



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA CIVIL**

HEYLLANE CHRISTINA ALVES DE OLIVEIRA

**PIRÓLISE DE LODO INDUSTRIAL PROVENIENTE DE PRODUÇÃO DE
BIODIESEL VISANDO A OBTENÇÃO DE ÓLEOS COMBUSTÍVEIS**

PALMAS

2021

HEYLLANE CHRISTINA ALVES DE OLIVEIRA

**PIRÓLISE DE LODO INDUSTRIAL PROVENIENTE DE PRODUÇÃO DE
BIODIESEL VISANDO A OBTENÇÃO DE ÓLEOS COMBUSTÍVEIS**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel no Curso
Superior de Engenheiro Civil do Instituto
Federal do Tocantins, *Campus* Palmas.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Mendes
Pedroza

PALMAS

2021

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins**

O48p Oliveira, Heyllane Christina Alves de
PIRÓLISE DE LODO INDUSTRIAL PROVENIENTE DE
PRODUÇÃO DE BIODIESEL VISANDO A OBTENÇÃO DE ÓLEOS
COMBUSTÍVEIS. / Heyllane Christina Alves de Oliveira. – Palmas,
TO, 2021.
62 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia
Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do
Tocantins, Campus Palmas, Palmas, TO, 2021.

Orientador: Dr. Marcelo Mendes Pedroza

1. Lodo. 2. Pirólise. 3. Bio-óleo. I. Pedroza, Marcelo Mendes. II.
Título.

CDD 624

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins
de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica do IFTO com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a).

FOLHA DE APROVAÇÃO

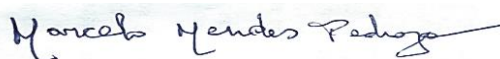
HEYLLANE CHRISTINA ALVES DE OLIVEIRA

PIRÓLISE DE LODO INDUSTRIAL PROVENIENTE DE PRODUÇÃO DE BIODIESEL VISANDO A OBTENÇÃO DE ÓLEOS COMBUSTÍVEIS

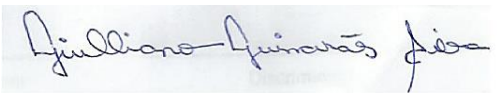
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do curso de Engenharia Civil Instituto Federal do Tocantins - *Campus* Palmas, como exigência à obtenção do grau em Engenheiro Civil.

Aprovado em: 04 / 02 / 2021

BANCA AVALIADORA



Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza
Orientador
(IFTO)



Prof. Dr. Giulliano Guimarães Silva
(IFTO)



Eng. Ambiental Rui Felipe de Miranda Rios
(Engenheiro Ambiental)

**“Dê ao homem um peixe e ele se
alimentará por um dia.
Ensine o homem a pescar e ele se
alimentará por toda a vida.”**

Dedico essa grande vitória àqueles que mais amo em vida, minha mãe **Neide**, meu pai **Aid**, meu irmão **Thayllor**, que sempre esteve comigo desde o início da faculdade, assim como minha avó **Cleusa**, que sempre acreditou e investiu nos meus sonhos.

Amo vocês de todo o meu coração!

AGRADECIMENTOS

Sou grata primeiramente a **Deus**, meu pai, melhor amigo, companheiro e defensor. Muito obrigada por me dar forças sempre que pensei em fraquejar, por se fazer presente em toda a minha vida e mostrar que eu posso mais a cada amanhecer. Obrigada por estar comigo ao longo desses cinco anos e me ajudar a concretizar um dos meus maiores sonhos, me tornar engenheira civil pelo IFTO.

Aos meus pais, **Aid** e **Neide**, que apesar de serem divorciados nunca mediram esforços em se unirem para me ajudar, que mesmo passando por dificuldades sempre estiveram ali, buscando a melhor solução para que continuasse a carreira acadêmica. Obrigada por me proporcionarem uma boa educação, por me ensinarem a ser humilde, responsável e buscar agir de forma correta, o que irei levar tanto para a vida pessoal como a profissional. Ao meu irmão **Thayllor**, que esteve comigo durante toda essa fase, e nos momentos que me vi angustiada, manteve ao meu lado me dando forças.

À minha avó **Cleusa**, ser humano em que busco me espelhar, agradeço por confiar e acreditar em todos os meus sonhos. Obrigada por se fazer tão presente em minha vida, por ter investido tanto no meu aprendizado e por ser o meu pilar como mulher e como pessoa.

Ao meu orientador Professor Dr. **Marcelo**, que abraçou o pedido de me orientar em um período tão difícil para todos, estando presente em todas as dificuldades que encontrei e buscando da melhor maneira possível contribuir para o meu aprendizado. Obrigado professor por me encorajar, pelos elogios, pelas risadas e por mesmo com as dificuldades não desacreditar do meu potencial.

Ao Professor Dr. **Giulliano**, que aceitou as minhas solicitações em participar das duas defesas. Sempre foi um excelente docente de modo a buscar o entendimento do aluno e proporcionar o melhor conhecimento. Saiba que seus ensinamentos contribuíram grandemente para o meu interesse na área de águas.

Ao Engenheiro Ambiental **Rui**, que também aceitou participar das duas defesas, apesar das dificuldades que enfrentamos atualmente. MUITÍSSIMO obrigada pela

contribuição na padronização do mesmo, a fim de me ensinar melhorias que poderei levar tanto para a vida profissional como pessoal.

À toda a minha família, avô, avós, tios, tias, primos e primas, que em todos os encontros me desejaram sorte e confiança para que eu pudesse continuar nesta caminhada.

Às minhas amigas mais próximas, **Karol**, **Sarah** e **Rebeca**, que por também serem acadêmicas, passaram comigo as dificuldades de estar longe da família e enfrentar as mazelas do curso de forma mais branda. Obrigada pelos momentos de descontração e por toda parceria.

Aos meus colegas de curso, que mesmo cada um enfrentando uma barreira diferente nunca deixou o outro para trás. Muito obrigada a todos que estiveram comigo até o presente momento, sempre me apoiando e me dando forças.

A todos os professores do curso, que se dedicam e apostam todos os dias nos seus alunos, meu muito obrigada a cada um.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins (IFTO), *Campus* Palmas, e todos os envolvidos na concretização desse sonho.

A todos, meu imenso agradecimento!

RESUMO

OLIVEIRA, Heyllane Christina Alves De. **Pirólise de lodo industrial proveniente de produção de biodiesel visando a obtenção de óleos combustíveis**. 2021. 61 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins. Palmas, 2021.

A grande quantidade de resíduos gerados pela indústria de biodiesel é preocupante, logo, as buscas por alternativas que deem uma destinação final adequadamente sustentável a esses sedimentos devem ser acentuadas. Sendo assim, este trabalho teve como objetivo utilizar a biomassa (lodo) gerada pelo efluente da Indústria GRANOL, localizada no município de Porto Nacional- TO, para a produção de bio-óleo através do ensaio de Pirólise, onde todos os testes foram elaborados no Laboratório de Análise de Águas, no Instituto Federal do Tocantins (IFTO), *Campus* Palmas. Inicialmente buscou-se obter algumas características do material *in natura* tais como Teor de Umidade, de Cinzas, de Material Volátil e de Carbono Fixo. A partir daí, realizou-se ensaio pirolítico realizado em um reator de leito fixo, com temperatura de 600°C, a uma taxa de aquecimento de 20°C/min e utilizando um gás de arraste, onde o vapor da água foi aquecido a 130°C. Concluída a Pirólise e obtendo o produto final, bio-óleo, novamente foi feita a caracterização (ensaios citados anteriormente) do material, adicionando a esta o Balanço de Massa, pH e Teste de Solubilidade. A análise imediata da biomassa *in natura* trouxe um Teor de Umidade de cerca de 5%, Material Volátil com 85%, Cinzas com aproximadamente 3% e Carbono Fixo de 7%, o que remetem a facilidade da amostra de entrar em combustão. O Balanço de Massa realizado após a Pirólise trouxe consigo um rendimento de carvão de 9% e de bio-óleo cerca de 82%. Com a análise imediata do bio-óleo obteve-se um Teor de Umidade em torno de 24%, Material Volátil com 79%, o Carbono Fixo foi de 5% e nenhuma Cinza foi detectada. O pH do biocombustível foi de 4,75 e se apresentou totalmente solúvel em acetona, clorofórmio e diclorometano; se mostrando parcialmente solúvel apenas quando em contato com o hexano. Logo, tais resultados comprovam a eficiência na substituição de combustíveis fósseis utilizados em indústrias por bio-óleo advindo de Pirólise de biomassa.

Palavras-chave: Óleos. Biodiesel. Lodo. Pirólise. Bio-óleos.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Heyllane Christina Alves De. **Pyrolysis of industrial sludge from the production of biodiesel to obtain fuel oils**. 2021. 61 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins. Palmas, 2021.

The large amount of waste generated by the biodiesel industry is worrying, so the search for alternatives that give a properly sustainable final destination to these sediments must be accentuated. Therefore, this work aimed to use the biomass (sludge) generated by the effluent from the GRANOL Industry, located in the municipality of Porto Nacional-TO, for the production of bio-oil through the Pyrolysis test, where all tests were carried out in the Water Analysis Laboratory, at the Federal Institute of Tocantins (IFTO), *Campus* Palmas. Initially, we sought to obtain some characteristics of the raw material such as Moisture, Ash, Volatile and Fixed Carbon Content. From then on, the pyrolytic test was carried out in a fixed bed reactor, with a temperature of 600°C, at a heating rate of 20°C / min and using a carrier gas, where the water vapor was heated to 130°C. Pyrolysis was completed and the final product, bio-oil, was again characterized (the aforementioned tests) of the material, adding to it the Mass Balance, pH and Solubility Test. The Immediate Analysis of the biomass in natura brought a Moisture Content of about 5%, Volatile Material with 85%, Ashes with approximately 3% and Fixed Carbon of 7%, which refer to the ease of the sample to enter combustion. The Mass Balance carried out after the pyrolysis brought with it a 9% coal and 82% bio-oil yield. With the Immediate Analysis of the bio-oil it was obtained a Moisture Content around 24%, Volatile Material with 79%, no ash was detected and the Fixed Carbon was 5%. The pH of the biofuel was 4,75 and was totally soluble in acetone, chloroform and dichloromethane; partially soluble only when in contact with hexane. Therefore, these results prove the efficiency in the substitution of fossil fuels used in industries, with bio-oil resulting from biomass pyrolysis.

