



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

SÉRGIO LUIS SOUSA MOREIRA

**PIRÓLISE CATALÍTICA DE LODO INDUSTRIAL PROVENIENTE DA
INDÚSTRIA DE BIODIESEL VISANDO PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS**

PALMAS - TOCANTINS

2022

SÉRGIO LUIS SOUSA MOREIRA

**PIRÓLISE CATALÍTICA DE LODO INDUSTRIAL PROVENIENTE DA
INDÚSTRIA DE BIODIESEL VISANDO PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS**

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

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza

PALMAS - TOCANTINS

2022

SÉRGIO LUIS SOUSA MOREIRA

**PIRÓLISE CATALÍTICA DE LODO INDUSTRIAL PROVENIENTE DA
INDÚSTRIA DE BIODIESEL VISANDO PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS**

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

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza

Aprovado em:

BANCA AVALIADORA



Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza

IFTO – Campus Palmas



Prof. Me. Ranyere do Nascimento Lôbo

UFT – Campus Palmas



Prof. Dr. Elaine da Cunha Silva Paz

UFT – Campus Palmas

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

M835p Moreira, Sérgio Luis Sousa
 PIRÓLISE CATALÍTICA DE LODO INDUSTRIAL PROVENIENTE
 DA INDÚSTRIA DE BIODIESEL VISANDO PRODUÇÃO DE
 BIOCOMBUSTÍVEIS / Sérgio Luis Sousa Moreira. – Palmas, TO, 2022.
 59 p. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) –
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, Campus
Palmas, Palmas, TO, 2022.

Orientador: Dr. Marcelo Mendes Pedroza

1. Pirólise. 2. conversão termoquímica. 3. lodo industrial. 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).

RESUMO

Nas últimas décadas, a cadeia produtiva da soja, tanto em escala nacional quanto mundial, vem apresentando um crescimento contínuo e acelerado. A oleaginosa, além de estar presente em diversos produtos alimentícios, também possui alto valor energético, podendo, inclusive, ser empregado na produção de biocombustíveis renováveis. Uma dessas formas de aplicação da soja no mercado energético é na produção do biodiesel, que pode ser obtido por meio da chamada reação de transesterificação, a qual produz um éster a partir da interação de um éster com álcool, outro éster ou um ácido carboxílico. Em seguida, o éster formado passa por um processo de lavagem, onde é gerado um lodo residual, cuja as propriedades são nocivas ao meio ambiente. O objetivo do presente trabalho é, justamente, realizar um estudo acerca das propriedades obtidas ao submeter o lodo residual, fruto da lavagem de biodiesel, ao processo de conversão termoquímica em reator de leito fixo, na presença do catalisador de óxido de cálcio (CaO), a fim de formar hidrocarbonetos (C_xH_y) renováveis que possam ser utilizados como biocombustíveis. Nesse panorama, a realização dessa pesquisa se faz importante diante da busca, cada vez mais incessante, de um meio energético que seja benéfico a vida humana e ao meio ambiente, visando o pleno desenvolvimento sustentável.

Palavras chaves: Pirólise, conversão termoquímica, lodo industrial, soja, bio-óleo.

ABSTRACT

In recent decades, the soybean production chain, both nationally and globally, has shown continuous and accelerated growth. The oilseed, in addition to being present in various food products, also has a high energy value, and can even be used in the production of renewable biofuels. One of these forms of application of soy in the energy market is in the production of biodiesel, which can be obtained through the so-called transesterification reaction, which produces an ester from the interaction of an ester with alcohol, another ester or a carboxylic acid. Then, the formed ester goes through a washing process, where a residual sludge is generated, whose properties are harmful to the environment. The objective of this work is precisely to carry out a study on the properties obtained when subjecting the residual sludge, resulting from the washing of biodiesel, to the thermochemical conversion process in a fixed bed reactor, in the presence of a calcium oxide (CaO) catalyst, in order to form renewable hydrocarbons (C_xH_y) that can be used as biofuels. In this scenario, carrying out this research becomes important in the face of the increasingly incessant search for an energetic means that is beneficial to human life and the environment, aiming at full sustainable development.

Keywords: Pyrolysis, thermochemical conversion, industrial sludge, soybean, bio-oil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fontes de biomassa	19
Figura 2 - Reação de transesterificação por catálise da produção de biodiesel	21
Figura 3 - Infraestrutura de produção de biodiesel (B100) - 2020	27
Figura 4 - Capacidade nominal e produção de biodiesel (B100), segundo grandes regiões (mil m ³ /ano) - 2020	28
Figura 5 - Perfil nacional de matérias-primas consumidas para produção de biodiesel	30
Figura 6 - Esquema Geral de um Reator Catalítico de Leito Fixo	34
Figura 7 – Fluxograma das atividades realizadas	35
Figura 8 – Lodo industrial empregado na pesquisa	36
Figura 9 – Reator de leito fixo utilizado no ensaio da pirólise	40
Figura 10 – Reator de leito fixo utilizado no ensaio da pirólise	40
Figura 11 – Autoclave utilizado no ensaio da pirólise.	41
Figura 12 – Sistema empregado para o resfriamento dos vapores	41
Figura 13 – Recipiente contendo o lodo industrial com o catalisador (CaO).	42
Figura 14 – Recipiente contendo o lodo industrial com o catalisador (CaO), apoiado sobre a balança está o recipiente “barca” utilizado na pirólise	43
Figura 15 – Barca com amostra de lodo industrial com o catalisador	43
Figura 16 – Barca com amostra de lodo industrial sendo inserida dentro do reator de leito fixo.	44
Figura 17 – Reator de leito fixo em funcionamento	44
Figura 18 – Frasco separador de fases, presença de espuma amarelada característica do bio-óleo produzido.	45
Figura 19 – Frasco separador de fases, término do processo de pirólise.	45
Figura 20 – Bio-óleo resultante do processo de pirólise	46
Figura 21 – pHmetro digital, análise do pH do bio-óleo produzido	47
Figura 22 – Tubo de ensaio com bio-óleo originado no processo de pirólise em contato com solventes polares e apolares.	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Recorte histórico sobre a contexto de desenvolvimento de biodiesel no Brasil	23
Tabela 2 – Capacidade instalada de biodiesel (B100), segundo unidades produtoras – 2019	24
Tabela 3 - Perfil nacional de matérias-primas consumidas para produção de biodiesel	29
Tabela 4 – Resultados da análise imediata, valores de entrada.....	48
Tabela 5 - Resultados das análises imediatas, média aritmética das triplicatas.	49
Tabela 6 – Teste de solubilidade aplicado ao bio-óleo obtido no processo de pirólise.	50
Tabela 7 – Valor do pH e densidade do bio-óleo produzido.....	51

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Teor de umidade	37
Equação 2 – Teor de Cinzas	38
Equação 3 – Teor de Material Volátil	38
Equação 4 – Teor de Carbono Fixo.....	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica.

