

Venturi: dispositivo de cavitação hidrodinâmica para acelerar a síntese de biodiesel

Venturi: hydrodynamic cavitation device to accelerate biodiesel synthesis

Guilherme Bassi Rezende¹ , David Maikel Fernandes² , Deusmaque Carneiro Ferreira¹ ,
Julio Cesar de Souza Inácio Gonçalves^{1*} 

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial do Venturi para a síntese de biodiesel a partir de óleo comestível residual em rota metilica. Para tanto, foi construído em escala de laboratório um aparato experimental constituído de um tanque de 5,2 L e um dispositivo Venturi projetado para produzir o fenômeno de cavitação. A produção de biodiesel foi avaliada em três diferentes pressões de entrada do Venturi: 4,4; 2,9; e 1,4 bar. Os teores de ésteres metílicos foram determinados por cromatografia gasosa. O tempo de síntese de 5,2 L de biodiesel, com o Venturi, foi de 23,2 segundos (ou 4,5 segundos por litro de biodiesel produzido), o que equivale a um único ciclo de passagem pelo sistema a pressão máxima (4,4 bar). Nessa condição, o rendimento dos teores de ésteres foi superior a 98%. Não há na literatura outro caso de síntese tão rápida como a encontrada neste trabalho. A caracterização do biodiesel mostrou que os parâmetros viscosidade cinemática, índice de acidez, ponto de entupimento a frio e massa específica estão dentro dos limites estabelecidos pela Agência Nacional de Petróleo. A comparação com outros estudos da literatura mostrou que o Venturi é superior às placas de orifício na síntese de biodiesel.

Palavras-chave: cavitação; transesterificação; gerenciamento de resíduos; biocombustível.

ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate the potential of Venturi in the synthesis of biodiesel from residual edible oil in a methyl route. For this purpose, an experimental apparatus consisting of a 5.2 L tank and a Venturi device designed to produce the cavitation phenomenon was constructed in laboratory scale. Biodiesel production was evaluated at three different Venturi inlet pressures: 4.4; 2.9; and 1.4 bar. Methyl esters contents were determined by gas chromatography. Biodiesel synthesis time with the Venturi device was 23.2 seconds (or 4.5 seconds per liter of biodiesel produced), which is equivalent to a single cycle of the system at maximum pressure (4.4 bar). In this condition, the yield of the ester contents was greater than 98%. There is no other case of synthesis as fast as that found in this work. The biodiesel characterization showed that the parameters kinematic viscosity, acidity index, cold clogging point, and specific mass are within the limits established by National Agency of Petroleum Natural Gas and Biofuels (*Agência Nacional de Petróleo*). The use of Venturi, as a cavitation device, was shown to be more efficient in biodiesel synthesis than other devices, such as orifice plates.

Keywords: cavitation; transesterification; waste management; biofuel.

INTRODUÇÃO

O aumento da demanda de energia em virtude do crescimento populacional e industrial levou ao questionamento sobre o consumo das fontes fósseis, como petróleo e carvão mineral, bem como sobre os impactos ambientais provenientes da queima dessas fontes não renováveis (KULKARNI; DALAI, 2006). As pesquisas relacionadas ao uso de fontes renováveis de energia têm aumentando substancialmente devido às vantagens ambientais, como redução de gases poluentes, biodegradabilidade e menor toxicidade em relação aos derivados fósseis (LÓPEZ; GOODWIN JR.; BRUCE, 2007; GUIMARÃES *et al.*, 2018).

Nesse contexto, o biodiesel ganhou destaque sobre o diesel principalmente devido às baixas emissões de gases de efeito estufa, derivados sulfurosos, particulados, além da possibilidade da utilização de óleos comestíveis residuais para a sua produção (KOZERSKI; HESS, 2006; SHARIF *et al.*, 2007; BARROS; WUST; MEIER, 2008). Estima-se que de 70 a 95% dos custos do processo de produção do biodiesel resultem da matéria-prima utilizada. Dessa forma, o óleo comestível residual é uma alternativa relevante, pois reduz os custos da matéria-prima entre 50 e 60%, além de não competir diretamente com as matérias-primas refinadas (WANG *et al.*, 2007; SADEGHINEZHAD *et al.*, 2014). Além disso, corrobora o destino final ambientalmente adequado, minimizando, assim, os impactos nos recursos hídricos devido ao descarte incorreto desse resíduo, uma

¹Universidade Federal do Triângulo Mineiro - Uberaba (MG), Brasil.

²Universidade Federal de Uberlândia - Uberlândia (MG), Brasil.

*Autor correspondente: julio.goncalves@uftm.edu.br

Conflitos de interesse: os autores declaram não haver conflito de interesses.

Financiamento: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig).

Recebido: 07/06/2019 - **Aceito:** 05/11/2019 - **Reg. ABES:** 20190177

vez que 1 L de óleo comestível residual contamina aproximadamente 1 milhão de litros de água (ENCINAR; GONZÁLEZ; RODRÍGUEZ-REINARES, 2005).

As técnicas convencionais de síntese de biodiesel utilizam temperaturas na faixa de 60 a 75°C, pressão atmosférica e tempo de reação de 60 a 90 min (LORETO *et al.*, 2005). A taxa de produção é tipicamente limitada pela transferência de massa. Uma mistura de óleo vegetal ou gordura animal com álcool não é totalmente miscível, conduzindo a uma baixa taxa de reação (LAOSUTTIWONG *et al.*, 2018). Nos últimos anos, várias tecnologias foram desenvolvidas para aumentar a taxa de transferência de massa e, consequentemente, a taxa de reação, tais como: destilação reativa (BANCHERO; GOZZELINO, 2015), misturador estático, micro-ondas (BOKHARI *et al.*, 2015), cavitação ultrassônica e cavitação hidrodinâmica (GOGATE, 2008).

