

PRODUÇÃO DE BIODIESEL EM REATOR CONTÍNUO IRRADIADO COM MICRO-ONDAS

Bruna Lotti Bertucci ¹; Edmilson Renato de Castro ²; Renata Borges do Nascimento ²

¹ Aluno de Iniciação Científica do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT);

² Professor(a) do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT).

Resumo. *O objetivo principal desta pesquisa foi a produção de biodiesel utilizando um reator contínuo irradiado com micro-ondas. Os testes com micro-ondas foram executados em equipamento desenvolvido pelo Laboratório de Micro-ondas do Instituto Mauá de Tecnologia para esta finalidade. A quantificação do biodiesel formado durante a reação foi realizada por cromatografia gasosa e o maior rendimento alcançado foi de 74,6 %.*

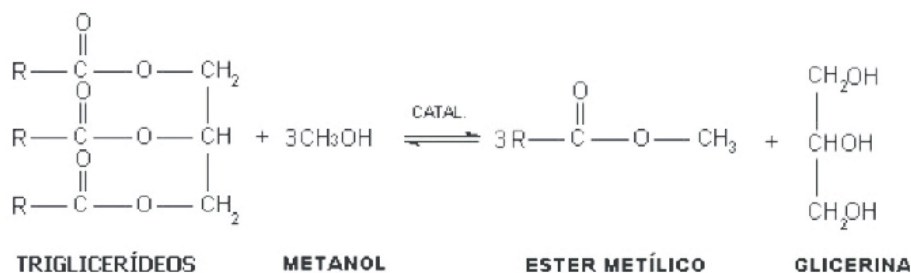
Introdução

Nas últimas décadas há um crescente interesse em substituir os derivados de petróleo em várias aplicações devido a inúmeras razões, como por exemplo relacionadas a aspectos ambientais, ao esgotamento de recursos naturais, como o petróleo, e garantir aos processos em geral uma segurança energética. Diante da necessidade de atenuar mudanças climáticas que são prejudiciais ao planeta devido ao uso desses derivados de petróleo, como por exemplo, reduzir a poluição do meio ambiente, reduzindo o consumo de combustíveis fósseis e assim alcançar um desenvolvimento global mais equilibrado e duradouro, tornando o mundo mais sustentável, mais saudável, mais seguro e agradável de viver. Com este fato e com a comprovadamente crescente demanda pelo uso de fontes energéticas limpas, as pesquisas visando o desenvolvimento de novos combustíveis tem ganhado destaque no cenário mundial. Nesse contexto, o biodiesel já demonstrou ser uma alternativa promissora, pois ele reduz as emissões de gases de efeito estufa, já que é derivado de fontes renováveis, como óleos vegetais e gorduras, o que significa dizer que a sua queima libera menos dióxido de carbono (CO₂) e outros poluentes comparados aos combustíveis tradicionais. Com este cenário, a busca por métodos mais eficazes na produção do biodiesel tem conduzido à estudos de novas rotas tecnológicas, em outras palavras, rotas que reduzam o tempo de processamento, reduzam o consumo de energia e reduzam o impacto ambiental. Uma alternativa interessante é o uso de reatores contínuos que possuem a capacidade de melhorar a velocidade de processamento de vários produtos químicos e consequentemente melhorar o rendimento e a produtividade deles em comparação com reatores em bateladas, nos quais há tempos de carga de reagentes, da reação propriamente dita e descarga dos produtos. O processamento contínuo, em geral é melhor, porque as reações acontecem de forma constante e ininterrupta, o que aumenta o desempenho global do sistema. Dessa forma, há um melhor aproveitamento dos reagentes, o que ajuda a minimizar desperdícios e otimizar a conversão em produtos desejados ⁽¹⁾. Aliada as vantagens de utilizar um reator contínuo em processos químicos, as principais vantagens em aplicar a energia de micro-ondas como fonte calor em contraste com as fontes de calor convencionais, é que as micro-ondas podem aquecer diretamente as moléculas na maior parte de uma mistura. Além da eficiência energética, o aquecimento por micro-ondas tem vários outros benefícios, como acelerar reações e oferecer condições reacionais mais suaves, maiores rendimentos e melhores seletividades, além de permitir métodos livres de solventes e muitas vezes de catalisadores. Com toda essa premissa, esta pesquisa visou contribuir no desenvolvimento, em fase inicial, de uma rota que produza biodiesel em reator contínuo aquecido por micro-ondas. Como forma de entender e familiarizar-se com a reação de transesterificação antes de processá-la continuamente, estudou-se a produção do biodiesel em batelada.

