

# CONSTRUÇÃO DE UM REATOR DE MICRO-ONDAS PARA PRODUÇÃO DE BIODIESEL

Luiza Hellen Sabaini Nascimento<sup>1</sup>, Marcos Valério Vieira Lyrio<sup>1</sup> e Renan Barroso Soares<sup>2</sup>

1 – Acadêmico do curso de Engenharia Química

2 – D.Sc. Engenheiro Químico – Professor Multivix - Vitória

## RESUMO

O biodiesel é uma fonte de energia renovável, que pode ser produzido com matéria-prima vegetal ou animal. Sua utilização reduz a dependência de combustíveis fósseis tradicionais e todos os seus impactos correlatos. A fim de aumentar a produtividade desse combustível, métodos de acelerar o processo são essenciais, como o método por micro-ondas. Desta forma, este trabalho desenvolveu um reator de micro-ondas para produzir biodiesel, a partir de um micro-ondas doméstico adaptado. O equipamento foi testado e validado através das reações de transesterificação e catálise básica, fixando a quantidade do catalisador hidróxido de sódio em 0,5% m/m (em relação ao óleo), tempo de reação de 6 minutos e utilizando proporções molares de 1:6, 1:9 e 1:12 de óleo e etanol, foi possível obter rendimentos de 73,38%, 76,42% e 93,44%, respectivamente. A eficiência do equipamento foi satisfatória, visto que as peças plásticas impressas em 3D, apesar de exigirem troca a cada 10 ciclos de batelada, são de baixo custo e fácil substituição. Ao todo, o desenvolvimento do reator custou R\$122,41.

Palavras-chave: Catálise básica. Transesterificação. Impressão 3D. Óleo de soja. Catálise homogênea.

## INTRODUÇÃO

O crescente aumento da população resulta em uma maior demanda de energia e seu maior consumo pode elevar a emissão de gases do efeito estufa, principalmente se a energia for baseada em combustíveis fósseis. Desse modo, alternativas de energias mais limpas e renováveis estão sendo cada vez mais discutidas e estudadas (FERREIRA; YADA, 2019).

O uso de energia renovável apresenta emissões zero ou quase zero de gases poluentes e tem potencial para atender a demanda energética mundial. Atualmente, diversas tecnologias renováveis estão disponíveis, sendo uma delas a conversão energética da biomassa para a produção de combustíveis (ASIF; MUNEEER, 2007; GOLDEMBERG, 2009).

Os combustíveis de óleos vegetais, por exemplo, como o biodiesel, são biocombustíveis de origem renovável e muito atrativos, por conta de seu alto poder calorífico e de seus benefícios ambientais, principalmente pelo baixo teor

de enxofre, baixa emissão de gases do efeito estufa e biodegradabilidade. Além disso, o biodiesel é fácil de usar em veículos, pois não necessita de nenhuma modificação no motor, e é mais seguro para manusear e armazenar, pois é menos tóxico (ATADASHI; AROUA; AZIZ, 2010; DEMIRBAS, 2005; KNOTHE; RAHL; GERPEN, 2015).

No Brasil, há abundância de matéria-prima para a produção de biodiesel, principalmente óleo de soja. Por outro lado, o preço dos óleos vegetais tem tornado este biocombustível economicamente desfavorável em relação ao diesel de petróleo. Sendo assim, são necessárias novas formas de produção para tornar o biodiesel viável, que atenda a demanda consumidora e seja ambientalmente favorável (DIB, 2010).

Uma forma de tornar a fabricação de biodiesel economicamente vantajosa apoia-se na otimização e aplicação de novos processos, tais como a reação irradiada por micro-ondas, que se revela benéfica em termos de velocidade de reação, consumo de energia e alto rendimento. Tudo isso é possível pelo fato do uso de micro-ondas provê um meio de aquecimento volumétrico, que resulta no aumento da temperatura no interior do material, simultaneamente em todos os pontos (NOMANBHAY; ONG, 2017).

A produção em reator batelada irradiado por micro-ondas consome em média 0,4681 kWh de energia elétrica para produzir 1 kg de biodiesel. Por outro lado, essa mesma quantidade de biodiesel possui conteúdo energético de 2,1217 kWh, ou seja, o processo é superavitário em energia e produz 1,6595 kWh de energia líquida para cada quilograma de biodiesel (MOTASEMI; ANI, 2012).

Nos últimos anos muitos autores buscaram explorar e irradiação de micro-ondas na produção de biodiesel, como Saifuddin e Chua (2006), Hernando *et al.* (2007), Barnard *et al.* (2007), Oliveira (2008), Lertsathapornsuk *et al.* (2008) e Nascimento *et al.* (2018), que demonstraram a eficácia do processo com vários tipos de reagentes, matérias-primas e configurações de reatores.

Embora os resultados sejam oriundos de experimentos em escala laboratorial, o uso de micro-ondas é plausível de ser usado em escala industrial. Para isso são necessárias mais pesquisas, de forma a tornar possível a aplicação em grandes escalas (NOMANBHAY; ONG, 2017).

