

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
BACHARELADO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**DANIELE COBUS  
GABRIELA GARBELOTTI DO PRADO**

**PRODUÇÃO DE BIODIESEL POR TRANSESTERIFICAÇÃO  
UTILIZANDO BANHO ULTRASSÔNICO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PONTA GROSSA**

**2019**

**DANIELE COBUS**  
**GABRIELA GARBELOTTI DO PRADO**

**PRODUÇÃO DE BIODIESEL POR TRANSESTERIFICAÇÃO  
UTILIZANDO BANHO ULTRASSÔNICO**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como requisito à obtenção  
do título de Bacharel em Engenharia  
Química, do Departamento de Engenharia  
Química, da Universidade Tecnológica  
Federal do Paraná.

Orientador: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Priscilla dos Santos  
Gaschi Leite

Coorientador: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Erica Roberta  
Lovo da Rocha Watanabe.

**PONTA GROSSA**

**2019**



---

**TERMO DE APROVAÇÃO**

Produção de Biodiesel por Transesterificação Utilizando Banho Ultrassônico

por

Daniele Cobus

Gabriela Garbelotti do Prado

Monografia apresentada no dia 19 de junho de 2019 ao Curso de Engenharia Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Ponta Grossa. Os candidatos foram arguidos pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Profa. Dra. Simone Delezuk Inglez  
(UTFPR)

---

Mestranda Luana Cerri Gabriel  
(UTFPR)

---

Profa. Dra. Priscilla dos Santos Gaschi Leite  
(UTFPR)  
Orientador

---

Profa. Dra. Erica Roberta Lovo da Rocha Watanabe  
(UTFPR)  
Coorientador

---

Profa. Dra. Juliana de Paula Martins  
Responsável pelo TCC do Curso de Engenharia Química

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos primeiramente a Deus, por sempre nos iluminar e nos dar forças para enfrentar os obstáculos.

Aos nossos familiares pelo amor, apoio e incentivo durante todos os anos de faculdade. Sem o apoio e o carinho de deles essa jornada se tornaria muito mais difícil.

Aos amigos pela parceria, momentos de descontração, conselhos e paciência nos dias ruins.

As orientadoras pela confiança e todo o conhecimento e experiências transmitidas a nós.

Aos professores que estavam dispostos a ajudar e dar sugestões para melhorar nosso aprendizado.

E a todos os envolvidos que de alguma maneira contribuíram para a finalização desta etapa.

## RESUMO

COBUS, Daniele; PRADO, Gabriela Garbelotti. **Produção De Biodiesel Por Transesterificação Utilizando Banho Ultrassônico**. 2019. 36 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2019

O método mais utilizado para produção de biodiesel é a reação de transesterificação, na qual, óleo e álcool em excesso são misturados juntamente com um catalisador. Entretanto devido aos reagentes serem parcialmente miscíveis é necessário manter a reação sob agitação mecânica e aquecimento por um determinado tempo. Logo, este é um método que consome bastante energia e para isso, algumas alternativas vem sendo cada vez mais pesquisadas, como o uso de ultrassom, que promove cavitações no meio reacional, e também o uso de cosolvente, pois ambos aumentam o contato entre as fases. Desta forma este trabalho tem por objetivo produzir biodiesel por transesterificação utilizando banho ultrassônico. Para a obtenção das amostras foram utilizados etanol e óleo de soja, na razão molar de 10,2:1, com catalisador hidróxido de potássio. Nos experimentos foram variadas as temperaturas, tempos de reação e a utilização do biodiesel como cosolvente. Após a análise de densidade e conversão das reações, foi possível perceber que a aplicação de banho ultrassônico é uma tecnologia promissora para promover diminuição no tempo de reação e conseqüentemente, diminuir o gasto energético.

**Palavras-chave:** Biodiesel de Soja. Banho Ultrassônico. Cosolvente.

## ABSTRACT

COBUS, Daniele; PRADO, Gabriela Garbelotti. **Biodiesel Production By Transesterification Using Ultrasonic Bath**. 2019. 36 f. Course Completion Work (Chemical Engineering) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2019

The most widely used method for producing biodiesel is the transesterification reaction, in which oil and excess alcohol are mixed with a catalyst. However, because the reactants are partially miscible it is necessary to maintain the reaction under mechanical agitation and heating for a certain time. Therefore, this is a method that consumes a lot of energy and for this, some alternatives are being increasingly researched, such as the use of ultrasound, which promotes cavitations in the reaction medium, and also the use of co-solvent, both increase the contact between the phases. In this way this work aims to produce biodiesel by transesterification using ultrasonic bath. To obtain the samples were used ethanol and soybean oil, in the molar ratio of 10,2:1, with potassium hydroxide catalyst. In the experiments were varied the temperatures, reaction times and the use of biodiesel as co-solvent. After the analysis of density and conversion of the reactions, it was possible to notice that the application of ultrasonic bath is a promising technology to promote decrease in the reaction time and consequently, to reduce energy expenditure.

**Keywords:** Soybean Biodiesel. Ultrasonic Bath. Co-solvent.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - REAÇÃO DE TRANSESTERIFICAÇÃO DE UM TRIGLICERÍDEO .....	11
FIGURA 2 - MECANISMO DA REAÇÃO DE TRANSESTERIFICAÇÃO DE UM TRIGLICERÍDEO .....	11
FIGURA 3 – BANHO ULTRASSÔNICO .....	14
FIGURA 4 – FLUXOGRAMA DA PRODUÇÃO DE BIODIESEL EM BANHO ULTRASSÔNICO .....	21
FIGURA 5 – SEPARAÇÃO DE FASES .....	23
FIGURA 6 - SISTEMA UTILIZADO PARA ROTA EVAPORAÇÃO .....	24
FIGURA 7 – FLUXOGRAMA DA PRODUÇÃO DE BIODIESEL EM BANHO ULTRASSÔNICO UTILIZANDO COSOLVENTE .....	25

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – PERFIL NACIONAL DE MATÉRIAS-PRIMAS CONSUMIDAS PARA PRODUÇÃO DE BIODIESEL NO BRASIL .....	16
TABELA 2 – PADRÕES DE QUALIDADE DO BIODIESEL .....	19
TABELA 3 – TEMPO DE REAÇÃO E TEMPERATURA UTILIZADOS NOS EXPERIMENTOS .....	22
TABELA 4 – TEMPO DE REAÇÃO E TEMPERATURA UTILIZADOS NOS EXPERIMENTOS COM COSOLVENTE .....	26
TABELA 5 – RESULTADOS DAS ANÁLISES NAS AMOSTRAS SEM COSOLVENTE .....	28
TABELA 6 – RESULTADOS DAS ANÁLISES NAS AMOSTRAS COM COSOLVENTE .....	29