A cavitação hidrodinâmica é considerada a tecnologia mais eficiente para produção de biodiesel, já que intensifica a mistura e as colisões efetivas entre os reagentes, propiciando redução no tempo de síntese (KELKAR; GOGATE; PANDIT, 2008; CVETKOVIC; KOMPARE; KLEMENCIC, 2015). Ela é gerada pela passagem de um líquido por meio de constrição física (dispositivo de cavitação), tais como uma placa de orifício (HILARES *et al.*, 2017) e um Venturi (CHOI *et al.*, 2018). Quando a pressão na constrição cai abaixo da pressão de vapor do líquido, microbolhas são geradas e, posteriormente, implodidas quando a pressão do líquido é recuperada, a jusante da constrição. De modo geral, a cavitação hidrodinâmica pode ser compreendida como um fenômeno de formação, crescimento e implosão (colapso) de microbolhas de vapor (cavidades) em meio líquido (BATISTA; ANHÊ; GONÇALVES, 2017; RAJORIYA *et al.*, 2018). Esse fenômeno ocorre em um pequeno intervalo de tempo e libera grande quantidade de energia, gerando pontos quentes (1.000 a 10.000 K) e regiões de elevadas pressões, entre 10 e 500 MPa (GOGATE; KABADI, 2009).

Santos (2009) verificou redução do tempo de síntese do biodiesel (≈ 20 min) com o uso de um sistema de cavitação hidrodinâmica, quando comparado aos métodos convencionais de produção (≈ 60 min). Ghayal, Pandit e Rathod (2013) estudaram a influência de diferentes geometrias de placas de orifício sobre a síntese de biodiesel. Eles mostraram que a microturbulência, gerada pela implosão das microbolhas de cavitação, reduz a resistência à transferência de massa. A placa com múltiplos orifícios (25) e com menor diâmetro de furos (2 mm) apresentou a maior eficiência de síntese (95% de conversão usando 10 min de tempo de reação). Chuah *et al.* (2015) encontraram que quando a cavitação hidrodinâmica é utilizada no lugar de um misturador mecânico, a eficiência de produção aumenta 833% e o tempo de reação reduz 600%. Para realizar essa comparação, os pesquisadores utilizaram óleo comestível residual e o processo de transesterificação com catalise alcalina. Bokhari *et al.* (2016) avaliaram a influência da pressão de entrada das câmaras de cavitação hidrodinâmica e a geométrica das placas de orifício sobre a síntese de biodiesel. Eles obtiveram a seguinte configuração ótima: placa com 21 orifícios, diâmetro dos orifícios de 1 mm e pressão de entrada de 3 bar. Com essa configuração, eles concluíram que a cavitação hidrodinâmica tem 5 vezes menor tempo de reação; 6,5 vezes maior eficiência energética; e 4,9 vezes maior taxa de reação do que a agitação mecânica.

Apesar de vários trabalhos mostrarem que a cavitação hidrodinâmica é vantajosa em comparação a outras tecnologias usadas para síntese de biodiesel, estudos que avaliam novos dispositivos, além das placas de orifício, ainda são necessários. Kuldeep e Saharan (2016) compararam a atividade cavitacional (*i.e.*, intensidade de colapso das microbolhas de cavitação) de dispositivos Venturi e

de placas de orifício. Eles concluíram que o Venturi apresenta maior atividade cavitacional do que as placas de orifício. Esse resultado foi confirmado por Alves *et al.* (2019), os quais mostraram que o potencial de remoção de demanda química de oxigênio (DQO) do Venturi é maior do que o das placas de orifício. O potencial de remoção de DQO está diretamente relacionado à atividade cavitacional. A maior intensidade de colapso das microbolhas geradas no Venturi pode reduzir ainda mais o tempo de reação para síntese do biodiesel, uma vez que quanto maior o colapso das microbolhas, maior a microturbulência do reator de cavitação e, consequentemente, maior a taxa de transferência de massa.

Diante do exposto, o objetivo deste estudo foi avaliar o potencial do Venturi como dispositivo de cavitação hidrodinâmica na síntese de biodiesel a partir de óleo comestível residual em rota metilica.

METODOLOGIA

Materiais e procedimentos de preparo da amostra

O óleo comestível residual oriundo do restaurante universitário da Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM) foi utilizado como matéria-prima para síntese do biodiesel. As propriedades físico-químicas do óleo comestível residual são apresentadas na Tabela 1. Essas propriedades estão diretamente relacionadas ao rendimento e à qualidade dos biodieseis, pois durante o aquecimento do óleo no processo de fritura ocorrem diversas reações químicas (hidrólise, oxidação, polimerização, craqueamento) que degradam o óleo (BARROS; WUST; MEIER, 2008).

O óleo comestível residual foi submetido à filtração simples (Whatman nº 1), a fim de reter as partículas grosseiras em suspensão, como restos de materiais fritos. O biodiesel de óleo residual foi sintetizado por transesterificação alcalina em rota metilica. Inicialmente, em um béquer de 1.000 mL foram adicionados hidróxido de sódio (NEON 98%) na proporção de 0,7% da massa de óleo residual e metanol (ANIDROL 99,8%) na razão molar de 6:1 (metanol/óleo). Promoveu-se a homogeneização completa do catalisador no metanol sob agitação constante de 250 rpm por 1 minuto. Os reagentes eram adicionados no tanque de alimentação do sistema de cavitação hidrodinâmica até que o volume atingisse 5,2 L.

Dispositivo de cavitação hidrodinâmica e métodos de análise

A representação esquemática do aparato experimental usado para produzir o fenômeno de cavitação hidrodinâmica é mostrada na Figura 1. O sistema foi construído em circuito fechado. Ele é constituído de um tanque de alimentação, uma bomba periférica de 1 cv de potência (KSB®Hydrobloc, modelo P1000), três válvulas de controle, dois manômetros, um dispositivo Venturi, tubulações

Tabela 1 – Caracterização físico-química do óleo comestível residual utilizado na síntese de biodiesel.

