

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
UNIDADE ACADÊMICA CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

STEPHANIE LAYLA ALÉCIO LIMA

**Simulação de um Reator Tubular na Produção de Biodiesel de Óleo Residual Utilizando
Técnicas Estatísticas**

Maceió
2023

STEPHANIE LAYLA ALÉCIO LIMA

Simulação de um Reator Tubular na Produção de Biodiesel de Óleo Residual Utilizando Técnicas Estatísticas

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Alagoas como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dra. Dayana de Gusmão Coelho

Maceió
2023

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

L732s Lima, Stephanie Layla Alécio.
Simulação de um reator tubular na produção de biodiesel de óleo residual
utilizando técnicas estatísticas / Stephanie Layla Alécio Lima. – 2023.
26 f. il. : figs. ; tabs. color.

Orientadora: Dayana de Gusmão Coelho.
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Química).
Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2023.

Bibliografia: f. 24-26.

1. Resíduos. 2. Frituras - Óleo. 3. Biodiesel. 4. Planejamento fatorial. I.
Título.

CDU: 662.753



Stephanie Layla Alécio Lima

***SIMULAÇÃO DE UM REATOR TUBULAR NA PRODUÇÃO DE BIODIESEL DE
ÓLEO RESIDUAL UTILIZANDO TÉCNICAS ESTATÍSTICAS***

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 DAYANA DE GUSMAO COELHO
Data: 24/05/2023 09:29:12-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dra. Dayana de Gusmão Coêlho

Documento assinado digitalmente
 EDUARDO LUCENA CAVALCANTE DE AMOR
Data: 23/05/2023 12:22:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Eduardo Lucena Cavalcante de Amorim

Documento assinado digitalmente
 MARITZA MONTOYA URBINA
Data: 22/05/2023 19:49:51-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dra. Maritza Montoya Urbina

RESUMO

A modernidade trouxe consigo grandes revoluções sistemáticas, econômicas e energéticas. Consequentemente, a mudança no comportamento social atrelada a um maior consumo gerou uma maior produção de resíduos sólidos. Essa produção, por sua vez, não foi acompanhada de um gerenciamento adequado que visasse definir o seu manuseio, coleta, tratamento e descarte. O óleo de fritura no Brasil de seus quatro milhões produzidos anualmente, dois bilhões é descartado incorretamente. Esse descarte irregular segue para estações de tratamento de esgoto demandando medidas que tornam esse tratamento aproximadamente 45% mais oneroso. Visando buscar alternativas de reuso, o presente trabalho, visa aperfeiçoar as condições de processo da produção de biodiesel em um reator PFR cujas simulações passaram por uma análise com o objetivo de validar o modelo por meio de dados experimentais da literatura. Seus valores, por sua vez, apresentaram comportamento similar em ambos os casos. Em seguida foi realizado um estudo estatístico por meio de análise estatística através do Planejamento Fatorial Completo 2^3 objetivando encontrar condições ótimas de operação para um reator PFR. As variáveis de vazão volumétrica e diâmetros foram tidas como significantes com relação à conversão do biodiesel, bem como a interação entre elas, tendo efeitos positivos. O erro residual foi de 0,049, enquanto que o coeficiente de determinação (R^2) foi de 0,99924. As condições ótimas de operação encontradas correspondem a um diâmetro de 0,412 m, uma vazão de 30 L/min e um comprimento de 20,185 m. A conversão obtida foi de 99,11%. O estudo foi relevante, posto que fornece parâmetros que viabilizam a otimização de reatores tubulares.

Palavras-chaves: resíduo, óleo de fritura, biodiesel, planejamento fatorial.

ABSTRACT

Modernity brought with it great systematic, economic and energy revolutions. Consequently, the change in social behavior linked to greater consumption generated greater production of solid waste. This production, in turn, was not accompanied by adequate management aimed at defining its handling, collection, treatment and disposal. Of the four million frying oils produced annually in Brazil, two billion are discarded incorrectly. This irregular disposal goes to sewage treatment stations, demanding measures that make this treatment approximately 45% more expensive. Aiming to seek reuse alternatives, the present work aims to improve the conditions of the biodiesel production process in a PFR reactor whose simulations underwent an analysis with the objective of validating the model through experimental data from the literature. Their values, in turn, showed similar behavior in both cases. Then a statistical study was carried out through statistical analysis through Full Factorial Planning 2^3 aiming to find optimal operating conditions for a PFR reactor. The variables of volumetric flow and diameters were considered significant in relation to the conversion of biodiesel, as well as the interaction between them, having positive effects. The residual error was 0.049, while the coefficient of determination (R^2) was 0.99924. The optimal operating conditions found correspond to a diameter of 0.412 m, a flow rate of 30 L/min and a length of 20.185 m. The conversion obtained was 99.11%. The study was relevant, since it provides parameters that enable the optimization of tubular reactors.

Keywords: waste, frying oil, biodiesel, factorial design

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	4
2. OBJETIVOS	5
2.1 Gerais	5
2.2 Específicos	5
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
3.1 Impacto ambiental decorrente dos resíduos sólidos	6
3.2 Oleaginosas e gordura animal	6
3.2.1 Oleaginosas.....	7
3.2.2 Gordura animal.....	9
3.3 Cenário energético atual.....	10
3.4 Óleo de fritura residual.....	10
3.5 Biodiesel.....	11
3.6 Reatores.....	12
3.6.1 Reator contínuo tubular.....	13
4. METODOLOGIA.....	14
4.1 Validação do modelo.....	14
4.2 Otimização das condições operacionais de um reator tubular.....	14
5. RESULTADOS	16
5.1 Validação do estudo de simulação.....	16
5.2 Otimização das condições operacionais de um reator tubular.....	17
6. CONCLUSÃO.....	19
REFERÊNCIAS	20

1. INTRODUÇÃO

A matriz energética representa o conjunto de fontes de energia disponíveis no país para suprir sua demanda energética. A matriz energética mundial, por sua vez, é praticamente composta por fontes não renováveis de energia. Como a utilização de combustíveis fósseis. Essa realidade reflete no aumento dos problemas relacionados ao meio ambiente dada alta demanda do uso de energia no mundo industrializado (REIS, 2011).