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>7</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>9</b>
2.1 GERAL .....	9
2.2 ESPECÍFICOS .....	9
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>10</b>
3.1 BIODIESEL .....	10
3.2 TRANSESTERIFICAÇÃO .....	10
3.2.1 Transesterificação em Meio Homogêneo .....	12
3.2.2 Transesterificação em Meio Heterogêneo .....	12
3.2.3 Transesterificação por Catálise Enzimática .....	13
3.3 OBTENÇÃO DO BIODIESEL PELO MÉTODO CONVENCIONAL .....	13
3.4 OBTENÇÃO DO BIODIESEL UTILIZANDO BANHO ULTRASSÔNICO .....	14
3.5 COSOLVENTE .....	15
3.6 MATÉRIAS-PRIMAS .....	16
3.6.1 Óleos e Gorduras .....	16
3.6.2 Álcool .....	17
3.6.3 Catalisador .....	17
3.7 GLICEROL .....	18
3.8 ASPECTOS DA QUALIDADE DO BIODIESEL .....	18
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>21</b>
4.1 PROCESSO DE PRODUÇÃO DO BIODIESEL PELO SISTEMA COM BANHO ULTRASSÔNICO .....	21
4.2 PROCESSO DE PRODUÇÃO DO BIODIESEL PELO SISTEMA COM BANHO ULTRASSÔNICO COM COSOLVENTE .....	25
4.3 ANÁLISE DA DENSIDADE RELATIVA .....	26
4.4 CÁLCULO DA CONVERSÃO DA REAÇÃO .....	27
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>28</b>
<b>6 CONCLUSÃO</b> .....	<b>30</b>
<b>7 TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>31</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>32</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos tempos, a maioria dos países têm buscado alternativas energéticas que sejam economicamente viáveis, ambientalmente sustentáveis e que possam ser produzidas em grande quantidade, para assim, realizar a substituição da matriz energética proveniente do petróleo. Desta forma, surgem novos e fortes estímulos para o desenvolvimento de tecnologias de produção de biocombustíveis.

Porém não é de hoje que há grande interesse na aplicação de óleos vegetais e gorduras animais como combustíveis, segundo Knothe (2006), este interesse é anterior à crise dos combustíveis dos anos 1970. Tal afirmação se baseia no relato feito por Rudolph Diesel em seu livro “Combustíveis Líquidos”, no qual ele conta ter visto um motor projetado para operar com combustíveis de petróleo funcionando com óleo de amendoim, sem grandes diferenças perceptíveis, na exposição de Paris em 1900.

O primeiro relato que se tem sobre o biodiesel como conhecido hoje, vem de uma patente belga, concedida em 1937 ao pesquisador G. Chavanne. Nela era descrito o uso de ésteres etílicos de ácidos graxos de óleo de palma como combustível análogo ao petrodiesel. Já o termo biodiesel foi usado pela primeira vez em um trabalho chinês publicado em 1988 (KNOTHE, 2006). Quimicamente, o biodiesel é uma mistura de ésteres, normalmente produzido por meio de uma reação de transesterificação de óleos vegetais ou gorduras animais.

O interesse do Brasil pelo uso de biodiesel como um combustível alternativo foi despertado inicialmente por conta do segundo choque no preço do petróleo, que aconteceu no início da década de 80. Anos mais tarde, a Lei nº 11.097/2005 trouxe a obrigatoriedade da mistura do biodiesel ao diesel fóssil. Desde então, o percentual de biodiesel na mistura vem sendo determinado por lei. Em 2018, a previsão era que seria obrigatória a comercialização do óleo diesel B9 (9% de biodiesel), porém uma resolução do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) antecipou a obrigatoriedade da especificação B10 (ANP, 2018).

A vantagem da combustão do biodiesel está na emissão de poluentes em menores concentrações quando comparado ao diesel mineral, além disso, também apresenta as vantagens de matérias-primas renováveis, maior segurança no transporte e armazenamento devido ao ponto de ignição mais elevado (SANTOS, 2009).

Tradicionalmente, a reação de transesterificação pode ser efetuada em batelada ou em fluxo contínuo utilizando aquecimento convencional e agitação mecânica. Entretanto, há um fator que dificulta este processo, pois como os reagentes são parcialmente miscíveis, há uma barreira inicial a ser vencida, aumentando assim, o tempo de reação.

Por isso, outras metodologias para produção de biodiesel vêm sendo intensamente pesquisadas, a fim de se reduzir o tempo de reação, e conseqüentemente diminuir a energia utilizada, mantendo a mesma qualidade do produto final (NASCIMENTO et al., 2009).

Uma alternativa ao processo convencional é a utilização do banho ultrassônico, que substitui o aquecimento e agitação mecânica durante a reação. O ultrassom gera cavitação provocando aumento do contato entre as fases álcool/óleo, favorecendo o processo e diminuindo o tempo de reação.

Juntamente com o uso do banho ultrassônico, outra alternativa é a adição de cosolvente na mistura reacional. O objetivo dessa adição é o aumento da solubilidade e conseqüentemente aumentar a transferência de massa entre o óleo e o álcool (ALHASSAN et al., 2014). O uso do próprio biodiesel vem se mostrando uma potencial opção como cosolvente, pois não é tóxico e não necessita ser separado ao final da reação (LAM; LEE, 2010).

Neste sentido este trabalho visa à produção de biodiesel de óleo de soja, empregando-se um banho ultrassônico para realizar experimentos a diferentes temperaturas, diferentes tempos de reação e utilizando cosolvente.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 GERAL

O objetivo principal do trabalho será produzir biodiesel por transesterificação utilizando um sistema com banho ultrassônico.

### 2.2 ESPECÍFICOS

No contexto do trabalho os objetivos específicos serão:

- Produzir biodiesel com tempos de reação de 30 minutos e 60 minutos, com temperaturas de 25°C e 40 °C;
- Produzir biodiesel com tempos de reação de 30 minutos e 60 minutos, com temperaturas de 25°C e 40 °C, utilizando cosolvente;
- Caracterizar por meio de análise da densidade o biodiesel obtido com e sem cosolvente;
- Verificar a conversão da reação em relação a massa de óleo nas amostras obtidas nos diferentes sistemas.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 BIODIESEL

O biodiesel é um combustível renovável composto de mono-alquilésteres de ácidos graxos de cadeia longa (KNOTHE et al., 2006), sendo normalmente obtido por reação de transesterificação de óleos vegetais ou gorduras animais com álcool, na presença ou não de catalisador (SANTANA, 2008).

Os álcoois mais utilizados na reação de obtenção do biodiesel são o metanol e o etanol, dessa forma, os compostos mono-alquilésteres que são originados nessa reação são denominados de ésteres metílicos ou etílicos, respectivamente (SANTANA, 2008).