Biodiesel: O biodiesel é composto de ésteres metílicos ou etílicos produzidos a partir de óleo vegetal ou de gordura e tem propriedades de combustível semelhantes ao combustível diesel, que torna seu uso como biocombustível. Atualmente, os processos comerciais de produção de biodiesel são

baseados em métodos de aquecimento convencionais ou supercríticos. Os métodos comumente usados são: pirólise, microemulsões, diluição e transesterificação de óleos em ésteres. Entre esses métodos, a transesterificação provou ser a rota mais simples e econômica para produzi-lo, com características físicas semelhantes ao diesel fóssil e pouca ou nenhuma formação de depósitos quando usada em motores a diesel. A transesterificação é um processo no qual um álcool (metanol ou etanol) na presença de um catalisador (ácido, alcalino ou enzima) é usado para quebrar quimicamente a molécula dos óleos vegetais ou gorduras animais em ésteres metílicos ou etílicos do combustível renovável. A reação estequiométrica deste processo requer 1 mol de um triglicerídeo e 3 mols de álcool. No entanto, o excesso de álcool é usado para aumentar os rendimentos dos ésteres alquílicos, deslocando o equilíbrio em direção à formação de ésteres e para permitir sua separação de fase do glicerol formado como subproduto ⁽²⁾. O processo geral de transesterificação que tem como produto o biodiesel está descrito na Figura 1.

Figura 1- Reação de transesterificação de triglicerídeos com metanol ⁽³⁾



Micro-ondas: As micro-ondas são radiações eletromagnéticas não-ionizantes com comprimentos de ondas, no ar, de 1 mm a 1 m e a frequência variando entre 300 MHz a 300 GHz. No espectro eletromagnético, encontram-se próximas às ondas de rádio e para evitar possíveis interferências com essas, as frequências de trabalho dos aparelhos de micro-ondas para uso doméstico e industrial, na maioria das aplicações, têm-se fixado em 2,45 GHz. O aquecimento por micro-ondas, também chamado de aquecimento dielétrico, possui técnicas de eletro aquecimento, como indução, radiofrequência, resistência direta ou aquecimento por infravermelho, que utilizam partes específicas do espectro eletromagnético. Esses processos se complementam e, em casos específicos, substituem totalmente os sistemas convencionais de aquecimento usados na indústria ou em pesquisas. Isso ocorre porque alguns sistemas convencionais são muito volumosos, não são fáceis de operar, podem poluir o meio ambiente devido a emissões prejudiciais e, acima de tudo, podem ser muito ineficientes. As principais vantagens do uso de micro-ondas para muitos processamentos industriais são a rápida transferência de calor transferida diretamente para a amostra, um aquecimento volumétrico e seletivo e ambiente livre de poluição, pois não há produtos de combustão. ⁽⁴⁾

Materiais e Métodos

Materiais

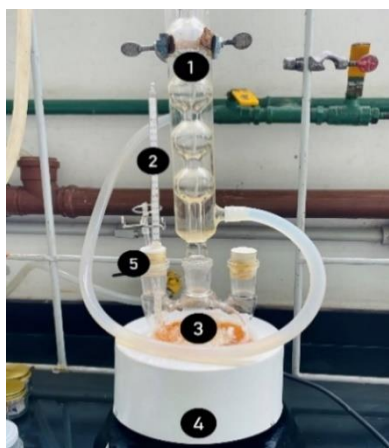
Na realização da síntese do biodiesel por batelada, foram utilizados como reagentes o óleo de soja *in natura* (densidade de 0,93 g/cm³ a 20°C) e o álcool metílico (densidade 0,79 g/cm³ a 20 °C e ponto de ebulição de aproximadamente 64,7 °C). O catalisador utilizado foi o sódio metálico (densidade de 0,98 g/cm³ e um ponto de ebulição de 882,8 °C). As quantidades, em gramas, utilizadas na reação estão detalhadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Massas dos reagentes e do catalisador utilizado na produção de biodiesel em batelada por aquecimento elétrico

Reagentes	Massa (g)
Óleo <i>in natura</i>	235,12
Álcool metílico	34,12
Catalisador (Na)	5,00

O equipamento utilizado para produzir o biodiesel em batelada com aquecimento por resistências elétricas consiste em uma manta aquecedora tipo ninho com agitação para balões de 0,5 L, conectada a um conjunto de vidrarias específicas de laboratório para reações de transesterificação. O equipamento completo está descrito e apresentado pela Figura 2.