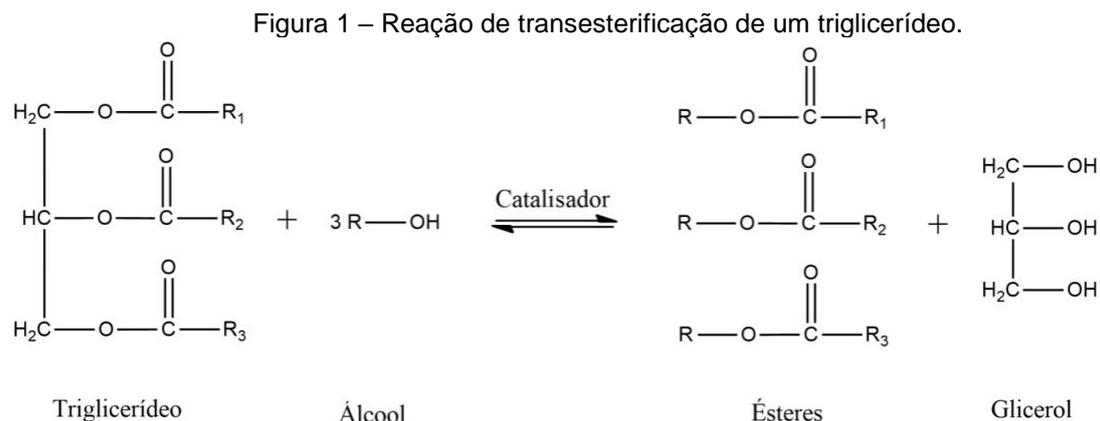
Nesse contexto, novos processos para a produção de biodiesel devem ser estudados, buscando otimizar e baratear a produção, tornando-o economicamente mais vantajoso e competitivo com os combustíveis fósseis. Dessa forma, o objetivo da presente pesquisa é adaptar um forno de micro-ondas doméstico para produzir biodiesel usando micro-ondas, e validá-lo através de comparações do rendimento obtido nos processos tradicionais e outros resultados na literatura utilizando reatores de micro-ondas.

## **REFERENCIAL TEÓRICO**

### **BIODIESEL**

O biodiesel é uma mistura composta por ésteres metílicos e etílicos, produzidos a partir de óleo vegetal ou gordura animal, com propriedades semelhantes ao diesel de petróleo. O biodiesel, contudo, é um combustível biodegradável, não-tóxico e produz gases menos nocivos, além disso é um combustível oxigenado, tornando a queima mais fácil e limpa (GEBREMARIAM; MARCHETTI, 2018; NOMANBHAY; ONG, 2017; PARDAL *et al.*, 2017).

As gorduras e óleos são formados por triglicerídeos, que são triésteres de ácidos carboxílicos de cadeia longa. A transesterificação de óleos e gorduras ocorre pela troca dos grupos alcóxidos, ou seja, quando um triglicerídeo, sob a presença de um catalisador, reage com um álcool, produzindo uma mistura de alquil ésteres de ácidos graxos e glicerol, devido à troca dos radicais dos ésteres com álcoois conforme a Figura 1 (SCHORE; VOLLHARDT, 2004).



Fonte: Adaptado de Schuchardt; Sercheli; Vargas (1998).

Os produtos da reação de transesterificação formam duas fases distintas. O glicerol, mais denso, decanta e arrasta a maioria das impurezas existentes, como o sabão formado e o álcool em excesso. Junto ao biodiesel ficam as moléculas de triglicerídeos que não reagiram, água e impurezas restantes (REI, 2007).

A reação de transesterificação requer um catalisador para obter taxas de conversão admissíveis. Os limites de composição que a matéria-prima deve atender são determinados pelo catalisador. Além disso, as condições da reação e as etapas subsequentes são determinadas pela natureza do catalisador usado (LOTERO *et al.*, 2005).

A transesterificação por catálise básica é o método mais utilizado pela indústria para a produção de biodiesel, devido à taxas de conversão bastante elevadas. A velocidade de reação é seis vezes mais rápida que a catálise ácida. Uma desvantagem do uso de catalisadores básicos, no entanto, é a formação de sabão, devido à reação secundária de saponificação, que pode ser minimizada limitando o teor de ácidos graxos livres em 0,5% m/m no reagente (LOTERO *et al.*, 2005; REI, 2007).

A transesterificação utilizando catalisadores ácidos possui a vantagem de evitar a reação paralela de saponificação. Além disso, os ácidos graxos livres reagirão por esterificação, transformando-se em biodiesel. Contudo, por ser mais lenta que a transesterificação catalisada por base, a catálise ácida é menos utilizada (REI, 2007).

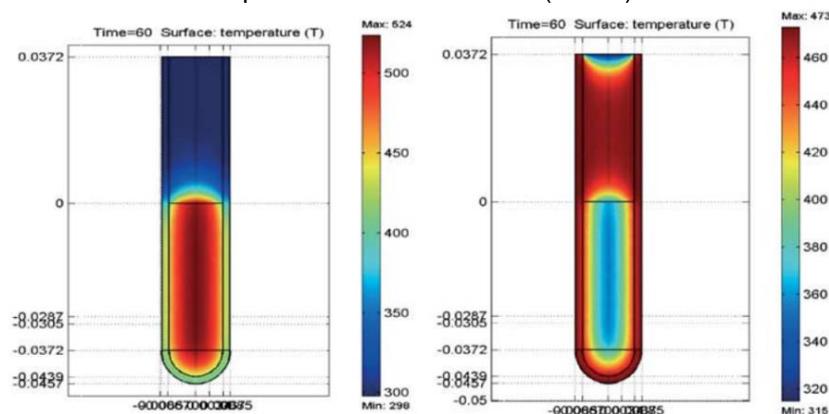
A transesterificação por catálise enzimática é outra opção para a produção de biodiesel, porém não é economicamente viável em grande escala. Apesar de produzir biodiesel de altíssima pureza, e com fácil separação, ela exige operações mais lentas e com alto custo (OLIVEIRA, 2008).