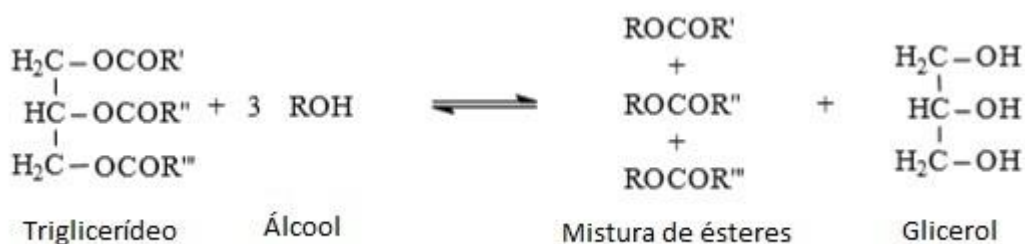
Suas propriedades físico-químicas são semelhantes as do diesel mineral, desta forma pode ser utilizado em motores à combustão interna com ignição por compressão tanto na forma pura quanto em misturas de diferentes proporções com o óleo diesel, sem exigir grandes ajustes no motor (SANTOS, 2009).

#### 3.2 TRANSESTERIFICAÇÃO

A transesterificação consiste na reação de triglicerídeo com álcool, utilizando-se catalisador que pode ser básico, ácido ou enzimático. Os produtos desta reação são os ésteres de ácidos graxos e o glicerol (KNOTHE et al., 2006; BLUM; FRANQUITTO, 2016).

Segundo Santos (2009), a razão molar estequiométrica de álcool e óleo na transesterificação é de 3:1 (três mols de álcool para um mol de óleo), porém, um amplo excesso de álcool é utilizado para deslocar o equilíbrio químico a fim de maximizar a produção de ésteres graxos. Esta reação pode ser visualizada na Figura 1.

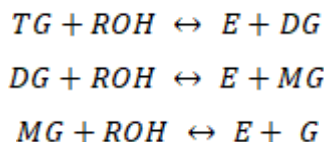
**Figura 1 - Reação de transesterificação de um triglicerídeo**



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

A reação de transesterificação é composta de três etapas reversíveis e consecutivas, como pode ser observado na Figura 2. Primeiramente, o triglicerídeo é convertido em diglicerídeo e uma molécula de éster, em seguida o diglicerídeo se transforma em monoglicerídeo e uma segunda molécula de éster. Por último, a molécula de monoglicerídeo reage para formar o glicerol e a terceira molécula de éster (FREEDMAN; BUTTERFIELD; PRYDE, 1986; BRITO, 2013).

**Figura 2 - Mecanismo da reação de transesterificação de um triglicerídeo**



**Fonte: Adaptado de Rodrigues et al. (2010).**

Após a reação de transesterificação duas fases são formadas, sendo a fase pesada composta de glicerol bruto, álcool, catalisador, sais de ácidos graxos, mono e diglicerídeos, e a fase leve constituída pela mistura de ésteres também com impurezas. Estas fases são separadas por decantação e/ou centrifugação (MENDES, 2005). Para Campos (2009), o principal objetivo da separação, ao final da reação, é remover os ésteres dessa mistura, assegurando um produto de alta pureza e com custo baixo.

Depois de separadas as fases, a última etapa do processo é a purificação dos ésteres, que são lavados e desumidificados para que possam ser considerados biodiesel (MENDES, 2005).

### 3.2.1 Transesterificação em Meio Homogêneo

A transesterificação metílica de óleos vegetais em meio alcalino homogêneo é o processo mais comum de produção do biodiesel. Neste caso, os catalisadores mais utilizados são o hidróxido de sódio e hidróxido de potássio, empregados em quantidades que variam de 0,3 a 1,0 %, sempre medido em relação à massa de triglicerídeo utilizada (RAMOS et al., 2016).

Embora seja muito utilizada, segundo Ramos et al. (2016), essa reação em meio alcalino apresenta a desvantagem de formação de sabões, visto que a base utilizada como catalisador pode reagir com os ácidos graxos livres, fazendo com que o rendimento do processo diminua e ocorra dificuldade na etapa de purificação.

Dessa forma, quando o material graxo a ser utilizado na transesterificação apresentar um percentual de ácidos graxos livres superior a 1%, pode-se considerar a utilização de ácidos de Brønsted-Lowry como catalisadores, como por exemplo HCl e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (RAMOS et al., 2016).

Quando comparada ao meio alcalino, a reação de transesterificação em meio ácido requer temperatura e tempo de reação maiores, além de quantidade de álcool mais elevada. Mesmo com estas desvantagens, para matérias-primas de alta acidez, a reação em meio ácido é mais viável (RAMOS et al., 2016).

### 3.2.2 Transesterificação em Meio Heterogêneo

A transesterificação com catalisadores heterogêneos para a produção de biodiesel necessita de maior tempo reação. De forma geral, Ramos et al. (2016) afirma que catalisadores sólidos para processos heterogêneos podem ser divididos em catalisadores ácidos e básicos, sendo que os de caráter básico requerem menor quantidade de sólido catalítico para a reação de transesterificação.

O rendimento das reações em meio heterogêneo, normalmente, é menor comparado a catálise homogênea. Segundo Ramos et al. (2016), isto pode ser associado as dificuldades da utilização de catalisadores sólidos como, por exemplo, contato entre os reagentes e a espécie catalítica, transferência de massa e formação de fases. Porém, mesmo apresentando estas desvantagens, o emprego de

catalisadores de fase heterogênea é bastante pesquisado, visto que, pode ser recuperado e ativado para ser reutilizado em vários ciclos catalíticos

### 3.2.3 Transesterificação por Catálise Enzimática

Os biocatalisadores empregados em processos enzimáticos são as lipases. Segundo Ramos et al. (2016), os processos de catálise enzimática para síntese do biodiesel apareceram na década de 1990 como uma alternativa para as desvantagens da catálise alcalina homogênea.

Para Ramos et al. (2016), a principal vantagem do processo enzimático na síntese do biodiesel é que a matéria-prima não precisa ser livre de umidade ou de ácidos graxos livres. E por não formar sabões nessa reação, o processo de purificação do biodiesel, torna-se mais fácil. Já as desvantagens são o alto custo do biocatalisador e o longo tempo de reação necessário para conseguir altas conversões.

## 3.3 OBTENÇÃO DO BIODIESEL PELO MÉTODO CONVENCIONAL

O método mais convencional de obtenção do biodiesel é pela reação de transesterificação, que pode ser efetuada em batelada ou em fluxo contínuo, normalmente utilizando aquecimento convencional. Neste tipo de aquecimento o calor é transferido ao meio reacional a partir da sua superfície por condução e convecção. Logo, este método consome mais energia e leva um maior tempo para atingir um rendimento de reação mais elevado (NASCIMENTO et al., 2009).