Figura 2 – Equipamento utilizado para a produção do biodiesel por aquecimento elétrico em batelada



- 01.** Condensador Allihn, tipo bolas para refluxo dos voláteis;
- 02.** Termômetro (ICEL - Modelo RD-880) com termopar tipo J e escala entre 0 °C a 400 °C;
- 03.** Balão de fundo redondo de 0,5 L com três bocas 24/40;
- 04.** Manta aquecedora tipo ninho com agitação, para balões de fundo redondo de 0,5 L (Fisatom - Modelo 52M, 240 W);
- 05.** Coletor de amostras para análise;

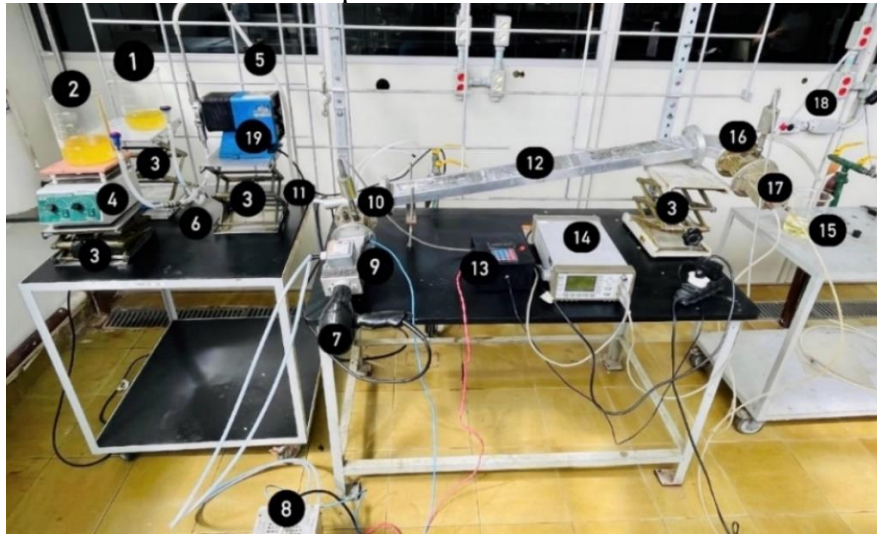
Na produção do biodiesel em reator contínuo, os reagentes utilizados foram os mesmos da batelada, porém as quantidades foram alteradas, conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Massa dos reagentes e do catalisador utilizado na produção de biodiesel em um reator contínuo irradiado por micro-ondas

Reagentes	Massa (g)
Óleo <i>in natura</i>	350,00
Álcool metílico	59,41
Catalisador (Na)	7,00

O sistema utilizado para a produção do biodiesel em um reator contínuo irradiado com micro-ondas consiste em várias vidrarias comumente usadas em laboratório e acessórios específicos. Iniciou-se com dois tanques (1 e 2) de alimentação apoiados sobre plataformas elevatórias, o 1 no qual realiza-se a limpeza do reator, e o 2 que está sobre um agitador magnético e continha os reagentes e catalisador necessários para a reação. Esta limpeza é feita apenas com óleo e dura aproximadamente 9 minutos, e então a válvula de controle é fechada para este tanque, e aberta para que os reagentes comecem a serem bombeados por um tubo de alimentação até o reator. Este reator é tubular e contínuo e está inserido no interior de uma cavidade retangular, conectada a guias de ondas para transportar as micro-ondas geradas pela válvula magnetron, que, por sua vez, estava conectada a um sistema para proteger e quantificar as micro-ondas (acoplador direcional, circulador, sensores e medidores de potência). Além disso, há um sistema de refrigeração a ar do gerador de micro-ondas e uma carga de dissipação que absorve uma parte da potência de micro-ondas que não foi usada no processo. Por fim, a saída do reator possui um termômetro e um tanque, onde o produto biodiesel está formado. O equipamento completo está apresentado pela Figura 3.

Figura 3 – Equipamentos utilizados para a produção do biodiesel em um reator contínuo irradiado por micro-ondas



- | | | |
|---|-------------------------------------|---------------------------------------|
| 01. Tanque de alimentação 1; | 09. Gerador de micro-ondas – | 14. Medidor de potência de |
| 02. Tanque de alimentação 2; | Válvula magnetron; | micro-ondas; |
| 03. Plataforma elevatória tipo Jack; | 10 e 16. Acopladores | 15. Tanque de saída (produto |
| 04. Agitador magnético; | direcionais; | biodiesel formado); |
| 05. Tubo de alimentação; | 11. Reator tubular contínuo; | 17. Carga de dissipação; |
| 06. Válvula de controle tipo esfera; | 12. Cavidade retangular | 18. Termômetro (escala entre 0 |
| 07. Sistema de refrigeração a ar do | (comprimento 100 cm, | a 400 °C); |
| gerador de micro-ondas; | largura 8 cm, altura 4 cm); | 19. Bomba de dosagem |
| 08. Fonte de alta tensão; | 13. Controlador de potência | química; |
| | de micro-ondas; | |

