré-aquecido foi superior, exceto para a condição de inserção da maior carga;
- A eficiência térmica foi igual para os dois combustíveis;
- Não houveram anomalias nas temperaturas de líquidos de arrefecimento e de lubrificação;
- Não houve evidência de degradação do lubrificante devido a contaminantes advindos do uso do óleo de crambe pré-aquecido;
- Identificou-se desgaste e superaquecimento do elemento de injetor.

Agradecimentos

À Fundação Araucária pelo apoio financeiro e à CAPES pela concessão de bolsa de mestrado do primeiro autor.

Referências bibliográficas

Agrawal BN, Sinha S, Kuzmin AV and Pinchuk VA (2019) Effect of vegetable oil share on combustion characteristics and thermal efficiency of diesel engine fueled with different blends. *Therm Sci Eng Prog.* 14:100404. Doi: 10.1016/j.tsep.2019. 100404

- Almeida SCA de, Belchior CR, Nascimento MVG, Vieira LSR and Fleury G (2022) Performance of a diesel generator fuelled with palm oil. *Fuel* (81)16: 2097-2102. Doi: 10.1016/S0016-2361(02)00155-2
- Altin R, Çetinkaya S and Yücesu HS (2001) The potential of using vegetable oil fuels as fuel for diesel engines. *Energy Conversion and Management* (42):529-538. Doi: 10.1016/S0196-8904(00)00080-7
- ASTM - American Society for Testing and Materials (2006) ASTM D2445-06: Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity), West Conshohocken, PA, United States.
- ASTM - American Society for Testing and Materials (2017) ASTM D240-17: Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter, West Conshohocken, PA, United States.
- Balakrishna B (2012) Vegetable oil as fuel in C.I. engine: problems and possible solutions. *International Journal of Engineering Science and Technology* (4)11: 4687-4690.
- Bakthavathsalam S, Gound RI and Muniappan, K (2019) The influence of ceramic-coated piston crown, exhaust gas recirculation, compression ratio and engine load on the performance and emission behavior of kapok oil-diesel blend operated diesel engine in comparison with thermal analysis. *Environ Sci Pollut Res.* (26):24772-94. Doi: 10.1007/s11356-019-05678-x
- Brasil - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2013) Resolução ANP N° 50, de 23.12.2013. Anexo: Regulamento técnico ANP N° 4/2013.
- Brasil - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2014) Resolução ANP N° 45, de 25.08.2014. Anexo: Regulamento técnico ANP N° 3/2014.
- Chauhan BS, Kumar N, Jun YD and Lee KB (2010) Performance and emission study of preheated Jatropha oil on medium capacity diesel engine. *Energy* (35) 6: 2484-2492. Doi: 10.1016/j.energy.2010.02.043
- Chidambaranathan B, Kumarasami DP, Soudararajan G and Ramachandran T (2022) Performance and environmental impact assessment of diesel engine operating on high viscous punnai oil-diesel blends. *Environ Sci Pollut Res.* Doi: 10.1007/s11356-022-20211-3
- Chidambaranathan B, Seeni Kannan P e Devan PK (2020) Performance, emission and combustion characteristics of a DI diesel engine using blends of punnai oil biodiesel and diesel fuel. *Therm Sci* (24):13-25. Doi: 10.2298/TSCI180325233B
- Delalibera, HC, Weirich Neto, PH e Martini, J. (2009) Utilização de óleo de girassol como combustível em unidade de potência monocilindro ciclo diesel. *Revista de Engenharia e Tecnologia* (1)1:36-49.
- Delalibera HC, Johann AL, Figueredo PRA de, Toledo A, Weirich Neto PH and Ralisch R (2017) Performance of diesel engine fuelled with four vegetable oils, preheated and at engine working temperature. *Engenharia Agrícola* (37)2: 302-314. Doi: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v37n2p302-314/2017
- Hasannuddin AK, Wira JY, Sarah S, Aqma WMNWS, Hadi ARA, Hirofumi N, Aizam SA, Aiman MAB, Watanabe S, Ahmad MI and Azrin MA (2016) Performance, emissions and lubricant oil analysis of diesel engine running on emulsion fuel. *Energy Conversion and Management* (117):548-557. Doi: 10.1016/j.enconman.2016.03.057
- Hellier P, Ladommatos N e Yusaf T (2017) The influence of straight vegetable oil fatty acid composition on compression ignition combustion and emissions. *Fuel* (143):131-43. Doi: 10.1016/j.fuel.2014.11.021
- Jain NL, Soni SL, Poonia MP, Sharma D, Srivastava AK and Jain H (2017) Performance and emission characteristics of preheated and blended thumba vegetable oil in a compression ignition engine. *Applied Thermal Engineering* (113):970-979. Doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.10.186
- Kalam MA, Masjuki HH, Jayed MH e Liaquat AM (2011) Características de emissão e desempenho de um motor diesel de ignição indireta alimentado com óleo de cozinha usado. *Energy* (36):397e402399. Doi: 10.1016/j.energy.2010.10.026
- Kothandan A and Masimalai S (2018) Cleaner emissions from a DI-diesel engine fueled with mahua oil and low carbon ethanol-hydrogen in dual fuel mode. *Environ Sci Pollut Res.* (25):32684-32693. Doi: 10.1007/s11356-018-3166-9