Keywords: Oils. Biodiesel. Sludge. Pyrolysis. Bio-oils.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	5
2 PROBLEMA DE PESQUISA	6
3 JUSTIFICATIVA	7
4 OBJETIVOS	8
4.1 Objetivo Geral	8
4.2 Objetivos Específicos	8
5 REVISÃO DE LITERATURA	9
5.1 Produção de Biodiesel	9
5.1.1 Biodiesel no mundo.....	9
5.1.2 Biodiesel no Brasil.....	11
5.1.3 Biodiesel no Tocantins	15
5.2 Produção do lodo	16
5.3 Pirólise	18
5.4 Biocombustíveis	21
6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	24
6.1 Coleta do lodo	25
6.2 Caracterização do lodo	25
6.2.1 Teor de Umidade	25
6.2.2 Teor de Material Volátil	28
6.2.3 Teor de Cinzas.....	29
6.2.4 Teor de Carbono Fixo	29
6.3 Teste de Pirólise	30
6.3.1 Balanço de Massa.....	32
6.3.2 Análise do Bio-óleo	32
6.3.2.1 Umidade, Material Volátil, Cinzas e Carbono Fixo.....	32
6.3.2.2 pH.....	33
6.3.2.3 Teste de solubilidade	33
7 RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
7.1 Caracterização do lodo	34
7.1.1 Teor de Umidade	34

7.1.2 Teor de Material Volátil	35
7.1.3 Teor de Cinzas.....	35
7.1.4 Teor de Carbono Fixo	36
7.2 Teste de Pirólise.....	37
7.2.1 Balanço de Massa.....	37
7.2.2 Caracterização do bio-óleo	38
7.2.2.1 Teor de Umidade	38
7.2.2.2 Teor de Material Volátil	39
7.2.2.3 Teor de Cinzas.....	39
7.2.2.4 Teor de Carbono Fixo	40
7.2.2.5 Teste de pH	40
7.2.2.6 Teste de Solubilidade	41
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	43
REFERÊNCIAS.....	44

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Produção mundial de biodiesel.	10
Figura 2- Queima do biodiesel e diesel.	11
Figura 3- Na sequência os frutos/sementes e suas árvores: óleo de palma, babaçu, girassol, algodão, amendoim, mamona, colza, soja, jatropha, coco.	14
Figura 4- Plantação de soja na agricultura familiar.	16
Figura 5- Reação para transesterificação.	17
Figura 6- Vias de conversão energética da biomassa.	19
Figura 7- Formas de utilização do bio-óleo no cotidiano.	23
Figura 8- Desenho esquemático das atividades desenvolvidas.	24
Figura 9- Lodo coletado do efluente industrial.	25
Figura 10- Modelo de estufa utilizada para o ensaio Teor de Umidade (ICAMO-MODELO 3).	26
Figura 11- Dessecador.	27
Figura 12- Balança (TECNAL).	27
Figura 13- Mufla (Fornos Magnu's).	28
Figura 14- Reator empregado no ensaio da Pirólise.	30
Figura 15- Autoclave utilizada no ensaio da Pirólise.	31
Figura 16- Desenho esquemático para o ensaio da Pirólise.	31
Figura 17- pHmetro.	33
Figura 18- Solventes utilizados no Teste de Solubilidade.	33
Figura 19- Resultados do Teste de Solubilidade.	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Comparação de oleaginosas cultivadas no Brasil.....	13
Tabela 2- Variantes do Processo de Pirólise.	20
Tabela 3- Principais propriedades dos bio-óleos.	22
Tabela 4- Dados para o início da análise imediata do lodo.....	34
Tabela 5- Dados para a Equação 1 e Teor Médio de Umidade.....	34
Tabela 6- Dados para a Equação 2 e Teor Médio de Material Volátil.....	35
Tabela 7- Dados para a Equação 3 e Teor Médio de Cinzas.	36
Tabela 8- Dados para a Equação 4 e Teor de Médio de Carbono Fixo.....	36
Tabela 9- Balanço de Massa e rendimento do carvão.....	37
Tabela 10- Rendimento do bio-óleo.....	37
Tabela 11- Dados para início da análise imediata do bio-óleo.....	38
Tabela 12- Dados para a Equação 1 e Teor Médio de Umidade.....	38
Tabela 13- Dados para a Equação 2 e Teor Médio de Material Volátil.....	39
Tabela 14- Dados para a Equação 3 e Teor de Cinzas.	39
Tabela 15- Dados para a Equação 4 e Teor de Médio de Carbono Fixo.....	40

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Acontecimentos históricos do biodiesel no Brasil.	12
Quadro 2- Oleaginosas de cada região do Brasil.	14
Quadro 3- Resultados das variantes do processo de Pirólise.	21
Quadro 4- Resultados do Teste de Solubilidade.	41

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

Art.- Artigo

ASTM- American Society for Testing and Materials (Sociedade Americana de Testes e Materiais)

BIOTINS- Companhia Produtora de Biodiesel do Tocantins

CNUMAD- Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento

CONAMA- Conselho Nacional do Meio Ambiente

DBO- Demanda Bioquímica de Oxigênio

EMBRAPA- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

INT- Instituto Nacional de Tecnologia

MATOPIBA- Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia

OCDE- Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico

PNPB- Programa Nacional de Uso e Produção de Biodiesel

SEAD- Secretaria Especial da Agricultura Familiar e Desenvolvimento Agrário

SEAGRO- Secretaria do Desenvolvimento da Agricultura e Pecuária

Unitins- Universidade Estadual do Tocantins

UTDs- Unidades Técnicas Demonstrativas com culturas Oleaginosas

LISTA DE SÍMBOLOS

CO₂- dióxido de carbono

CH₄- metano

C₂H₆OH- etanol

cP- centiPoise

cm- centímetros

°C- graus centígrados

3CH₃OH- metanol

g- gramas

H₂O- água

ha- hectare

kg- quilograma

kg/l- quilograma por litro

min- minuto

mL- mililitro

MJ/kg- megajoule por quilo

m³- metro cúbico

NO₂- dióxido de nitrogênio

OH- radical hidroxila

pH- potencial hidrogeniônico

seg- segundos

SO₂- dióxido de enxofre

XVIII- século dezoito

XX- século vinte

1 INTRODUÇÃO

A energia presente em todo mundo advém de fontes como petróleo, carvão e gás natural. Entretanto, há uma preocupação global em como substituir essas matrizes por fontes limpas e renováveis, de forma a reduzir tanto o alto custo como os impactos ambientais das emissões da queima de combustíveis fósseis convencionais (DAUD *et al.*, 2015).

O biodiesel é um biocombustível originado pelo processamento de óleos vegetais e/ou gorduras animais, onde possuem diversas substâncias em sua composição, como ésteres de ácidos graxos e ésteres de aquila de ácidos carboxílicos de cadeia longa, se tratando então de um excelente combustível, assim como o diesel, que é derivado do petróleo (SANTOS *et al.*, 2017).

Porém para utilização desse biodiesel é necessário um sistema de limpeza, gerando, por conseguinte, um dos principais efluentes industriais e que degrada o meio ambiente, sendo ele, o lodo, rico em óleo na sua composição, apresentando assim pouca solubilidade, o que prejudica o corpo hídrico, o solo e os seres vivos do ecossistema (HINRICHS; KLEINBACH, 2003). Com isso, algumas empresas da agroindústria têm dificuldade em escolher alternativas para um melhor tratamento desse lodo, o que as levam a buscar tecnologias viáveis para tais (FRASSON, 2011).

A partir daí, surge a problemática em encontrar um destino final para esse lodo provindo da agroindústria do biodiesel, de modo a favorecer todo o meio ambiente. Novos estudos surgem todos os dias em busca de como reutilizar os resíduos, como o óleo, por meio de processos termoquímico, bioquímico e mecânico, a fim de substituir o uso de recursos naturais não renováveis (ADÃO, 2006).

2 PROBLEMA DE PESQUISA

De que maneira a produção de bio-óleos combustíveis, provenientes de lodo industrial, podem substituir os combustíveis fósseis/ convencionais?

3 JUSTIFICATIVA

O Brasil, como sendo um país favorável para o cultivo de oleaginosas, possui inúmeras vantagens em gerar diversos produtos advindos, por exemplo, da soja. Dentre tais resultados, tem-se o biodiesel, e por ser tratar da mistura de transesterificação de um óleo e um álcool acaba gerando compostos contendo uma grande quantidade de impurezas, onde Lazzari (2018) ressalta que são substâncias com alta toxicidade e possuindo agentes patogênicos, de forma a prejudicar a natureza e a saúde humana.

Alguns processos químicos, físicos e térmicos podem ser utilizados para propor uma destinação final adequada desses resíduos provindos da agroindústria de oleaginosas, tal como a Pirólise, que se trata de um processo térmico ao qual possui melhores resultados quando se comparado à biomassa pura, podendo gerar vários proveitos a serem utilizados no cotidiano e em substituição de materiais não renováveis (PEDROZA *et al.*, 2011).

Sendo assim, os estudos sobre a utilização de biomassa para a obtenção de bio-óleo combustível vêm sendo bastante pesquisado e levado em conta, onde as previsões para o futuro são de perspectivas energéticas modernas, de modo à combustíveis líquidos e gasosos substituírem combustíveis sólidos (ADÃO, 2006).

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo obter bio-óleo através de Pirólise de lodo industrial, provindo da fabricação de biodiesel, visando a sua aplicação industrial.

4.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar o material *in natura*;
- Realizar a Pirólise de lodo industrial em reator de leito fixo;
- Determinar as características químicas do bio-óleo obtido no processo.

5 REVISÃO DE LITERATURA

5.1 Produção de Biodiesel

5.1.1 Biodiesel no mundo

A origem do biodiesel no mundo provém de todo um histórico, baseada em decorrência de outras fontes de energia:

A base da matriz energética mundial foi composta, em meados do século XVIII pelo carvão mineral, em seguida veio pelo petróleo e gás natural, onde estão até os dias de hoje. Estas fontes de energia são limitadas e provocam impactos ambientais, sendo assim é cada vez mais necessário descobrir outras formas alternativas de energias (PINHO; TEIXEIRA, 2015).

A ideia de usar o biodiesel para produção de combustível surgiu quando o mundo começou a encontrar e desenvolver recursos energéticos alternativos, influenciados pelo esgotamento de fontes de energia não renováveis. Um dos fatores preponderantes para tal substituição se deu pela alta dependência de combustíveis de petróleo ou combustíveis fósseis levando à incerteza no preço e na oferta (DAUD *et al.*, 2015).

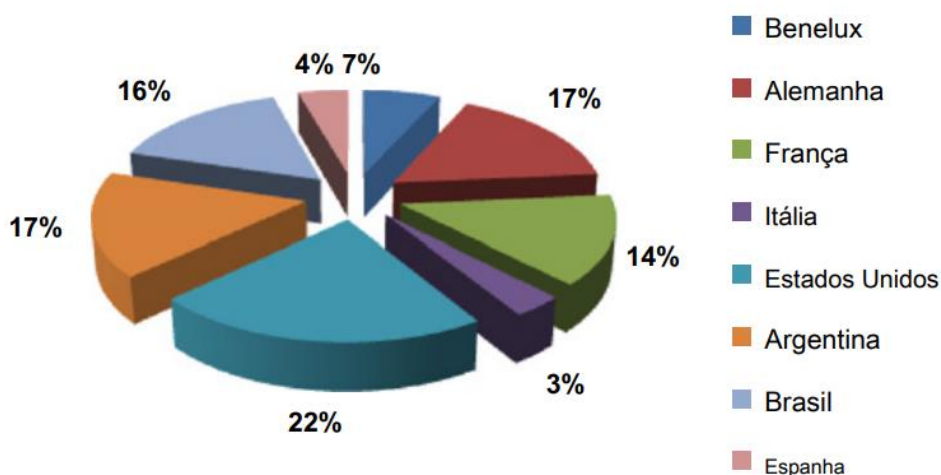
Na década de 1890, foi introduzido e investigado o biodiesel que seria à base de óleo vegetal, onde Rudolph Diesel inventou os motores a diesel para serem usados em máquinas no setor agrícola, a partir de então a revolução do biodiesel tornou-se crescente (DAUD *et al.*, 2015). Segundo Cordeiro *et al.* (2011), o biodiesel pode ser produzido pela reação de transesterificação de óleos vegetais e/ou gorduras animais com álcool.