Nesse contexto, o biodiesel surge como uma alternativa interessante tanto para fins econômicos, como ambientais e sociais. É considerado um combustível alternativo de queima limpa com importantes conceitos ambientais e ecológicos, além de ser uma alternativa energética por conseguir suprir praticamente as mesmas demandas do diesel convencional. Outro ponto bastante favorável é a sua obtenção por meio da gordura vegetal ou animal, bem como da reciclagem de óleos residuais (FERRARI, 2005).

A matéria-prima para a produção de óleo no Brasil encontra-se fortemente concentrada na cultura de soja. Cerca de 90% dos atuais seis milhões de toneladas óleo vegetais produzidos anualmente originam-se dessas oleaginosas. Outras oleaginosas tradicionais como mamona, algodão, girassol, canola e amendoim contribuem com pequenas quantidades de óleo assim como o dendê, devido à pequena área plantada na atualidade (CARGNIN, 2007).

Sua produção acontece por meio de uma reação de transesterificação entre um ácido graxo e um álcool de cadeia curta, na presença de um catalisador sendo ele ácido, básico ou enzimático, e glicerol (REIS, 2011). A reação, por sua vez, pode sofrer grande interferência dos equipamentos, reagentes e catalisadores. Portanto, um conhecimento prévio e detalhado acerca possibilita rendimento da reação.

Os reatores contínuos do tipo tanque agitados (CSTR) são os mais utilizados nas usinas de produção do biodiesel. No entanto, eles não possuem a exclusividade para essa produção. O reator contínuo tubular (PFR) apresenta como uma alternativa para se fazer uso na produção de biodiesel, uma vez que, dentre as suas vantagens está o maior rendimento quando comparado com um reator CSTR.

Para que o rendimento superior do reator PFR em relação ao reator CSTR seja alcançado é necessário que determinadas variáveis estejam operando em condições ótimas, para tal têm-se utilizado o planejamento experimental estatístico. Essa ferramenta, por sua vez, é um conjunto de técnicas matemáticas e estatísticas que permite obter a melhor resposta para uma determinada situação (NETO, 1996).

A escolha de um reator tem grande influência sobre o processo produtivo, devendo levar em consideração o comportamento termodinâmico e cinético da reação, o volume produzido e também o regime de operação. Na modelagem, por sua vez, as escolhas das variáveis são importantes para observar o comportamento do modelo que se deseja estudar (FRANCHI, 2011). O comprimento, o diâmetro e a vazão volumétrica, são variáveis que influencia diretamente no comportamento do reator. Tendo influência na atividade da reação e, conseqüentemente, no seu rendimento (MARQUES, 2017).

Vasconcelos (2018), ISHIDA et. al (2017) e Fiori (2013), realizaram trabalhos em que a produção do biodiesel fora realizada sob a influência das variáveis citadas, bem como do reator PFR (reator contínuo tubular). Além de utilizarem condições operacionais semelhantes, ainda que finalidades de estudos diferentes.

2. OBJETIVOS

Geral

Avaliar o projeto de um reator tubular na produção de biodiesel a partir de óleo de fritura residual, através de um estudo estatístico.

2.1 Específicos

- Simulação de um reator PFR utilizando dados experimentais da literatura;
- Avaliar o efeito das variáveis de processo na produção de biodiesel;
- Otimizar variáveis de processo através de estudo estatístico com o planejamento fatorial completo 2^3 .

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção, serão abordados os principais assuntos que norteiam o impacto do descarte incorreto do óleo residual no meio ambiente, e sobre o processo e tecnologias aplicadas no emprego do óleo residual de fritura na produção de biodiesel.

3.1. Impacto Ambiental decorrente de resíduos sólidos

Inúmeras foram às mudanças sofridas pela população ao longo dos anos, desde a acelerada mudança no estilo de vida à produção desenfreada de novos produtos para o consumo. Tal ato, por sua vez, culminou numa maior produção e diversificação de resíduos.

No entanto, determinada produção não foi acompanhada de um planejamento adequado quanto ao destino destes resíduos. Posto que não há, para uma boa parte, uma destinação sanitária e ambiental correta, bem como informações suficientes acerca do tema, ainda que certos progressos sejam evidentes (GOUVEIA, 2012).

O óleo de fritura, por sua vez, bastante presente na rotina do brasileiro é um dos exemplos de resíduo sólidos que não possuem gerenciamento definido para o seu manuseio, coleta, tratamento e descarte. Quando realizado de maneira inadequada, segue para as estações de tratamento de esgoto, onde uma grande quantidade de processos físicos e produtos químicos são demandados para o tratamento dessa água. Desse modo, o tratamento torna-se cerca de 45% mais oneroso (MURTA E GARCIA, 2009).

Apesar de determinada consequência, milhares de litros de óleos usados na fritura de alimentos são descartados por ano em sistemas de esgotos. E, como resultado, aumenta-se os custos de tratamento dos efluentes (REFAAT et al., 2008). O tratamento adequado desses resíduos além de ser uma importante estratégia na preservação ambiental, é também uma opção que pode contribuir na geração de renda.

3.2. Oleaginosas e gorduras animais

Comumente, óleos e gorduras são tidos como sinônimos. No entanto, apesar da associação feita nos óleos predominam-se glicerídeos de ácidos insaturados e são líquidos na temperatura ambiente, enquanto que nas gorduras predominam-se glicerídeos de ácidos saturados e são sólidos na temperatura ambiente (PARK E PASTORE, 1989).

O biodiesel pode ser obtido tanto de óleos vegetais como da gordura animal, sendo essa uma das soluções para dar uma finalidade aos rejeitos. Posto que o Brasil é um grande produtor e consumidor de carne suínos e bovinos (MAZZONETTO, 2016).

3.2.1. Oleaginosas

Os óleos vegetais da categoria de óleos fixos ou triglicerídeos podem ser transformados em biodiesel, este por sua vez, pode ser obtido por processos químicos como craqueamento e transesterificação. A matéria-prima é submetida a um processo de neutralização e secagem, sendo a acidez presente eliminada por um processo de lavagem com solução alcalina de hidróxido de sódio ou potássio (PARENTE, 2003).

As oleaginosas, fontes dessa matéria-prima, são proteínas vegetais que além de grande potencial nutricional e alta capacidade na obtenção de óleo. Ou seja, as sementes e os frutos desses vegetais podem ser processados com o objetivo de conseguir alguma finalidade industrial (RODRIGUES, 2006).