## MICRO-ONDAS EM SÍNTESES ORGÂNICAS

Sínteses irradiadas por micro-ondas são reconhecidas por serem mais rápidas, resultantes da taxa de aquecimento maior do que as possíveis de se obter pelo aquecimento convencional. Mesmo com condições mais brandas de temperatura e com tempo de reação mais curto, é possível obter altas conversões com esta técnica. A irradiação de micro-ondas em reações químicas combina efeitos térmicos como: pontos quentes, superaquecimento e aquecimento seletivo; e não-térmicos como: campo altamente polarizado e efeitos de mobilidade, que influenciam nas probabilidades de contato efetivo entre as moléculas (DE LA HOZ; DÍAZ-ORTIZ; MORENO, 2005).

O uso de micro-ondas provê um meio de aquecimento volumétrico simultâneo em todos os pontos do sistema. Isso significa que a reação ocorre com temperatura mais uniformemente distribuída no vaso de reação, diferentemente do aquecimento convencional, que aquece com mais intensidade regiões mais externas. A comparação entre o perfil dos dois tipos de aquecimento é evidenciado na Figura 2 (SCHANCHE, 2003; SURAT; JAUHARI; DESAK, 2012).

Figura 2 – Comparação entre aquecimento por micro-ondas (esquerda) com aquecimento convencional (direita).



Fonte: Schanche (2003).

As reações irradiadas por micro-ondas são de muitas formas superiores as realizadas via aquecimento convencional, principalmente pela capacidade de aumentar a velocidade da reação em até 1000 vezes, pelo rendimento ser geralmente mais elevado, pelo menor tempo de reação e por permitir a elevação de temperatura de reação à valores superiores à temperatura de ebulição do solvente.

A Tabela 1 apresenta a comparação entre o método de aquecimento convencional e o método de aquecimento por micro-ondas para a produção de biodiesel. Ambos os métodos apresentam vantagens, limitações, características e parâmetros peculiares.

Tabela 1 – Comparação entre o aquecimento convencional e o por micro-ondas.

<b>Parâmetro/característica</b>	<b>Convencional</b>	<b>Micro-ondas</b>
Tempo de reação	Longo (1-2 h)	Muito curto (0,05-0,1 h)
Temperatura de reação	40-100°C	40-100°C
Pressão de reação	Atmosférica	Atmosférica
Catalisador	Sim	Sim/Não
Perda de calor	Alta	Baixa
Forma de energia	Energia elétrica convertida em térmica	Energia elétrica aplicada através de micro-ondas
Eficiência do processo	Baixa	Alta
Vantagens	Operação simples	Reação rápida, produtos limpos e eficiência energética
Limitações	Altos requisitos de energia e produtos saponificados	Pode não ser eficiente com sólidos na matéria-prima

Fonte: adaptado de Gude; Patil e Deng (2012).

## **PRODUÇÃO DE BODIESEL IRRADIADA POR MICRO-ONDAS**

De acordo com Saifuddin e Chua (2004), enquanto o processo por aquecimento convencional exige 75 minutos para atingir a conversão máxima de biosiesel, o processo irradiado por micro-ondas leva apenas 4 minutos, para as mesmas condições de catalisador, proporção óleo:álcool e temperatura.

Lertsathapornsuk *et al* (2008) estudou a construção de um reator contínuo utilizando um micro-ondas de uso doméstico (de 800W de potência) aplicando-o na transesterificação de óleo de palma usado. Os autores

reportaram uma conversão de 97%, utilizando 3% de hidróxido de sódio em etanol, proporção 1:12 de óleo:etanol e tempo de residência de 30 segundos.

Saifuddin e Chua (2004) descreveram o processo de produção em batelada, utilizando óleo de fritura transesterificado, com 0,5% de hidróxido de sódio, 100% de etanol em excesso (proporção óleo:etanol de 1:6), 4 minutos de tempo de residência e micro-ondas com potência de saída de 375W. Tal processo obteve conversão de 87%.

Nascimento *et al.* (2009) concluíram uma redução no tempo de até 10 vezes em relação aos métodos convencionais, apresentando um estudo de transesterificação em reator em batelada irradiado por micro-ondas de uso doméstico, onde foi possível obter uma conversão de 99,07% sob as seguintes condições: razão óleo:metanol, 8,59; 2,19% m/m de hidróxido de potássio (em relação a massa de óleo) e 70 segundos de tempo de residência.

## **METODOLOGIA**

Tendo em vista os propósitos e objetivos supracitados, a pesquisa se baseia no método de abordagem hipotético-dedutivo, de objetivo exploratório e abordagem quantitativa, com procedimentos experimentais e bibliográficos que buscam explorar, avaliar e otimizar um novo método para a produção de biodiesel com objetivos de natureza básica (GIL, 1991; RUIZ, 1996).

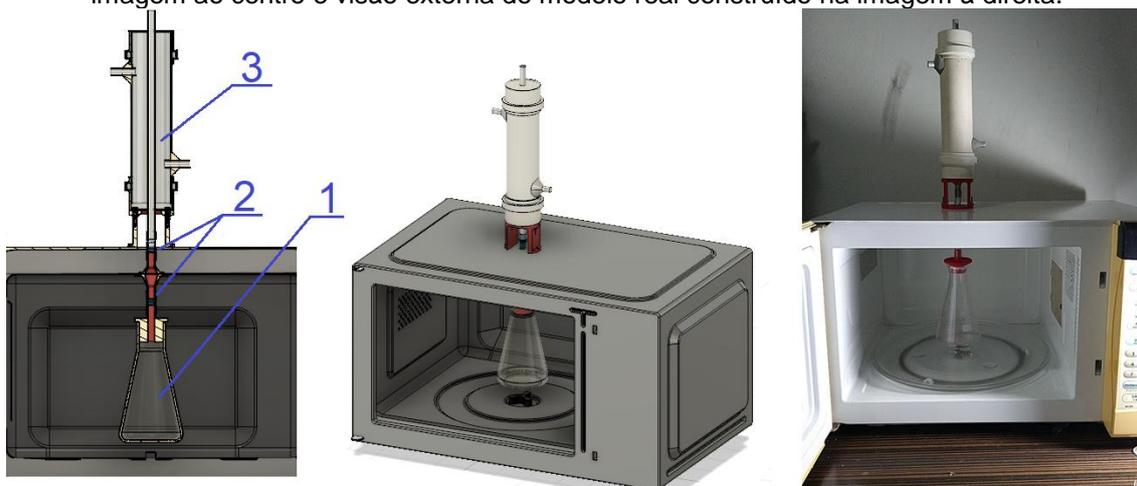
A metodologia será dividida em duas partes: Construção do reator e Procedimento experimental.