Diferentes óleos de sementes têm sido usados em diversos países como matéria-prima para a produção de biodiesel de acordo com sua disponibilidade. O óleo de soja é frequentemente usado nos Estados Unidos, Brasil e Argentina, já o óleo de colza é comum a um bom número de países europeus, enquanto os óleos de palma e coco são usados na Malásia e na Indonésia para a produção de biodiesel (GHADGE; RAHEMAN, 2005).

A Figura 1, elaborada mediante dados da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE, 2011), retrata:

Os grandes produtores mundiais de biodiesel e enfatiza o maior produtor como sendo o Estados Unidos (3,7milhões de m³), seguido da Alemanha (2,8milhões de m³) e da Argentina (2,7milhões de m³), sendo o Brasil o quarto maior produtor mundial (2,6milhões de m³) em que sua posição se deve em grande parte aos investimentos feitos em pesquisa e produção de biodiesel por meio de um programa governamental (BERGMANN *et al.*, 2013).

Figura 1- Produção mundial de biodiesel.



Fonte: Bergmann *et al.*, retirado da OCDE (2011).

O biocombustível pode ser usado puro ou misturado com o óleo diesel em qualquer proporção, onde sua nomenclatura é dada por biodiesel BXX, sendo XX a porcentagem em volume do biodiesel à mistura, logo, o B2 possui uma concentração de 2% de biodiesel. A utilização do biodiesel no mercado de combustíveis tem ocorrido em quatro graus de concentração: puro(B100); misturas (B20–B30); aditivo (B5); aditivo de lubricidade (B2) (HINRICHS; KLEINBACH, 2003).

O biodiesel é um combustível diesel biodegradável, não tóxico, ambientalmente correto e com baixo teor de enxofre e recursos renováveis. Pode reduzir a quantidade de emissões de gases de efeito estufa e emite menos CO₂,

SO₂, entre outros, em comparação ao diesel convencional. A Figura 2 compara a produção de gases na queima entre o biodiesel e o diesel (ZAKARIA *et al.*, 2013).

Figura 2- Queima do biodiesel e diesel.



Fonte: Zakaria *et al.*, (2013).

Muito além de sanar dos problemas das crises de energia, o biodiesel renovável oferece soluções ilimitadas para as questões associadas ao esgotamento das reservas e emissões prejudiciais com os combustíveis fósseis. Para superar a crescente demanda de energia devido ao crescimento da população mundial, o surgimento do biodiesel e sua adoção global no setor de transporte trouxe um fornecimento confiável de combustível que pode ser usado em motores a diesel sem qualquer modificação (OGUNKUNLE; AHMED, 2019).

5.1.2 Biodiesel no Brasil

No âmbito nacional o biodiesel teve seus primeiros impulsos em 1920, pelo Instituto Nacional de Tecnologia (INT), onde a partir de então aumentaram-se os incentivos para maior diversificação energética (PINHO; TEIXEIRA, 2015). O Quadro 1 apresenta os principais marcos desses incentivos na história do país até 2014.

Quadro 1- Acontecimentos históricos do biodiesel no Brasil.

Ano	Acontecimentos históricos no país
1920	Primeiras experiências do INT
1930	Implantação de políticas para os biocombustíveis
1948	Incentivo do álcool no uso de motores à combustão
1970	Pesquisas sobre transformação de óleos vegetais em combustíveis
1975	Criação do Proálcool e do Pró-Óleo
1979	Substituição da gasolina por álcool hidratado
1983	Criação do Programa de Óleos Vegetais (OVEG)
1986	Finalização da contribuição do Proálcool
2003	Lançamento de veículos flex, ocasionando o aumento da produção assim como a venda de etanol hidratado
2004	Criação do Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB)
2005	Lei nº 11.097- Introdução do biodiesel na matriz energética brasileira
2008	Obrigatoriedade de uso do B2
2010	Obrigatoriedade de uso do B5
2014	Obrigatoriedade de uso do B6 e B7

Fonte: Adaptado de Pinho; Teixeira (2015).

O Brasil, por ser um país grande em extensão e com condições climáticas favoráveis, é considerado beneficiado para se ter a exploração da biomassa para fins alimentícios, químicos e energéticos. Em se tratando das oleaginosas, matérias-primas de excelente potencial para a produção de biodiesel, a tendência de se ter em grande escala é substancial, dependendo da região do país (FREITAS; PENTEADO, 2006).

A Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005 (Brasil, 2005), que dispõe sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira, em seu artigo 3º deixa evidente seus preceitos:

Estabelecer diretrizes para programas específicos, como os de uso do gás natural, do carvão, da energia termonuclear, dos biocombustíveis, da energia solar, da energia eólica e da energia proveniente de outras fontes alternativas (BRASIL, 2005).

Segundo Zuniga *et al.* (2014), com o incentivo à produção de biocombustíveis, criou-se o Programa Nacional de Uso e Produção de Biodiesel (PNPB) em 2004, com o intuito de ter uma maior presença de energias renováveis na matriz energética brasileira, buscando produzir biodiesel de maneira sustentável e de fácil produção.

O PNPB foi elaborado para que os pequenos agricultores familiares, assim como as grandes operações do agronegócio, sejam incentivados a produzir oleaginosas para a produção de biodiesel. Para aumentar a disponibilidade de óleo e melhor utilizar os recursos regionais estão sendo consideradas culturas alternativas de óleos vegetais a soja. Estes incluem dendê, noz-moscada, coco, babaçu, girassol, colza, mamona, amendoim e algodão, suas porcentagens estão representadas na Tabela 1 (BERGMANN *et al.*, 2013).

Tabela 1- Comparação de oleaginosas cultivadas no Brasil.

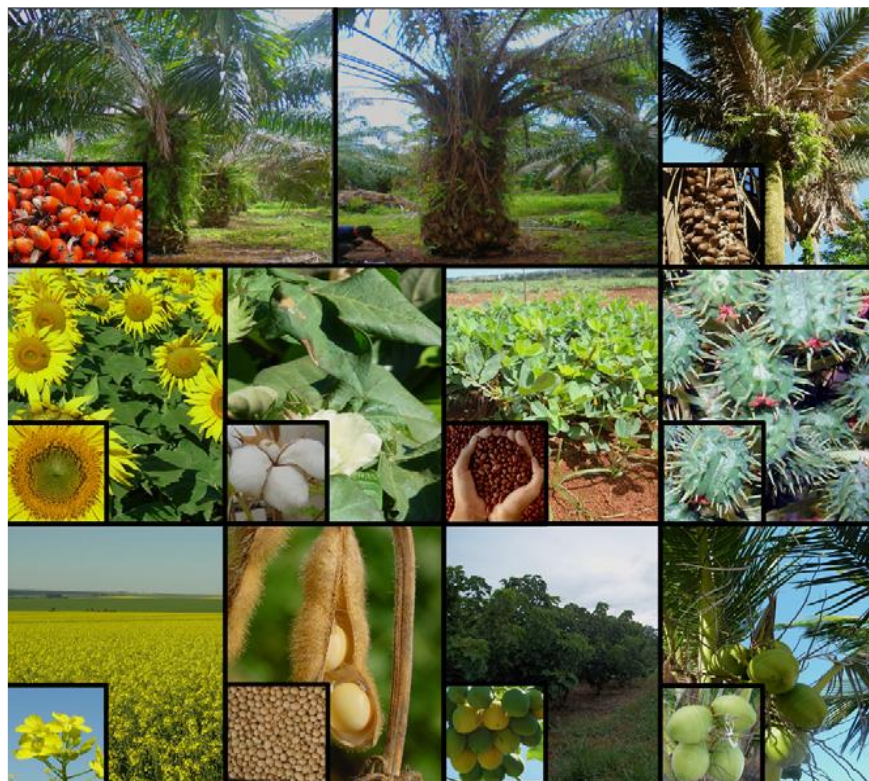
Colheita	Conteúdo de óleo (%)	Ciclo da planta	Rendimento do óleo (kg/ha)
Dendê (fruta)	22	Perene	2,000 a 8,000
Porca Física (caroço)	38	Perene	1,200-1,500
Coco (copra)	58-65	Perene	1,481
Babaçu (kernel)	60	Perene	120
Mamona (semente)	39,6-59,5	Anual	470-810n
Amendoim (grão)	40-6-	Anual	788
Girassol (semente)	40-47	Anual	774
Soja (grão)	18-21	Anual	560
Colza	34-40	Anual	570
Algodão (semente)	18-20	Anual	361

Observação: n= 810 kg/ha foi calculado considerando uma produtividade de 1,8 t/ha e um rendimento de óleo industrial de 45%

Fonte: Bergmann *et al.*, (2013).

A seguir (Figura 3), as oleaginosas candidatas para a produção de biodiesel no Brasil (BERGMANN *et al.*, 2013).

Figura 3- Na sequência os frutos/sementes e suas árvores: óleo de palma, babaçu, girassol, algodão, amendoim, mamona, colza, soja, jatropha e coco.



Fonte: Bergmann *et al.*, (2013).

No Quadro 2 estão elencadas as respectivas oleaginosas de cada região do país mediante Barros *et al.* (2006):

Quadro 2- Oleaginosas de cada região do Brasil.

Região	Oleaginosas
Norte	Soja, mamona e dendê
Nordeste	Soja, caroço de algodão e mamona
Centro-Oeste	Soja, caroço de algodão e girassol
Sudeste	Soja, girassol e amendoim
Sul	Soja e girassol

Fonte: Barros *et al.*, (2006).

Até 2012, o biodiesel de soja respondeu por mais de 85% da produção total de biodiesel no Brasil. O aumento do biodiesel decorre da política de promoção de energias renováveis e do seu uso eficiente. Isso fez com que o Brasil emergisse como o terceiro maior produtor de biodiesel depois dos Estados Unidos e da Alemanha (NAYLOR; HIGGINS, 2017).

A introdução e incentivo do país na produção de biodiesel, busca atingir alguns fatores, tais como substituir o consumo de fontes não renováveis; estimular a mistura entre o biodiesel com o diesel, de modo a variar a base energética; aumentar a produção de oleaginosas com o intuito de contribuir para geração de empregos para famílias de baixa renda e minimizar formação de gases poluentes lançados na atmosfera, associado com o acordo ao Protocolo de Kyoto (GOMES *et al.*, 2008).

Atualmente, atendendo a legislação, todo o diesel vendido no Brasil deve conter em sua composição cerca 12% de biodiesel, onde o objetivo é chegar em 2023 com cerca de 15% dessa mistura (EMBRAPA, 2020).

5.1.3 Biodiesel no Tocantins

O Tocantins, de acordo com Zuniga *et al.* (2014), é um dos estados que tem bastante observância para a produção de biodiesel, pela grande disponibilidade de áreas com solos favoráveis à agricultura, e contando com um custo baixo em termos de logísticas, onde pode se citar grandes vias de locomoção como a Ferrovia Norte-Sul e a Hidrovia Araguaia-Tocantins.