Atualmente, a matéria-prima para a produção de óleo no Brasil encontra-se fortemente concentrada na cultura de soja. Cerca de 90% dos atuais seis milhões de toneladas óleo vegetais produzidos anualmente originam-se dessas oleaginosas. Outras oleaginosas tradicionais como mamona, algodão, girassol, canola e amendoim contribuem com pequenas quantidades de óleo assim como o dendê, devido à pequena área plantada na atualidade (CARGNIN, 2007).

No entanto, a produção de biodiesel deve respeitar a especificidade de cada região produzindo o que, de certa maneira, lhe proporcionará uma maior vantagem comparativa (HOLANDA, 2004). A tabela 1 apresenta as regiões com suas respectivas potencialidades de produção do biodiesel.

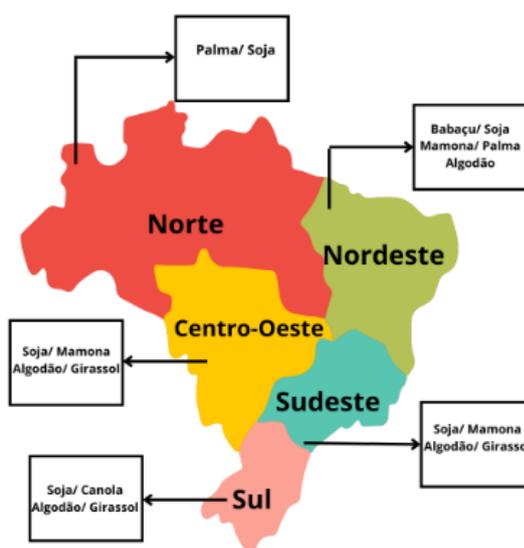
Tabela 1 - Características de culturas oleaginosas no Brasil

Espécie	Produtividade (kg/ha.ano)	Teor de óleo (%)	Rendimento (t óleo/ha)
Dendê/Palma	15000	22,0	3,0 – 6,0
Coco	1190	55,0 – 60,0	1,3 – 1,9
Babaçu	700	66,0	0,1 – 0,3
Girassol	1500	38,0 – 48,0	0,5 – 1,9
Colza/Canola	1800	40,0 – 48,0	0,5 – 0,9
Mamona	1500	45,0 – 50,0	0,5 – 0,9
Amendoim	2000	40,0 – 43,0	0,6 – 0,8
Soja	2400	18,0	0,2 – 0,4
Algodão	1800	15,0	0,1 – 0,2

Fonte: EMBRAPA, 2018.

O Brasil tem, hoje, potencial para ser líder mundial na produção de biodiesel. Posto que nenhum outro lugar é tão apropriado para a produção de oleaginosas. O clima favorável, a vocação agrícola e a disponibilidade de cerca de 100 milhões de hectares virgens de terras boas para a agricultura são fatores que corroboram com essa afirmação (IBGE, 2020). Cada região do país possui potencial para produzir biodiesel por meio de diferentes matérias primas, como mostra a Figura 1.

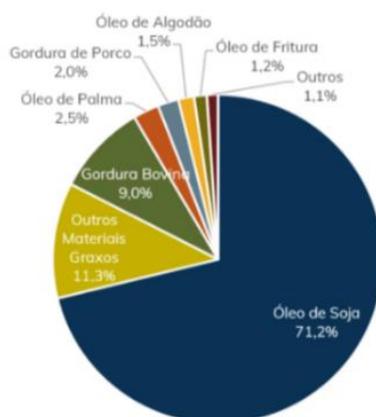
Figura 1. Principais culturas oleaginosas por região brasileira para Biodiesel



Fonte: EMBRAPA, 2018.

A Figura 2 mostra as porcentagens da produção de biodiesel de diferentes matérias primas.

Figura 2. Principais matérias-primas consumidas para produção de biodiesel no Brasil.



Fonte: ANP – Boletim mensal de biodiesel, 2020.

3.2.2. Gordura animal

Segundo Rio (2009), aproveitar subprodutos animais para a produção de biocombustíveis possui vantagens mais significativas quando comparada a certos óleos vegetais, posto que consegue reduzir o dióxido de carbono lançado e diminuir o consumo de água, por exemplo.

A maior parte da gordura suína, por sua vez, está depositada na região subcutânea do corpo do animal. Essa gordura é composta de quantidades próximas de ácidos graxos 9 saturados e insaturados, no entanto a quantidade de cada varia mediante diversos fatores que geralmente não são considerados quando se analisa a gordura ou se deseja aplicá-la (BELLAVAR, 2009). A gordura suína, portanto, deve ser pré-tratada passando pela secagem, para que assim consiga retirar a umidade presente, com o intuito de prevenir a formação de sabões. É necessário, também, remover as impurezas macroscópicas por meio da filtração e diminuir o índice de acidez (RIBEIRO, 2010).

A gordura proveniente do frango possui propriedades que se assemelham a da soja, apresentando-se em estado líquido a temperatura ambiente, fato que proporciona uma maior facilidade a reação de transesterificação. O óleo do frango possui baixos valores de acidez, possibilitando sua produção por catálise básica (MOREIRA, 2009).

Segundo CETESB (2006), o Brasil é o segundo maior produtor de corte de carne bovina do mundo, além de ser um grande produtor de carne suína e de frango. Tal fato, observado pela óptica ambiental, torna-se necessário e uma obrigação ao país o aproveitamento dos rejeitos provenientes da indústria de processamento de carne, a produção de biodiesel com o intuito de diminuir a quantidade de resíduos lançadas ao meio ambiente.

Além da contribuição ambiental, a utilização da gordura animal é também uma ótima opção no que se diz respeito à economia de tempo e dinheiro, uma vez que, é uma matéria-prima facilmente disponível, de baixo custo e com grande diversidade (ABREU, 2005; OLIVEIRA, 2008).

As vantagens quanto à produção em si também devem ser levadas em consideração. Segundo Rio (2009), o aproveitamento de subprodutos animais na produção de biocombustíveis apresenta vantagens mais significativas do que a utilização de certos óleos vegetais, como por exemplo, a redução de dióxido de carbono que é lançado, diminuição no consumo de água no processo produtivo, além de um melhor desempenho dos motores.