Propriedades (unidades)	Óleo comestível residual
Viscosidade cinemática (mm ² .s ⁻¹ , a 40°C)	42,72 ± 0,11
Índice de acidez (mg de KOH g ⁻¹)	2,65 ± 0,25
Ponto de entupimento a frio (°C)	-2 ± 0,10
Índice de peróxido (meq/kg)	14,77 ± 0,80
Massa específica 20°C (kg.m ⁻³)	921,50 ± 1,80

Fonte: elaborada pelos autores (2019).

e conexões. O Venturi foi dimensionado com base no estudo de Bashir *et al.* (2011), os quais utilizaram *computational fluid dynamics* (CFD) para otimizar parâmetros geométricos de dispositivos de cavitação. As dimensões do Venturi, construído em formato retangular, são apresentadas na Figura 1.

A intensidade de cavitação era controlada utilizando-se as válvulas 2 (V2) e 3 (V3), respectivamente, as quais eram ajustadas para produzir a pressão desejada em P1. As pressões em P1 (montante do Venturi) e em P2 (jusante do Venturi) foram medidas utilizando manômetros digitais (PCT-400Ri, Full Gauge) com acurácia de 0,1 bar e faixa de medição de 0 a 34,4 bar. As temperaturas dos experimentos foram controladas (25°C) por um trocador de calor composto de tubulação de cobre e bomba para recirculação de água fria. A vazão do escoamento foi controlada pela válvula 2 e medida com o uso de placa de orifício devidamente calibrada (coeficiente de vazão $C_d = 0,70$).

A produção de biodiesel foi avaliada em três diferentes pressões de entrada do Venturi (P1): 4,4; 2,9; e 1,4 bar. De acordo com Gągol, Przyjazny e Boczkaj (2018), P1 é um dos parâmetros mais importantes adotados para avaliar a eficiência da cavitação hidrodinâmica. O número de passagens (número de ciclos) pelo dispositivo Venturi foi fixado em 1 em todos os experimentos. Dessa forma, quando o tempo de detenção hidráulico (volume do tanque/vazão do sistema) de cada experimento era atingido, o sistema de cavitação era desligado e a amostra era coletada. Essa condição experimental pode viabilizar, no futuro, a

produção de biodiesel em regime contínuo, uma vez que a solução passa pelo dispositivo de cavitação apenas uma vez.

Na Tabela 2 são apresentadas as características do escoamento no dispositivo Venturi utilizado neste estudo.

Transcorrido o tempo reacional, a mistura foi levada ao funil de separação, permanecendo em repouso por 5 minutos para a separação das fases biodiesel e glicerina. Na sequência, o biodiesel foi lavado com 4 porções de 50 mL de água destilada quente (~ 85°C) até a obtenção de um pH em torno de 7. A água residual contida na amostra de biodiesel foi removida com o uso de rota evaporador (IKA RV3) durante 1 hora, a 85 rpm e 80°C. Em seguida, o biodiesel foi caracterizado empregando-se os seguintes parâmetros físico-químicos: viscosidade cinemática (ASTM D455), índice de acidez (EN 14 104), ponto de entupimento a frio (ASTM D6371), índice de peróxido (*American oil Cheists' Society, official method Cd8-53*) e massa específica (ASTM D4052).

O teor de ésteres do biodiesel foi determinado usando-se cromatógrafo gasoso modelo 7890^a (CG, *Agilent Technologies, USA*), coluna capilar CPWAX 52CB (30 m × 0,25 mm × 0,15 μm) e volume de injeção de 0,5 μL (injetor a 250°C). A temperatura do forno foi de aproximadamente 170°C e a do detector de ionização em chama (FID), de 390°C, com taxa de aquecimento de 2 mL.min⁻¹. O gás hidrogênio foi mantido na pressão de 200 kPa.