O Estado do Tocantins produz cerca 70% do biodiesel de toda a região Norte, entretanto, com a nova aliança entre estados, MATOPIBA (Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia), essa porcentagem tende a atingir valores ainda maiores e significantes. Dentre as oleaginosas disponíveis, a soja é maior responsável por tal fator, mas ainda assim outras culturas tendem a crescer também, tais como o dendê, o girassol e a macaúba (LIMA, 2015).

O Governo do Estado do Tocantins vem colaborando, juntamente com a Secretaria do Desenvolvimento da Agricultura e Pecuária (SEAGRO), a Secretaria Especial da Agricultura Familiar e Desenvolvimento Agrário (SEAD) e com a ajuda da Universidade Estadual do Tocantins (Unitins), de modo a incentivar a produção de biodiesel, criando Unidades Técnicas Demonstrativas com culturas Oleaginosas (UTDs) nos municípios de Porto Nacional, Santa Rosa do Tocantins e Brejinho de Nazaré. As oleaginosas cultivadas são: algodão, amendoim, gergelim, macaúba e soja, a Figura 4 mostra um exemplo de Unidade Demonstrativa dessa cultura (TENÓRIO, 2018).

Figura 4- Plantação de soja na agricultura familiar.

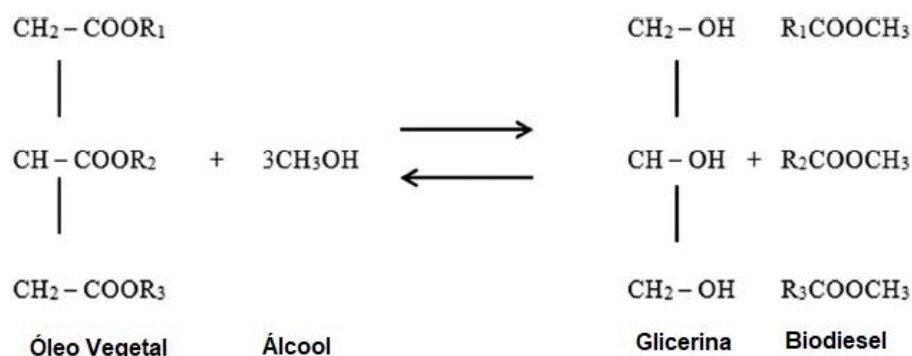


Fonte: SEAGRO (2018).

Atualmente, a produção de biodiesel no Estado é realizada por duas usinas, a GRANOL: Indústria, Comércio e Exportação S/A, situada em Porto Nacional, e a Companhia Produtora de Biodiesel do Tocantins – BIOTINS Energia, localizada em Paraíso do Tocantins (ZUNIGA *et al.*, 2014).

5.2 Produção do lodo

O processo mais comum para se obter biodiesel se dá pela transesterificação de óleos vegetais com álcool na presença de um catalisador (EVANGELISTA, 2011), onde sua reação está representada na Figura 5.

Figura 5- Reação para transesterificação.

Fonte: Adaptado de Ogunkunle; Ahmed (2019).

A transesterificação tem sido amplamente utilizada na redução da viscosidade do óleo vegetal e influenciado sua conversão em biodiesel. É um processo pelo qual os ésteres alquila são produzidos a partir de reações químicas entre o álcool e os óleos vegetais na presença de um catalisador. Os álcoois mais acessíveis e disponíveis nesta reação incluem metanol e etanol (BHUIYA *et al.*, 2016).

Ao fazer a limpeza do biodiesel, é gerado um efluente no processo contendo diversas impurezas quimicamente tóxicas, onde a partir dele pode-se retirar diversos resíduos (AFONSO *et al.*, 2017). Dentre esses sedimentos cabe citar substâncias não biodegradáveis, que denotam peculiaridades de acordo com seu modo de produção, podendo prejudicar o ecossistema onde estão sendo lançados (BATISTA, 2015).

A Resolução CONAMA Nº 430/2011, trata das condições cabíveis e necessárias para lançamento de efluentes no ambiente. Em sua Seção II, Art. 16 estão elencadas tais exigências indispensáveis para as propriedades desses resíduos, como o teor de pH, temperatura, quantidade de materiais sedimentáveis, óleos e graxas, Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), regime de lançamento da vazão e os valores máximos de substâncias inorgânicas.

Para Frasson (2011), os processos de tratamento dos efluentes de agroindústrias geram biomassas, lodo industrial, que podem ser ativa (pode regredir ao ecossistema em sua forma pura) ou inerte (é necessária uma forma de tratamento antes de retorná-lo ao meio). Seu tratamento é a parte mais difícil, visto

que deve se atentar a legislação ambiental e possuir materiais, meios e montante para tal processo.

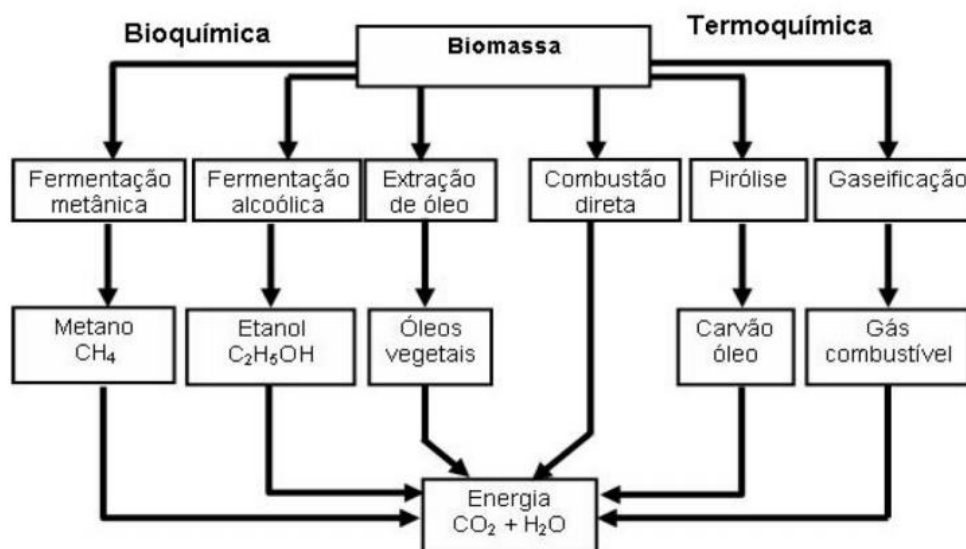
Lazzari (2018) afirma que o modo como descartar tal resíduo ainda é uma mazela a ser resolvida, ainda que no contexto da Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (CNUMAD), de junho de 1992, estejam elencadas algumas formas de reduzir a produção, reutilizar e adotar outras maneiras que não causem impactos ambientais.

Sendo assim, as alternativas para designar um tratamento eficaz do lodo são poucas e as convencionais possuem um alto valor agregado, como por exemplo o aterro industrial, ao qual gera o gás metano, um dos gases causadores do efeito estufa; tem-se também a incineração, porém de alto custo econômico (FRASSON, 2011). A partir daí é que surgem outros meios para utilização desse lodo, sendo como biomassa para a geração de uma energia limpa e independente de fontes não renováveis (LAZZARI, 2018).

5.3 Pirólise

Há uma grande preocupação ambiental sobre o uso de combustível fóssil e sua contribuição para o efeito estufa. Biomassas são alguns dos principais recursos de energia renovável disponíveis e fornecem uma única fonte renovável de líquidos, gases e sólidos. Elas podem ser usadas de diferentes formas para fornecer energia, tais como por processo de Gaseificação e Pirólise. A gaseificação fornece um gás combustível para combustão e aquecimento, já a Pirólise pode fornecer um líquido capaz de substituir o óleo combustível (BRIDGWATER *et al.*, 1999). A Figura 6 esquematiza as várias maneiras de se obter energia de biomassa por diversos processos.

Figura 6- Vias de conversão energética da biomassa.



Fonte: Rodrigues *et al.*, (2011).

A definição de Pirólise pode ser dada por se tratar de um processo de degradação térmica de uma substância orgânica, sem o contato com oxigênio, e na inexistência de um agente oxidante (PEDROZA, 2011).

Para Bridgwater *et al.* (1999) a biomassa é uma mistura de hemicelulose, celulose, lignina e pequenas quantidades de outros orgânicos que pirolisam ou degradam em taxas, por mecanismos e vias diferentes. Sendo assim, a taxa e a extensão da decomposição de cada um desses componentes dependem dos parâmetros do processo de temperatura do reator (Pirólise), taxa de aquecimento da biomassa e pressão, logo, recebe bastante influência da configuração do reator.

Os processos pirolíticos vêm sendo aplicados para o aproveitamento de resíduos sólidos urbanos e industriais na Europa e nos Estados Unidos, em escala piloto e industrial, desde a década de 70 do século XX, e mais recentemente no Brasil em escala laboratorial (VIEIRA, 2004).

A Pirólise, talvez mais do que qualquer outra tecnologia de conversão, recebeu considerável criatividade e inovação na concepção de sistemas de

reatores que fornecem os ingredientes essenciais de altas taxas de aquecimento, temperaturas moderadas e curtas, ainda segundo Bridgwater *et al.* (1999).

Dois tipos de Pirólises podem ser explanados: Pirólise convencional e Pirólise rápida. Os tipos já citados possuem variáveis que permitem fazer tal diferenciação, tais como produtos obtidos, temperatura e tempo de residência (VIEIRA, 2004), logo, essas variáveis permitem designar alguns tipos de Pirólises explanados na Tabela 2.

Tabela 2- Variantes do Processo de Pirólise.

Variantes do processo	Tempo de Residência	Temperatura do processo, °C	Principais produtos obtidos
Carbonização	Horas/dias	400 – 450	carvão vegetal
Convencional	5 – 30 min	até 600	bio-óleo, carvão e gás
Rápida	0,5 – 5 seg	500 – 550	bio-óleo
Flash-líquido	< 1 seg	< 650	bio-óleo
Flash-gás	< 1 seg	> 650	gás combustível
Ultra-rápida	< 0,5 seg	1000	produtos químicos e gás combustíveis
Vácuo	2 – 30 seg	400	bio-óleo
Metano-Pirólise	< 10 seg	>700	produtos químicos
Hidro-Pirólise	< 10 seg	<500	bio-óleo e produtos químicos

Fonte: Adaptado de Gómez (2002).

Para melhor contextualizar as influencias das variantes citadas anteriormente, Parandela (2012) expõe os efeitos causados por cada uma no Quadro 3.

Quadro 3- Resultados das variantes do processo de Pirólise.

Variantes	Resultados
Tempo de residência	Quanto maior o tempo maior geração de produtos mais estáveis
Temperatura	Maiores temperaturas contribuem para uma maior quebra de estrutura, produzindo uma maior quantidade de moléculas

Fonte: Adaptado de Parandela (2012).

Segundo Kimura (2009), os resultados de Pirólise de biomassas são: na parte sólida tem-se o carvão vegetal, sem a presença de algumas substâncias como chumbo, enxofre e mercúrio, o que o torna uma fonte limpa para ser usada em várias atividades (adubagem, matéria-prima para processos de gaseificação e etc); já na parte líquida surge o bio-óleo, onde suas propriedades variam de acordo com o tipo de biomassa utilizado, o modo de produção, entre outros.