- Mat SC, Idroas MY, Hamid MF and Zainal ZA (2018) Performance and imissions of straight vegetable oils and its blends as a fuel in diesel engine: a review. *Renew Sustain Energy Rev.* (82): 808-823. Doi: 10.1016/j.rser.2017.09.080
- Martini J, Delalibera HC e Weirich Neto PH (2012) Consumo de óleo de soja pré-aquecido por motor diesel. *Revista Brasileira de Agrociência* (18)2: 213-220
- Nwafor OMI (2003) The effect of elevated fuel inlet temperature on performance of diesel engine running on neat vegetable oil at constant speed conditions. *Renewable Energy* (28):171-181. Doi: 10.1016/S0960-1481(02)00032-0
- Pinheiro CT, Ascensão VR, Cardoso CM, Quina MJ and Gando-Ferreira LM (2017) An overview of waste lubricant oil management system: Physicochemical characterization contribution for its improvement. *Journal of Cleaner Production* (150):301-308. Doi: 10.1016/j.jclepro.2017.03.024
- Prabu PM, Sivaprakasam P, Perumal V, Kim SC, Balasubramani P and Kumar SS (2021) Emission Measurement Analysis of Sapodilla Seed Oil Blending Fueled IC Engine. *Journal of Nanomaterials* (Article ID 2385356). Doi: 10.1155/2021/2385356
- Pradhan P, Raheman H and Padhee D (2014) Combustion and performance of a diesel engine with preheated *Jatropha curcas* oil using waste heat from exhaust gas. *Fuel* (115):527-533. Doi: 10.1016/j.fuel.2013.07.067
- Praubu SS, Asokan MA, Prathiba S, Ahmed S and Puthean G (2018) Effect of additives on performance, combustion and emission behavior of preheated palm oil/diesel blends in DI diesesel engine. *Renew Energy* (122):196-205. Doi: 101016/j.renene.2018.01.068
- Qi DH, Jin X, Li K, Zhang C and Wang T (2021) Experimental study of castor oil–diesel–n-butanol blends used in a CRDI diesel engine with double injection strategy. *International Journal of Sustainable Energy* (40)12. Doi:10.1080/14786451.2021.2016760
- Ramakrishnan M, Rathinam TM and Viswanathan K (2018) Comparative studies on the performance and emissions of a direct injection diesel engine fueled with neem oil and pumpkin seed oil biodiesel with and without fuel preheater. *Environ Sci Pollut Res.* (25):4621-4631. Doi: 10.1007/s11356-017-0838-9
- Schlosser JF, Machado PRM e Camargo MN (2007) Desempenho de misturas pré-aquecidas de óleo de soja cru e Diesel como combustível para motores agrícolas. *Ciência Rural* (37)5:1329-1335. Doi: 10.1590/S0103-84782007000500017
- Sidibé SS, Blin J, Vaitilingom G and Azoumah Y (2010) Use of crude filtered vegetable oil as a fuel in diesel engines state of the art: Literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (14)9:2748-2759. Doi: 10.1016/j.rser.2010.06.018
- Varuvel EG, Sonthalia A, Subramanian T and Aloui F (2018) NOx-smoke trade-off characteristics of minor vegetable oil blends synergy with oxygenate in a commercial CI engine. *Environ Sci Pollut Res.* (25):35715-35724. Doi: 10.1007/s11356-018-3484-y
- Venkatesan EP, Kandhasamy A, Sivalingam A, Kumar AS, Ramalingam KM, Joshua PJT and Balasubramanian D (2019) Performance and emission reduction characteristics of cerium oxide nanoparticle-water emulsion biofuel in diesel engine with modified coated piston. *Environ Sci Pollut Res.* (26):27362-27371. Doi: 10.1007/s11356-019-05773-z
- Wander PR, Altafini CR, Moresco AL, Colombo AL and Lusa D (2011) Performance analysis of a mono-cylinder diesel engine using soy straight vegetable oil as fuel with varying temperature and injection angle. *Biomass and Bioenergy* (35)9:3995-4000. Doi: 10.1016/j.biombioe.2011.06.024