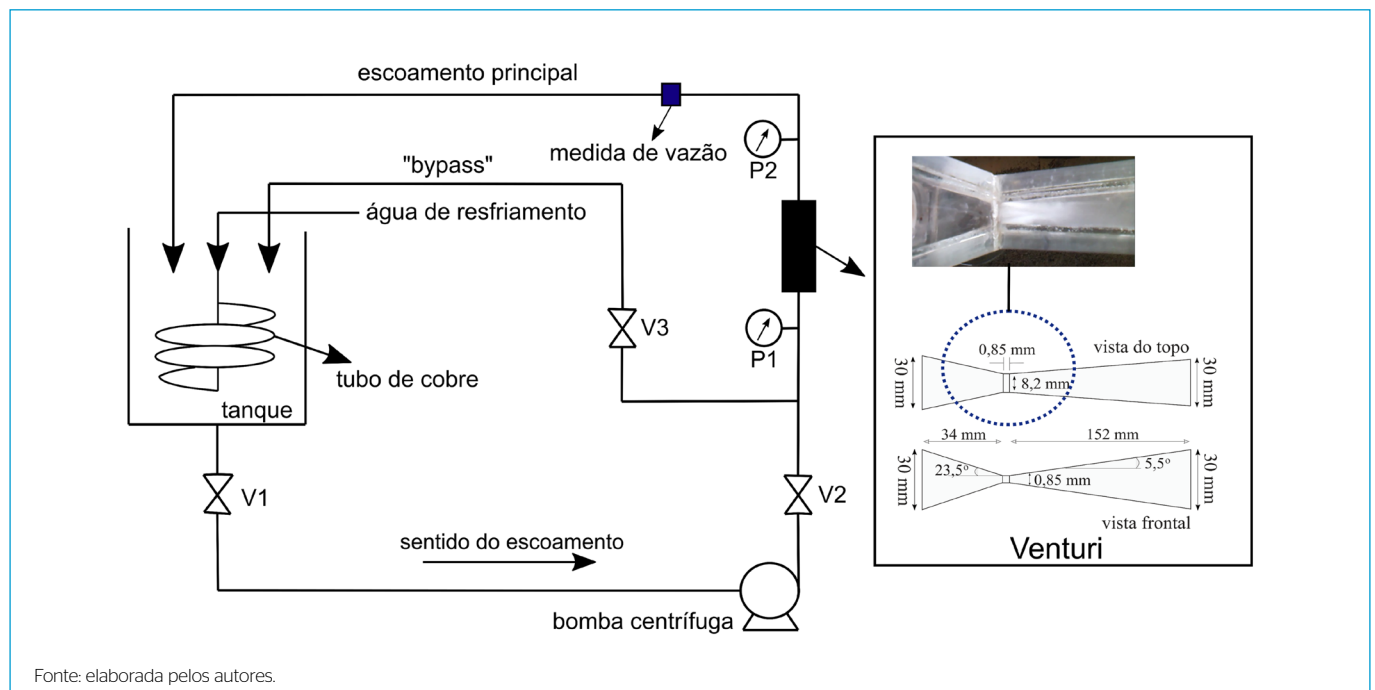


Figura 1 - Sistema de cavitação hidrodinâmica utilizado para produzir biodiesel. V1 válvula para a amostragem. V2 e V3 válvulas para o controle da vazão. P1 e P2 pressões a montante e a jusante do Venturi, respectivamente.

Tabela 2 - Características do escoamento no dispositivo de cavitação.

Experimento	P ₁ (bar)	P ₂ (bar)	U (m.s ⁻¹)	Q (L.s ⁻¹)	t (s)
E1	4.400	0.058	31.000	0.224	23.200
E2	2.900	0.047	26.297	0.190	27.600
E3	1.400	0.038	20.208	0.146	35.500

t: tempo de detenção hidráulico; Q: vazão no sistema.

Fonte: elaborada pelos autores (2019).

As análises foram realizadas em triplicata. A análise de éster foi realizada de acordo com a EN14103 usando metileptadecanoato como padrão interno, sendo as amostras e o padrão diluídos em n-heptano. A identificação dos ésteres metílicos foi fundamentada nos tempos de retenção em relação ao padrão interno.

A composição do teor de ésteres foi calculada de acordo com as áreas dos picos. O resultado para o teor de ésteres foi expresso como a fração percentual em massa usando o metileptadecanoato. A porcentagem de ésteres de ácido graxo obtidos foi calculada por meio da Equação 1.

$$C = \frac{(\sum A) - AEI}{AEI} \times \frac{(CEI \times VEI)}{W} \times 100 \quad (1)$$

Em que:

ΣA = área total dos picos partindo do éster de metila em C14 até aquele em C24:1;

AEI = área do pico correspondente ao metileptadecanoato;

CEI = é a concentração (mg.mL^{-1}) de solução de metileptadecanoato;

VEI = volume (mL) de solução de metileptadecanoato;

W = massa da amostra (mg).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Produção de ésteres metílicos no sistema de cavitação hidrodinâmica

A porcentagem de conversão de ésteres metílicos produzidos no sistema de cavitação hidrodinâmica é mostrada na Tabela 3. A maior porcentagem de conversão ocorreu no E1, 98,3%, e a menor, no E3, 88,5% (o limite mínimo de aceitabilidade pela ANP é de 96%). Como o E3 não atingiu o limite mínimo de aceitabilidade da ANP, consideramos que as condições experimentais foram insuficientes para a síntese de biodiesel. Esse resultado mostra que a pressão de entrada no dispositivo Venturi (P1) é um parâmetro extremamente importante para a produção de biodiesel. Como visto na Tabela 2, E1 foi o experimento que apresentou maior P1 (4,4 bar) e E3 foi

o que apresentou menor P1 (1,4 bar); enquanto E2 (P1 = 2,9 bar) foi condição intermediária entre E1 e E3.

O resultado obtido é atribuído ao fato de que: quanto maior a pressão de entrada, maior o número de microbolhas geradas no dispositivo de cavitação e maior a quantidade de implosão (colapso) de microbolhas na zona de recuperação da pressão (BASHIR *et al.*, 2011). O aumento do colapso das microbolhas produz elevação da microturbulência e da taxa de transferência de massa. No entanto, isso não significa que o aumento contínuo de P1 levará a taxas cada vez maiores de transferência de massa. Alves *et al.* (2019) mostraram que o excesso de microbolhas pode produzir um fenômeno conhecido como nuvens de cavitação (coalescência entre as microbolhas), o qual reduz a intensidade de implosão das microbolhas. Chuah *et al.* (2016), usando placas de orifício como dispositivo de cavitação, observaram que a porcentagem de conversão de ésteres metílicos se elevou quando a pressão de entrada passou de 1 para 2 bar. Entretanto, o mesmo não ocorreu quando a pressão aumentou de 2 para 3 bar. Maddikeri, Gogate e Pandit (2014) mostraram que quando a pressão aumenta de 2 para 3 bar a produção de biodiesel aumenta de 79 a 89%, mas quando a pressão passa de 3 para 4 bar não há significativo aumento da produção de biodiesel. Eles verificaram também que um subsequente aumento da pressão de 4 para 5 bar resulta em diminuição da produção de biodiesel de 89 para 85%. Essa redução provavelmente está associada à coalescência das microbolhas geradas no fenômeno de cavitação hidrodinâmica (nuvens de cavitação).

Na Tabela 4 é mostrada a comparação, entre este estudo e outros trabalhos encontrados na literatura, do tempo de reação (para síntese de 1 L de biodiesel) e da conversão de ésteres metílicos. Observa-se que o dispositivo Venturi utilizado neste estudo (P1 = 4,4 bar) produziu a maior porcentagem de conversão em um pequeno tempo de reação (4,5 segundos = 23,2 segundos/5,2 L). A melhor performance do dispositivo Venturi em comparação às placas de orifício, conforme visto na Tabela 4, pode ser explicada com base no estudo desenvolvido por Kuldeep e Saharan (2016). Esses autores mostraram que, nas placas de orifício, as microbolhas são geradas na entrada do orifício e implodidas já na saída do orifício. Esse fato produz microbolhas menores, já que elas não tiveram espaço

Tabela 3 - Teor de ésteres metílicos obtidos a partir dos triglicerídeos contidos no óleo comestível residual por transesterificação alcalina (dispositivo Venturi).