A reação também utiliza agitação mecânica e como óleo e álcool são parcialmente miscíveis, é importante aumentar a miscibilidade entre os reagentes, e desta forma aumentar o rendimento e a seletividade da reação. Uma alternativa para aumentar a miscibilidade é o uso de ultrassom, uma vez que essa tecnologia promove cavitações no meio reacional.

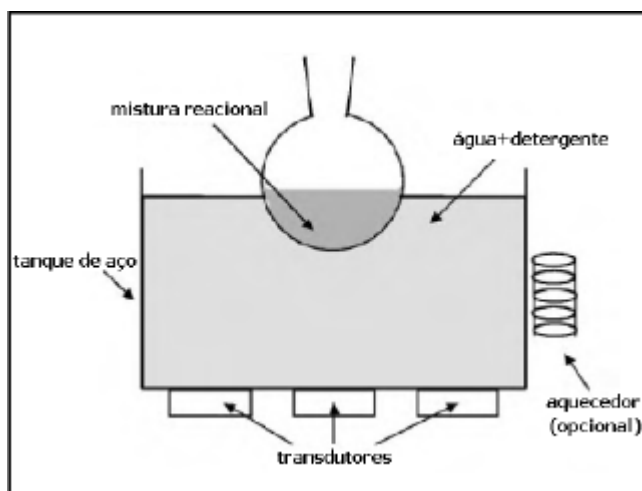
### 3.4 OBTENÇÃO DO BIODIESEL UTILIZANDO BANHO ULTRASSÔNICO

Para uma melhoria na reação e na conversão do produto e conseqüente diminuição do tempo de reação, Ho; Ng e Gan (2016) afirmam que a área superficial entre as fases imiscíveis formadas deve ser maximizada, e que a utilização do banho ultrassônico como substituição da agitação mecânica convencionalmente utilizada vem se mostrando uma tecnologia promissora.

De acordo com Barbosa e Serra (1992) a energia ultrassônica vem de uma cerâmica piezoelétrica disposta entre duas chapas de metal, o que constitui o transdutor piezoelétrico. Um sinal é transmitido à cerâmica piezoelétrica pelo gerador de frequência, e a cerâmica transforma ondas elétricas em ondas mecânicas. As chapas de metal amplificam esses sinais e o transdutor transmite os impulsos ultrassônicos ao meio reacional.

No banho ultrassônico, como mostrado na Figura 3, o transdutor é preso do fundo da cuba do aparelho e a energia ultrassônica se transmite por meio de um líquido, geralmente água (BARBOSA; SERRA, 1992).

**Figura 3 – Banho ultrassônico**



**Fonte: Mason, 2002 apud Santos (2009).**

O ultrassom apresenta a geração de cavitação. Segundo Santos (2009, p. 49) “a cavitação gerada pelo ultrassom é um fenômeno físico baseado no processo de criar, aumentar e implodir cavidades de vapor e gases, promovendo assim, a ativação de reações químicas”. Essa cavitação resulta então, em micro jatos de alta



velocidade e ondas de choque, que aumentam a transferência de calor e massa (HO; NG e GAN, 2016).

Com o auxílio do banho ultrassônico, a reação de transesterificação se torna mais rápida, com maiores taxas de conversão, o que dispensa maiores quantidades de catalisador, que implica na minimização da formação de sabão, e conseqüentemente, diminui os gastos com a purificação do biodiesel. Apesar de trabalhar apenas com uma frequência fixa, é um equipamento amplamente disponível, que não necessita de uma adaptação para a reação e tem boa distribuição de energia por meio das paredes do vaso de reação (SANTOS, 2009).

### 3.5 COSOLVENTE

A reação de transesterificação do óleo vegetal com álcool apresenta uma velocidade de reação baixa. Isso se deve à imiscibilidade do óleo e do álcool na mistura reacional (LAM; LEE, 2010). Para melhorar a transferência de massa entre os componentes da reação, o uso de cosolvente tem chamado a atenção de pesquisadores, pois tem alta solubilidade em óleo e álcool, apresentando redução do tempo de reação e acelerando a conversão (ALHASSAN et al., 2014).

Segundo Simonelli et al. (2018), os cosolventes mais utilizados são: tetrahidrofurano, éter dietílico, hexano, 2-propanol, acetato de etila, éter dibutílico, éter terc-butil metílico e éter diisopropílico. Como esses cosolventes geralmente são tóxicos e eles são usados em quantidades significativas, o uso do biodiesel como cosolvente têm se mostrado uma opção. A principal vantagem do uso do biodiesel é que ele não necessita de uma etapa adicional de separação, visto que é o produto final da reação de transesterificação. Outro fator que destaca o biodiesel como cosolvente é a sua disponibilidade nas plantas químicas de transesterificação de óleos ou gorduras (LAM; LEE, 2010).

### 3.6 MATÉRIAS-PRIMAS

#### 3.6.1 Óleos e Gorduras

As matérias-primas utilizadas para produzir biodiesel são os óleos vegetais, gordura animal, óleo e gorduras residuais. Os óleos vegetais e gorduras são compostos basicamente de triglicerídeos, ésteres e ácidos graxos (ALMEIDA et al, 2011).

No Brasil, segundo Almeida et al (2011), a matéria-prima mais utilizada no esforço de produção do biodiesel é o óleo de soja, apesar de a soja ser uma maior fonte para alimentação, visto que contém mais proteína do que óleo.

Segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), no início do ano de 2019, as matérias-primas mais consumidas para produção de biodiesel foram óleo de soja e gordura bovina. Na Tabela 1 a seguir, pode-se observar o perfil das matérias primas nos quatro primeiros meses do ano em questão.

**Tabela 1 – Perfil nacional de matérias-primas consumidas para produção de biodiesel no Brasil**

Descrição da matéria-prima	Jan/19	Fev/19	Mar/19	Abr/19
Óleo de Soja	67,00%	66,83%	68,30%	69,80%
Gordura Bovina	12,47%	13,67%	12,99%	11,93%
Outros Materiais Graxos	12,49%	12,73%	12,78%	11,96%
Óleo de Palma/Dendê	3,17%	1,54%	1,31%	1,33%
Gordura de Porco	2,00%	2,08%	2,05%	2,19%
Óleo de Fritura	1,88%	2,01%	1,46%	1,96%
Óleo de Algodão	0,57%	0,57%	0,62%	0,31%
Gordura de Frango	0,36%	0,56%	0,45%	0,51%
Óleo de Milho	0,06%	0,01%	0,04%	0,01%

Fonte: ANP, conforme Resolução ANP nº 729/2018 e Resolução ANP nº 734/2018 (2019).

Óleos e gorduras residuais, que são resultantes de processamentos domésticos, comerciais e industriais, apresentam-se como matérias-primas de

grande interesse, pois tem potencial de oferta elevado e custo baixo (SANTOS, 2009).

### 3.6.2 Álcool

Outro reagente necessário para que ocorra a reação de transesterificação é o álcool. Dentre os álcoois mais utilizados estão o metanol e o etanol.