ANP - Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.

OVEG - Programa Nacional de Energia de Óleos Vegetais.

Proálcool - Programa Brasileiro de Alcool).

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.

MEC – Ministério da Educação.

CNPE – Conselho Nacional de Política Energética.

INT - Instituto Nacional de Tecnologia.

PNPB - Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel.

CaO – Óxido de Cálcio.

BDO - óleo biodegradável.

DCO – Descarboxilação.

FFAs - Ácidos graxos livres.

K – Kelvin.

MME - Ministério de Minas e Energia.

t – Tempo (min).

°C – Graus Celsius.

T – Temperatura (°C).

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. JUSTIFICATIVA	14
3. OBJETIVOS	15
3.1. Objetivo Geral.....	16
3.2. Objetivo Específico	16
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
4.1. Cultura da soja no Brasil.....	16
4.2. Matérias primas da biomassa	18
4.3. Produção de biodiesel no cenário mundial.....	19
4.4. Produção de biodiesel no cenário nacional	22
4.5. Tratamento de efluentes do biodiesel	30
4.6. Tecnologias convencionais para produção de biocombustíveis.....	31
4.7. Processos de pirólise	31
4.8. Reatores de leito fixo.....	33
5. MATERIAIS E MÉTODOS	34
5.1. Procedimentos analíticos a serem empregados na caracterização química do lodo industrial bruto	36
5.1.1. Caracterização do lodo industrial bruto.....	36
5.1.2. Teor de Umidade.....	36
5.1.3. Teor de Cinzas	37
5.1.4. Teor de Material Volátil	38
5.2. Pirólise Catalítica.....	39
5.2.1. Metodologia aplicada no processo de pirólise.....	39
5.2.2. Procedimentos aplicados para Pirólise	42
5.3. Procedimentos analíticos empregados para caracterização do bio-óleo produzido	46
5.3.1. Densidade	46
5.3.2. Análise do pH.....	47
5.3.3. Teste de solubilidade.....	47
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	48
6.1. Caracterização química do lodo industrial	48
6.1.1. Análise imediata.....	48

6.2. Caracterização do bio-óleo originado do processo de pirólise catalítica do lodo industrial.....	50
6.2.1. Rendimento do bio-óleo produzido durante a pirólise do lodo residual.....	50
6.2.2. Teste de solubilidade.....	50
6.2.3. Análise de pH e densidade.....	51
7. CONCLUSÕES.....	51
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	52

1. INTRODUÇÃO

Após o epílogo da revolução industrial, a matriz energética mundial passou a ser baseada em fontes não renováveis, tendo como matéria-prima o petróleo. Tais considerações são importantes quando se objetiva falar sobre fontes energéticas renováveis, tendo em vista que é um grande desafio para a sociedade atual a geração e uso eficiente de matriz energética, sendo que a emissão de gases de efeito estufa proveniente da utilização de fontes não renováveis de energia pode provocar mudanças climáticas em escala global gerando grande impacto ambiental (PEDROZA, 2011).

Vale ressaltar que a crescente preocupação com o meio ambiente e a necessidade de diminuir a dependência por recursos energéticos fósseis tem despertado a busca por materiais renováveis que possam ser utilizados nas indústrias, dentre os quais se destacam os resíduos agrícolas/agroindustriais gerados por diversos tipos de culturas, onde destacamos a soja como matéria-prima base para geração de biocombustíveis (SCATOLINO *et al.*, 2017).

Dessa forma, é importante frisar que a busca por fontes de energéticas renováveis é de suma importância para satisfazer as preocupações com o meio ambiente em relação a utilização de fontes energéticas não renováveis (BRIDGWATER, 2011).

Contudo, essa procura por novas matrizes renováveis de energia que atendam a demanda da sociedade, juntamente com a conscientização ecológica e o inevitável esgotamento das reservas petrolíferas, torna o estudo da biomassa cada vez mais relevante, devido a sua natureza renovável, ampla disponibilidade e biodegradabilidade como matéria-prima na produção de biocombustível (CORREIA & VIEIRA, 2013)

Para a pesquisa em pauta, vale ressaltar que a biomassa compreende toda matéria orgânica vegetal produzida através da reação de fotossínteses, bem como: culturas, resíduos agrofloretais e a matéria orgânica contida em resíduos industriais. A energia desses resíduos tem origem nas transformações energéticas a partir da radiação solar. Desse modo, essa energia intrínseca pode ser liberada de forma direta através da queima por combustão ou processada gerando outras fontes energéticas mais adequadas como álcool e carvão vegetal (RIBEIRO, 2007).

O estudo da biomassa destaca-se no cenário brasileiro pelo seu enorme potencial de aproveitamento energético. As condições climáticas regionais favorecem a produção desse insumo satisfazendo consideravelmente os níveis de demanda. Esse é um dos principais fatores que tornam o uso biomassa promissor no que tange à produção de biocombustíveis. Desse modo, faz-se oportuno o desenvolvimento de tecnologias e processos aperfeiçoados de conversão térmica aplicados a esses materiais, visto que parte considerável do potencial dos biocombustíveis no Brasil não está sendo devidamente aproveitada do ponto de vista energético (RIBEIRO, 2007).

A crescente produção de bens e serviços tem resultado no aumento da quantidade de resíduos gerados pela indústria. Como resultado, o setor industrial está sendo pressionado a adotar políticas de gestão de resíduos para alcançar benefícios econômicos, ambientais, tecnológicos e sociais (CORREIA, 2013).

Dado o exposto, várias tecnologias vêm sendo desenvolvidas e empregadas como alternativas viáveis para o aproveitamento de lodo residual. Dentre essas alternativas, observam-se as seguintes: pirólise, oxidação úmida e o processo de gaseificação (PEDROZA, 2011).