Ésteres metílicos	NC/ND	% (massa) E1	% (massa) E2	% (massa) E3
Palmitato de metila	C16:0	5,5 ± 0,1	5,5 ± 0,1	5,5 ± 0,1
Palmitoleato de metila	C16:1	1,2 ± 0,2	1 ± 0,2	0,8 ± 0,2
Estearato de metila	C18:0	4 ± 0,1	4 ± 0,1	4 ± 0,1
Oléico	C18:1	79,6 ± 0,5	77,1 ± 0,5	70,2 ± 0,5
Linoléico	C18:2	n.d.	n.d.	n.d.
Linolenato de metila	C18:3	n.d.	n.d.	n.d.
Araquidato de metila	C20:0	2,1 ± 0,1	2,1 ± 0,1	2,1 ± 0,1
Gadoleato de metila	C20:1	n.d.	n.d.	n.d.
Behenato de metila	C22:0	2,1 ± 0,1	2,1 ± 0,1	2,1 ± 0,1
Eruciato de metila	C22:1	n.d.	n.d.	n.d.
Lignocérico	C24:0	3,8 ± 0,1	3,8 ± 0,1	3,8 ± 0,1
Σ Saturados	-	175 ± 0,1	175 ± 0,1	175 ± 0,1
Σ Insaturados	-	80,8 ± 0,1	78,1 ± 0,1	71 ± 0,1
% Conversão	-	98,3 ± 0,1	95,6 ± 0,1	88,5 ± 0,1

NC: número de carbonos; ND: número de duplas ligações, n.d.: não detectado.

Fonte: elaborada pelos autores (2019).

para crescer, e de baixa intensidade de colapso. Por outro lado, em um Venturi as microbolhas são produzidas na entrada da garganta e estendem-se até a seção divergente, na qual tornam-se maiores. Quando essas microbolhas implodem, há elevada intensidade de colapso e maior geração de microturbulências.

Características físico-químicas do biodiesel produzido

Os valores de viscosidade cinemática, índice de acidez, ponto de entupimento a frio, índice de peróxido e massa específica dos produtos obtidos nas reações de transesterificação metílica processadas nos experimentos E1, E2 e E3 são apresentados na Tabela 5.

Os valores de viscosidade para os produtos obtidos nos experimentos E1, E2 e E3 estão dentro do limite estabelecido pela ANP. A avaliação da viscosidade de um combustível é relevante para a utilização em motores de injeção por combustão, exercendo elevada influência na autoignição, na injeção e na circulação (LIN; WU; CHANG, 2007). Valores elevados para a viscosidade reduzem significativamente o fluxo de combustível — a ANP recomenda um limite de $6,0 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$. Sabe-se que o aumento do número de insaturação na estrutura molecular do biodiesel contribui significativamente para reduzir o valor da sua viscosidade (KNOTHE; STEIDLEY, 2005).

Os valores dos índices de acidez encontrados foram inferiores ao limite estabelecido pela ANP (0,5 mg de KOH por grama de biodiesel). O índice de acidez quantifica o teor de ácidos graxos livres de uma referida amostra de biodiesel. A presença de ácidos graxos livres no óleo comestível residual favorece a reação de saponificação, diminuindo, assim, o rendimento de biodiesel na reação de transesterificação alcalina (LEUNG; WU; LEUNG, 2010). Normalmente, a acidez do biodiesel está relacionada com a matéria-prima empregada na síntese. Nos óleos comestíveis residuais, o aumento de temperatura na presença de água favorece a hidrólise dos ésteres, liberando os ácidos graxos livres (RAMOS *et al.*, 2011). O aumento da acidez do biodiesel pode acelerar a oxidação dos tanques de armazenagem e das estruturas metálicas do motor, além de intensificar a

degradação do biodiesel em sistemas de injeção que operam com temperaturas mais elevadas (TALEBIAN-KIAKALAEI; AMIN; MAZAHARI, 2013). Índices de acidez elevados foram encontrados por Morais *et al.* (2013) em amostras de óleos comestíveis residuais submetidos a elevadas temperaturas em contato com a umidade oriunda dos alimentos.

O ponto de entupimento é a temperatura na qual ocorre a formação de ceras e pequenos cristais que podem interromper o fluxo do biocombustível, provocando o entupimento do filtro. Os valores encontrados para o ponto de entupimento a frio para E1, E2 e E3 foram inferiores 9°C , o qual é o limite estabelecido pela norma americana (ASTM D6371). Essa é uma propriedade importante, pois indica a possibilidade de solidificação do biodiesel. O valor aceito depende do mês do ano, do clima da região e da temperatura média (SANTOS *et al.*, 2002).

Embora o índice de peróxido não seja um parâmetro intrínseco dos padrões do biodiesel vigentes pela ANP, sua determinação é fundamental para avaliar a estabilidade oxidativa do biodiesel e as condições de armazenamento. Ele indica o grau quantitativo de insaturações dos ésteres formados no biodiesel (RAMOS *et al.*, 2011).

À medida que se eleva a concentração de alquilésteres com alto grau de instauração na composição do biodiesel, maiores serão a degradação térmica e a taxa de oxidação, reduzindo-se, assim, o tempo de estocagem do biocombustível (COSTA *et al.*, 2013). Os valores de índice de peróxidos apresentados na Tabela 5 foram superiores aos resultados das misturas de ésteres a partir do óleo de pequi verificados por Oliveira *et al.* (2015). Essa discrepância está relacionada com a variação do teor de ésteres insaturados oriundos da matéria-prima empregada na síntese do biodiesel.