5.4 Biocombustíveis

A ideia de usar biocombustíveis em motores a diesel surgiu quando o primeiro motor a diesel foi exibido por seu idealizador, Rudolf Diesel, na feira mundial de Paris em 1900. O óleo de amendoim foi usado como combustível e ele presumiu que óleos de safras locais poderiam ser usados para operar seus motores (CHALKLEY,1917).

Para se obter o produto desejado por meio da Pirólise, há a influência de alguns fatores, a exemplo, se o processo for lento e com baixa temperatura o resultado será um material mais sólido como o carvão, porém, se o processo for mais rápido e com elevadas temperaturas, isso implicará em algo mais líquido, como o bio-óleo (RODRIGUES *et al.*, 2011).

Esses óleos combustíveis são misturas de multicomponentes compostos por moléculas de tamanhos diferentes, derivadas principalmente de reações de despolimerização e fragmentação de três blocos de construção de biomassa: celulose, hemicelulose e lignina. Portanto, a composição elementar do bio-óleo se

assemelha à da biomassa, e não aos óleos do petróleo (BRIDGWATER, 2004). A Tabela 3 disponibiliza as principais propriedades dos bio-óleos.

Tabela 3- Principais propriedades dos bio-óleos.

Propriedades	Valores médios
Teor de umidade	15- 30%
Densidade	1,2 kg/l
Oxigênio	35- 60%
Carbono	50- 58%
Hidrogênio	5- 7%
pH	2,5
Poder calorífico superior	17 MJ/kg
Sólidos	1%
Viscosidade	10- 1000cp (40°C)

Fonte: Rodrigues *et al.*, (2011).

Os biocombustíveis são significativos devido à sua sustentabilidade, enquanto os combustíveis fósseis são um recurso limitado. Aqueles têm a capacidade de alimentar diferentes tipos de carros com motor a diesel, independentemente das condições atmosféricas. Melhorar a produção de biocombustíveis líquidos, como o biodiesel, levaria, portanto, a maior disponibilidade de uma fonte de energia mais limpa e mais barata em comparação com os combustíveis fósseis (OGUNKUNLE; AHMED, 2019).

Ainda que a utilização de bio-óleos seja uma forma sustentável, suas características possuem propriedades distintas, variando de acordo com o tipo de biomassa utilizada e como o processo de Pirólise foi conduzido (RODRIGUES *et al.*, 2011).

Não obstante, segundo Bridgwater (2004), o produto de bio-óleo líquido da Pirólise tem a vantagem considerável de ser um combustível armazenável e transportável, bem como uma fonte potencial de uma série de produtos químicos valiosos que oferecem a atração de um valor agregado muito maior do que os combustíveis tradicionais. A Figura 7 apresenta algumas formas de utilização do bio-óleo advindo de biomassas.

Figura 7- Formas de utilização do bio-óleo no cotidiano.

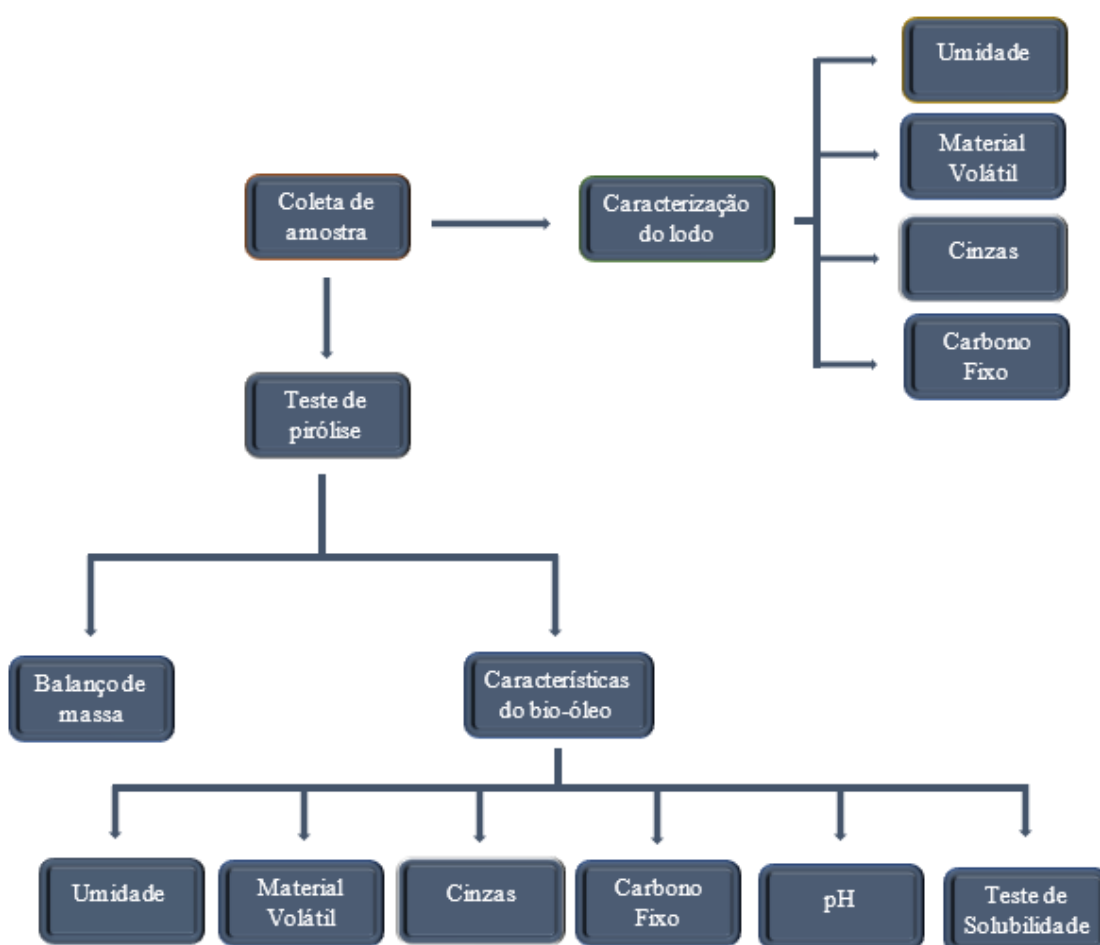


Fonte: Santos (2011).

6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este capítulo trata dos procedimentos metodológicos utilizados nesta pesquisa, abordando os materiais utilizados, preparação, caracterização e os procedimentos realizados para obter bio-óleo através de Pirólise de lodo industrial provindo da fabricação de biodiesel. O diagrama esquemático da metodologia proposta pode ser visto na Figura 8.

Figura 8- Desenho esquemático das atividades desenvolvidas.



Fonte: Autora (2021).

6.1 Coleta do lodo

O lodo (Figura 9) foi coletado na Indústria GRANOL localizada em Porto Nacional– TO, e armazenado em reservatórios plásticos apropriados e encaminhado até o laboratório de análises de águas, localizado no Instituto Federal do Tocantins, *Campus* Palmas, local esse em que aconteceu todos os ensaios dessa pesquisa.

Figura 9- Lodo coletado do efluente industrial.



Fonte: Autora (2021).

6.2 Caracterização do lodo

Os procedimentos citados nesse capítulo, determinaram o Teor de Umidade, o Teor de Cinzas, o Teor de Material Volátil e o Teor de Carbono Fixo, e foram realizados com a amostra *in natura*.

6.2.1 Teor de Umidade

A umidade do material foi encontrada de acordo com a norma ASTM D 3173-87. O objetivo da análise tratou em quantificar a massa perdida após submeter-se a uma temperatura controlada.

Para início do ensaio, foram adicionados cerca de 3 gramas do material a um cadinho de porcelana, de antemão seco e com peso constante pré-determinado. Em seguida a amostra passou para uma estufa (Figura 10) aquecida a uma temperatura de 110 °C por um período de 1 hora. Posteriormente, transferiu-se o cadinho para um dessecador (Figura 11) por 15 min, logo em seguida obteve-se o peso utilizando a balança da Figura 12. Este procedimento foi realizado em triplicata, portanto encontrou-se o Teor de Umidade final pela média aritmética simples entre os resultados. O ensaio citado foi determinado segundo a Equação 1, descrita a seguir:

$$\% \textit{umidade} = \frac{A-B}{A} \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

A = massa inicial da amostra, em gramas (aproximadamente 3g);

B = massa da amostra após o aquecimento, em gramas.

Figura 10- Modelo de estufa utilizada para o ensaio Teor de Umidade (ICAMO-MODELO 3).



Fonte: Autora (2021).

Figura 11- Dessecador.



Fonte: Autora (2021).

Figura 12- Balança (TECNAL).



Fonte: Autora (2021).

6.2.2 Teor de Material Volátil

A metodologia seguida para a determinação do Teor de Material Volátil do lodo foi mediante a proposição dada por Sanchez *et al.*, (2009), ao qual utilizou-se um cadinho com peso pré-determinado, contendo aproximadamente 3 gramas do material analisado. Feito isso, a amostra foi aquecida em mufla (Figura 13) com uma temperatura de 850 °C por um tempo de 7 min, sem presença de oxigênio, logo todo o conjunto esteve totalmente fechado. Após o procedimento, a amostra teve de ser resfriada à temperatura ambiente por 50 min, para obtenção da massa final. O ensaio também foi realizado em triplicata e a porcentagem de material volátil foi determinada por meio da Equação 2 descrita a seguir:

$$\% \text{ material volátil} = \frac{A-B}{c} \times 100 \quad (\text{Equação 2})$$

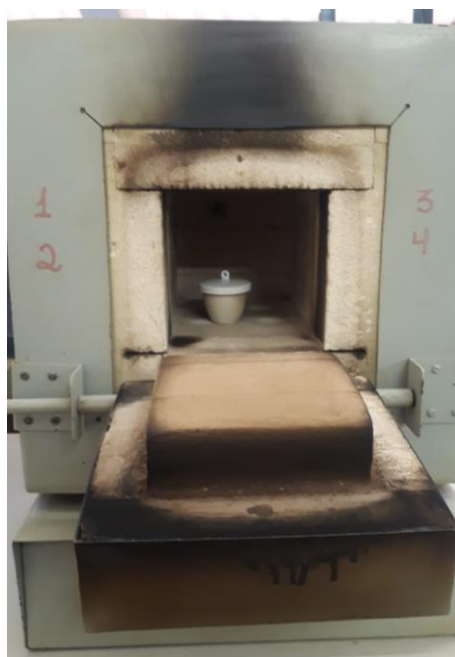
Onde:

A = massa inicial do conjunto, em gramas;

B = massa final do conjunto, em gramas;

C = massa da amostra inicial, em gramas (aproximadamente 3g).

Figura 13- Mufla (Fornos Magnu's).



Fonte: Autora (2021).

6.2.3 Teor de Cinzas

A cinza, segundo Cecchi (2003), trata de o resultado da matéria orgânica estar submetida à altas temperaturas, gerando assim um composto inorgânico, podendo gerar: CO₂, H₂O e NO₂.