O lodo residual, subproduto sólido do tratamento de esgoto e biomassa, tem sido apresentado como matéria prima principal potencial para geração de biocombustíveis a partir da aplicação de processo térmico, apresentando-se assim como alternativa economicamente e ambientalmente viável, além de possibilitar a obtenção de um produto de valor econômico, tornando um resíduo que inicialmente era descartado em matéria-prima. Logo, essa alternativa eliminaria dois problemas de forma simultânea: a disposição do lodo de esgoto das ETEs e de geração de energia (VIEIRA, 2000).

Desta maneira, nota-se que a literatura abrange o estudo de viabilidade do lodo de esgoto como matéria-prima potencial para obtenção de bio-óleo e biocombustíveis. No entanto, o diferencial da presente pesquisa é basicamente a origem do lodo de esgoto, que nesse caso é proveniente da indústria de biodiesel.

Isso porque o biodiesel é um recurso renovável e pouco agressivo para o meio ambiente, porém seu processo de produção deve ser otimizado. Antes de chegar a sua fase final, o

biodiesel precisa passar por uma etapa de purificação. Nesta etapa, ele passa por uma lavagem utilizando grandes quantidades de água, para retirar impurezas, tais como, excedente de catalisador, álcool, sabão, óleos, graxas e glicerol residual. Para isso, é utilizado, em média, um volume três vezes maior de água para cada litro de biodiesel produzido que, em função de suas características físico-químicas, não estão adequados para o lançamento nos corpos hídricos (BONI ET AL., 2012).

Logo, com o inevitável aumento na produção de biodiesel, a produção de resíduos proveniente das etapas de obtenção do biodiesel também aumentará e com isso a produção de lodo industrial. Embora a tendência seja a aplicação de novos métodos e tecnologias a fim de diminuir a produção desses resíduos, não se pode descartar o emprego de sistemas capazes de reaproveitar esse material, tendo em vista que seu descarte é um dos problemas mais complexos de frontados pela engenharia. Vale dizer que o lodo industrial possui características indesejáveis, como instabilidade biológica e possibilidade de transmissão de patógenos (PEDROZA, 2011).

De acordo com os estudos de Santos et al. (2015), a soja é considerada como um dos principais produtos agropecuários com liquidez no mercado brasileiro.

Também é necessário frisar que, em 2017, o Brasil ocupava a segunda posição no ranking mundial de produtores de soja, ficando atrás apenas dos EUA (CONAB, 2021). Diante disso, percebemos que a produção de soja no Brasil está crescendo em um ritmo acelerado e, consequentemente, os produtos que utilizam a soja como matéria-prima, sendo um deles o biodiesel.

A presente pesquisa tem por objetivo investigar a pirólise do lodo proveniente do processamento de soja em reator de leito fixo empregando o catalisador de óxido de cálcio (CaO), no intuito de obter um material que possa ser utilizado como biocombustível visando a aplicação industrial. O lodo utilizado tem origem no processo de geração de biodiesel e será retirado no sistema de tratamento de esgoto da indústria de processamento de soja GRANOL, localizada na cidade de Porto Nacional, no estado do Tocantins.

2. JUSTIFICATIVA

A gestão dos resíduos produzidos proveniente da geração de biodiesel nas indústrias de processamento de soja tem se tornado uma preocupação crescente, devido a sua complexibilidade e características distintas. Embora haja alguns avanços tecnológicos, a solução para os problemas desses resíduos se apresenta como um desafio à engenharia (OLIVEIRA, 2020).

Nota-se que quanto mais eficiente for o controle de qualidade de um processo industrial, maior será a quantidade de lodo gerado no final desse processo. A separação do lodo industrial nos sistemas de tratamento de efluentes é uma prática necessária e complexa, devido ao seu volume e elevada umidade, necessitando assim de uma atenção extra quanto ao seu armazenamento antes da disposição final. Logo, considerando a falta de áreas adequadas para o acondicionamento desses rejeitos industriais, tal processo se torna oneroso (VERAS E POVINELLI, 2014).

Dentre as tecnologias utilizadas para o aproveitamento da biomassa, a pirólise apresenta uma série de vantagens sobre as demais, pois este tipo de tratamento térmico tem como objetivo primordial a produção de produtos com maiores densidades energéticas e melhores propriedades do que os produzidos pela biomassa natural. Os principais produtos obtidos durante a pirólise de biomassa são o bio-óleo (líquido), o carvão (sólido) e a fração gasosa. Devido às suas propriedades energéticas, esses materiais podem ser usados de várias maneiras (PEDROZA, 2011).

A logística da degradação termoquímica de resíduos obtidos pelo processamento de soja, em especial o lodo industrial, ainda não foi completamente investigada em outros estudos. Este projeto visa divulgar dados experimentais que possam auxiliar no esclarecimento da função, bem como da dinâmica desta degradação. Cabe ressaltar que diversos estudos realizados com outros tipos de biomassa demonstram a viabilidade da proposta atual. Por fim, a pesquisa sobre o uso de um método termoquímico para degradar resíduos de soja para a produção de biocombustíveis se mostrou uma opção viável para reaproveitar e agregar valor aos resíduos, convertendo-os em matéria-prima de valor econômico e social para outros processos.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo Geral

- Efetuar a pirólise de lodo industrial, proveniente da indústria de biodiesel a partir do tratamento térmico do lodo residual da indústria da soja em reator de leito fixo, visando a produção de biocombustíveis para aplicação industrial.

3.2. Objetivo Específico

- Determinar as características químicas do lodo industrial utilizado no experimento;
- Realizar a pirolise do lodo industrial utilizando para isso o elemento químico, óxido de cálcio, como catalisador.
- Determinar as características químicas do bio-óleo produzido no processo.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Cultura da soja no Brasil

Em meados de 1960, dois fatores internos levaram o governo brasileiro a considerar a soja como um produto comercial, um desenvolvimento que mais tarde impactaria o cenário mundial da produção de soja. Na época, a principal cultura no sul do Brasil era o trigo, tendo a soja surgido como uma alternativa viável essa primeira cultura. Além disso, o governo brasileiro iniciou um esforço para aumentar a produção de suínos e aves, resultando no aumento da demanda por farinha de soja.