Métodos

Testou-se dois diferentes tipos de álcoois (etílico e metílico) para determinar qual deles seria utilizado na transesterificação por batelada do biodiesel junto ao catalisador metal alcalino de sódio e ao óleo *in natura*. As massas dos reagentes utilizados na síntese do biodiesel foram adotadas segundo a estequiometria da reação, de 1 mol de triglicerídeo, para 3 mols de álcool, conforme apresentado pela Figura 1. Na sequência, determinou-se o tempo necessário de reação para a formação de um biodiesel com o maior rendimento possível. Deste modo, foram realizadas sínteses com 20 e 40 minutos. Após determinar a rota operacional, caracterizações físicas do biodiesel produzido por batelada foram realizadas. Caracterizou-se, segundo normas ABNT, a densidade, a curva de volatilidade ASTM, o ponto de fulgor em vaso aberto, a viscosidade, o ponto de névoa, e o ponto de fluidez. A seguir, um resumo de cada metodologia empregada nestas análises.

Para determinar a densidade do biodiesel, transferiu-se uma alíquota representativa da amostra para uma proveta e deixou-se a temperatura entre ambos estabilizar-se. Mergulhou-se o densímetro selecionado na amostra e aguardou-se a estabilização da temperatura, deixando-o flutuar. Após alcançar a temperatura de equilíbrio, realizou-se a leitura da escala e anotou-se a temperatura da amostra.⁽⁵⁾ No ensaio da volatilização atmosférico (ASTM), o método se baseia na destilação de um fluido, que visa encontrar o comportamento desse composto a faixa de temperaturas em que diferentes frações do líquido são vaporizadas e condensadas. Inicia-se colocando a amostra no balão de destilação e aquecendo-a gradualmente. À medida que a temperatura aumenta, diferentes frações do líquido são vaporizadas e condensadas no condensador. Essas frações são coletadas e registradas em diferentes intervalos de temperatura⁽⁶⁾. Na caracterização do ponto de fulgor em vaso aberto uma alíquota de 100 mL de biodiesel foi adicionada a uma cuba de ensaio, aquecido gradualmente, enquanto uma chama de ensaio é periodicamente passada sobre a cuba. A temperatura em que ocorre uma breve faísca azul momentânea é registrada como o ponto de fulgor⁽⁷⁾. No teste da viscosidade, o biocombustível foi inserido em um viscosímetro apropriado para este tipo de análise (Cannon-Fensk

nº50). A metodologia consiste em sugar o fluido, passando de um capilar maior até chegar em outro capilar menor. Com isso, mede-se o tempo necessário em que o óleo necessita para ir do menisco superior até o inferior e a partir dessa medida, calcula-se a viscosidade ⁽⁸⁾. Nos ensaios tanto do ponto de fluidez, quanto do ponto de névoa, 55 mL de biodiesel foram colocados em um tubo de Nessler, resfriado em banho de gelo seco e álcool etílico, e de tempo em tempo, o frasco é inclinado manualmente. Assim que o líquido não flui por mais de 5 segundos, com um auxílio de um termômetro, é determinado o ponto de fluidez. Ou seja, representa a menor temperatura em que o combustível pode fluir, a fim de avaliar o desempenho nas condições de uso em que é submetido a baixas temperaturas ⁽⁹⁾. Já no ponto de névoa, o procedimento é similar e visa caracterizar se ocorrerá o aparecimento de impurezas na amostra, que representa o momento em que um determinado composto (“impureza”) atinge uma temperatura que inicia sua cristalização, sendo perceptível quando o composto fica turvo ou apresenta um precipitado em seu fundo ⁽¹⁰⁾. A Figura 4 apresenta os equipamentos utilizados nestas caracterizações físicas do biodiesel.