A massa específica dos produtos obtidos na reação de transesterificação alcalina no dispositivo Venturi está dentro dos padrões estabelecidos pela ANP. A massa específica é um parâmetro importante para o sistema de injeção, sendo alterada, principalmente, em função da composição química da matéria-prima

Tabela 4 – Comparação da performance do dispositivo Venturi com placas de orifício usadas em outros estudos. O tempo de reação foi calculado considerando 1 litro de biodiesel produzido.

Referência	Matéria-prima	Tempo de reação (s)/L	Porcentagem de conversão (%)	Dispositivo de cavitação
Este estudo (P1 = 4,4 bar)	Óleo comestível residual	4,5	98,3	Venturi
Chuah <i>et al.</i> (2016)	Óleo comestível residual	18	98	Placa de orifício
Chuah <i>et al.</i> (2016)	Óleo de cozinha refinado	18	98	Placa de orifício
Maddikeri, Gogate e Pandit (2014)	Óleo comestível residual	120	64/89	Placa de orifício/Venturi
Ghayal, Pandit e Rathod (2013)	Óleo comestível residual	60	95	Placa de orifício
Gole, Naveen e Gogate (2013)	Óleo de <i>Nagchampa</i>	120	92	Placa de orifício

Fonte: elaborada pelos autores (2019).

Tabela 5 – Caracterizações físico-químicas dos produtos obtidos nas reações de transesterificação alcalina, rota metílica.

Propriedades (unidades)	E1	E2	E3	Limite
Viscosidade Cinemática (mm^2s^{-1} , a 40°C)	$3,59 \pm 0,15$	$3,57 \pm 0,09$	$3,57 \pm 0,07$	1,9-6
Índice de acidez (mg de KOH g^{-1})	$0,32 \pm 0,02$	$0,31 \pm 0,03$	$0,32 \pm 0,02$	0,50
Ponto de entupimento a frio* ($^\circ\text{C}$)	$-1 \pm 0,02$	0	-1	9
Índice de peróxido (meq/kg)	$4,77 \pm 0,10$	$4,79 \pm 0,06$	$4,70 \pm 0,05$	10
Massa específica 20°C ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	861 ± 2	868 ± 6	871 ± 2	850-900

*Estado: MG; mês de referência: julho.

Fonte: elaborada pelos autores (2019).

e do excesso de álcool presente no biodiesel (KRAUSE, 2008). Considerando-se que a massa específica média do óleo diesel normalmente varia entre 837 e 842 kg.m⁻³, a mistura de biodiesel no diesel de petróleo aumenta a massa específica do produto final (850 a 900 kg.m⁻³), o que é bom para operar o motor em geral, porque massas específicas mais elevadas favorecem a maior injeção de combustível, podendo acarretar mais carbono, mais calor e, conseqüentemente, maior potência para o motor (CANESIN et al., 2014). No entanto, segundo Alptekin e Canakci (2009), esse aumento na potência apenas é significativo em misturas usando mais de 20% de ésteres metílicos no diesel.

Com isso, esse incremento de biodiesel, além de aumentar a eficiência do motor do ciclo diesel, ainda beneficia o meio ambiente, pois aumenta o consumo de combustível renovável menos poluente em relação aos derivados fósseis (KULKARNI; DALAI, 2006).

CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou o potencial do dispositivo Venturi de realizar a síntese de biodiesel a partir de óleo comestível residual em rota metílica. Os experimentos foram conduzidos em um aparato experimental construído em circuito fechado.

A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- O Venturi utilizado neste estudo, projetado para atingir a máxima atividade cavitacional, sintetizou 1 L de biodiesel em tempo de reação de 4,5 segundos. Não há na literatura outro caso de síntese tão rápida como a encontrada neste trabalho;
- A porcentagem de conversão de ésteres metílicos é dependente da pressão de entrada (P1) no dispositivo Venturi. Isso ocorre porque P1 influencia

na quantidade de microbolhas produzidas no sistema de cavitação hidrodinâmica. A pressão de 4,4 bar produziu a maior conversão (98,3%);

- A comparação com outros estudos da literatura mostrou que o dispositivo Venturi é superior às placas de orifício na síntese de biodiesel;
- O uso do Venturi como dispositivo de cavitação hidrodinâmica favorece a ampliação da produção de biodiesel como alternativa aos combustíveis à base de petróleo (óleo diesel), além de propiciar disposição final ambientalmente adequada aos óleos comestíveis residuais. São inerentes a essa tecnologia: simplicidade do processo, menor tempo reacional, maior facilidade de automação e possibilidade de aumento de escala, quando comparada com outros métodos de produção de combustível renovável. A síntese rápida do biocombustível no Venturi promove a redução dos custos, deixando o biodiesel mais competitivo em relação ao óleo diesel;
- Essa metodologia também representa alternativa viável de reciclagem do óleo comestível residual, já que retorna o resíduo ao ciclo de consumo (biodiesel), eliminando os severos impactos ambientais que causaria em decorrência do seu descarte inadequado nos recursos hídricos.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Rezende, G. B.: Conceituação, Investigação, Análise Formal. Fernandes, D. M.: Investigação, Escrita — Primeira Redação, Metodologia. Ferreira, D. C.: Conceituação, Recursos, Escrita — Primeira Redação, Supervisão. Gonçalves, J. C. S. I.: Recursos, Escrita — Revisão e Edição, Análise Formal, Administração do Projeto.