A produção de biodiesel por rota metílica é mais frequentemente utilizada, por ser mais econômico e mais produtivo, sendo menos consumido na reação e também porque a separação de ésteres metílicos da glicerina ocorre de forma espontânea. Porém, o metanol é consideravelmente mais tóxico que o etanol, que é produzido no Brasil por fontes renováveis, e em grande escala, e essa elevada oferta acarreta em vantagem na utilização do etanol para produção do biodiesel (SILVA, 2008).

Uma desvantagem do uso do etanol para produzir biodiesel, segundo Lôbo e Ferreira (2009), é que ele promove uma maior dispersão da glicerina no biodiesel, dificultando sua separação. Então, para um maior rendimento na reação de transesterificação, é comum a utilização de excesso de álcool e a remoção da glicerina. A razão molar água:óleo comumente empregada para o metanol é de 6:1 e para o etanol a razão é de 9:1 a 12:1.

### 3.6.3 Catalisador

Catalisadores são substâncias que participam da reação e alteram a sua velocidade. Podem ser homogêneos, quando formam um sistema de uma única fase com os reagentes, ou heterogêneos, quando formam um sistema de mais de uma fase (FOGLER, 1939).

O biodiesel é preparado, usualmente, utilizando como catalisadores, ácidos, como exemplo o ácido sulfúrico, ou bases, como exemplos o hidróxido de sódio e hidróxido de potássio. O processo geralmente mais empregado é a catálise homogênea em meio alcalino, devido à sua maior eficiência, simplicidade e rapidez. O uso de catalisadores ácidos leva a uma cinética de reação mais lenta, quando comparada com o uso de catalisadores básicos (CAMPOS, 2009).

De acordo com Lôbo e Ferreira (2009), os hidróxidos de sódio e potássio têm sido amplamente empregados como catalisadores na produção de biodiesel, pois mesmo sendo menos ativos, apresentam menor custo e rendimentos satisfatórios. Porém, catalisadores básicos formam sabões com os ácidos graxos livres presentes no óleo vegetal, o que dificulta a purificação do produto final.

### 3.7 GLICEROL

Segundo a Agência Embrapa de Informação Tecnológica (AGEITEC), o glicerol ou propano-1,2,3-triol é um composto viscoso, oleoso, solúvel em água e álcool, que tem na sua estrutura três hidroxilas. O termo glicerina é utilizado para se referir ao produto na sua forma comercial, com pureza acima de 95%.

O glicerol puro pode ser aplicado na indústria de cosméticos, farmacêutica, detergentes, na fabricação de resinas e aditivos e também na indústria de alimentos (BRITO, 2013).

No processo de produção de biodiesel a partir de óleos e gorduras, o glicerol é o principal subproduto produzido. Porém quando obtido por meio de transesterificação de triglicerídeo e álcool, apresenta impurezas como água, sais, álcool, ésteres e óleo residual, tendo assim, seu valor agregado diminuído (BRITO, 2013).

Desta forma, conforme a AGEITEC, o glicerol necessita passar por um processo de purificação, que inclui etapas de filtração, destilação a vácuo, descoloração e troca de íons. Entretanto, por este procedimento ter um elevado custo, torna-se muitas vezes inviável para pequenos e médios produtores de biodiesel.

### 3.8 ASPECTOS DA QUALIDADE DO BIODIESEL

Para assegurar a qualidade do biodiesel produzido, é necessário estabelecer padrões de qualidade. No Brasil, esses padrões são regulamentados pela Resolução ANP 45/2014, como pode ser visto na Tabela 2. Variações na qualidade

do biodiesel podem acontecer conforme as estruturas moleculares dos éteres que o constituem ou devido também à presença de contaminantes provenientes da matéria prima, do processo de produção ou desenvolvidos durante a estocagem do biodiesel (LÔBO; FERREIRA, 2009).

**Tabela 2 – Padrões de qualidade do biodiesel**

Característica	Unidade	Limite
<b>Massa específica a 20°C</b>	kg/m <sup>3</sup>	850-900
<b>Viscosidade cinemática a 40°C</b>	mm <sup>2</sup> /s	3,0-6,0
<b>Teor de água, máx</b>	mg/kg	500
<b>Contaminação total, máx</b>	mg/kg	24
<b>Ponto de fulgor, mín</b>	°C	100
<b>Teor de éster, mín</b>	% massa	96,5
<b>Resíduo de carbono</b>	% massa	0,050
<b>Cinzas sulfatadas, máx</b>	% massa	0,020
<b>Enxofre total, máx</b>	mg/kg	50
<b>Sódio + Potássio, máx</b>	mg/kg	5
<b>Cálcio + Magnésio, máx</b>	mg/kg	5
<b>Fósforo, máx</b>	mg/kg	10
<b>Corrosividade ao cobre, 3h a 50°C, máx</b>	-	1
<b>Ponto de entupimento de filtro a frio, máx</b>	°C	19
<b>Índice de acidez, máx</b>	mg KOH/g	0,50
<b>Glicerol livre, máx</b>	% massa	0,02
<b>Glicerol total, máx</b>	% massa	0,25
<b>Mono, di, triacilglicerol</b>	% massa	Anotar
<b>Metanol ou etanol, máx</b>	% massa	0,20
<b>Índice de iodo</b>	g/100g	Anotar
<b>Estabilidade à oxidação a 110°C, mín</b>	h	6

Fonte: ANP (2014).

Métodos analíticos são aplicados para avaliar a qualidade do biodiesel, e a partir dos resultados, pode-se obter, segundo Lôbo e Ferreira (2009), informações sobre a matéria-prima empregada, o processo de fabricação e armazenamento, assim como, o desempenho do biodiesel como combustível e da qualidade de suas emissões.

Nos motores a diesel, as propriedades fluidodinâmicas do combustível são importantes para seu funcionamento. Essas propriedades são viscosidade e densidade, e elas exercem influência na circulação e injeção do combustível. A viscosidade é uma medida da resistência de um fluido ao escoamento e uma elevada viscosidade acarreta heterogeneidade na combustão do biodiesel, que pode

levar a deposição de resíduos nas partes internas do motor. Já a densidade do biodiesel está relacionada com a sua estrutura molecular, e quanto maior for a cadeia carbônica do alquiléster, maior será a densidade. Impurezas como o álcool podem influenciar na densidade do biodiesel (LÔBO; FERREIRA, 2009).

O número de insaturações presente na reação tem efeito sobre a viscosidade, densidade e também na estabilidade oxidativa do biodiesel. Esse grau de insaturação é quantificado pelo índice de iodo. Outro aspecto importante para assegurar a qualidade do biodiesel é o monitoramento da sua acidez, principalmente durante a estocagem. A alteração na acidez pode significar a presença de água no biodiesel (ALMEIDA et al, 2011).