Figura 4 – Equipamentos utilizados para a caracterização e avaliação do biodiesel



a) Destilador de solventes ASTM; b) Ponto de fulgor vaso aberto Cleveland; c) Banho viscosimétrico com viscosímetro tipo Cannon-Fenske; d) Ponto de fluidez

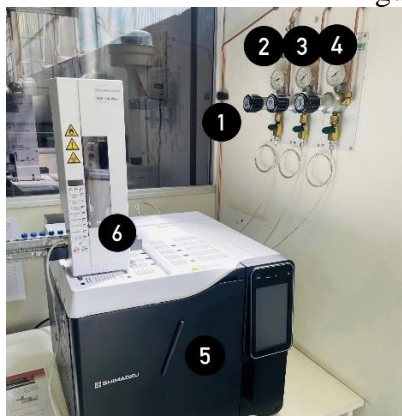
Após essas etapas, com o objetivo de obter uma eficiência superior ao obtido em batelada, começou-se então a construção da metodologia que seria utilizada para a produção do biodiesel em um reator contínuo irradiado com micro-ondas. Para isso, iniciou-se os ensaios das vazões de óleo da bomba com todas as suas porcentagens de velocidade de pulso (de 10 a 100%), a fim de analisar em qual destas se encaixaria melhor no contexto deste trabalho. Quanto ao reator contínuo propriamente dito, observou-se que a sua inclinação poderia influenciar na mistura de reagentes, na transferência de calor, na separação de produtos ou até no escoamento de resíduos. Com isso, além dos testes com a vazão do óleo, foram feitos dois ensaios para analisar a influência da inclinação, isto é, na posição horizontal e com 30° de inclinação. Após estas etapas iniciais, estimou-se o comportamento real de um fluido em um reator, utilizando a técnica denominada “Distribuição dos Tempos de Residência (DTR)”. Esta é, resumidamente, o resultado de medições obtidas a partir de experimentos aplicando-se um traçador ao reator como forma de perturbação e avaliando-se a resposta. A injeção de um traçador é realizada na entrada de um sistema, enquanto a coleta de amostras é realizada na saída para elaborar a curva de concentração pelo tempo ⁽¹¹⁾. Neste caso, realizou-se a injeção de óleo misturado com um corante vermelho na entrada do reator, e então coletou-se as amostras a cada 2 minutos para analisá-las, como mostra a Figura 5. Como método de análise da curva de calibração criada, para calcular a área sob essa curva, utilizou-se a Regra de Simpson.

Determinou-se as porcentagens das potências de micro-ondas, executando-se testes com 50%, 60%, 70%, 80%, 90% e 100% da capacidade da válvula magnetron, com a finalidade de também avaliar em qual destas condições se obteria um rendimento maior possível de biodiesel em um tempo de 12 minutos de reação.

E para as análises químicas das amostras de biodiesel coletadas durante os experimentos utilizou-se um cromatógrafo gasoso, da marca Shimadzu do modelo 2030, como apresentado pela Figura 5. A fase móvel utilizada foi o gás hélio e coluna polar com fase estacionária em

polietilenoglicol (Carbowax). A Tabela 3 apresenta as condições de rampa de temperatura utilizadas, e as demais informações necessárias para o desenvolvimento do método no equipamento.

Figura 5 – Cromatógrafo a gás Shimadzu 2030



- 01.** Válvula reguladora de pressão para o controle de fluxo gasoso;
- 02.** Gás hélio;
- 03.** Ar sintético;
- 04.** Gás hidrogênio;
- 05.** Coluna polar (Carbowax);
- 06.** Injetor (vaporizador) de amostra.

Tabela 3 – Condições nominais de execução do método analítico cromatográfico

Volume de amostra	0,1 µL
Temperatura do injetor e detector	250 °C
Temperatura inicial	120 °C por 2 min
Rampa	10 °C/min até 180 °C, 3 min 5 °C/min até 230 °C, 2 min
Tempo total da corrida	23 min
Split	1:50

Resultados e Discussão

O metanol demonstrou ser mais eficaz em termos de rendimento final do produto do que etanol, uma vez que seu rendimento foi superior, conforme apresentado pela Tabela 4.

Tabela 4 – Produção do biodiesel com álcool etílico e metílico

Amostra (min)	Volume (mL)	Concentração (mg/ML)	Massa (mg)	Biodiesel etanol (%)	Massa (mg)	Biodiesel metanol (%)
0	5	10	254,7	19,34	251,3	0,77
10	5	10	252,1	70,35	253,4	37,53
20	5	10	256,0	73,57	256,9	42,44
30	5	10	260,4	73,33	251,9	34,78
40	5	10	268,4	72,46	253,7	59,49
50	5	10	260,0	77,23	250,9	88,97
60	5	10	253,4	72,21	263,7	94,79

A partir da estequiometria da reação, conseguiu-se calcular as massas que seriam necessárias tanto para o biodiesel produzido por batelada aquecido por resistências elétricas, quanto para o biodiesel produzido em reator contínuo irradiado com micro-ondas, conforme Tabela 5.