REFERÊNCIAS

- ALPTEKIN, E.; CANAKCI, M. Characterization of the key fuel properties of methyl ester-diesel fuel blends. *Fuel*, v. 88, n. 1, p. 75-80, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.05.023>
- ALVES, P.H.L.; SILVA, P.S.L.; FERREIRA, D.C.; GONÇALVES, J.C.S.I. COD removal from sucrose solution using hydrodynamic cavitation and hydrogen peroxide: a comparison between Venturi device and orifice plate. *Brazilian Journal of Water Resources*, v. 24, e12, 2019. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.241920180147>
- BANCHERO, M.; GOZZELINO, G. Nb₂O₅-catalyzed kinetics of fatty acid-esterification for reactive distillation process simulation. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 100, p. 292-301, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.05.043>
- BARROS, A.A.C.; WUST, E.; MEIER, H.F. Estudo de viabilidade técnico-científica da produção de biodiesel a partir de resíduos gordurosos. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 13, n. 3, p. 255-262, 2008. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522008000300003>
- BASHIR, T.A.; SONI, A.G.; MAHULKAR, A.V.; PANDIT, A.B. The CFD driven optimisation of a modified venturi for cavitalational activity. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 89, n. 6, p. 1366-1375, 2011. <https://doi.org/10.1002/cjce.20500>
- BATISTA, M.D.; ANHÉ, A.C.B.M.; GONÇALVES, J.C.S.I. Use of hydrodynamic cavitation for Algae Removal: effect on the inactivation of microalgae belonging to genus *Scenedesmus*. *Water, Air, and Soil Pollution*, v. 228, n. 11, p. 443, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11270-017-3624-x>
- BOKHARI, A.; CHUAH, L.F.; YUSUP, S.; AHMAD, J.; SHAMSUDDIN, M.S.; TENG, M.K. Microwave-assisted methyl esters synthesis of Kapok (Ceiba pentandra) seed oil: parametric and optimization study. *Biofuel Research Journal*, v. 2, n. 3, p. 281-287, 2015. <https://doi.org/10.18331/BRJ2015.2.3.6>
- BOKHARI, A.; CHUAH, L.F.; YUSUP, S.; KLEMES, J.J.; KAMIL, R.N.M. Optimisation on pretreatment of rubber seed (Heveabraziliensis) oil via esterification reaction in a hydrodynamic cavitation reactor. *Bioresource Technology*, v. 199, p. 414-422, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.013>
- CANESIN, E.A.; OLIVEIRA, C.C.; MATSUSHITA, M.; DIAS, L.F.; PEDRÃO, M.R.; SOUZA, N.E. Characterization of residual oils for biodiesel production. *Electronic Journal of Biotechnology*, v. 17, n. 1, p. 39-45, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2013.12.007>
- CHOI, J.; CUI, M.; LEE, Y.; KIM, J.; SON, Y.; KHIM, J. Hydrodynamic cavitation and activated persulfate oxidation for degradation of bisphenol A: kinetics and mechanism. *Chemical Engineering Journal*, v. 338, p. 323-332, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.01.018>