Consoante dados obtidos em plataformas governamentais, no ano de 1966, a produção comercial de soja tornou-se uma necessidade estratégica, com mais de 500 (quinhentas) mil toneladas produzidas no país. Já por volta de 1970, o preço da soja disparou no mercado global, alarmando ainda mais agricultores e o governo brasileiro. Em comparação com outros países produtores, o Brasil tem uma vantagem competitiva: o escoamento de safra brasileira ocorre na entressafra americana, quando os preços atingem os níveis mais altos. Desde então, o país vem

investindo em tecnologia para adaptar a cultura às condições brasileiras, processo liderado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2022).

O crescimento da soja na região centro-brasileira, que inclui os estados do Mato Grosso do Sul, Mato Grosso e Goiás, foi significativo nas décadas de 1970 e 1980. A região do cerrado possibilitou o aumento da área cultivada e na produção de uma variedade de culturas, incluindo soja, tomate, banana, cana-de-açúcar e milho. No entanto, entre estes, foi a soja que mais cresceu em termos de área cultivável (CÂMARA, 2015).

A soja é um dos produtos agrícolas mais importantes no contexto global e nacional. Em termos de área e volume de produção, é a cultura mais importante do Brasil. Além disso, a soja é amplamente distribuída devido às suas inúmeras aplicações em diversos setores e desempenha um papel vital na economia brasileira. A soja é utilizada na produção de proteína animal, e seu uso na nutrição humana vem crescendo, estabelecendo uma cadeia agroindustrial e servindo também como alternativa para uso na produção de biocombustíveis (CONAB, 2017).

A soja, que possui uma tecnologia agrícola bem desenvolvida e está plantada em quase 25 milhões de hectares em todo o país, é hoje a principal matéria-prima para a produção de biodiesel. É uma proposta arriscada do ponto de vista do equilíbrio energético, uso do solo e inclusão social, mas é a melhor do ponto de vista econômico e de disponibilidade, portanto, superando as demais opções de matérias-primas (LEITE E LEAL, 2007).

De acordo com Gazzoni (2018), ao longo da história do cultivo da soja no Brasil, assistimos a uma dupla pressão. A primeira veio do mercado internacional, que demandava maior produção a cada ano devido à alta demanda. A segunda decorre da necessidade de produzir com o menor dano ambiental possível. Além da utilização de tecnologias, que são sempre desenvolvidas com o objetivo de ter o menor impacto ambiental possível, algumas técnicas abordam especificamente essas preocupações. Por exemplo, o Sistema Integrado Lavoura, Pecuária e Floresta (ILPF) reforça esse cuidado, assim como a intensificação agrícola, com a sequência de duas ou três safras de grãos (por exemplo, soja, milho, algodão ou feijão), ou mesmo uma pasta que ocupa o linguado na entressafra.

A forte demanda mundial por proteína animal, presente desde o período pós-guerra e intensificada na década de 1970, auxiliou na expansão da cultura da soja no Brasil, que, além

de propiciar a entrada do país nesse complexo mercado internacional, alterou o sistema de produção agrícola de oleaginosas do país (FREITAS ET AL., 2000).

O sistema de produção de óleos vegetais comestíveis é dividido em duas etapas, sendo elas: processamento ou esmagamento e refino. O primeiro está diretamente relacionado ao setor agrícola, enquanto o segundo utiliza o subproduto do esmagamento (petróleo) como matéria-prima primária para o processo que resulta na produção de óleo refinado (FREITAS ET AL., 2000).

De acordo com levantamento realizado em junho de 2021, pela UDSA, a produção de soja no mundo é de 362,947 milhões de toneladas, sendo 127,842 milhões de hectares de área plantada. No Brasil, a produção de soja em maio do mesmo ano, segundo levantamento feito pela CONAB, foi de 135,409 milhões de toneladas, sendo 38,502 milhões de hectares de área plantada, a produtividade ficou em 3.517 kg/ha. O consumo interno (processamento) de acordo com ABIOVE, em 2020, foi de 46,845 milhões de toneladas (EMBRAPA, 2022).

4.2. Matérias primas da biomassa

A biomassa surge como alternativa de produção de energia limpa, dado que a matéria orgânica produzida pela natureza não é extinta, é considerada uma fonte renovável de energia. O uso direto da Biomassa através da combustão em fornos e caldeiras apresenta vantagens significativas, assim como a redução dos impactos socioambientais. Como desvantagem, seu uso tem uma eficiência menor, razão pela qual os pesquisadores vêm estudando o avanço das tecnologias de comunicação.

Segundo a ANEEL (2002), a biomassa é qualquer material orgânico, seja de origem animal ou vegetal, que possa ser utilizado na produção de energia (MORELLO ET AL., 2020).

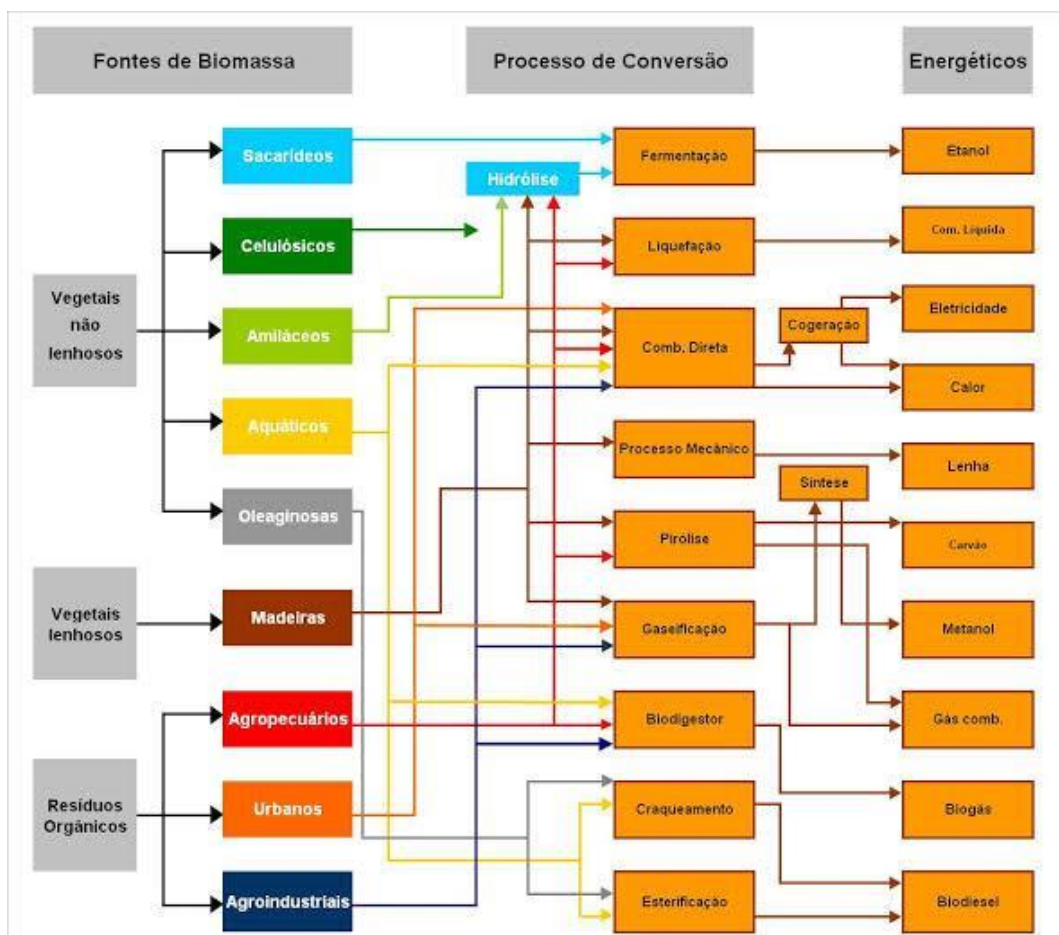
Cortez et al. (2008) define as fontes de biomassa em três categorias:

A biomassa pode ser obtida de vegetais não-lenhosos, de vegetais lenhosos, como é o caso da madeira e seus resíduos, e também de resíduos orgânicos, nos quais encontramos os resíduos agrícolas,

urbanos e industriais. Assim como também se pode obter biomassa dos biofluidos, como os óleos vegetais (por exemplo, mamona e soja).

A Figura 1 descreve um esquema das fontes de biomassa.

Figura 1 - Fontes de biomassa



Fonte: Balanço energético nacional – BEN., Brasília: MME, 1982. (Adaptado por CENBIO).

4.3. Produção de biodiesel no cenário mundial

O biodiesel é um combustível renovável alternativo para motores a ciclo diesel constituído por monoésteres de alquila de ácidos graxos de óleos vegetais ou gordura animal (CANAKCI E GERPEN, 2001). Grande parte do biodiesel que é produzido no mundo, atualmente, deriva do óleo de soja, sendo utilizado metanol e um catalisador alcalino, no entanto todos os óleos vegetais correspondentes nesta categoria de óleos fixos ou triglicerídeos podem ser utilizados para se obter biodiesel. No Brasil, pode-se utilizar os tanto os óleos comestíveis,

como os obtidos a partir da soja, girassol, amendoim, algodão e dendê, quanto os não comestíveis, como os obtidos a partir do pinhão-manso e da mamona. Também pode ser utilizado às gorduras animais (sebo) e os óleos reciclados de fritura. (D'ARCE E VIEIRA, 2007).

Conforme explica Goldemberg (2002), em 1975, o programa Proálcool (Programa Brasileiro de Álcool) foi criado com o objetivo de reduzir a importação de combustíveis fósseis, como o petróleo, por meio da produção de etanol a partir da cana-de-açúcar. A iniciativa demonstrou aspectos positivos, tanto ambientais quanto econômicos.

Por meio desse programa, o governo incentivou a indústria definindo um mandado para a adição de etanol à gasolina. As medidas resultaram em aumento de investimentos, ampliação da área plantada de cana-de-açúcar e instalação de novas unidades produtoras. Após o segundo desastre do xisto betuminoso em 1979, surgiram os veículos movidos exclusivamente a etanol hidratado. No início da década de 1980, a grande maioria dos carros vendidos no Brasil eram movidos a álcool. No entanto, as condições do mercado de petróleo e açúcar começaram a desestabilizar o Programa nesse período. A queda do preço do petróleo e a elevação do preço do açúcar no mercado global resultaram na queda do preço do etanol no mercado interno. Esses fatores, aliados à eliminação dos subsídios à produção de álcool, levaram à extinção do programa Proálcool (VIDAL, 2019).

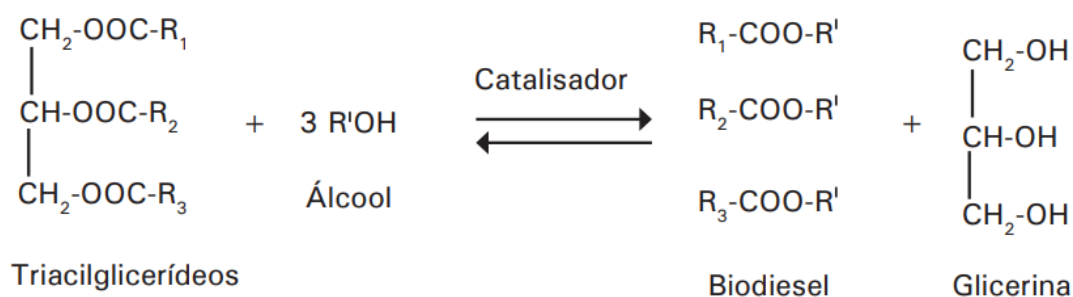
Os óleos vegetais são produtos de origem natural constituídos da mistura de ésteres derivados do glicerol. Sua aplicação como combustível de motores a ciclo diesel ainda é limitada, devido sua alta viscosidade, baixa volatilidade e seu caráter poliinsaturado, que podem acarretar em uma série de problemas nos motores bem como numa combustão incompleta. Na tentativa de reduzir sua viscosidade, os óleos vegetais passam por processos de diluição, microemulsão com metanol e etanol, craqueamento catalítico e reação de transesterificação com etanol ou metanol. O processo de transesterificação tem se apresentado bastante promissor, pois trata-se de um processo relativamente simples que promove a obtenção de biodiesel, cujas características são similares às do óleo diesel utilizado como combustível em motores a ciclo diesel (D'ARCE E VIEIRA, 2007).