Tabela 5 – Massas dos reagentes para produção do biodiesel em batelada, e em um reator contínuo

Reagentes Estequiometria	Biodiesel batelada		Biodiesel contínuo	
	Óleo <i>in natura</i> 1	Metanol 3	Óleo <i>in natura</i> 1	Metanol 3
	566,26 g	3*32,04g	566,26 g	3*32,04g
	566,26 g	96,12 g	566,26 g	96,12 g
	201,00 g	m1	350,00 g	m2
	Massa de metanol = 34,12 g		Massa de metanol = 59,41 g	
	Massa total = 235,12 g		Massa total = 409,41 g	

Nos ensaios da determinação do tempo a ser padronizado para a produção de biodiesel em batelada por aquecimento convencional, percebeu-se que 40 minutos foi o que apresentou uma média superior de rendimentos, ou seja, resultados mais constantes como as Tabelas 6 e 7 indicam.

Tabela 6 – Produção de biodiesel em batelada por 20 minutos

Ensaio	Massa do óleo (g)	Massa do álcool (g)	Volume do catalisador (mL)	Temperatura (°C)	Rendimento (%)
1	201,99	51,24	5,00	64	73,57
2	201,16	51,15	5,00	72	91,0
3	201,23	51,02	5,00	74	97,01
4	201,50	51,09	5,00	150	89,99
5	201,29	51,07	5,00	72	92,84
6	201,67	51,70	5,00	77	89,98
					Média = 89,065

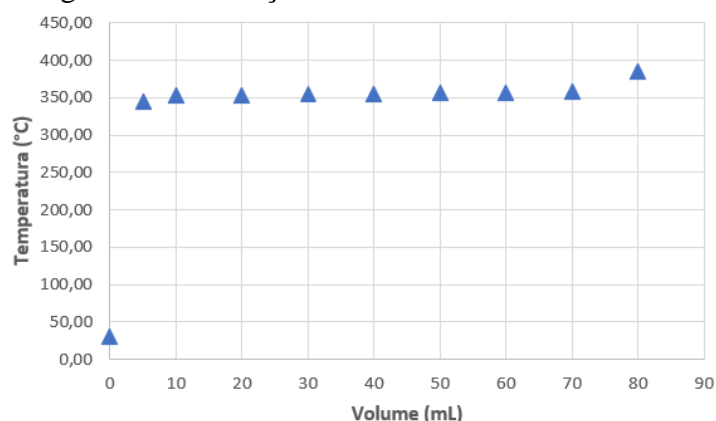
Tabela 7 - Produção de biodiesel em batelada por 40 minutos

Ensaio	Massa do óleo (g)	Massa do álcool (g)	Volume do catalisador (mL)	Temperatura (°C)	Rendimento (%)
1	201,63	51,22	5,00	74	95,98
2	201,12	51,75	5,00	100	96,00
3	201,19	51,38	5,00	75	95,70
4	201,43	51,38	5,00	72	96,00
5	201,41	51,50	5,00	76	80,90
6	202,30	51,79	5,00	73	84,90
					Média = 91,58

Para os métodos de caracterização deste biocombustível, obteve-se resultados satisfatórios, uma vez que comparando-os com um biodiesel padrão⁽¹²⁾, se mostraram dentro do esperado. Como exemplo, o padrão possui uma densidade entre 0,86 e 0,90 g/cm³ e o que foi produzido em batelada no Laboratório de Micro-ondas do IMT possuiu uma densidade de 0,88 g/cm³.

Na destilação ASTM para um biodiesel padrão, ele pode ser parcial ou totalmente evaporado numa temperatura máxima de 400°C⁽¹³⁾. No caso do biodiesel em batelada, alcançou-se uma temperatura máxima de 384,54°C, como apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Destilação ASTM biodiesel em batelada



No ponto de fulgor em vaso aberto realizou-se uma triplicata e obteve-se uma temperatura média de 176,67°C, de acordo com a Tabela 8. O esperado seria de até 190°C⁽¹⁴⁾, então também é possível concluir que está dentro da referência.

Tabela 8–Ponto de fulgor vaso aberto biodiesel em batelada

Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)	
20	170	
40	176	Média = 176,67°C
58	184	

O biodiesel tem uma viscosidade menor que a dos óleos vegetais, próxima ao diesel de petróleo 5,0 mm²/s, ambas a 40°C⁽¹⁵⁾ e o que foi produzido possuiu uma viscosidade média de 4,707 mm²/s, como indica a Tabela 9.

Tabela 9– Viscosidade biodiesel em batelada

Tempo (s)	Viscosidade (mm ² /s)	
579	4,632	
578	4,624	Média = 4,71 mm ² /s
608	4,864	

De acordo com a norma ASTM D6751, que estabelece especificações para o biodiesel nos Estados Unidos, o ponto de fluidez do biodiesel está abaixo de 0°C, e tendo este objetivo, o biodiesel produzido em batelada atingiu uma média de -10,75°C, como mostra a Tabela 10.