## **CONSTRUÇÃO DO REATOR**

O reator foi construído e operado, baseando-se no modelo descrito por Nascimento *et al.* (2009) e Lertsathapornsuk *et al.* (2008). O equipamento desenvolvido consiste de um micro-ondas Eletrolux, modelo ME28S, 110V, 60Hz, 28 Litros, com geração de ondas na frequência de 2,45Ghz e potência máxima de 900W, ajustáveis em 10 níveis. O reator é apresentado na Figura 3. Nela, pode ser percebido que o micro-ondas Eletrolux foi adaptado para

convertê-lo em um reator com processamento em batelada, constituindo de basicamente três módulos: 1-vaso de reação; 2-tubulação de silicone e plástico para o fluxo de vapor; 3-condensador de refluxo, de modo a tornar possível a realização dos experimentos de transesterificação. Na Figura 3 é possível observar o condensador de refluxo e o Erlenmeyer.

Figura 3 – Diagrama do reator para produção de biodiesel. Visão em corte do reator e seus componentes na imagem à esquerda, visão geral do modelo tridimensional desenvolvido na imagem ao centro e visão externa do modelo real construído na imagem à direita.



Fonte: produzido pelos autores.

Para a construção do reator, utilizou-se um Erlenmeyer de 250 mL de borossilicato como vaso de reação e um condensador de refluxo, ligados entre si através de juntas e conectores de ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno) manufaturadas em uma impressora 3D.

O condensador de refluxo, conforme ilustrado na Figura 4, foi construído a partir de um tubo de alumínio de 10 mm de diâmetro externo, 8 mm de diâmetro interno e 270 mm de comprimento, transpassando por dentro de um tubo de PVC (Policloreto de Vinila) com 50 mm de diâmetro e 20 cm de comprimento. O tubo de PVC possui dois tampões com um furo central de 10 mm, para selar e manter o fluido refrigerante, e prender o tubo de alumínio em seu interior. Para o controle térmico do condensador, foram instalados dois furos na região superior e inferior do tubo de PVC, onde foram acopladas as mangueiras (feitas de silicone e com diâmetro de 10 mm) de entrada e saída de água, usada como fluido refrigerante em temperatura ambiente. As vedações foram realizadas utilizando massa epóxi da marca Durepoxi®.

Figura 4 – Condensador de refluxo. Visão em corte do condensador à esquerda e visão do objeto real à direita.



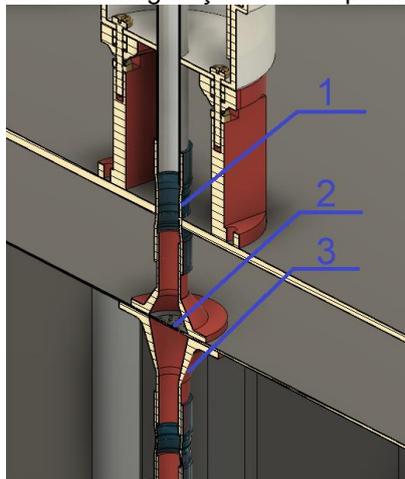
Fonte: produzido pelos autores.

O condensador foi fixado ao micro-ondas utilizando um adaptador e um suporte de plástico ABS, 4 parafusos M3x20mm e 10 porcas M3. Primeiramente foram presos dois parafusos na carenagem externa do micro-ondas, seguido pela instalação do primeiro adaptador (para compensar a altura das porcas). Logo após, foi conectada uma mangueira de silicone (oriunda da parte interna do micro-ondas) ao tubo de alumínio, seguindo-se para a fixação do suporte no topo do micro-ondas e a instalação do condensador.

O maior desafio na montagem do equipamento foi encontrar uma forma de permitir o fluxo de líquido e vapor entre o vaso de reação e condensador, livre do vazamento de micro-ondas. Baseando-se no reator de Nascimento *et al.* (2009), foram feitas 14 perfurações (umas próximas das outras) de 1 mm de diâmetro na camada de blindagem do micro-ondas para evitar vazamentos de micro-ondas. Dessa forma, ficou impossibilitado atravessar a camada de blindagem com a mangueira de silicone que une o vaso de reação e o tubo de alumínio do condensador, já que o diâmetro das perfurações feitas é muito pequeno. Para solucionar esse problema foram desenvolvidos dois conectores de plástico ABS, compatíveis com a mangueira de silicone, cujo diâmetro é de 10 mm. Os conectores foram colados ao redor dos furos feitos, um no lado externo e o outro no lado interno da camada de blindagem. Para a carenagem

do micro-ondas foi possível atravessar a mangueira diretamente, visto que essa camada serve para acabamento e proteção do circuito do micro-ondas. A Figura 5 descreve em detalhes a configuração dos conectores no reator, destacando os componentes como: 1 - Mangueira, 2 - Furos e 3 - Conectores.