O Teor de Cinzas foi dado, seguindo a metodologia sugerida por Cecchi (2003), onde inicialmente pesou-se um cadinho incinerado e com massa pré-determinada, em seguida foram adicionados aproximadamente 3 gramas de material. Na sequência, o conjunto foi colocado dentro da mufla, ao qual aumentou-se a temperatura progressivamente até chegar a 710°C, deixando a amostra por um período de 1 hora. Feito isso, retirou-se o cadinho com a amostra e o encaminhou para um dessecador para que esfriasse por 50 min e assim que chegou à temperatura ambiente foi possível pesá-lo. Assim como os demais, o ensaio também foi realizado em triplicata, onde a porcentagem de cinzas foi obtida de acordo com a Equação 3, descrita abaixo:

$$\% \text{ cinzas} = \frac{A-B}{C} \times 100 \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

A = massa do conjunto após a queima, em gramas;

B = massa do cadinho vazio, em gramas;

C = massa da amostra utilizada antes da queima, em gramas (aproximadamente 3g).

6.2.4 Teor de Carbono Fixo

Concluído todos os ensaios ditos acima, iniciou-se a análise da quantidade de Carbono Fixo contido na amostra, pois segundo Mckendry (2002), o Carbono Fixo representa todo o material restante após liberar os compostos voláteis. Para estipular seu valor, o cálculo utilizado foi o da Equação 4:

$$\% CF = 100 - (\% \text{ umidade} + \% \text{ cinzas} + \% \text{ material volátil}) \quad (\text{Equação 4})$$

6.3 Teste de Pirólise

O ensaio pirolítico foi realizado em um reator de leito fixo de aço inox, de 100 cm de comprimento e diâmetro externo de 10 cm. O reator (Figura 14) foi aquecido por forno bipartido reclinável (marca FLYEVER, modelo FE50RPN e linha 05/50), sendo operado em regime de batelada. O gás de arraste empregado na reação foi o vapor da água aquecido a 130 °C em autoclave (Figura 15). A temperatura do ensaio foi de 600°C e a taxa de aquecimento de 20°C/min. Cada experimento teve uma duração de 60 min. O diagrama esquemático para o ensaio da Pirólise está representado na Figura 16.

Figura 14- Reator empregado no ensaio da Pirólise.



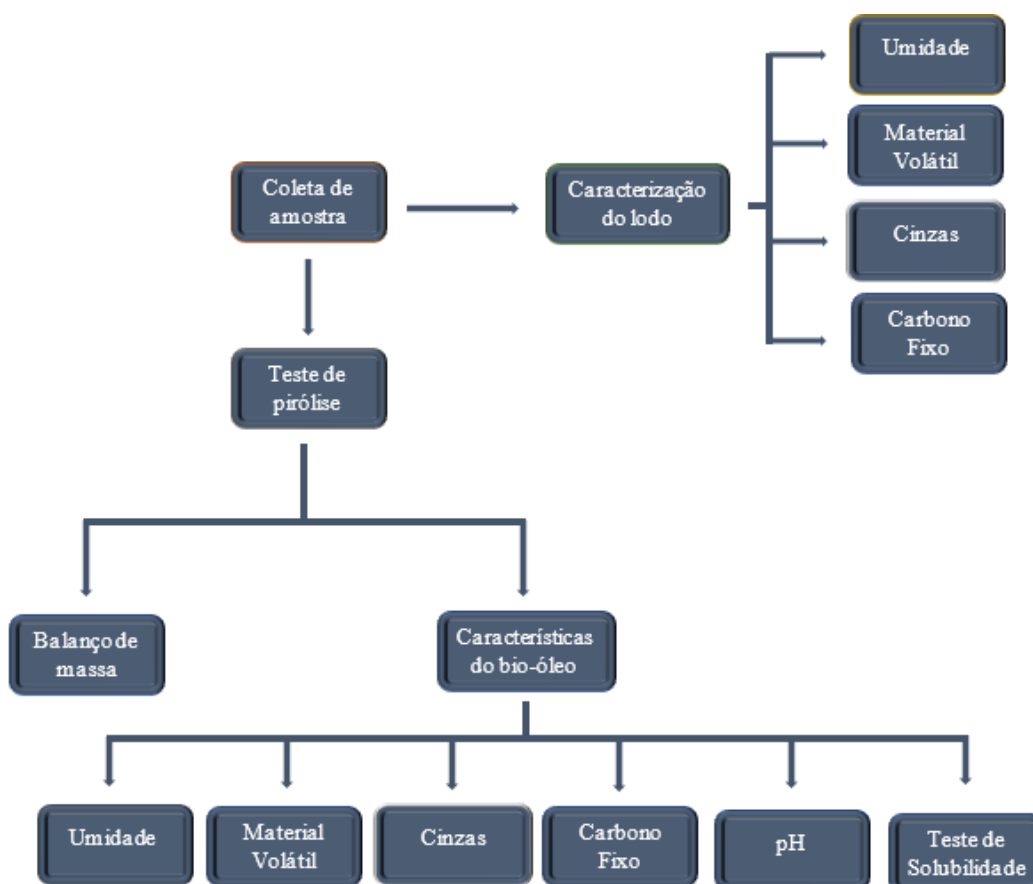
Fonte: Autora (2021).

Figura 15- Autoclave utilizada no ensaio da Pirólise.



Fonte: Autora (2021).

Figura 16- Desenho esquemático para o ensaio da Pirólise.



Fonte: Autora (2021).

6.3.1 Balanço de Massa

Mediante Himmelblau (2006), o balanço material retrata o desenvolvimento da lei de conservação das massas, onde se designa que a massa não pode ser nem criada nem destruída. Sendo assim, o Balanço de Massa foi dado de acordo com a massa que entrou e que saiu do reator, no caso, a parte sólida e líquida. Portanto, a equação utilizada para determinação do Balanço da parte sólida pode ser expressa pela Equação 5:

$$M = M1 - M2 \quad \text{(Equação 5)}$$

Onde:

M = massa de carvão, em gramas;

M1 = massa final, em gramas;

M2 = massa do recipiente tarado, em gramas.

Para fins de Balanço de Massa, após resfriamento da planta de Pirólise, todos os produtos foram pesados e armazenados. O bio-óleo foi coletado após o sistema de condensação de vapores e o carvão diretamente do reator.

6.3.2 Análise do Bio-óleo

6.3.2.1 Umidade, Material Volátil, Cinzas e Carbono Fixo

A metodologia empregada para se obter tais características do bio-óleo após a Pirólise, foram as mesmas utilizadas com a amostra *in natura*, já citadas anteriormente, na sessão 6.2 (itens 6.2.1, 6.2.2, 6.2.3, 6.2.4). Entretanto, o Teste de Umidade foi realizado em triplicata, já o Teste de Material Volátil e Cinzas utilizou duas amostras para encontrar seus valores médios.

6.3.2.2 pH

O pH da amostra obtida após o ensaio de Pirólise foi determinado usando um pHmetro digital, da marca TECNAL, Figura 17.

Figura 17- pHmetro.



Fonte: Autora (2021).

6.3.2.3 Teste de solubilidade

O Teste de Solubilidade foi o mesmo empregado por Oliveira (2020), onde foram utilizados alguns solventes, sendo eles: água, acetona, hexano, clorofórmio, diclorometano (Figura 18). No ensaio, um volume de amostra de 0,2 mL foi medido com auxílio de uma pipeta graduada e em seguida transferido para um tubo de ensaio, adicionando a este 3 mL de solvente. O material foi agitado e em seguida observado a solubilidade do material no solvente empregado.

Figura 18- Solventes utilizados no Teste de Solubilidade.



Fonte: Autora (2021).

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1 Caracterização do lodo

A Tabela 4 explana os primeiros dados coletados para início dos ensaios de análise imediata da biomassa.

Tabela 4- Dados para o início da análise imediata do lodo.

Cadinho	Peso cadinho vazio- P0 (g)	Amostra (g)
C1	34,541	3,474
C2	34,888	3,033
C3	33,271	3,065

Fonte: Autora (2021).

7.1.1 Teor de Umidade

Os dados utilizados para o cálculo de Teor de Umidade assim como seus resultados estão dispostos na Tabela 5.

Tabela 5- Dados para a Equação 1 e Teor Médio de Umidade.

Cadinho	Peso conjunto a 100°C P1(g)	A (g)	B (g)	% umidade	Teor Médio de Umidade (%)
C1	37,870	3,474	3,329	4,174	4,804
C2	37,747	3,033	2,859	5,737	
C3	36,198	3,065	2,927	4,502	

Fonte: Autora (2021).

O Teor de Umidade de uma biomassa é fator primordial para utilização como fonte de energia, pois contribui para a quantidade de energia gerada pela combustão (VALE *et al.*, 2011). Por se tratar de uma biomassa para fins combustíveis e atingindo um Teor de Umidade de aproximadamente 5% o resultado é bastante considerável, visto que segundo Jenkins *et al.* (1998), para a maioria desses compostos (biomassa) o limite que deve ser atingido é cerca de 65%, onde se ultrapassado esse valor o índice de energia não atenderia ao objetivo esperado,

a combustão. O valor encontrado aproxima-se dos encontrados por Kimura (2009), onde foram utilizadas outras biomassas com umidades chegando a 12%.

7.1.2 Teor de Material Volátil

Para o quantificar o Teor de Material Volátil tem -se a Tabela 6.

Tabela 6- Dados para a Equação 2 e Teor Médio de Material Volátil.

Cadinho	Peso cadinho a 100°C, P1=A (g)	Peso cadinho a 850°, P2=B (g)	C (g)	% material volátil	Teor Médio de Material Volátil (%)
C1	37,870	34,885	3,474	85,924	85,204
C2	37,747	35,190	3,033	84,306	
C3	36,198	33,581	3,065	85,383	

Fonte: Autora (2021).

A facilidade ou não da biomassa de entrar em combustão, submetida à altas temperaturas, representa tanto a quantidade de voláteis como a taxa de matéria orgânica presentes em sua cadeia (KLAUTAU, 2008). Sendo assim, a amostra contendo cerca de 85% de Material Volátil expressa a grande facilidade de entrar em combustão em um curto tempo, um valor alto se comparado ao maior valor obtido por Pedroza (2011), cerca de 57,79%. Logo, analisando tal fator e mediante Mânica (2015), se trata de uma biomassa fortemente favorável para a contribuição na geração de energia a partir da queima.

7.1.3 Teor de Cinzas

Os resultados obtidos do ensaio de Teor de Cinzas estão representados na Tabela 7.

Tabela 7- Dados para a Equação 3 e Teor Médio de Cinzas.

Cadinho	Peso cadinho a 710°C, P3=A (g)	Peso cadinho vazio P0=B (g)	C (g)	% Cinzas	Teor Médio de Cinzas (%)
C1	34,634	34,541	3,474	2,677	
C2	34,966	34,888	3,033	2,571	2,630
C3	33,352	33,271	3,065	2,642	

Fonte: Autora (2021).

Segundo Klautau (2008), a quantidade de Cinzas contida na biomassa se trata de um fator limitante, pois se presente um alto valor, influi em uma baixa geração de energia. O Teor de Cinza da biomassa com aproximadamente 3% é menor que o encontrado por Rodríguez (2006) onde variou entre $4,92 \pm 1,23$ %, e por Vale (2011) acima de 7,95%. Tais comparações realçam ainda mais a eficiência da amostra em estudo no intuito do processo de ignição, onde Mânica (2015) ressalta que as Cinzas que sobram após o ensaio são justamente os materiais que não foram atingidos pela queima, o que não contribui para o processo de combustão.