/

3.3. Cenário energético atual

Segundo o Ministério de Minas e Energia a Oferta Interna de Energia – OIE foi de 287,6 milhões de toneladas equivalentes de petróleo em 2020, no qual ocorreu um aumento da participação das fontes renováveis de 46,1% para 48,4% como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 – Oferta Interna de Energia (OIE)

Especificações	Mil tep		20/19 %	Estrutura %	
	2019	2020		2019	2020
Não – Renovável	158.316	148.518	-6,2	53,9	51,6
Petróleo e Derivados	100.898	95.247	-5,6	34,3	33,1
Gás Natural	35.909	33.824	- 5,8	12,2	11,8
Carvão Mineral e Derivados	15.435	14.027	-9,1	5,3	4,9
Urânio (U308) e Derivados	4.292	3.727	-13,2	1,5	1,3
Outras Não-Renováveis	1.780	1.693	-4,9	0,6	0,6
Renováveis	135.642	139.094	2,5	46,1	48,4
Hidráulica e Elétrica	36.364	36.210	-0,4	12,3	12,6
Lenha e Carvão Vegetal	25.725	25.710	-0,1	8,8	8,9
Derivados da Cana-de-açúcar	52.841	54.933	4,0	18,0	19,1
Outras Renováveis	20.712	22.241	7,4	7,0	7,7
Total	293.957	287.612	-2,2	100,0	100,0
dos quais fósseis	134.023	144.791	-6,0	52,4	50,3

Fonte: Ministério Minas e Energia, 2020.

O aumento na utilização de combustíveis renováveis é um ponto bastante positivo, uma vez que são menos nocivos ao meio ambiente que os combustíveis não-renováveis, sendo estes correspondentes aqueles que possuem ligação direta com a emissão dos gases do efeito estufa, além da contribuição para o aquecimento global.

Desse modo, é necessário ressaltar a importância desse aumento na porcentagem das fontes renováveis de energia, ainda que seja um aumento singelo é bastante significativo.

3.4. Óleo de fritura residual

A reciclagem, de maneira geral, tem sido vista com um olhar mais necessário e vantajoso tanto por razões econômicas como ambientais. O óleo proveniente de frituras, tanto

de uso doméstico como comercial, tem ganhado bastante visibilidade e aplicações com o passar dos anos.

Atualmente, verifica-se um grande uso de óleo vegetal para a fritura de alimentos. Fritadeiras com capacidades que variam de 15 a 350 litros (l) de óleo e em indústrias que podem chegar a 1000 litros, estão sendo muito usadas atualmente (PASQUELETO E BARBOSA, 2018).

Desse modo, diante da necessidade de reciclar alguns tipos de resíduos e da preocupação com o meio ambiente como um todo, buscam-se maneiras diversas de diminuir a quantidade de resíduos com descartes incorretos. No Brasil estima-se que sejam produzidos quatro bilhões litros de óleo de fritura por ano, sendo que dois bilhões são descartados. A reciclagem desses resíduos vem ganhando espaço cada vez maior. Algumas cidades brasileiras, como Ribeirão Preto-SP, Curitiba-PR, ABC Paulista, Florianópolis-SC e Porto Alegre-RS, estão utilizando o óleo residual de fritura para produção de vários produtos. Porém, a disposição em aterros sanitários e esgotos domésticos é prática comum (WUST, 2004; ALBERECI E PONTES, 2004; LIMA et al, 2007; FERNANDES et al, 2008).

Hoje, no Brasil, parte do óleo vegetal residual oriundo do consumo humano é destinado a fabricação de sabões (NETO et. al., 2000) e, em menor volume, à produção de biodiesel (NETO et. al., 2000; FERRARI, OLIVEIRA E SCABIO, 2005). A reduzida solubilidade dos óleos vegetais na água constitui um fator negativo no que se refere à sua degradação em unidades de tratamento de despejos por meio de processos biológicos e, quando presentes em mananciais utilizados para abastecimento público, causam problemas no tratamento de água. No entanto, os problemas de origem estética não são os únicos presentes.

A diminuição da área de contato entre a superfície da água e o ar atmosférico impede a transferência do oxigênio da atmosfera para a água e, os óleos e graxas em seu processo de decomposição, reduzem o oxigênio dissolvido elevando a demanda bioquímica de oxigênio (DBO), causando alterações no ecossistema aquático (DABDOUB, 2006).

3.5. Biodiesel

O biodiesel pode ser definido como um combustível composto de alquil ésteres de ácidos graxos oriundos de óleos vegetais ou gorduras animais, designado por B100 (biodiesel puro), segundo a ANP através do Regulamento Técnico nº07/2008. É também tido como um combustível renovável que possui propriedades físico-químicas similares ao óleo diesel de petróleo, obtido por meio de um processo químico denominado transesterificação. Os

triglicerídeos presentes nos óleos e gordura animal reagem com um álcool primário, metanol ou etanol, gerando dois produtos: o éster e a glicerina.

Esse biocombustível é uma opção bastante viável para o segmento de combustíveis, podendo ser derivado de biomassa, além de ser menos poluente e renovável (SHARMA, 2008).

Normas como da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), a American Society for Testing and Materials (ASTM), International Organization for Standardization (ISO), são especificações que ajudam a manter padrões de qualidade do biodiesel no Brasil. Diversas propriedades físicas e químicas como massa específica, viscosidade cinemática, umidade, índice de acidez, índice de saponificação, por exemplo, foram padronizadas tendo como objetivo a importância de um atendimento às especificações mínimas de qualidade e, conseqüentemente, atender aos padrões internacionais do produto (KRAUSE, 2008).

3.6. Reatores

Segundo a CNTQ (Confederação Nacional dos Trabalhadores no Ramo Químico), reatores podem ser definidos como vasos projetados para conter reações químicas de interesse e escala industrial. Esses reatores podem ser classificados de diversas maneiras e há três principais tipos que são utilizados na produção de biodiesel são eles: reatores em batelada, reatores semi-contínuos e reatores contínuos.

Os reatores em batelada apresentam uma aplicação bastante geral na indústria química mais limitada para processos industriais pesados. Apresenta um processo mais barato e flexível, além de requerer um investimento menor. No entanto, esse tipo de reator possui baixa produtividade, uma maior variação na qualidade do produto, além de estar sujeito a sofrer influências externas e internas.