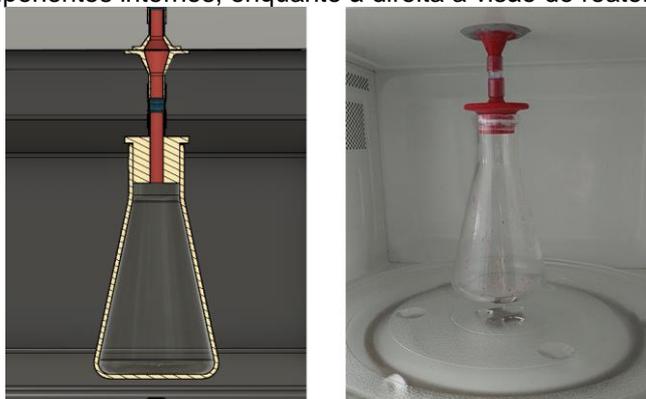
Figura 5 – Configuração dos acopladores.



Fonte: produzido pelos autores.

A Figura 6 mostra o acoplamento do vaso de reação ao restante do sistema. O vaso de reação foi unido ao acoplador interno, utilizando uma rolha de ABS, revestida com fita de politetrafluoretileno (Teflon®) e presa na boca do Erlenmeyer, conectados entre si por uma mangueira de silicone (com as mesmas medidas das utilizadas em outras partes do reator). Além da ligação entre a rolha e os conectores, nota-se na Figura 6 que o Erlenmeyer não ficou apoiado no prato do micro-ondas. Optou-se por isso, uma vez que o giro do prato danificava a mangueira, ocasionando o desprendimento da conexão.

Figura 6 – Ligação interna do vaso de reação. À esquerda tem-se a vista em corte dos componentes internos, enquanto à direita a visão do reator real.



Fonte: produzido pelos autores.

A temperatura do vapor foi monitorada por um termopar tipo K, instalado no topo do condensador, de modo a permitir aos operadores o acompanhamento da temperatura através de um controlador com display modelo w1209, configurado para desarmar caso a temperatura atingisse 70°C. Ao verificar o aumento da temperatura pelo controlador, o fluxo de água no condensador era acionado. O local escolhido para o posicionamento do termômetro não foi no vaso de reação, mas sim no condensador, visando evitar um possível vazamento de micro-ondas.

A Tabela 2 descreve os custos associados ao desenvolvimento do reator. Conforme supracitado, utilizou-se de recursos de impressão 3D para a manufatura de algumas partes do reator, o que permitiu uma ampla capacidade de adaptação e personalização dos componentes, sendo possível a criação de inúmeros protótipos rápidos durante a etapa de desenvolvimento, sendo essa a segunda etapa de maior custo. O maior custo foi referente à compra de peças para o reparo do micro-ondas. De maneira geral, conforme apresentado na Tabela 2, o sistema teve baixo custo de construção, apenas R\$ 122,41.

Tabela 2 – Custos associados ao desenvolvimento do reator.

<b>Material</b>	<b>Custo</b>	<b>Observação</b>
Micro-ondas	R\$ 0	Obtido de sucata
Erlenmeyer	R\$ 9,90	-
Mangueira de Silicone	R\$ 5,60	Foram utilizados 4 metros
Peças para o micro-ondas	R\$ 60,00	Fusível termostato e capacitor
Massa Epóxi	R\$ 10,00	-
Termostato digital	R\$ 7,91	Controlador+ termistor
Tubo de alumínio	R\$ 0	Obtido de sucata
Cano de PVC 50 mm	R\$ 0	Obtido de sucata
Tampões de PVC 50 mm	R\$ 10,00	Duas unidades
Parafusos e porcas	R\$ 1,00	4 parafusos M3x20mm + 10 porcas M3
Plástico ABS	R\$ 18,00	200g
<b>TOTAL</b>	<b>RS 122,41</b>	-

Fonte: produzido pelos autores.

## PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a produção de biodiesel, optou-se a catálise básica, já que é o método mais utilizado. Para tal, utilizou-se óleo de soja refinado da marca Coamo, visto que esse óleo é o mais facilmente encontrado no comércio e com o menor custo. Como o álcool da reação, optou-se por usar o etanol, tendo em vista a maior facilidade em ser adquirido e pela menor toxicidade quando comparado ao metanol. Como catalisador, utilizou-se soda cáustica em escama (98% de pureza da marca Escorpião). O hidróxido de sódio é mais facilmente encontrado no comércio local do que o hidróxido de potássio. Para o processo de lavagem, utilizou-se solução de ácido clorídrico, baseando-se no trabalho de Nascimento *et al.* (2009), visando neutralizar o catalisador presente no produto final, convertendo-o para forma de sal cloreto de sódio solúvel em água.

O experimento foi realizado variando a relação óleo:etanol e fixando o catalisador em 0,5% em relação a massa de óleo e a potência em 270 W, baseando-se nos trabalhos de Motasemi e Ani (2012) e Nomanbhay e Ong (2017). Os experimentos foram feitos em duplicata. Sendo assim, o processo de produção do biodiesel seguiu as seguintes etapas:

1. Com o Erlenmeyer de 250 mL (vaso de reação) previamente tarado, foi pesado o óleo de soja;
2. Com um béquer de 100 mL previamente tarado, foi pesado o álcool etílico 97% m/m, seguindo a proporção estabelecida para o ensaio, para a diluição do hidróxido de sódio em escamas;
3. Feita a diluição, a solução de etanol com hidróxido foi despejada no Erlenmeyer contendo o óleo e feita uma leve agitação para a homogeneização do líquido;
4. O Erlenmeyer foi posicionado no reator de micro-ondas e acionado o tempo, a potência e o condensador;
5. Após este período a solução seguiu para a etapa de lavagem, utilizando 80 ml de água e 20 ml de ácido clorídrico 5%;

6. Após um período de 3 horas foi possível realizar a separação entre biodiesel produzido e a glicerina com catalisador neutralizado, ambos presentes na fase aquosa;
7. Por fim, foi realizada a pesagem e o cálculo do rendimento.