7.1.4 Teor de Carbono Fixo

Após obtidos os demais Teores, obteve-se o Teor Médio de Carbono Fixo, representado na Tabela 8.

Tabela 8- Dados para a Equação 4 e Teor de Médio de Carbono Fixo.

Teor Médio de Umidade (%)	Teor Médio de Material Volátil (%)	Teor Médio de Cinzas (%)	Teor Médio de Carbono Fixo (%)
4,804	85,204	2,630	7,361

Fonte: Autora (2021).

Analisando o Teor Médio de Carbono Fixo, com um valor de cerca de 7%, e os demais teores, seus valores se aproximam dos encontrados por Figueiredo (2011) utilizando como biomassa fibra de coco seco: 9,19%, 77,83%, 1,76% e

11,22% respectivamente (umidade, material volátil, cinzas e carbono fixo), o que se conclui que a biomassa em estudo possui uma ótima eficiência para combustão e possivelmente para a geração de energia, por ter uma grande facilidade de queima atingindo assim um menor tempo para a realização do processo (MÂNICA, 2015).

7.2 Teste de Pirólise

7.2.1 Balanço de Massa

Na Tabela 9 está explícito o rendimento do carvão e a Tabela 10 o rendimento do bio-óleo, obtidos após o ensaio de pirólise.

Tabela 9- Balanço de Massa e rendimento do carvão.

Recipiente vazio M2 (g)	Massa inicial conjunto (g)	Massa final conjunto M1 (g)	Massa Carvão M (g)	% Carvão
63,759	193,600	80,701	16,942	8,751

Fonte: Autora (2021).

Tabela 10- Rendimento do bio-óleo.

Massa bio-óleo (g)	% Bio-óleo
157,970	81,596

Fonte: Autora (2021).

Tendo como rendimento resultante do ensaio de Pirólise cerca de 9% de carvão e 82% de bio-óleo, se comparado aos valores obtidos por Kimura (2009), os teores de carvão (19,83% a 53,38%) foram superiores e os do bio-óleo (9,50% a 37,83%) foram menores com a mesma temperatura no ensaio, já os resultados de Teixeira *et al.* (2016), carvão com cerca de 62,3% e bio-óleo com aproximadamente 10,8%, foram divergentes pois a temperatura de pirólise foi menor que a utilizada no presente trabalho. Analisando tais valores, pela biomassa possuir uma enorme quantidade de material orgânico e estar exposta a uma temperatura de 600°C com

um gás de arraste de 130°C, isso refletiu a um valor baixo de carvão e um alto teor de bio-óleo.

7.2.2 Caracterização do bio-óleo

Na Tabela 11 estão dispostos os primeiros dados coletados para início dos ensaios de análise imediata do bio-óleo.

Tabela 11- Dados para início da análise imediata do bio-óleo.

Cadinho	Peso cadinho vazio- P0 (g)	Amostra (g)
C1	33,744	3,080
C2	33,633	3,683
C3	33,159	3,371

Fonte: Autora (2021).

7.2.2.1 Teor de Umidade

Os dados utilizados para o cálculo do Teor de Umidade, assim como seus resultados estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12- Dados para a Equação 1 e Teor Médio de Umidade.

Cadinho	Peso conjunto a 100°C P1(g)	A (g)	B (g)	% umidade	Teor Médio de Umidade (%)
C1	35,929	3,080	2,185	29,058	23,604
C2	36,448	3,683	2,815	23,568	
C3	35,917	3,371	2,758	18,185	

Fonte: Autora (2021).

É correto afirmar que o Teor de Umidade do bio-óleo pode variar entre 15% a 30%, isso tanto por conta do processo de pirólise ao qual foi submetido, assim como pelo seu modo de armazenamento (KIMURA, 2009). Portanto, o Teor de Umidade da amostra em estudo com cerca de 24% é considerado dentro do esperado para esse tipo de produto e se aproxima do valor encontrado por Torri (2013) de 25%.

7.2.2.2 Teor de Material Volátil

O Teor de Material Volátil foi obtido mediante dados registrados na Tabela 13.

Tabela 13- Dados para a Equação 2 e Teor Médio de Material Volátil.

Cadinho	Peso cadinho a 100°C, P1=A (g)	Peso cadinho a 850°, P2=B (g)	C (g)	% material volátil	Teor Médio de Material Volátil (%)
C2	36,448	33,632	3,683	76,459	79,167
C3	35,917	33,157	3,371	81,875	

Fonte: Autora (2021).

Tendo como Teor de Material Volátil cerca de 79%, esse valor está dentro dos encontrados por Rodríguez (2006) ao quais variaram entre 75,2% a 80%, logo, essa porcentagem representa a facilidade, segundo Mânica (2015), da amostra entrar em combustão em um curto período de tempo.

7.2.2.3 Teor de Cinzas

O Teor de Cinzas foi obtido mediante dados registrados na Tabela 14.

Tabela 14- Dados para a Equação 3 e Teor de Cinzas.

Cadinho	Peso cadinho a 710°C, P3=A (g)	Peso cadinho vazio P0=B (g)	C (g)	% Cinzas
C2	33,629	33,633	3,683	ND
C3	33,159	33,159	3,371	ND

Obs.: ND= não detectado.

Fonte: Autora (2021).

Mediante Kimura (2009), a presença de cinzas no bio-óleo deve ser menor que 0,1%, pois valores acima desse limite representam uma forte capacidade desse biocombustível de danificar motores a combustão causando corrosão, deterioração e erosão. Porém o valor encontrado por Torri (2013) de 0,2% foge ao estipulado, o

que na presente amostra de bio-óleo, por não terem sido encontrados valores para o Teor de Cinzas, pode-se considerar como 0%, atendendo à bibliografia quanto a sua propriedade esperada.

7.2.2.4 Teor de Carbono Fixo

Para o cálculo de Carbono Fixo do bio-óleo, foram utilizados apenas os Teores de Umidade e de Material Volátil, visto que não foi encontrado Teor de Cinzas na amostra, logo, os resultados estão dispostos na Tabela 15.

Tabela 15- Dados para a Equação 4 e Teor de Médio de Carbono Fixo.

Teor Médio de Umidade (%)	Teor Médio de Material Volátil (%)	Teor Médio de Carbono Fixo (%)
23,604	79,167	5,356

Fonte: Autora (2021).

O Teor Médio de Carbono Fixo com cerca de 5% foi bem menor que os encontrados por Rodríguez (2006), variando de 19,1% a 20,9%.

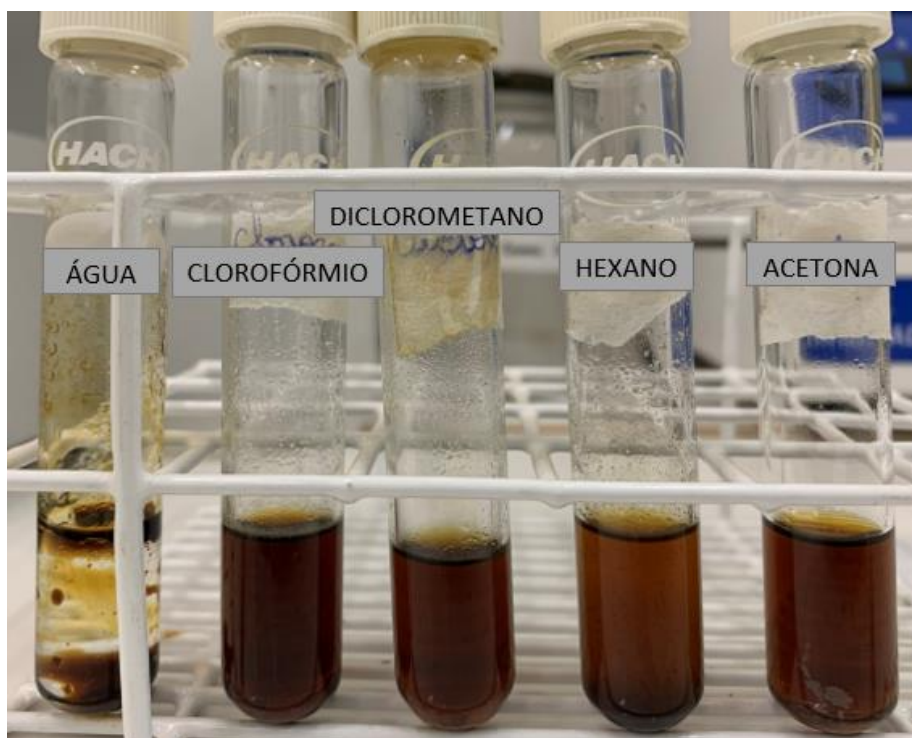
7.2.2.5 Teste de pH

O pH da amostra atingiu cerca de pH 4,75, sendo considerado um bio-óleo ácido, e próximo do alcançado por Figueiredo (2011), onde variou entre 3,12 - 3,80. Quando encontrado um bio-óleo com pH baixo, remete que em sua composição há a presença nitrogênio, compostos fenólicos e de ácidos carboxílicos, proporcionando-lhe uma certa instabilidade, de modo que se misturado com água, e submetidos a elevadas temperaturas, proporciona ao bio-óleo a capacidade de corrosão (RODRÍGUEZ, 2006; PEDROZA, 2011).

7.2.2.6 Teste de Solubilidade

A Figura 19 mostra as misturas utilizadas para o Teste de Solubilidade, e no Quadro 4 está diagnosticado as possíveis análises (visuais) feitas.

Figura 19- Resultados do Teste de Solubilidade.



Fonte: Autora (2020).

Quadro 4- Resultados do Teste de Solubilidade.

Tipo de Solvente	Resultado
Água	Mistura Heterogênea
Acetona	Mistura Homogênea- Total
Hexano	Mistura Homogênea- Parcial
Clorofórmio	Mistura Homogênea- Total
Diclorometano	Mistura Homogênea- Total

Fonte: Autora (2020).

A solubilidade da fração do bio-óleo com a acetona, clorofórmio e diclorometano foi considerada total, pois na Figura 19 percebe-se inteira homogeneização. Para o hexano, considera-se parcial, visto que no fundo do tubo de ensaio houve uma pequena concentração de resíduo. Porém, quando em contato com a água, o bio-óleo não se misturou, o que segundo Bridgwater (2004) os líquidos de pirólise podem tolerar um pouco a adição da água, mas há um limite antes que ocorra a separação de fases. Mediante dados de Pedroza (2011) e comparando com o pH obtido do bio-óleo em questão, se trata de um produto instável ao qual sua solubilidade depende de alguns fatores, tais como a forma e o período de armazenamento, de modo que, dependendo das reações que ocorram entre suas moléculas, processo de polimerização, tem-se as chances de mistura ou não entre a amostra e os solventes.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Analisando os percentuais encontrados da caracterização da amostra *in natura*, percebe-se que os valores do Teor de Umidade, Teor de Material Volátil, Teor de Cinzas e Carbono Fixo estão dentro do estipulado pelas bibliografias, visto que tais resultados influenciam na capacidade do lodo de entrar facilmente em combustão.

Submetendo a biomassa ao ensaio de Pirólise, foi notória a potencialidade de obtenção de bio-óleo por meio desse teste, visto que o Balanço de Massa realizado logo em seguida representou a pouca quantidade de sólidos encontrados em sua composição, o que o torna também eficiente para a geração de energia.