Para verificar a conversão de ácidos graxos em biodiesel, normalmente usa-se da técnica de cromatografia, que mostra a composição dos ésteres de ácido graxos da amostra de biodiesel (SANTOS, 2009).

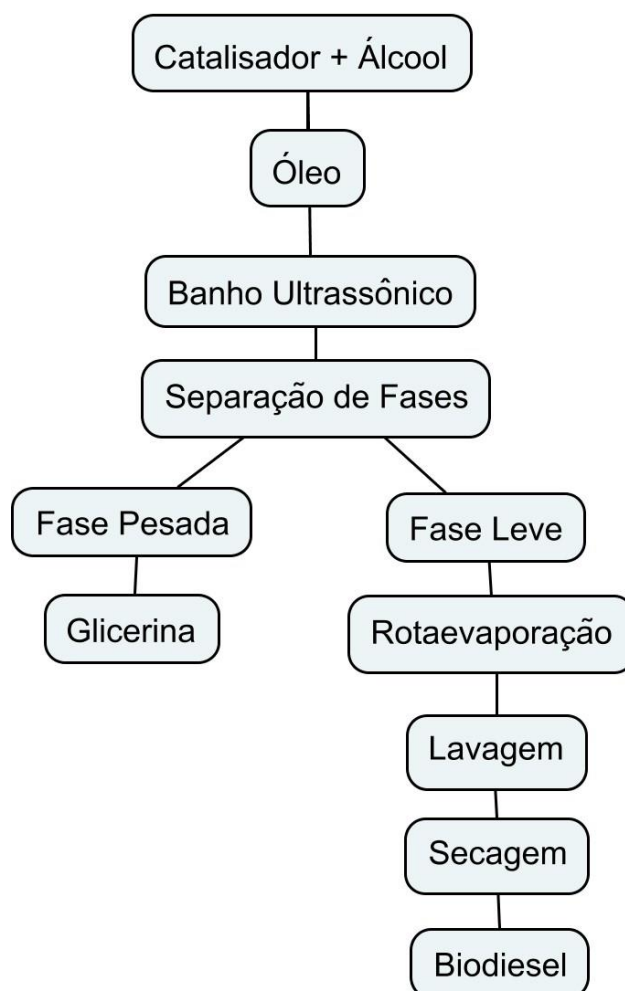
## 4 MATERIAL E MÉTODOS

Os biocombustíveis foram produzidos a partir da reação de transesterificação e para ambos os sistemas, foi utilizado óleo de soja comercial, adquirido em supermercado na cidade de Ponta Grossa.

### 4.1 PROCESSO DE PRODUÇÃO DO BODIESEL PELO SISTEMA COM BANHO ULTRASSÔNICO

O processo de produção do biocombustível foi realizado de acordo com as etapas mostradas na Figura 4 e descritas em seguida.

Figura 4 – Fluxograma da produção de biodiesel em banho ultrassônico



Fonte: Autoria própria (2019).

A reação se iniciou com a dissolução do catalisador hidróxido de potássio em etanol previamente aquecido, a aproximadamente 40°C, em um Erlenmeyer, sendo utilizado 0,35 % de KOH em relação a massa de óleo. Em seguida, o óleo de soja foi adicionado e essa mistura foi colocada no banho ultrassônico, a uma frequência de 25 kHz, por um tempo determinado de acordo com o tipo da amostra, mostradas na Tabela 3. Neste sistema, a razão molar utilizada é 1 de óleo para 10,2 de álcool, visto que foi baseada na metodologia proposta por Rodrigues et al. (2009).

Foram realizados quatro experimentos, com condições diferentes de tempo e de temperatura, conforme Tabela 3. Primeiramente, foram realizadas reações a temperatura ambiente e em seguida, foram realizadas reações a temperatura aproximada de 40°C, para isso foi acionado o aquecimento que o próprio banho possui, por meio de uma resistência.

**Tabela 3 – Tempo de reação e temperatura utilizados nos experimentos**

Experimento	Tempo de reação (min)	Temperatura (°C)
1a	30	25
2a	60	25
3a	30	40
4a	60	40

Fonte: A autoria própria (2019).

Após o tempo decorrido da reação, a mistura foi colocada em um funil de decantação para que as fases fossem separadas. Depois de 24 horas de repouso, ocorreu a distinção das fases, sendo a fase inferior composta de glicerina e a fase superior composta de biodiesel impuro, como pode ser observado na Figura 5.



**Figura 5 – Separação de fases**

**Fonte: Autoria própria (2018).**

A glicerina foi retirada e o biodiesel foi rotaevaporado em um sistema que pode ser visto na Figura 6, composto por um banho termostático com temperatura de 40°C, um balão com a amostra conectado a rotação, e por meio da utilização de uma bomba de vácuo, há a redução de pressão que proporciona a diminuição da temperatura de ebulição do etanol. Assim, a evaporação e posterior condensação do álcool é facilitada, e o mesmo é recuperado em um balão de fundo redondo. Este sistema foi utilizado com o objetivo de recuperar o excesso de etanol adicionado na reação.

**Figura 6 - Sistema utilizado para rotaevaporação**



**Fonte: Autoria própria (2018).**

O biodiesel foi colocado novamente em um funil de separação para a retirada de impurezas no processo de lavagem, o qual tem como objetivo eliminar o sabão formado e sais presentes na solução. Para esta etapa, foi necessário aquecer a água até aproximadamente 40 °C e adicioná-la no funil de decantação. Em seguida, retirou-se a água e este processo foi repetido até o momento em que a água da lavagem estivesse límpida.

Para a retirada de água presente no biodiesel foi utilizado sulfato de sódio, visto que tem a capacidade de absorver a água presente na solução. Neste processo, o sulfato de sódio é adicionado no biodiesel turvo, e logo após, foi filtrado em um filtro com uma camada também de sulfato de sódio, obtendo-se assim, o biodiesel.

## 4.2 PROCESSO DE PRODUÇÃO DO BODIESEL PELO SISTEMA COM BANHO ULTRASSÔNICO COM COSOLVENTE

As etapas executadas para obtenção de biodiesel com cosolvente são apresentadas na Figura 7 e descritas em seguida.

Figura 7 – Fluxograma da produção de biodiesel em banho ultrassônico utilizando cosolvente



Fonte: Autoria própria (2019).

O processo de produção utilizando o cosolvente se iniciou com a dissolução do hidróxido de potássio em etanol aquecido, a aproximadamente 40°C. Em seguida, adicionou-se o óleo de soja e o cosolvente, que neste caso foi um biodiesel produzido anteriormente, e a proporção utilizada foi de 10% em massa total, como

aplicado por Alhassan et al. (2014) em seu trabalho. A razão molar também permaneceu sendo 1 de óleo para 10,2 de etanol.