Em um ensaio preliminar, foi utilizado um tempo de 3 minutos e potência de 270 W, porém, verificou-se que a reação acontecia após este período, entendendo que este tempo era o necessário para o aquecimento da amostra e que após outros 3 minutos a reação estaria completa. Sendo assim, o tempo suficiente para que ocorresse a reação foi de 6 minutos a 270 W. Neste mesmo experimento foram realizadas sucessivas etapas de lavagem com água e ácido clorídrico 5%, porém verificou-se que após a primeira lavagem, as cores do biodiesel e da água não modificaram, concluindo que apenas uma lavagem era suficiente para sua purificação.

Para calcular as quantidades de reagentes foi necessário conhecer a massa molar do óleo, dessa forma foi utilizada a regra da mistura de Kay, descrita na equação (1).

$$M = \frac{1}{\frac{y}{M_{ag}} + \frac{1-y}{M_{tg}}} \quad (1)$$

Sendo que:

M: massa molar média do óleo (g/mol);

Mag: massa molar média dos ácidos graxos (g/mol);

Mtg: massa molar média dos triglicerídeos presentes no óleo de soja (g/mol);

y: percentual de ácidos graxos livres.

Através da aplicação da Equação 1, considerando os valores para o óleo de soja refinado de  $M_{ag} = 282,771$  g/mol e  $M_{tg} = 886,665$  g/mol, conforme Alves e Pacheco (2014) e Firestone (2009), além disso, considerou-se que o óleo de soja utilizado apresentava teor de ácidos graxos no limite máximo de 0,3% m/m, segundo a ANVISA (1999), sendo este valor adotado para a variável y.

A equação química da reação de produção do biodiesel, onde 1 óleo + 3 álcool  $\rightarrow$  3 éster +1 glicerol, foi adotada para os cálculos estequiométricos. A quantidade de óleo utilizada foi fixada em 100 gramas e a massa molecular do etanol considerada foi 46,07 g/mol. A Tabela 3 apresenta os valores usados nos experimentos, já calculados levando em consideração a pureza dos reagentes.

Tabela 3 – Condições experimentais para os ensaios.

Proporção molar óleo:etanol	Tempo de reação (minutos)	Óleo de soja (gramas)	Etanol 97% m/m (gramas)	Catalisador (gramas)
1:6	6	100	32,34	0,5
1:9	6	100	48,5	0,5
1:12	6	100	64,67	0,5

Fonte: produzido pelos autores.

Obtidos os valores em gramas de biodiesel produzido em cada proporção e seguindo a estequiometria, foi calculado o rendimento da reação pelas Equações 2 e 3, utilizando um valor de  $M_{ee} = 308,55$  g/mol, segundo (CAVALCANTE, 2010).

$$m_{teórica} = \frac{m_{óleo} \cdot (3 \cdot M_{ee})}{M} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{m_{recuperada}}{m_{teórica}} \cdot 100 \quad (3)$$

Sendo que:

$m_{teórica}$ : massa teórica dos ésteres (g);

$m_{óleo}$ : massa do óleo utilizada (g);

$M_{ee}$ : massa molar dos ésteres etílicos (g/mol);

$M$ : massa molar média do óleo (g/mol);

$m_{recuperada}$ : massa do biodiesel (g);

$\eta$ : rendimento.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A equação 1 forneceu uma massa molar média do óleo de soja de 881,36 g/mol. A massa teórica de ésteres, calculada pela equação 2, mostrou um valor de 105,025 g. Dessa forma, utilizando a equação 3, obteve-se os seguintes valores de rendimento apresentados na Tabela 4.

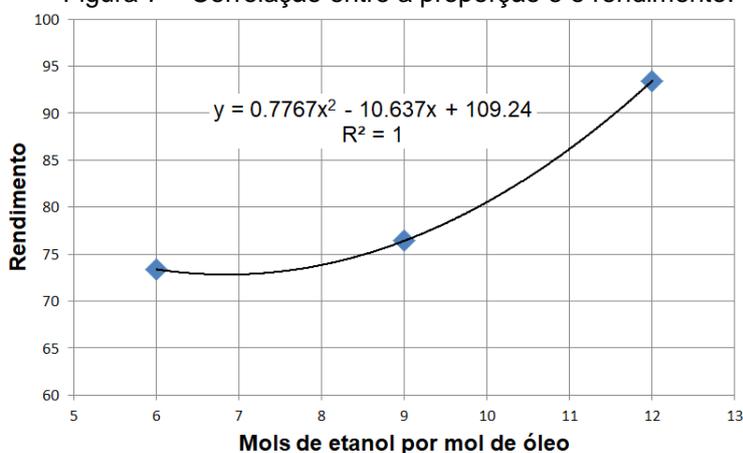
Tabela 4 - Proporção e peso do biodiesel formado para cada proporção analisada, bem como o rendimento encontrado.

Proporção molar óleo:etanol	Massa recuperada (g)	Rendimento (%)	Rendimento médio (%)	Desvio padrão
1:6	75,9	72,14	73,38	1,754
	78,5	74,62		
1:9	80,1	76,14	76,42	0,403
	80,7	76,71		
1:12	98,4	93,53	93,44	0,134
	98,2	93,34		

Fonte: produzido pelos autores.

Analisando os resultados graficamente, nota-se uma forte relação entre o rendimento e a quantidade de etanol, modelada por uma equação de segundo grau, com coeficiente de correlação igual a 1, conforme apresentado pela Figura 7.