- CHUAH, L.F.; ABD AZIZ, A.R.; YUSUP, S.; BOKHARI, A.; KLEMES, J.J.; ABDULLAH, M.Z. Performance and emission of diesel engine fuelled by waste cooking oil methyl ester derived from palm olein using hydrodynamic cavitation. *Clean Technologies and Environmental Policy*, v. 17, n. 8, p. 2229-2241, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10098-015-0957-2>
- CHUAH, L.F.; YUSUP, S.; ABD AZIZ, A.R.; BOKHARI, A.; ABDULLAH, M.Z. Cleaner production of methyl ester using waste cooking oil derived from palm olein using a hydrodynamic cavitation reactor. *Journal of Cleaner Production*, v. 112, parte 5, p. 4505-4514, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.112>
- COSTA, J.F.; ALMEIDA, M.F.; ALVIM-FERRAZ, M.C.M.; DIAS, J.M. Biodiesel production using oil from fish canning industry wastes. *Energy Conversion and Management*, v. 74, p. 17-23, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.04.032>
- CVETKOVIC, M.; KOMPARE, B.; KLEMENCIC, A.K. Application of hydrodynamic cavitation in ballast water treatment. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 22, n. 10, p. 7422-7438, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4360-7>
- ENCINAR, J.M.; GONZÁLEZ, J.F.; RODRÍGUEZ-REINARES, A. Biodiesel from Used Frying Oil. Variables affecting the yields and characteristics of the biodiesel. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 44, n. 15, p. 5491-5499, 2005. <https://doi.org/10.1021/ie040214f>
- GĄGOL, M.; PRZYJAZNY, A.; BOCZKAJ, G. Wastewater treatment by means of advanced oxidation processes based on cavitation: a review. *Chemical Engineering Journal*, v. 338, p. 599-627, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.01.049>
- GHAYAL, D.; PANDIT, A.B.; RATHOD, V.K. Optimization of biodiesel production in a hydrodynamic cavitation reactor using used frying oil. *Ultrasonics Sonochemistry*, v. 20, n. 1, p. 322-328, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jultsonch.2012.07.009>
- GOGATE, P.R. Cavitation reactors for process intensification of chemical processing applications: a critical review. *Chemical Engineering Science*, v. 47, n. 4, p. 515-527, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.09.014>
- GOGATE, P.R.; KABADI, A.M. A review of applications of cavitation in biochemical engineering/biotechnology. *Biochemical Engineering Journal*, v. 44, n. 1, p. 60-72, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2008.10.006>
- GOLE, V.L.; NAVEEN, K.R.; GOGATE, P.R. Hydrodynamic cavitation as an efficient approach for intensification of synthesis of methyl esters from sustainable feedstock. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, v. 71, p. 70-76, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2012.10.006>
- GUIMARÃES, C.C.; SANTOS, V.M.L.; CORTEZ, J.W.; SANTOS, L.P.G. Redução da emissão de material particulado em função da inserção de misturas do biodiesel de soja e mamona ao diesel. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 23, n. 2, p. 355-362, 2018. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522018168718>
- HILARES, R.T.; IENNY, J.V.; MARCELINO, P.F.; AHMED, M.A.; ANTUNES, F.A.F.; SILVA, S.S.; SANTOS, J.C. Ethanol production in a simultaneous saccharification and fermentation process with interconnected reactors employing hydrodynamic cavitation-pretreated sugarcane bagasse as raw material. *Bioresource Technology*, v. 243, p. 652-659, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.159>
- KELKAR, M.A.; GOGATE, P.R.; PANDIT, A.B. Intensification of esterification of acids for synthesis of biodiesel using acoustic and hydrodynamic cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*, v. 15, n. 3, p. 188-194, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jultsonch.2007.04.003>
- KNOTHE, G.; STEIDLEY, K.R. Kinematic viscosity of biodiesel fuel components and related compounds. Influence of compound structure and comparison to petrodiesel fuel components. *Fuel*, v. 84, n. 9, p. 1059-1065, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.01.016>
- KOZERSKI, G.R.; HESS, S.C. Estimativa dos poluentes emitidos pelos ônibus e microônibus de Campo Grande/MS, empregando como combustível diesel, biodiesel ou gás natural. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 11, n. 2, p. 113-117, 2006. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522006000200003>
- KRAUSE, L.C. *Desenvolvimento do processo de produção de biodiesel de origem animal*. 147f. Tese (Doutorado em Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- KULDEEP; SAHARAN, V.K. Computational study of different venturi and orifice type hydrodynamic cavitating devices. *Journal of Hydrodynamics*, v. 28, n. 2, p. 293-305, 2016. [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(16\)60631-5](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(16)60631-5)
- KULKARNI, M.G.; DALAI, A.K. Waste cooking oil: an economical source for biodiesel: A review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 45, n. 9, p. 2901-2913, 2006. <https://doi.org/10.1021/ie0510526>
- LAOSUTTIWONG, T.; NGAOSUWAN, K.; KIATKITTIPONG, W.; WONGSAWAENG, D.; KIM-LOHSONTORN, P.; ASSABUMRUNGRA, S. Performance comparison of different cavitation reactors for biodiesel production via transesterification of palm oil. *Journal of Cleaner Production*, v. 205, p. 1094-1101, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.159>
- LEUNG, D.Y.C.; WU, X.; LEUNG, M.K.H. A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. *Applied Energy*, v. 87, n. 4, p. 1083-1095, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.10.006>
- LIN, F.L.; WU, Y.P.G.; CHANG, C.T. Combustion characteristics of waste-oil produced biodiesel/diesel fuel blends. *Fuel*, v. 86, n. 12-13, p. 1772-1780, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.01.012>
- LÓPEZ, D.E.; GOODWIN JR., J.G.; BRUCE, D.A. Transesterification of triacetin with ethanol on Nafion acid resins. *Journal of Catalysis*, v. 245, n. 2, p. 381-391, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2006.10.027>
- LORETO, E.; LIU, E.Y.; LOPEZ, D.E.; SUWANNAKARN, K.; BRUCE, D.A.; GOODWIN, J.G. Synthesis of biodiesel via acid catalysis. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 44, n. 14, p. 5353-5365, 2005. <https://doi.org/10.1021/ie049157g>
- MADDIKERI, G.L.; GOGATE, P.R.; PANDIT, A.B. Intensified synthesis of biodiesel using hydrodynamic cavitation reactors based on the interesterification of waste cooking oil. *Fuel*, v. 137, p. 285-292, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.08.013>
- MORAIS, V.S.; CASTRO, E.V.R.; CARNEIRO, M.T.W.D.; BRANDÃO, G.P.; FABRI JÚNIOR, R.; SENA, D.R. COR ASTM: Um método simples e rápido para determinar a qualidade do biodiesel produzido a partir de óleos residuais de fritura. *Química Nova*, v. 36, n. 4, p. 16, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422013000400018>
- OLIVEIRA, C.J.; CREMONEZ, P.A.; FEROLDI, M.; MEIER, T.R.W.; TELEKEN, J.G. Comparação da variação do índice de peróxido e massa específica das misturas de ésteres a partir do óleo de pequi após diferentes tempos de fritura. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, v. 4, n. esp., p. 482-497, 2015. <https://doi.org/10.19177/rgsav.4e02015482-497>

RAJORIYA, S.; BARGOLE, S.; GEORGE, S.; SAHARAN, V.K. Treatment of textile dyeing industry effluent using hydrodynamic cavitation in combination with advanced oxidation reagents. *Journal of Hazardous Materials*, v. 344, p. 1109-1115, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.12.005>

RAMOS, L.P.; SILVA, F.R.; MANGRICH, A.S.; CORDEIRO, S.C. Tecnologias de Produção de Biodiesel. *Revista Virtual de Química*, v. 3, n. 5, p. 385-405, 2011. <https://doi.org/10.5935/1984-6835.20110043>

SADEGHINEZHAD, E.; KAZI, S.N.; SADEGHINEJAD, F.; BADARUDIN, A.; MEHRALI, M.; SADRI, R.; SAFAEI, M.R. A comprehensive literature review of bio-fuel performance in internal combustion engine and relevant costs involvement. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 30, p. 29-44, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.09.022>

SANTOS, A.R.; VIDOTTI, E.C.; SILVA, E.L.; MAIONCHI, F.; HIOKA, N. Determinação da massa molar por crioscopia: terc-butanol, um solvente extremamente adequado. *Química Nova*, v. 25, n. 5, p. 1-5, 2002. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422002000500022>

SANTOS, S.L. *Uso da cavitação hidrodinâmica como uma alternativa para a produção de biodiesel*. 80f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, 2009.

SHARIF, A.B.M.H.; NASRULHAQ, H.A.M.; MAJID, S.; CHANDRAN, R.Z. Biodiesel production from waste cooking oil as environmental benefits and recycling process: a review. *Asia Biofuel Conference Book*. Cingapura, 2007.

TALEBIAN-KIAKALAIEH, A.; AMIN, N.A.S.; MAZAHERI, H. A review on novel processes of biodiesel production from waste cooking oil. *Applied Energy*, v. 104, p. 683-710, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.061>

WANG, Y.; OU, S.; LIU, P.; ZHANG, Z. Preparation of biodiesel from waste cooking oil via two-step catalyzed process. *Energy Conversion and Management*, v. 48, n. 1, p. 184-188, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.04.016>