A mistura foi colocada no banho ultrassônico e deixada em reação pelo tempo necessário de cada amostra. Neste método de produção também foram feitos quatro experimentos, nos quais foram variados os tempos e temperaturas de reação, conforme Tabela 4.

**Tabela 4 – Tempo de reação e temperatura utilizados nos experimentos com cosolvente**

Experimento	Tempo de reação (min)	Temperatura (°C)
1b	30	25
2b	60	25
3b	30	40
4b	60	40

Fonte: Autoria própria (2019).

Decorrido o tempo de reação, a mistura foi colocada em um funil de decantação, para que houvesse a separação de fases. E as demais etapas para a obtenção do biocombustível seguiram semelhantes às do sistema explicado anteriormente.

Após as 24 horas, a glicerina foi separada e o biodiesel foi rotaevaporado para recuperação do etanol em excesso. Em seguida, lavou-se com água aquecida a 40 °C, aproximadamente, e a última etapa foi a secagem com o sulfato de sódio, obtendo-se assim, o biodiesel pronto para ser caracterizado por meio das análises.

#### 4.3 ANÁLISE DA DENSIDADE RELATIVA

A densidade do biodiesel foi determinada utilizando um picnômetro, pequeno frasco de vidro constituído de forma que o volume do fluido que o preencher seja sempre o mesmo.

Primeiramente, anotou-se a temperatura da amostra e foi verificado se o picnômetro estava limpo e seco. Em seguida, pesou-se o picnômetro vazio com a tampa em uma balança analítica. Colocou-se o picnômetro em uma superfície plana e horizontal e o mesmo foi preenchido com a amostra até a borda, e então foi colocada a tampa de modo a transbordar o excesso de produto. Após limpar e

secar, em uma balança analítica o picnômetro cheio foi pesado. Com isso, foi possível determinar a densidade, por meio da equação 1, em que  $d$  é a densidade,  $m$  é a massa da amostra contida no picnômetro, resultante da subtração da massa do picnômetro vazio da massa do picnômetro cheio de amostra, e  $V$  é o volume declarado no certificado de calibração do picnômetro.

$$d = \frac{m}{V} \quad (1)$$

#### 4.4 CÁLCULO DA CONVERSÃO DA REAÇÃO

Para determinação da conversão em relação a massa de óleo, utilizou-se a relação estequiométrica da reação de transesterificação. Para isso, a massa de óleo e do produto foi transformada em mols e utilizada na equação 2 para a determinação da conversão. Para as amostras com cosolvente, foi subtraída a massa de cosolvente adicionada na reação da massa de biodiesel obtida.

$$\text{Conversão (\%)} = \frac{\text{mol reagido}}{\text{mol que deveria reagir}} \times 100 \quad (2)$$

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As análises foram realizadas utilizando a metodologia descrita anteriormente e os valores encontrados foram comparados com a literatura. Os resultados obtidos nas reações de 30 minutos e 60 minutos nas temperaturas de 25°C e 40 °C sem adição de cosolvente estão apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5 – Resultados das análises nas amostras sem cosolvente**

Experimento	Tempo de reação (min)	Temperatura (°C)	Densidade a 20°C (Kg/m <sup>3</sup> )	Conversão (%)
1a	30	25	870	67,90
2a	60	25	872	46,44
3a	30	40	870	55,87
4a	60	40	857	51,43

Fonte: Autoria própria (2019).

Os valores estabelecidos para a densidade, segundo a ANP, são de 850 a 900 Kg/m<sup>3</sup>, logo, observa-se na Tabela 5 que todos os valores de densidade dos experimentos estão de acordo com o padrão. Este é um parâmetro importante para avaliar a qualidade do biodiesel, pois está relacionado com a pureza do mesmo, visto que entre outros fatores, a presença de glicerina, pode ocasionar mudança na densidade. Além disso, é um método rápido e de baixo custo (FROEHNER; LEITHOLD; JÚNIOR, 2007).

O experimento de maior conversão de óleo em ésteres etílicos foi o de tempo de 30 minutos e temperatura de 25°C, sendo de 67,90%. Analisando a Tabela 5, pode-se observar que com um tempo de 30 minutos a conversão foi maior tanto na temperatura de 25 °C quanto na temperatura de 40 °C, indicando que o tempo de 30 minutos foi suficiente para se obter, dentro do intervalo estudado, a melhor condição. Porém, de maneira geral, os resultados de conversão de todas as amostras foram menores quando comparados a conversão de 91,8 %, obtido por Rodrigues et al. (2009). Esta diferença pode ser explicada pela utilização de um banho ultrassônico com frequência de 25 kHz, enquanto que no trabalho comparado foi utilizado um aparelho de 40 kHz. Com uma frequência mais elevada, a agitação das moléculas é maior, auxiliando no contato entre os reagentes, promovendo uma maior conversão.

Após a produção e análises das amostras com cosolvente, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 6:

**Tabela 6 – Resultados das análises nas amostras com cosolvente**

Experimento	Tempo de reação (min)	Temperatura (°C)	Densidade a 20 °C (Kg/m <sup>3</sup> )	Conversão (%)
1b	30	25	870	51,95
2b	60	25	869	56,40
3b	30	40	870	52,32
4b	60	40	871	55,75

Fonte: Autoria própria (2019).

Todos os valores encontrados para densidade estão entre os valores limites especificados pela ANP, indicando que o processo de purificação foi satisfatório, pois a presença de contaminantes alteraria a densidade.

Os resultados de conversão de óleo em ésteres etílicos se mostraram muito próximos, porém a amostra que se destaca é a de 60 minutos com temperatura de 25°C com 56,40%. Comparando-se com a literatura, é possível perceber que a conversão é baixa, e isto pode ser associado a utilização de um banho ultrassônico com frequência de 25 kHz. E com relação aos efeitos do cosolvente na conversão, nenhuma das condições se mostrou significativamente melhor, logo, seria necessária uma investigação mais aprofundada, por meio da determinação da curva cinética da reação, que possibilitaria analisar a atuação do cosolvente no tempo da reação.

Analisando os experimentos a mesma temperatura, pode-se perceber que a variação da conversão é pequena nos diferentes tempos de reação, isto pode estar associado a utilização do banho ultrassônico, que por meio da cavitação, promove maior contato entre as fases reagentes, obtendo maiores taxas de conversão em menores de tempos de reação.

Verificando as conversões dos diferentes experimentos com e sem cosolvente, pode-se perceber que o uso do banho ultrassônico mostrou potencial para obter biodiesel em um menor tempo de reação, pois os valores de conversão possuem pequena variação em relação ao tempo. Logo, não há vantagens em dobrar o tempo de reação, e conseqüentemente dobrar o gasto energético, para atingir uma conversão pouco acima da alcançada com 30 minutos de reação.