Tabela 10 – Ponto de fluidez biodiesel em batelada

Ensaio	Intervalo de temperatura (°C)	Média
1	-10,5 a -12,5	-11,5
2	-9,5 a 10,5	-10,0
		-10,75°C

Sobre o ponto de névoa de um biodiesel é indicado que seja entre 0 a 16°C⁽¹⁶⁾. Porém, o combustível produzido em batelada obteve esse fator a 21°C, indicando a possibilidade de ter uma performance um pouco menos resistente a temperaturas mais baixas em comparação com um biodiesel que tenha um ponto de névoa menor.

Em relação aos resultados obtidos na produção do biodiesel em um reator contínuo irradiado com micro-ondas, foi escolhido a porcentagem máxima (100%) de pulso da bomba dosadora, já que esta contribui para uma maior velocidade durante o experimento e de 30° de inclinação do reator,

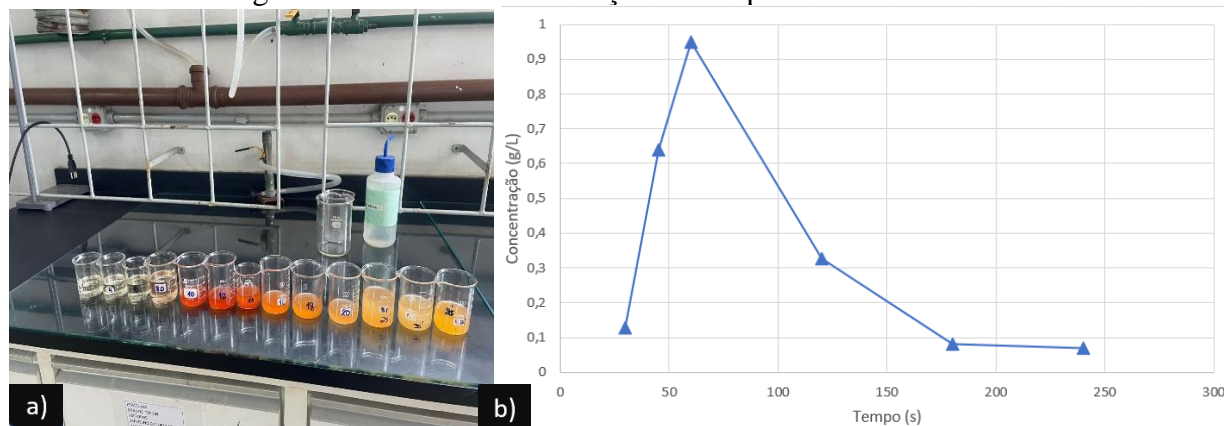
pois as vazões médias do produto foram superiores, como mostra a Tabela 11. Pretendeu-se com isso, otimizar o processo e a qualidade do biocombustível.

Tabela 11 – Vazões médias do reator sem/com inclinação de 30°

Velocidade do pulso	Volume (mL) reator sem inclinação	Vazão média (mL/min) reator sem inclinação	Volume (mL) reator com inclinação de 30°	Vazão média (mL/min) reator com inclinação de 30°
100%	64,0	62,7	64,0	65,3
	62,0		66,0	
	62,0		66,0	

Nos testes do tempo de residência, as amostras coletadas foram analisadas através da espectrometria UV/visível, que possibilitou quantificar as concentrações do traçador, através de uma curva de calibração previamente criada. Após estas determinações, calculou-se a área desta curva pela “Regra de Simpson”, encontrando uma distribuição do tempo de residência deste reator contínuo de aproximadamente 103 segundos.

Figura 7 – Ensaio da distribuição do tempo de residência do reator



a) Amostras coletadas; b) Gráfico das concentrações em função do tempo

Nos ensaios das porcentagens das potências de micro-ondas, a máxima geração da válvula magnetron (100%) foi a que resultou em maiores rendimentos de biodiesel, e na maior temperatura possível como apresenta a Tabela 12. Isso pode ser explicado pelo fato de que o aumento da temperatura pode acelerar algumas reações químicas envolvidas na produção, podendo levar a uma maior eficiência do processo em termos de conversão de matéria-prima em biodiesel.