Já nos reatores semi-contínuos, alguns componentes são alimentados em bateladas enquanto que outros são abastecidos de forma contínua. Esse reator é bastante utilizado onde há processos de homogeneização, cisalhamento, mistura e controle de temperatura. Além de permitir a injeção ou retirada de reagentes de forma contínua dentro do processo de batelada.

Os reatores contínuos, por sua vez, têm como o reator mais utilizado na produção de biodiesel o reator tanque agitado contínuo (CSTR). Nesse reator os reagentes, reativos e, geralmente, solventes fluem para um reator que os produtos da reação saem simultaneamente do recipiente.

3.6.1. Reator Contínuo Tubular

O Reator Contínuo Tubular pode ser definido como uma imagem simplificada e idealizada do movimento de um fluido, em que todos os elementos de fluido estão se movendo em uniformemente ao longo das linhas de fluxo paralelas (FROMENTE et. al, 1900).

Quando operado em condições ditas como ideais, um elemento do fluido ao entrar em um reator PFR será movido por meio de um pistão e, em seguida, irá preencher a seção transversal do tubo por completo.

Esse reator, por sua vez, tende a apresentar um maior rendimento por unidade de volume quando comparado aos reatores CSTR. Além de um baixo custo operacional e uma eficiente troca de calor.

O PFR, desse modo, além de facilitar a obtenção de mais pontos experimentais é também um reator mais flexível para a inibição da reação. Reações de larga escala, rápidas e de alta temperatura tem como prioridade o uso desse tipo de reator (ISHIDA et al., 2017).

Segundo Levenspiel (2008), o fluido de um reator tubular ideal varia de ponto a ponto. Desse modo, é necessário que a análise de composição de um elemento ocorra em um diferencial de volume dentro do reator. A equação abaixo representa a análise referida:

$$F_{i0} - F_i + r_i dV = 0$$

Onde:

F_{i0} é o fluxo molar inicial do componente i ;

F_i é o fluxo molar final do componente i ;

dV é a diferencial de volume.

3.7. Planejamento e Otimização de Experimentos

O planejamento fatorial é uma estratégia analítica cuja sua principal aplicação consiste na triagem das variáveis consideradas mais relevantes de um determinado sistema analítico (MONTGOMERY, 1991). Desse modo, essa análise de dados juntamente com a parte experimental pertencem a um procedimento essencial para a compreensão de ferramentas voltadas para a otimização.

O planejamento experimental, por sua vez, tem fundamental importância no fornecimento exato do tipo de informação desejada pelo analista (BARROS NETO, 1995). A repetição, a casualização e o controle local, são alguns dos princípios básicos do planejamento experimental.

O planejamento fatorial completo 2^3 é um dos mais utilizados e permite estimar 3 efeitos principais, 3 efeitos de interações de segunda ordem e, 1 interação de terceira ordem.

4. METODOLOGIA

Para o referido trabalho, utilizou-se de dados da literatura referentes à produção de biodiesel proveniente do óleo residual de fritura em que a matéria prima passou pelos processos de pré-tratamento e caracterização similares aos encontrados nos laboratórios de ensino. Posteriormente, realizou-se uma validação de estudo da simulação de um reator tubular realizado por meio do software MATLAB com um algoritmo para simulação dos modelos e otimização dos parâmetros cinéticos. Para resolução do sistema de EDO's, utilizou-se a rotina ode45s. Variações de comprimento, diâmetro e vazão foram analisadas a fim de se obter um melhor rendimento e, conseqüentemente, melhores condições de operação.

4.1. Validação do Modelo

Para as simulações de validação do modelo, utilizou-se os dados da simulação do trabalho de Vasconcelos (2018), no qual foi estudado a obtenção do biodiesel por meio do óleo residual de fritura proveniente do Restaurante Universitário da Universidade Federal de Alagoas a uma temperatura de 60°C. A proporção molar utilizada foi de 1:6 óleo e metanol, respectivamente, além da presença do hidróxido de sódio como catalisador da reação de transesterificação. Esta, por sua vez, ocorreu por meio de uma simulação de um reator tubular por 40 minutos.

Para que a validação ocorresse, os dados foram comparados entre os obtidos por meio da simulação e os obtidos experimentalmente nos trabalhos de ISHIDA et al. (2017) e Fiori (2013).

4.2. Otimização das Condições Operacionais de um Reator Tubular

Algumas variáveis podem exercer determinada influência para avaliar o rendimento de uma reação de transesterificação. Bem como, por meio dessa avaliação, compreender a cerca da flexibilidade que o modelo pode apresentar em diferentes condições de operação (GALANTE, 2012).

Portanto, busca-se realizar um planejamento estatístico aplicando a metodologia do Planejamento Fatorial Completo 2³. Com um ajuste nos parâmetros experimentais realizados, um planejamento experimental será empregado para as variáveis de comprimento, diâmetro e vazão volumétrica.

Com o objetivo de realizar um estudo amplo nos fatores utilizou-se oito simulações nos níveis -1 e +1, sendo os níveis superiores adotados por (+) e os inferiores por (-). A utilização desses níveis proporciona criar uma variação maior, bem como iterações para os ensaios que convergem para valores mais satisfatórios (RODRIGUES E LEMMA, 2009).

O levantamento das faixas das variáveis avaliadas foi definido por meio de consultas bibliográficas dos trabalhos de ISHIDA et al. (2017), Fiori (2013) e Vasconcelos (2018). O efeito do comprimento foi avaliado na faixa de 10,185 a 50 m, enquanto que o diâmetro foi na faixa de 0,2 a 0,47 m e a vazão volumétrica de 8,34 L/ min e 37 L/min.

Essas simulações foram realizadas inicialmente considerando os parâmetros experimentais de Vasconcelos (2018) e, posteriormente, seguirão o planejamento experimental descrito na tabela abaixo.

Tabelas 3 – Variáveis analisadas e seus níveis de variação

Variáveis	-1	+1
Comprimento(m)	20,185	40,185
Diâmetro(m)	0,2716	0,412
Vazão Volumétrica(L/min)	14,34	30

Fonte: Autor, 2023.

As faixas utilizadas nos níveis apresentados na Tabela 3 estão dentro do intervalo estabelecido anteriormente, como forma de ter valores dentro de uma margem aceitável.