## 6 CONCLUSÃO

Os resultados alcançados na análise de densidade estão dentro dos limites previstos em legislação, e indicam que os processos de obtenção e purificação das amostras foram satisfatórios, pois a presença de glicerina ou outros contaminantes influencia diretamente no valor de densidade.

Em relação a adição de cosolvente na mistura reacional, não se pode concluir os efeitos que a mesma provocou na reação. Desta forma, seria necessário levantar a curva cinética da reação com cosolvente para verificar a sua influência em relação ao tempo de reação.

Portanto, os resultados obtidos neste trabalho demonstram que o uso de banho ultrassônico para produção de biodiesel é uma tecnologia promissora, pois pode favorecer a obtenção do biocombustível em menor tempo de reação, menor gasto de energia e maior produtividade.



## 7 TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão de trabalhos futuros, pode-se apontar:

- Aplicação de banho ultrassônico com frequência de 40 kHz para produção de biodiesel;
- Realização de um planejamento experimental para definir as melhores condições de reação;
- Levantamento da curva cinética da reação com cosolvente.

## REFERÊNCIAS

AGEITEC (Agência Embrapa de Informação Tecnológica). **Definição**. Brasília, 2018. Disponível em: <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br>>. Acesso em: 29 mai. 2018.

ALHASSAN, Y.; et al. Co-solvents transesterification of cotton seed oil into biodiesel: Effects of reaction conditions on quality of fatty acids methyl esters. **Energy Conversion and Management**, v. 84, p. 640-648, 2014.

ALMEIDA, J. K. P.; et al. Caracterizações físico-químicas de óleos vegetais utilizados para produção de biodiesel com metodologias alternativas simples. In: XXXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção. **Anais...** Belo Horizonte, 2011.

ANP (Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis). **Definição**. Brasília, 2018. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/>> Acesso em: 29 mai. 2018.

BARBOZA, J. C. S; SERRA, A. A. Ultra-som: influência do ultra-som na química. **Química Nova**. São Paulo, v. 14, n. 4, p. 302-316, 1992.

BLUM, S. A.; FRANQUITTO, K. R. **Produção De Biodiesel E Obtenção De Dados De Equilíbrio Líquido-Líquido A Partir Do Óleo De Crambe (*Crambe Abyssinica Hochst*)**. 2016. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2016. Disponível em: <[http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/7463/1/PG\\_COENQ\\_2016\\_2\\_10.pdf](http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/7463/1/PG_COENQ_2016_2_10.pdf)> Acesso em: 14 mai. 2018.

BRASIL. **Lei n. 11.097, de 13 de janeiro de 2005**. Dispõe sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2004-2006/2005/lei/l11097.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2005/lei/l11097.htm)>. Acesso em: 29 mai. 2018.

BRITO, F. O. **Desenvolvimento de Usina de Produção de Biodiesel a Partir de Óleo de Fritura Usando Simuladores de Processo: Aspectos Operacionais e Ambientais**. 2013. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, Ceará, 2013. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/7672>> Acesso: 20 abr. 2018.

CAMPOS, R. J. A. **Metodologia de análise energética e exergética aplicada à planta piloto de biodiesel de Caetés-PE**. 2009. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2009.

Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/5123>> Acesso em: 17 mai. 2018.

FOGLER, H. S. **Elementos de Engenharia das Reações Químicas**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009, p.853.

FREEDMAN, B.; BUTTERFIELD, R. O.; PRYDE, E. H. Transesterification kinetics of soybean oil 1. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 63, n. 10, p. 1375-1380, 1986.

FROEHNER, S.; LEITHOLD, J.; JÚNIOR, L. F. L. Transesterificação de óleos vegetais: caracterização por cromatografia em camada delgada e densidade. **Química Nova**, v 30, n. 8, p. 2016-2019, 2007.

HO, W. W.; NG, H. K.; GAN, S. Advances in ultrasound-assisted transesterification for biodiesel production. **Applied Thermal Engineering**. v. 100, p. 553-563, 2016.

KNOTHE, G.; et al. **Manual do biodiesel**. São Paulo: Editora Blücher, 2006.

LAM, M. K.; LEE, K. T. Accelerating transesterification reaction with biodiesel as co-solvent: A case study for solid acid sulfated tin oxide catalyst. **Fuel**. v. 89, n. 12, p. 3866-3870, 2010.

LÔBO, P. I; FERREIRA, S. L. C. Biodiesel: parâmetros de qualidade e métodos analíticos. **Química Nova**. São Paulo, v. 32, n. 6, p. 1596-1608, jul. 2009.

MARQUES, M. V. Determinação do teor de ésteres graxos em biodiesel metílico de soja por cromatografia gasosa utilizando oleato de etila como padrão interno. **Química Nova**. São Paulo, v. 33, n. 4, p. 978-980, mar. 2010.

MENDES, R. de A. **Diagnóstico, Análise de Governança e Proposição de Gestão para a Cadeia Produtiva do Biodiesel da Mamona (CP/BDM): o Caso do Ceará**. 2005. 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/4855>> Acesso em: 24 mai. 2018.

NASCIMENTO, U. M.; et al. Otimização da produção de biodiesel a partir de óleo de coco babaçu com aquecimento por micro-ondas. **Eclética Química**. São Paulo, v. 34, n. 4, p. 37-48, 2009.

RAMOS, L. P.; et al. Biodiesel: Matérias-Primas, Tecnologias de Produção e Propriedades Combustíveis. **Revista Virtual de Química**. v. 9, n. 1, p. 317-369, 2017.

RODRIGUES, S.; et al. Optimization of the production of ethyl esters by ultrasound assisted reaction of soybean oil and ethanol. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 26, n. 2, p. 361-366, 2009.

SANTANA, G. C. de S. **Simulação e análise de custos na produção de biodiesel a partir de óleos vegetais**. 2008. 175 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) Programa de Pós-Graduação em Engenharia – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2008. Disponível em: <<http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/266153>> Acesso em: 10 mai. 2018.

SANTOS, F. F. P. dos. **Produção de biodiesel assistida por ultra-som**. 2009. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2009. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/15769>> Acesso em: 30 mar. 2018.

SCHUCHARDT, U.; SERCHELI, R.; VARGAS, R. M. Transesterification of Vegetable Oils: a Review. **Journal of the Brazilian Chemical Society**. v 9, n. 1, p. 199-210, 1998.

SILVA, T. O. M. da. **Síntese e caracterização de biocombustíveis obtidos a partir do arroz e seus derivados**. 2008. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica. Rio Grande do Sul, 2008. Disponível em: <<http://repositorio.pucrs.br/dspace/handle/10923/3276>> Acesso em: 10 abr. 2018.

SIMONELLI, G; PIRES, C. A. M; SANTOS, L. C. L. **Adição de substância tensoativa e cosolvente na transesterificação de óleo de soja**, p. 132-135. In: São Paulo: Blucher, 2018.