Figura 7 – Correlação entre a proporção e o rendimento.



Fonte: produzido pelos autores.

Considerando que o perfil se mantenha regido por esta equação experimental, teoricamente seria possível obter 100% de rendimento utilizando a proporção molar óleo:etanol de 1:12,72 sob as mesmas condições experimentais utilizadas.

A Tabela 5 compila as informações, considerando o melhor resultado obtido pelos experimentos de cada autor, assim como os dados obtidos neste trabalho. Comparando com alguns trabalhos disponíveis na literatura, percebe-se que o rendimento encontrado se compara aos reatores baseados na irradiação por micro-ondas, além disso, o tempo de reação foi inferior ao método tradicional analisado. Isso mostra que a produção de biodiesel por micro-ondas pode ser um processo vantajoso, já que os rendimentos obtidos são bem maiores do que aqueles verificados no processo tradicional por catálise básica, mesmo em menores tempos de reação. Além disso, este trabalho mostrou que o desenvolvimento de um equipamento micro-ondas pode ser feito de forma simples e com baixo custo. Isso pode ser uma motivação para novos estudos, de forma a desenvolver projetos em maiores escalas.

Tabela 5 – Comparação dos resultados obtidos com alguns valores extraídos da literatura.

<b>Autores</b>				
	Lertsathapornsuk <i>et al</i> (2008)	Alves e Pacheco (2014)	Saifuddin e Chua (2004)	Presente trabalho
<b>Proporção</b>	1:12	1:6	1:6	1:12
<b>Álcool</b>	Etanol	Etanol	Etanol	Etanol
<b>Óleo</b>	Palma residual	Soja	Soja residual	Soja
<b>Catalisador</b>	3% NaOH	1,5% KOH	0,5% NaOH	0,5% NaOH
<b>Tempo</b>	30 seg.	30 min.	4 min.	6 min
<b>Método</b>	Micro-ondas	Tradicional	Micro-ondas	Micro-ondas
<b>Rendimento</b>	97%	33%	87%	93,44%

Fonte: produzido pelos autores.

Tendo em vista as informações apresentadas na Tabela 5, pode-se observar que o presente trabalho alcançou um rendimento favorável, obtendo resultado superior ao realizado por Saifuddin e Chua (2004), porém com tempo de reação maior. Comparando ao experimento de Lertsathapornsuk *et al* (2008), nota-se que sua reação ocorreu 12 vezes mais rápido, com rendimento levemente superior, apresentando uma diferença de 3,56%. Comparando ao método tradicional, a reação do presente trabalho ocorreu 5 vezes mais rápida,

apresentando um rendimento 2,83 vezes maior, ou seja, com uma diferença de 60,44%.

Em relação ao desempenho do equipamento desenvolvido, durante o procedimento experimental, notou-se que a conexão entre o vaso de reação e o condensador comportou-se conforme esperado, não sendo detectados vazamentos de etanol. Já para blindagem de micro-ondas, não foi possível testar a eficácia dos furos de 1 mm em evitar o vazamento, devido a indisponibilidade de um detector apropriado. Quanto à degradação dos componentes, percebeu-se um leve derretimento nas regiões internas dos conectores e na rolha de ABS a partir do décimo ciclo de batelada, sendo necessária a troca dos componentes nesse ponto para evitar que o problema se agravasse e interferisse no processo. A degradação em momento algum ocasionou o vazamento de etanol. Todos os trabalhos envolvendo micro-ondas (relacionados na seção Referencial Teórico) utilizaram conectores de Teflon®, que é o mais apropriado para trabalhar nessas condições. Porém o conector de ABS, apesar de sofrer leve degradação, atuou muito bem para essa finalidade. Embora degrade, este material é de baixo custo e pode ser facilmente substituído quando chega ao fim de sua vida útil. Todavia, em um processo contínuo, poderia ocasionar paradas frequentes no processo, sendo um ponto de atenção para a planta química.

O condensador de refluxo se comportou conforme o esperado, notando-se o fluxo de etanol na seção transparente do tubo do condensador, conforme a Figura 8. Além disso, após a reação se estabilizar, a temperatura se manteve praticamente estável, oscilando  $\pm 0,8^{\circ}\text{C}$ , operando em uma faixa entre  $42,7$  a  $43,5^{\circ}\text{C}$ .

Figura 8 - Observação da temperatura e do fluxo de etanol no condensador.



Fonte: produzido pelos autores.

## CONCLUSÃO

O reator de micro-ondas construído demonstrou desempenho satisfatório e baixo custo. A partir da análise de rendimento da reação de transesterificação realizada no reator de micro-ondas construído, o processo apresentou um rendimento de 93,44% para a proporção molar de óleo:etanol de 1:12, muito maior do que os valores reportados para o processo convencional sem micro-ondas. A comparação com o método tradicional expressou a superioridade do reator de micro-ondas no quesito tempo de reação e rendimento, porém, o método em questão aparenta maior dificuldade de operação, visto que exige um controlador de temperatura eficiente para manter a estabilidade do reator, e em casos de descontrole, cortar a fonte de alimentação de energia. Novos sistemas em maiores escalas são necessários para otimizar e baratear a produção de biodiesel, tornando-o economicamente mais vantajoso e competitivo com os combustíveis fósseis.

## REFERÊNCIAS

ALVES, A.; PACHECO, B. Síntese Do Biodiesel a Partir De Óleo Residual Através Da Esterificação Homogênea Dos Ácidos Graxos Livres E Transesterificação Alcalina. **Universidade Federal de Alfenas**, p. 35, 2014.