5. RESULTADOS

Buscou-se na literatura estudos que utilizassem matérias-primas com origem, caracterização e rendimentos similares. Desse modo, o óleo residual utilizado é proveniente do óleo de soja que passou por um pré-tratamento com degomagem e secagem antes de ser utilizado. O óleo apresentou após sua caracterização uma acidez de 1,4%, densidade e viscosidade de 0,8975 g/cm³ e 17,6714 mm²/s, respectivamente, ambas a 60°C; além de um teor de umidade de 0,59%. O rendimento, por sua vez, foi de aproximadamente 94%.

5.1. Validação do Estudo de Simulação

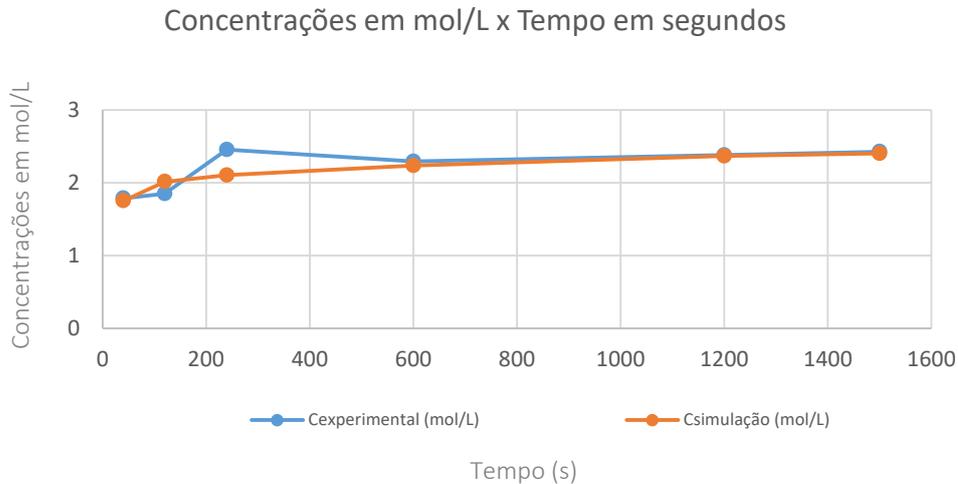
A validação do estudo se deu ao realizar uma comparação dos dados obtidos por Vasconcelos (2018), ISHIDA et. al (2017) e Fiori (2013), tanto experimentalmente como por meio da simulação, realizados em um reator contínuo a uma temperatura de 60°C.

Desse modo, criou-se uma tabela (Tabela 4) com concentrações do biodiesel encontradas experimentalmente ($C_{\text{experimental}}$) e com a simulação ($C_{\text{simulação}}$), bem como o tempo de residência em ambas, a partir do 40s (tempo correspondente a conversão do biodiesel). A Figura 3 abaixo mostra o comportamento dessas concentrações em função do tempo de residência.

Tabela 4- Concentrações em função do tempo de residência

t(s)	$C_{\text{experimental}}$ (mol/L)	$C_{\text{simulação}}$ (mol/L)
40	1,787	1,752
120	1,849	2,014
240	2,456	2,105
600	2, 294	2,236
1200	2,382	2,369
1500	2,437	2,403

Fonte: Autor, 2023.

Figura 3- Comportamento das concentrações me função do tempo.

Fonte: Autor, 2023.

Em ambos os casos foi possível observar um comportamento similar. É possível observar que após atingir um pico, a concentração do biodiesel decresce isso acontece, provavelmente, devido à presença do glicerol que permite que as moléculas de biodiesel sejam dissolvidas no referido álcool (GALANTE, 2012).

Por meio de uma análise do gráfico, observa-se que inicialmente há uma discrepância no comportamento dessas concentrações, mas que ao decorrer do tempo há uma aproximação. Desse modo, é possível notar uma compatibilidade entre esses valores, sendo o erro observado inferior a 3%.

5.2. Otimização das Condições Operacionais do Reator Tubular

O estudo do planejamento estatístico permitiu avaliar o efeito das variáveis: comprimento, diâmetro e vazão volumétrica. Além de determinar o melhor modelo para o sistema.

Inicialmente foi realizado um Planejamento Fatorial Completo 2^3 (níveis -1 e +1), como mostrado na matriz de planejamento da Tabela 5.

Tabela 5 – Dados do planejamento estatístico juntamente com o rendimento.

Simulação	Comprimento (m)	Diâmetro (m)	Vazão Volumétrica (L/min)	Rendimento (%)
1	20,185 (-1)	0,2716 (-1)	14,34 (-1)	91,73
2	40,185 (+1)	0,2716 (-1)	14,34 (-1)	93,45
3	20,185 (-1)	0,412 (+1)	14,34 (-1)	98,78
4	40,185 (+1)	0,412 (+1)	14,34 (-1)	99,36
5	20,185 (-1)	0,2716 (-1)	30 (+1)	98,01
6	40,185 (+1)	0,2716 (-1)	30 (+1)	99,18
7	20,185 (-1)	0,412 (+1)	30 (+1)	99,11
8	40,185 (+1)	0,412 (+1)	30 (+1)	99,77

Fonte: Autor, 2023.

Na tabela acima, com os dados do planejamento foi possível obter o rendimento do biodiesel para cada uma das combinações dos níveis. Segundo os limites estabelecidos pela ANP, é considerada um bom rendimento do biodiesel, aquelas que são maiores de 96,5%. Desse modo, é possível observar que as simulações 1 e 2 não satisfazem esse limite.

Em seguida, ainda com os dados apresentados acima, utilizou-se da metodologia proposta por Barros Neto et al., (1995) para calcular os efeitos das variáveis bem como os seus coeficientes para o modelo matemático. Dessa forma, utilizou-se do planejamento fatorial 2^3 completo (níveis -1 e +1).

Uma nova tabela (Tabela 6) foi criada com o objetivo de analisar a quantificação dos efeitos para as variáveis analisadas, utilizando apenas as simulações referentes ao Planejamento Fatorial 2^3 .

Tabela 6 – Quantificação dos efeitos e índices estatísticos.