O biodiesel pode ser definido como mono-álquil éster de ácidos graxos derivados de fontes renováveis (CANAKCI E GERPEN, 2001). Consiste em uma combinação de ésteres de

ácidos graxos decorrentes da reação de transesterificação de materiais graxos com um álcool de cadeia curta, sendo o metanol e etanol os álcoois mais utilizados. Esse processo de transesterificação de óleos ou gorduras promove a quebra dos triacilgliceróis, conhecido também como triglicerídeo, liberação dos ácidos graxos da estrutura glicerídica e a sua reação com metanol ou etanol, formando monoésteres de ácidos graxos, com viscosidade bastante reduzida quando comparados com os triglicerídeos ou com os ácidos graxos livres. No primeiro caso, ocorre a troca de três moléculas de metanol com uma de glicerol, sem formação de água (D'ARCE E VIEIRA, 2007).

A Figura 2 representa o processo de transesterificação por catálise da produção de biodiesel. Este processo pode ocorrer com o uso de catalisadores ácidos, alcalinos, enzimáticos ou sem catalisador (processo supercrítico), sendo utilizado metanol ou etanol para reagir com óleo (EMBRAPA, 2011).

Figura 2 - Reação de transesterificação por catálise da produção de biodiesel



Fonte: Embrapa, 2011

O procedimento comercialmente utilizado é a transesterificação envolvendo o uso de catalisadores alcalinos e metanol. A rota etílica tem sido apontada como potencial fonte de etanol no Brasil devido ao seu longo histórico de produção de etanol e sua natureza renovável, além dos benefícios ambientais derivados da conversão metanol-etanol. O processo por via etílica apresenta algumas desvantagens técnicas em comparação ao processo pela via metílica, como a taxa de reação mais lenta e com menor rendimento (EMBRAPA, 2011).

A taxa de conversão do óleo neutro de soja em ésteres etílicos depende do modo que a reação de transesterificação é realizada, sendo influenciado por vários fatores que incluem o tipo de catalisador (alcalino ou ácido), a razão molar álcool/óleo vegetal, temperatura, pureza

dos reagentes e o teor de ácidos graxos livres bem como das condições do processo (FERRARI ET AL 2005).

De modo geral, os biocombustíveis são considerados os combustíveis derivados de biomassa de origem renovável podendo substituir parcial ou totalmente os combustíveis de origem fóssil. Logo, o biodiesel é um tipo de biocombustível.

Devido a utilização internacional do biodiesel, fez-se necessário a adoção de uma nomenclatura única, BXX, para identificar a concentração de biodiesel na mistura, onde o B representa a tipagem do óleo diesel, e o XX representa a percentagem em volume do biodiesel utilizado na mistura (diesel/biodiesel). Como resultado, a utilização de uma mistura de biodiesel em concentrações de 2%, 5% e 100% no diesel comum, representa, respectivamente: B2, B5 e B100 (PINHO E TEIXEIRA, 2015).

No contexto global de produção e uso de biocombustíveis, o Brasil se destaca, principalmente, em relação ao etanol produzido a partir da cana-de-açúcar e ao biodiesel derivado de óleos vegetais ou gorduras animais. Deve-se frisar que o Brasil, juntamente com a União Europeia e os Estados Unidos, são os mercados mais importantes do mundo na produção de biocombustíveis. Além desses países, China, Argentina e Indonésia são mercados-chave para etanol e biodiesel, respectivamente (VIDAL, 2019).

4.4. Produção de biodiesel no cenário nacional

O biodiesel tem sua primeira aparição em meados de 1895, quando dois grandes inovadores, Rudolf Diesel e Henry Ford, descobriram nos óleos vegetais uma oportunidade de obter uma matéria prima de cunho renovável para a geração de combustíveis. Os pesquisadores analisaram uma variedade de combustíveis que poderiam ser usados em motores, incluindo o álcool produzido a partir de biomassa. Independentemente de terem aspirações para o desenvolvimento de combustíveis, o rápido avanço da indústria do petróleo, fez com que suas aspirações fossem adiadas (MEC, 2006).

Motivado pela alta do preço do petróleo, o governo brasileiro decidiu implantar o Programa de Óleos Vegetais (Projeto OVEG) em 1983, com o objetivo de avaliar o uso do biodiesel na forma pura e em vários níveis de mistura com combustível mineral. Esta iniciativa

foi liderada pelo Ministério da Indústria e Comércio (atual Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio) (ABREU ET AL., 2006).

O desenvolvimento de substitutos do diesel foi tentado com grande entusiasmo no início do Proálcool como forma de reduzir ainda mais o consumo de petróleo, mantendo um perfil de produção compatível com a capacidade das refinarias do país. O procedimento falhou por vários motivos, o alto custo do esmagamento das oleaginosas e da produção em si, bem como a estabilização do preço do barril de petróleo, fizeram com que o projeto original desacelerasse. Como resultado, a substituição parcial da gasolina pelo etanol provocou um desequilíbrio no perfil do refino do petróleo, o que repercutiu na qualidade do diesel, sendo necessária a importação de cerca de 20% do diesel consumido e a exportação de parte da gasolina produzida. O governo brasileiro voltou a despertar interesse pelo biodiesel quando a produção e o uso do biodiesel cresceram na Europa. Também foi visto como uma forma de fortalecer a agricultura familiar e, conseqüentemente, melhorar a inclusão social, um grave problema no Brasil (LEITE E LEAL, 2007).

A mistura do biodiesel com diesel fóssil começou em 2004 como um experimento, e entre 2005 e 2007, com teor de 2%, a comercialização tornou-se voluntária. A obrigatoriedade decorre do artigo 2º da Lei nº 11.097/2005, que determinou o uso do biodiesel na matriz energética brasileira. A mistura legalmente obrigatória de 2% (B2) entrou em vigor em janeiro de 2008 em todo o território nacional. Com o crescimento do mercado brasileiro, o CNPE aumentou gradativamente esse percentual até atingir o atual patamar de 12% (ANP, 2020).

Experimentos pioneiros com combustíveis renováveis vêm sendo realizados no Brasil desde a década de 1920, segundo o Instituto Nacional de Tecnologia (INT). A Tabela 1 apresenta um breve resumo dos principais eventos que moldaram a evolução dos biocombustíveis no Brasil.

Tabela 1 - Recorte histórico sobre a contexto de desenvolvimento de biodiesel no Brasil

Período	Marco Histórico
1975	Criação do Proálcool.
1979	Produção de álcool hidratado, em substituição à gasolina.