Tabela 12 – Relação entre as potências de micro-ondas com os rendimentos obtidos de biodiesel

Potência de micro-ondas (%)	Temperatura máxima (°C)	Rendimento biodiesel (%)
50	-----	13,972
60	-----	28,354
70	-----	25,157
80	81	29,021
90	84	29,982
100	102	74,596

É importante ressaltar que por razões adversas, não foi possível realizar a caracterização do biocombustível produzido por reator contínuo, e compará-lo com aquele produzido em batelada. Por conseguinte, é possível perceber que por mais que o biodiesel produzido em um reator contínuo irradiado com micro-ondas possua um rendimento máximo de 74,6%, não foi possível atingir um

resultado superior ao de um biodiesel produzido em batelada por aquecimento convencional, que alcançou um rendimento de 96,0%. Isso pode ser compreendido por inúmeros fatores dentro desse sistema, podendo ter melhorias com a reconfiguração de algumas metodologias e do protótipo utilizadas neste trabalho.

Conclusão

Neste estudo sobre a produção de biodiesel em reator contínuo irradiado com micro-ondas, demonstrou-se o potencial desta tecnologia como uma alternativa eficiente e sustentável aos métodos convencionais. Embora os rendimentos de biodiesel não tenham superado os processos em batelada em termos percentuais, esta pesquisa também contribuiu para a literatura ao fornecer observações significativas sobre a otimização das condições de reação, como a influência da inclinação do reator, e a segurança energética promovida pelas micro-ondas na eficiência do processo. Em suma, o presente trabalho destaca a aplicabilidade e os benefícios de reatores contínuos irradiados com micro-ondas na produção de biodiesel. Contudo, são necessários mais estudos para otimizar ainda mais o processo e realizar comparações abrangentes de custo-benefício com métodos de produção convencionais. Esta pesquisa abre caminho para futuras investigações que podem levar a melhorias significativas na produção de biodiesel, alinhando-se com as crescentes demandas por processos industriais mais verdes e eficazes.

Referências Bibliográficas

- ANALITICA, T. I. **Reatores de Fluxo Contínuo**. Disponível em: <<https://blog.tennessine.com.br/2023/07/25/os-reatores-de-fluxo-continuo-sao-fundamentais-para-a-industria-quimica/>>. Acesso em: 24 nov. 2023. (1)
- GUDE, V. et al. Microwave energy potential for biodiesel production. *Sustainable Chemical Processes*, 22 maio 2013. (2)
- MARQUES, A. (ED.). Reação de transesterificação de triacilgliceróis (triglicerídeos), onde R representa a cadeia carbônica dos ácidos graxos. fev. 2012. Disponível em: <https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Reacao-de-transesterificacao-de-triacilgliceroids-triglicerideos-onde-R_fig1_277029386> (3)
- Metaxas. A.C.; Meredith, R.J. (1983) *Industrial Microwave Heating*. Peter Peregrinus Ltd., London, United Kingdom. (4)
- MIYASHIRO, C. et al. PRODUÇÃO DE BIODIESEL A PARTIR DA TRANSETERIFICAÇÃO DE ÓLEOS RESIDUAIS. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, [s.d.]. (15)
- NICKEL, CAMILLA. *DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO PONTO DE NÉVOA de MISTURAS DOS CONSTITUINTES DO BODIESEL E DIESEL POR CALORIMETRIA EXPLORATÓRIA DIFERENCIAL*. 2015. (16)
- NORMA BRASILEIRA ABNT NBR 7148. [s.l: s.n.]. (5)
- NORMA BRASILEIRA ABNT NBR 9619. [s.l: s.n.]. (6)
- NORMA BRASILEIRA ABNT NBR 11341. [s.l: s.n.]. (7)
- NORMA BRASILEIRA ABNT NBR 10441. [s.l: s.n.]. (8)
- NORMA BRASILEIRA ABNT NBR 11349. [s.l: s.n.]. (9)
- NORMA BRASILEIRA ABNT NBR 14598. [s.l: s.n.]. (14)
- SATIRO, A. R. G.; ANDREATTA, D.; PORTO, P. S. S. DISTRIBUIÇÃO DE TEMPOS DE RESIDÊNCIA EM REATORES DE ELETROFLOCULAÇÃO PARA DIFERENTES GEOMETRIAS OPERANDO SOB FLUXO CONTÍNUO. XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química: [s.n.]. (11)
- SCHUARÇA, R.; MARTIM, E. ESTUDO DAS CURVAS DE DESTILAÇÃO ASTM D1160 EM REGIME TRANSIENTE. Article—I Congresso Nacional de Engenharia de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis: [s.n.]. (13)
- Standard Test Method for Cloud Point of Petroleum Products. [s.l: s.n.]. (10)
- ZUNIGA, A. et al. REVISÃO: PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DO BODIESEL. [s.l: s.n.]. (12)