Fator	Efeito	Desvio Padrão	Nível p	Limite Inferior 95%	Limite Superior 95%
Média	97,42375	0,078750	0,000515	96,42314	98,42436
Comprimento	1,03250	0,157500	0,096369	-0,96873	3,03373
Diâmetro	3,66250	0,157500	0,027360	1,66127	5,66373
Vazão Volumétrica	3,18750	0,157500	0,031431	1,18627	5,18873
Comprimento x Diâmetro	-0,41250	0,157500	0,232197	-2,41373	1,58873
Comprimento x Vazão	-0,11750	0,157500	0,591954	-2,11873	1,88373
Volumétrica x Diâmetro	-2,81750	0,157500	0,035550	-4,81873	-0,81627

Vazão Volumétrica

Fonte: Autor, 2023.

O coeficiente de determinação (R^2), por sua vez, foi de 0,99924 e o valor do nível p de 0,035550, além de um nível de significância de 95%. Sabendo que o valor do nível p necessita ser menor que 0,05, àqueles que possuíram valores maiores, não são significativos para o modelo. O erro residual sem duplicata apresentado foi de 0,49.

Dos resultados apresentado acima, é possível identificar como variáveis significativas o diâmetro e a vazão volumétrica uma vez que ambas apresentaram um nível p menor que 0,05 (a um nível de significância de 95%), bem como suas interações.

O diâmetro e a vazão são dois fatores importantes no desempenho de um reator PFR para a produção de biodiesel. O diâmetro do reator influencia na velocidade de escoamento do fluido, enquanto a vazão afeta a quantidade de matéria-prima que é alimentada ao reator. Ou seja, com um diâmetro menor pode resultar em uma maior taxa de fluido e, assim, aumentar sua eficiência. Enquanto que uma vazão alta pode prejudicar a mistura e a reação química no reator, causando problemas de homogeneidade e de produção do biodiesel (GALANTE, 2012). Portanto, para obter um melhor rendimento na produção de biodiesel em um reator tubular contínuo é necessário equilibrar o diâmetro e a vazão do reator, para obter o melhor desempenho possível.

Estimando os efeitos de cada variável, foi possível concluir que as condições operacionais: vazão volumétrica de 30 L/min, diâmetro de 0,412 m e comprimento de 20,185 m, proporcionam um maior rendimento. Como mostra a tabela ANOVA abaixo (Tabela 7).

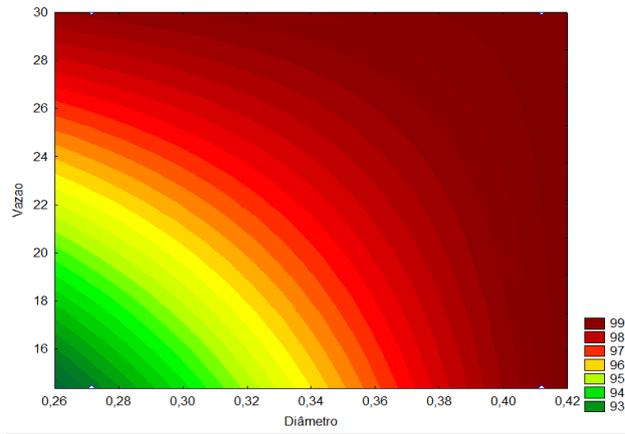
Tabela 7 – Tabela Anova

Fonte de variação	Soma quadrática	Graus de liberdade (v)	Média quadrática	$F_{\text{Calculado}}$
Regressão	65,52478	1	32,76239	660,39891
Falta de Ajuste	0,04961	1	0,04961	
Total	65,57439	1	9,36777	
% de variação explicada (R^2) 0,999243		R^2_{ajustado} : 0,9989402		

Fonte: Autor, 2023.

A Figura 3 apresenta a sobreposição vazão x diâmetro e seu comportamento ao longo das simulações realizadas.

Figura 4 – Superfície de contorno da vazão volumétrica e o do diâmetro.



Fonte: Autor, 2023

6. CONCLUSÃO

Com o aumento do uso de resíduos sólidos e a crescente necessidade de uma destinação para o óleo residual. Além da elevada demanda por energia sustentável e limpa no mundo, faz-se necessários estudos que tragam viabilidade para suprir tal questão.

Neste trabalho foi possível observar que a reação de transesterificação realizada para o modelo cinético adotado é eficiente, resultando numa conversão de 99,11%.

Foi possível constatar que as variáveis de vazão volumétrica e diâmetro, a partir dos resultados do Planejamento Fatorial 2^3 foram significativos e com efeitos positivos para a otimização do reator na conversão do biodiesel. O comprimento, apesar da sua relevância no reator, obteve resultados que não foram significativos para uma melhor conversão do biodiesel.

Desse modo, o estudo do presente trabalho possibilita futuramente novas variáveis sejam estudadas com o objetivo de aperfeiçoar reatores contínuos, bem como novos modelos possam ser validados a fim de se obter uma taxa de conversão maior e, conseqüentemente, um maior rendimento do reator.

REFERÊNCIAS

- ABREU, P. G.; HIGARASHI, M. M.; JÚNIOR, A. C. **Transesterificação com catálise ácida de resíduos de gordura de frango para produção de biodiesel: resultados preliminares.** In: 3º Congresso Brasileiro de Plantas Oleaginosas, Óleos, Gorduras e Biodiesel. Universidade Federal de Lavras e Prefeitura Municipal de Varginha. Anais. Varginha, Minas Gerais, 2005.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP): <<http://www.anp.gov.br/wwwanp/biocombustiveis/biodiesel>>. Acesso em 26 junho 2022.
- ALBERICI, R. M.; PONTES, F. F. F. **Reciclagem de Óleo Comestível Usado Através da Fabricação de Sabão.** Eng. Amb., Espírito Santo do Pinhal, vol. 1, nº1, jan./dez., 2004. P. 073-076.
- BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I.S.; BRUNS, R. E., **Planejamento e Otimização de Experimentos**, Ed. UNICAMP: Campinas, 1995.
- BELLAVER, C.; Zanotto, D.L. et al. 2009. **Determinação da solubilidade protéica de farinhas de subproduto de aves com a pepsina em baixa concentração.** Conferencia APINCO 2009.
- CARGININ, A. **Oleaginosas potenciais para produção de biodiesel: necessidade de cultivares melhoradas.** Disponível em: <www.agrosoft.org.br/?q=node/26295> . Acesso em: 4 maio 2022.
- CETESB: Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRABALHADORES NO RAMO QUÍMICO (CNTQ): <<http://cntq.org.br/wp-content/uploads/2013/05/Reator-qu%C3%ADmico.pdf>>. Acesso em 30 setembro 2022.
- COSTA, M.; GETÚLIO, PC.; ANTONIASSE, R. **Composição em ácidos graxos e caracterização física e química de óleos hidrogenados de coco babaçu.** Revista Ceres. 2006.
- DABDOUB, M.J., **Biodiesel em casa e nas Escolas: Programa coleta de óleos de fritura.** 2006.
- DIJKSTRA, J. Albert. **Desgomado, refinación, lavado y secado de aceites y grasas.** Libro de Oro de A&G - 10º Aniversario – v.2 : Recopilación de Artículos Técnicos, Asociación Argentina de Grasas y Aceites, 2000.
- EMBRAPA - **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.** Disponível em: <<http://www.embrapa.com.br>>. Acesso em 26 junho 2022.