Atrelado ao anterior, os resultados encontrados da análise imediata, pH e solubilidade do bio-óleo demonstraram em suas propriedades que se trata de um líquido consideravelmente atrativo na utilização de indústrias em substituição de combustíveis fósseis.

Com base em todos os dados, é perceptível como a reutilização de uma biomassa que seria descartada na natureza, pode ser satisfatória, tanto pela forma de reutilização, no caso por meio de pirólise, que se trata de uma alternativa eficaz e de forma simples, quanto os benefícios ao meio ambiente, onde pode-se contribuir para a substituição de fontes não renováveis (combustíveis fósseis) e redução do acúmulo de resíduos gerados e de gases nocivos lançados na atmosfera.

Como sugestões para trabalhos futuros tem-se a comparação mediante análise estatística entre diferentes formas de transformar a biomassa em biocombustíveis, a fim de verificar se as vantagens aumentariam e se as propriedades seriam distintas. Outra sugestão, seria de analisar quantitativamente e qualitativamente os produtos advindos das transformações das biomassas.

REFERÊNCIAS

- ADÃO, D. C. **Avaliação físico-química de bio-óleo e biocombustível como aditivo para combustíveis fósseis**. Londrina: UEL, 2006. 67 p. Dissertação-Mestrado em Química dos Recursos Naturais da Universidade Estadual de Londrina, 2006.
- AFONSO, L. F. *et al.* **Avaliação de tecnologias de tratamento para reuso de efluente na indústria de biodiesel**. Congresso ABES, FENASAN 2017.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM, 1991. **Annual Book of ASTM Standards**. Sec 05.05. Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke. ASTM, D 3173-87, Philadelphia, PA, p.324-325.
- BARROS, G. S. DE C. *et al.* Custos de produção de biodiesel no Brasil. **Revista de Política Agrícola**, Ano XV – Nº 3 – jul./ago./set. 2006.
- BATISTA, L.F. (2015). **Lodos gerados nas estações de tratamento de esgotos no Distrito Federal: um estudo de sua aptidão para o condicionamento, utilização e disposição final**. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM-168/2015, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 197p. 2015.
- BERGMANN, J.C. *et al.* Biodiesel production in Brazil and alternative biomass feedstocks. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 21 (2013).
- BHUIYA, M. M. K. *et al.* Prospects of 2nd generation biodiesel as a sustainable fuel-Part: 1 selection of feedstocks, oil extraction techniques and conversion technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 55, p. 1109-1128, março, 2016.
- BRASIL. **Lei nº 11.097, de 13 de Janeiro de 2005**. Estabelece a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Brasília, DF, 2005.
- BRASIL. **Resolução CONAMA Nº 430, de 13 de maio de 2011**. Dispõe sobre condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Diário Oficial da União, Brasília, DF, n. 92, 16 mai. 2011, p. 89.
- BRIDGWATER, A. V. *et al.* **An overview of fast pyrolysis of biomass**. Organic Geochemistry, 30, p. 1479- 1493, 1999.

BRIDGWATER, A. V. **Biomass fast pyrolysis**. Thermal Science, Vol. 8, Nº 2, p. 21-49, 2004.

CECCHI, H. M. Fundamentos teóricos e práticos em análise dos alimentos. In: CECCHI, H. M. **Cinza e conteúdo mineral**. 2.ed. Campinas: UNICAMP, 2003. p 49-59.

CHALKLEY, A. **Diesel Engines for Land and Marine Work**. 2º ed. D. Van Nostrand Company, Nova York, 1917.

CORDEIRO, C. S. *et al.* Catalisadores heterogêneos para a produção de monoésteres graxos (biodiesel). **Química Nova**, vol. 34, n. 3, 477-486, janeiro de 2011.

DAUD, N. M. *et al.* Production of biodiesel and its wastewater treatment technologies: A review. **Process Safety and Environmental Protection**. Vol. 94, p. 487–508, 2015.

EMBRAPA. **Biodiesel Week: Embrapa Agroenergia é correalizadora da Biodiesel Week**. 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/54659441/embrapa-agroenergia-e-correalizadora-da-biodiesel-week>. Acesso em 16 jan. 2021.

EVANGELISTA, J. P. C. **Obtenção de biodiesel através da transesterificação do óleo de farelo de arroz utilizando KI/Al₂O₃**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós Graduação em Química, Natal, 2011.

FIGUEIREDO, A. L. **Pirólise termoquímica de pós de coco seco em um reator de cilindro rotativo para produção de bio-óleo**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

FRASSON, A.C. **Escolha de alternativa tecnológica para tratamento e destino final de lodo gerado no tratamento de efluentes líquidos de agroindústrias com base no método AHP**. 70 páginas. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina. Londrina, 2011.

FREITAS C.; PENTEADO, M. **Biodiesel: Energia do Futuro**. 1.^a ed. São Paulo: Letra Boreal, 2006.

GHADGE, S.V.; RAHEMAN, H. Biodiesel production from mahua (*Madhuca indica*) oil having high free fatty acids. **Biomass Bioenergy**, 2005.

GOMES, S. V. *et al.* Biodiesel: uma nova fonte em potencial produtivo e econômico. **XXVIII Encontro Nacional De Engenharia De Produção**. Rio de Janeiro, 2008.

GÓMEZ, E. O. **Estudo da pirólise rápida de capim elefante em leito fluidizado borbulhante mediante caracterização dos finos de carvão**. 2002. 369p. Tese de Doutorado, Unicamp, Campinas, 2002.

HIMMELBLAU, D. M. **Engenharia Química: Princípios e Cálculos**. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

HINRICHS, R. A.; KLEINBACH, M. **Energia e meio ambiente**. Tradução da 3.^a ed. Norte-americana. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003.

JENKINS, B.M. *et al.* Combustion Properties of Biomass. **Fuel Processing Thecnology**. Vol 54, p. 17-46, 1998.

KIMURA, L. M. **Uma contribuição à pirólise de biomassa: avaliação de alguns resíduos da agroindústria como fonte de energia alternativa**. Dissertação de Mestrado em Engenharias na Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

KLAUTAU, J. V. P. **Análise experimental de uma fornalha a lenha de fluxo cocorrente para secagem de grãos**. Curitiba: UFPR, 2008. 192 p. Dissertação-Pós- Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Universidade Federal do Paraná, 2008.

LAZZARI, J. **Análise do potencial energético de lodos obtidos no tratamento de esgoto**. Vitória: UFES, 2018. 83 p. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, 2018.

LIMA, T. **Tocantins apresenta novas fontes de produção de biodiesel durante a Agrotins Brasil 2015**. SEAGRO-TO, 2015. Disponível em: <https://seagro.to.gov.br/noticia/2015/5/9/tocantins-apresenta-novas-fontes-de-producao-de-biodiesel-durante-a-agrotins-brasil-2015/>. Acesso em: 12 out. 2020.

MÂNICA, A. N. **Determinação do poder calorífico do lodo de esgoto doméstico e industrial a partir da análise imediata**. Chapecó: UFFS, 2015. 15 p. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental, Universidade Federal da Fronteira Sul, 2015.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. **Bioresource Technology** 83, 37–46, jun. 2002.

NAYLOR, R.L.; HIGGINS, M.M. The political economy of biodiesel in an era of low oil prices. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017.

OCDE. Database-OECD-FAO Agricultural Outlook 2020–2029. OECD-FAO/Disponível em: https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=HIGH_AGLINK_2012#. Acesso em: 22 set. 2020.

OGUNKUNLE, O.; AHMED, N. A. A review of global current scenario of biodiesel adoption and combustion in vehicular diesel engines. **Energy Rev.** 5, 1560- 1579, 2019.

OLIVEIRA, M. C. C. R. de. **Degradação termoquímica de lodo residual proveniente da indústria de processamento da soja visando à produção de bio-óleo.** Dissertação de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental na Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2020.

PARADELA, F. M. R. **Estudo da pirólise de misturas de resíduos de plásticos, pneus e biomassa.** Dissertação de mestrado em Bioenergia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012.

PEDROZA, M. M. **Bio-óleo e Biogás da degradação termoquímica de lodo de esgoto doméstico em cilindro rotativo.** 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

PEDROZA, M. M. *et al.* Características químicas de lodos de esgotos produzidos no Brasil. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, Desarrollo y Práctica**, 4, p.1-13, 2011.

PINHO, L. D.; TEIXEIRA, F.L.C. Biodiesel no Brasil: uma análise da regulação e seus reflexos na diversificação das matérias-primas usadas no processo de produção. **Revista Brasileira de Administração Política**, Salvador-Bahia, vol. 8, n. 2, 141-161, outubro de 2015.

RODRIGUES, T. O. *et al.* **Bio-óleo: uma alternativa para valorização energética da biomassa.** Revista Brasileira de Energia, Vol. 17, Nº 2, 2º Sem. P. 39-56, 2011.

RODRÍGUEZ, R. A. V. Uso da Biomassa como Energia Limpa e Matéria Prima Renovável. **BIOWARE**, Campinas, fev. 2006.

SANCHEZ, M. E. *et al.* Effect of pyrolysis temperature on the composition of the oils obtained from sewage sludge. **Biomass and Bioenergy**, 33, p 933-940, 2009.

SANTOS, K. G. dos. **Aspectos fundamentais da pirólise de biomassa em leito de jorro: fluidodinâmica e cinética do processo.** Tese de Doutorado em Engenharias na Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

SANTOS, M. F. V. *et al.* Produção de biodiesel por transesterificação utilizando catalisador heterogêneo (KOH/Al₂O₃). **HOLOS**, ano 33, vol. 01, p. 14, fev. 2017.

TEIXEIRA, G. M. R. *et al.* Caracterização do bio-óleo proveniente da pirólise de lodo residual. **VII JICE- IFTO**. 2016.

TENÓRIO, E. **Tocantins incentiva produção de biodiesel para a agricultura familiar**. SEAGRO, Governo do Tocantins, fevereiro de 2018. Disponível em: <https://seagro.to.gov.br/noticia/2018/2/5/tocantins-incentiva-producao-de-biodiesel-para-a-agricultura-familiar/>. Acesso em: 06 out. 2020.

TORRI, I. D. V. **Caracterização de bio-óleos obtidos por pirólise da serragem de Eucalyptus sp. (hardwood) e Picea abies (softwood) utilizando as técnicas de cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas**. Dissertação de Mestrado em Ciências dos Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

VALE, A. T. do. *et al.* Potencial energético da biomassa e carvão vegetal do epicarpo e da torta de pinhão manso (*Jatropha curcas*). **CERNE**, Lavras, v. 17, n. 2, p. 267-273, abr./jun. 2011.

VIEIRA, G. E. G. **Fontes alternativas de energia – Processo aperfeiçoado de conversão térmica**. 2004. 181p. Tese de Doutorado, Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2004.

ZAKARIA, H. *et al.* **Overview effect of biodiesel storage on properties and characteristics**. Dezembro de 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/269351980_Overview_Effect_Of_Biodiesel_Storage_On_Properties_And_Characteristics. Acesso em: 24 set. 2020.

ZUNIGA, A. D. G. *et al.* Situação atual e perspectivas do biodiesel no estado do Tocantins. **Revista Interdisciplinar da Universidade Federal do Tocantins – V. 1**, n. 01, p. 263-278, jul/dez. 2014.