ANVISA. **Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução RDC nº 482, de 23 de setembro de 1999. Regulamento Técnico para Fixação de Identidade e Qualidade de Óleos e Gorduras Vegetais**, 1999. Disponível em: <[https://freitag.com.br/files/uploads/2018/02/portaria\\_norma\\_499.pdf](https://freitag.com.br/files/uploads/2018/02/portaria_norma_499.pdf)>.

ASIF, M.; MUNEER, T. Energy supply, its demand and security issues for developed and emerging economies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 11, n. 7, p. 1388–1413, 2007.

ATADASHI, I.M.; AROUA, M.K.; ABDUL AZIZ, A. High quality biodiesel and its diesel engine application: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 17, p. 1999–2008, 2010.

BARNARD, T. M. et al. Continuous-flow preparation of biodiesel using microwave heating. **Energy and Fuels**, v. 21, n. 3, p. 1777–1781, 2007.

CAVALCANTE, R. M. Predição da densidade de biodiesel proveniente de diferentes matérias-primas. **Rio de Janeiro**, v. 80, 2010.

DE LA HOZ, A.; DÍAZ-ORTIZ, À.; MORENO, A. Microwaves in organic synthesis. Thermal and non-thermal microwave effects. **Chemical Society Reviews**, v. 34, n. 2, p. 164–178, 2005.

DEMIRBAS, A. Biodiesel production from vegetable oils via catalytic and non-catalytic supercritical methanol transesterification methods. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 31, n. 5–6, p. 466–487, 2005.

DIB, F. H. Produção de biodiesel a partir de óleo residual reciclado e realização de testes comparativos com outros tipos de biodiesel e proporções de mistura em um moto-gerador. 2010. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, **Universidade Estadual Paulista**, São Paulo, 2010..

FERREIRA, C. E.; YADA, M. M. Plano de negócio para a produção de biodiesel através de óleo residual de fritura. 2019.

FIRESTONE, D. **Physical and Chemical Characteristics of Oils, Fats, and Waxes**. [S.I.]: Aocs Press, 2009.

GEBREMARIAM, S. N.; MARCHETTI, J. M. Economics of biodiesel production: Review. **Energy Conversion and Management**, v. 168, n. April, p. 74–84, 2018.

GIL, A.C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 2. ed. SP: Atlas, 1991.

GOLDEMBERG, J. Biomassa e energia. **Quimica Nova**, v. 32, n. 3, p. 582–587, 2009.

GUDE, V. G.; PATIL, P.; DENG, S. Microwave energy potential for large scale biodiesel production. **World Renewable Energy Forum, WREF 2012, Including World Renewable Energy Congress XII and Colorado Renewable Energy Society (CRES) Annual Conferen**, v. 1, n. c, p. 751–759, 2012.

HERNANDO, J. et al. Biodiesel and FAME synthesis assisted by microwaves: Homogeneous batch and flow processes. **Fuel**, v. 86, n. 10–11, p. 1641–1644, 2007.

KNOTHE G.; KRAHL J.; GERPEN, J. **The biodiesel handbook**. [S.I.]: Elsevier, 2015.

LERTSATHAPORNSUK, V. et al. Microwave assisted in continuous biodiesel production from waste frying palm oil and its performance in a 100 kW diesel generator. **Fuel Processing Technology**, v. 89, n. 12, p. 1330–1336, 2008.

LOTERO, E et al. Synthesis of biodiesel via acid catalysis. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 44, n. 14, p. 5353–5363, 2005.

MOTASEMI, F.; ANI, F. N. A review on microwave-assisted production of biodiesel. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 7, p. 4719–4733, 2012.

NASCIMENTO, U. M. et al. Otimização da produção de biodiesel a partir de

óleo de coco babaçu com aquecimento por microondas. **Eclética Química Journal**, v. 39, n. 4, p. 37, 2018.

NOMANBHAY, S.; ONG, M. Y. A review of microwave-assisted reactions for biodiesel production. **Bioengineering**, v. 4, n. 2, 2017.

PARDAL, A. et al. Utilização do biodiesel: perspectiva química e ambiental. **Research and Networks in Health**, v. 1, n. 3, p. 6, 2017.

REI, P. A. G. V. Procedimentos laboratoriais para o controlo da qualidade do biodiesel. p. 142, 2007.

RUIZ, J. A. **Metodologia Científica: guia para eficiência nos estudos**. 4. ed. SP: Atlas, 1996.

frying oil: optimization of transesterification process using microwave irradiation. **MALAYSIAN JOURNAL OF CHEMISTRY (MJChem)**, v. 6, n. 1, p. 77-82, 2004.

SCHANCHE, J. S. Microwave synthesis solutions from Personal Chemistry. **Molecular Diversity**, v. 7, n. 2–4, p. 293–300, 2003.

VOLLHARDT, P; SCHORE, N. E. **Química Orgânica: Estrutura e Função**. Bookman Editora, 2013.

SCHUCHARDT, U.; SERCHELI, R.; VARGAS, R. M. Transesterification of Vegetable Oils: a Review General Aspects of Transesterification Transesterification of Vegetable Oils Acid-Catalyzed Processes Base-Catalyzed Processes. **J. Braz. Chem. Soc.**, v. 9, n. 1, p. 199–210, 1998.

SURATI, M A.; JAUHARI, S; DESAI, K. R. A brief review: Microwave assisted organic reaction. **Archives of Applied Science Research**, v. 4, n. 1, p. 645-661, 2012.

OLIVEIRA, P. T. D. J. **Produção de Biodiesel por via catalítica e indução de microondas**. 2008. Tese de Doutorado. **Instituto Politécnico de Bragança, Escola Superior de Tecnologia e de Gestão**.