1983	Lançamento do Programa de Óleos Vegetais (OVEG).
2003	Utilização facultativa de biodiesel.
2005	Criação do Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB).
2008	Início da obrigatoriedade de uso do B2 e B3.
2009	Início da obrigatoriedade de uso do B4.
2010	Início da obrigatoriedade de uso do B5.
2014	Início da obrigatoriedade de uso do B6 e B7.
2017	Início da obrigatoriedade de uso do B8.
2018	Início da obrigatoriedade de uso do B10.
2019	Início da obrigatoriedade de uso do B11.
2020	Início da obrigatoriedade de uso do B12.

Fonte: Adaptado de acordo com a literatura empregada na pesquisa.

A especificação do biodiesel vem sendo constantemente atualizada ao longo dos anos, contribuindo para sua harmonização com as normas internacionais e alinhamento de sua qualidade com as condições de mercado, garantindo maior segurança e previsibilidade aos agentes econômicos. Com isso, o biodiesel já é uma realidade no Brasil, garantindo ao país uma posição única no mundo. Etanol e biodiesel, quando combinados, fortalecem o papel dos biocombustíveis na matriz energética nacional e a imagem do Brasil como um país que valoriza uma variedade de fontes energéticas (ANP, 2020).

A Tabela 2 mostra a capacidade instalada de biodiesel (B100) especificado conforme Resolução ANP nº 45/2014, de acordo com as unidades produtoras no ano de 2019.

Tabela 2 – Capacidade instalada de biodiesel (B100), segundo unidades produtoras – 2019

Unidade produtora	Município / UF	Capacidade instalada
		m ³ /dia
Total		28.391,6

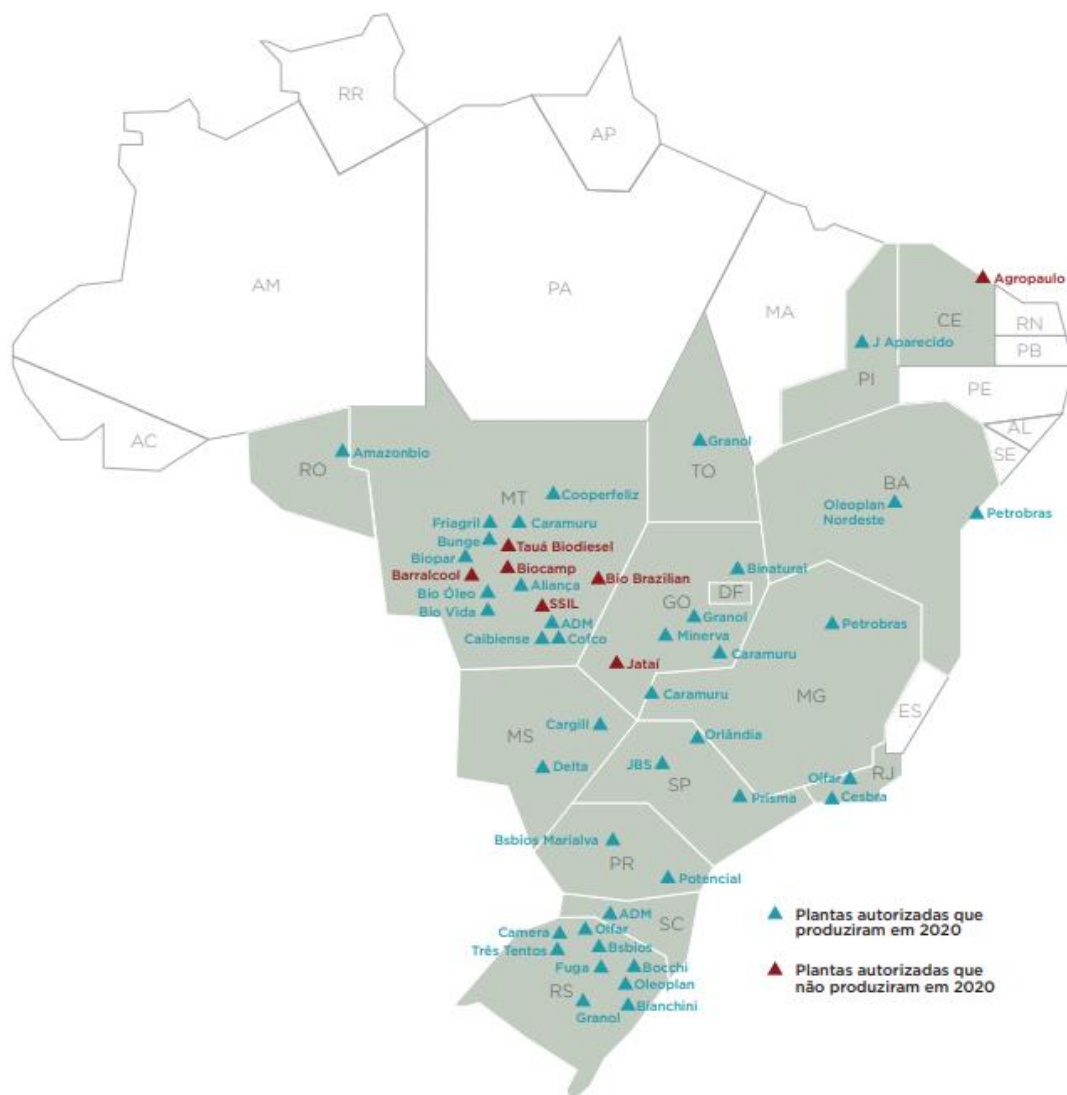
ADM	Rondonópolis/MT	1.352,0
ADM	Joaçaba/SC	510,0
Agropaulo	Jaguaruana/CE	50,0
Aliança	Rondonópolis/MT	10,0
Amazonbio	Ji-Paraná/RO	90,0
Barralcool	Barra dos Bugres/MT	190,5
Bianchini	Canoas/RS	1.150,0
Binatural	Formosa/GO	450,0
Bio Brazilian	Barra do Garças/MT	98,0
Bio Óleo	Cuiabá/MT	150,0
Bio Vida	Várzea Grande/MT	150,0
Biopar	Nova Marilândia/MT	288,0
Bocchi	Muitos Capões/RS	300,0
Bsbios	Passo Fundo/RS	1.150,0
Bsbios	Marialva/PR	1.150,0
Bunge	Nova Mutum/MT	497,0
Caibiense	Rondonópolis/MT	100,0
Camera	Ijuí/RS	650,0
Caramuru	Ipameri/GO	625,0
Caramuru	São Simão/GO	625,0
Caramuru	Sorriso/MT	285,0
Cargill	Três Lagoas/MS	700,0
Cesbra	Volta Redonda/RJ	166,7
Cofco	Rondonópolis/MT	1.030,0
Cooperfeliz	Feliz Natal/MT	100,0
Delta	Rio Brilhante/MS	600,0
Delta Cuiabá	Cuiabá/MT	1.000,0
Fiagril	Lucas do Rio Verde/MT	563,0
Fuga	Camargo/RS	500,0
Granol	Porto Nacional/TO	800,0
Granol	Anápolis/GO	1.550,0
Granol	Cachoeira do Sul/RS	933,3