- ERICKSON, R.D. **Aspectos críticos en la refinación del aceite de soja**. Libro de Oro de A&G - 10º Aniversario – v. 2: Recopilación de Artículos Técnicos, Asociación Argentina de Grasas y Aceites, 2000
- FERNANDES, R. K. M.; PINTO, J. M. B.; MEDEIROS, O. M. de.; PEREIRA, C. de A. **Biodiesel a partir de óleo residual de fritura: alternativa energética e desenvolvimento sócio-ambiental**. XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Rio de Janeiro, RJ, 13 a 16 de outubro, 2008; 10p.
- FERRARI, R. A.; OLIVEIRA, V. DA S.; SCABIO, A. **Biodiesel de soja – Taxa de conversão em ésteres etílicos, caracterização físico-química e consumo em gerador de energia**. Química Nova, v.28, n.1, p.19-23, 2005.
- FERREIRA, J. A.; ANJOS L. A. **Aspectos de saúde coletiva e ocupacional associados à gestão dos resíduos sólidos municipais**. Cad Saúde Pública, 2001.
- FIORI, J. **Análise e simulação de um reator tubular para produção Contínua de biodiesel**. Centro Universitário Padre Anchieta. 2013.
- FRANCHI, Claiton Moro. **Controle de Processos Industriais**. São Paulo: Érica, 2011.
- FROMENT, Gilbert F. et al. **Chemical reactor analysis and design**. New York: Wiley, 1990.
- GALANTE, R. **Modelagem e simulação de um reator tubular contínuo para a produção de biodiesel**. Florianópolis, SC, 25 de maio, 2012; 77p.
- GOUVEIA, N. **Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social**. Departamento de Medicina Preventiva, Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo, 2012.
- HARTMAN, L.; ESTEVES, W. **Tecnologia de óleos e gorduras vegetais**. São Paulo, SP: Secretaria da Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia, p. 1 - 54, [s.d.].
- HOLANDA, A. **Biodiesel e Inclusão Social**. Câmara dos Deputados. Conselho de Altos Estudos e Avaliação Tecnológica. Brasília, 2004.
- IBGE: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em 05 maio 2022.
- ISHIDA et. al. **Desenvolvimento e avaliação de um reator contínuo para a produção de biodiesel**. 2017.
- KRAUSE, L.C. **Densenvolvimento do Processo de Produção de Biodiesel de Origem Animal**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- LIMA, M. V. S.; NUNES, R. C. da R.; ARAÚJO B. Q.; FIGUEIREDO, F. C.; SANTOS JUNIOR, J. R. dos. **Síntese de ésteres (biodiesel) a partir de óleo de fritura com metanol e etanol**. In: XVI Seminário de Iniciação Científica da UFPI, 2007, Teresina – PI, 2007.

- MAZZONETO, A.W. **Produção de Biodiesel de Gordura Animal**. 2016.
- MONTGOMERY, D.C; **Design e Análise de Experimentos**, 3ª ed., John Wiley: Nova Iorque, 1991.
- MURTA, A. L. S.; GARCIA, A. **Reaproveitamento de óleo residual de fritura para produção de biodiesel na marinha**. 2009.
- NETO, P.R C.; ROSSI, L.F.S.; ZAGONEL, G.F.; RAMOS, L.P., **Produção de biocombustível alternativo ao óleo diesel através da transesterificação de óleo de soja usado em frituras**. Química Nova, 23(4), p. 531-537, 2000
- OLIVEIRA, D. **Biodegradação de biodiesel de origem animal**. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”- UNESP Instituto de Biociências – Rio Claro, 2008.
- PARENTE, E. J. S. **Biodiesel: Uma aventura tecnológica num país engraçado**. Fortaleza, CE. Tecbio, 2003.
- PASQUALETTO, A.; BARBOSA, G. N. **Aproveitamento do óleo residual de fritura na produção de biodiesel**. In. XXXI Congresso Interamericano AIDIS. Santiago, Chile, 12 a 15 de outubro, 2008, 8p.
- REFAAT, et al. **Production optimization and quality assessment of biodiesel from waste vegetable oil**. 2008.
- RIBEIRO, T. C. **Síntese de Insumos Químicos a partir de Biodiesel Produzido pela Transesterificação de Gordura Animal**. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, 2010.
- RIO, R. **Fábrica na Dinamarca produz biodiesel de gordura animal**. Disponível em: <<http://www.biodieselbr.com/noticias/em-foco/fabrica-dinamarca-produz-biodiesel-gorduraanimal-14-08-09.htm>>. Acesso em 15 maio 2022.
- RODRIGUES, R. **Perspectivas para o Agronegócio Brasileiro**. Anais do XVII Fórum Nacional: O Desafio da China e da Índia, INAE, Rio de Janeiro, 2006. Disponível em <<http://www.inae.org.br>>. Acesso em: 02 maio 2022.
- RODRIGUES, M. I.; LEMMA, A. F. **Planejamento de experimentos e otimização de processos**. 2. Ed. Campinas: Casa do Espírito Amigo Fraternidade Fé e Amor, 2009.
- SHARMA, Y. C.; SINGH, B.; UPADHYAY, S. N., **Avanços no desenvolvimento e caracterização do biodiesel: uma revisão**. 2008.
- VASCONCELOS, A. **Determinação da cinética da reação de produção de biodiesel de óleo de fritura para projeto preliminar de reator tubular**. 2018.
- WUST E., **Estudo da viabilidade técnico-científica da produção de biodiesel a partir de resíduos gordurosos**. Blumenau, 2004.