J Aparecido	Florianópolis	250,0
Jataí	Jataí/GO	50,0
JBS	Lins/SP	560,2
JBS	Campo Verde/MT	410,0
Minerva	Palmeiras de Goiás/GO	200,0
Oleoplan	Veranópolis/RS	1.300,0
Oleoplan Nordeste	Iraquara/BA	1.300,0
Olfar	Erechim/RS	600,0
Olfar	Porto Real/RJ	450,0
Orlândia	Orlândia/SP	367,0
Petrobras Biocombustíveis	Montes Claros/MG	545,5
Petrobras Biocombustíveis	Candeias/BA	845,5
Potencial	Lapa/PR	2.500,0
Prisma	Sumaré/SP	200,0
SSIL	Rondonópolis/MT	50,0
Tauá	Nova Mutum/MT	100,0
Três Tentos	Ijuí/RS	850,0

Fonte: ANP/SPC, conforme a Resolução ANP nº 30/2013.

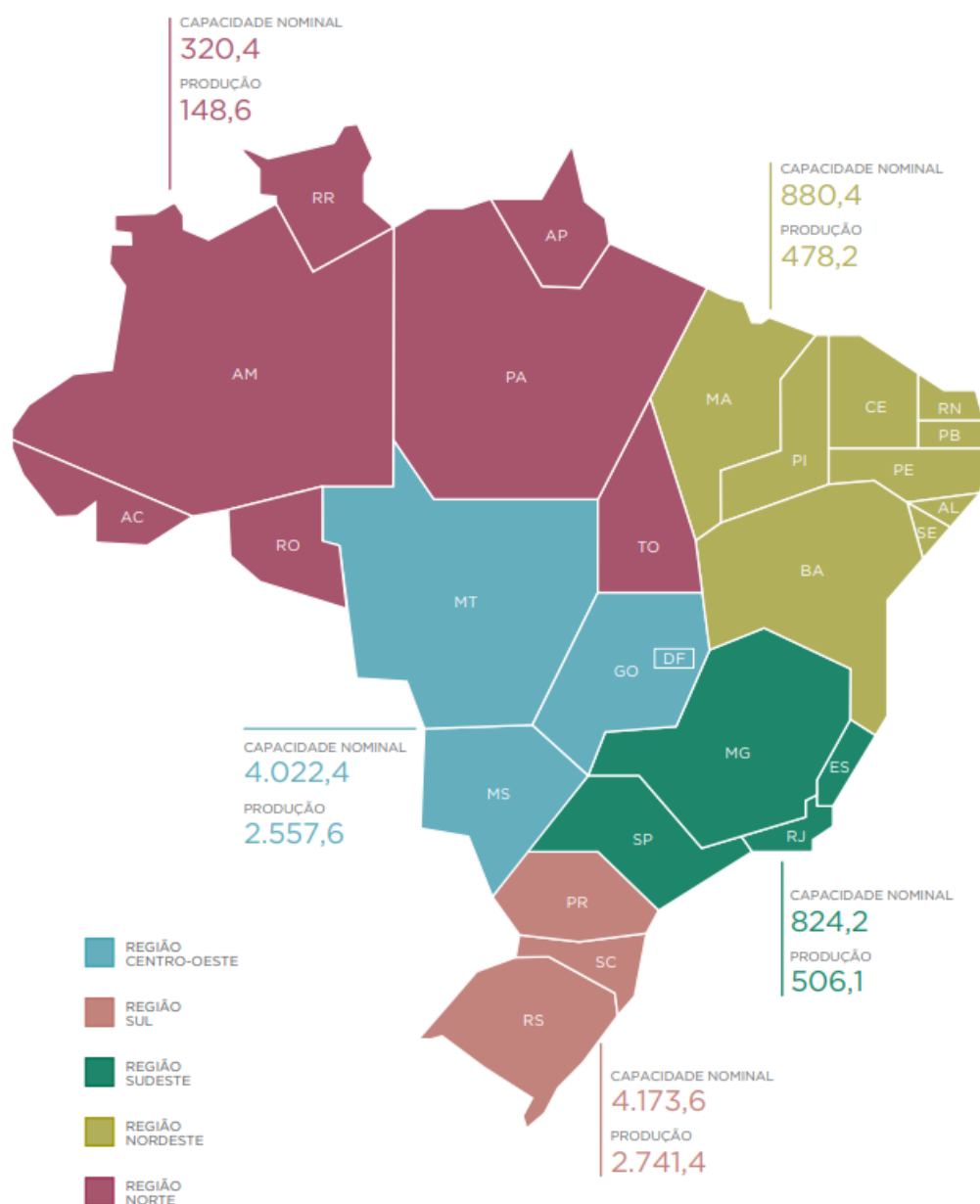
A Figura 3 representa a infraestrutura de produção de biodiesel (B100), como a localização no mapa do Brasil das unidades produtoras, no ano de 2020 e a Figura 4 mostra a capacidade nominal e produção de biodiesel (B100), segundo grandes regiões (mil m³/ano) no ano de 2020.

Figura 3 - Infraestrutura de produção de biodiesel (B100) - 2020



Fonte: ANP/SPC, 2020.

**Figura 4 - Capacidade nominal e produção de biodiesel (B100), segundo grandes regiões
(mil m3/ano) - 2020**



Fonte: ANP/SPC, 2020.

No Brasil, grande parte do biodiesel é produzido a partir de sementes de oleaginosas, principalmente a soja, mas há um aumento significativo no uso de gordura animal. A Tabela 3 mostra os tipos de matéria primas utilizadas na produção de biodiesel no Brasil no ano de 2020 (ANP, 2020).

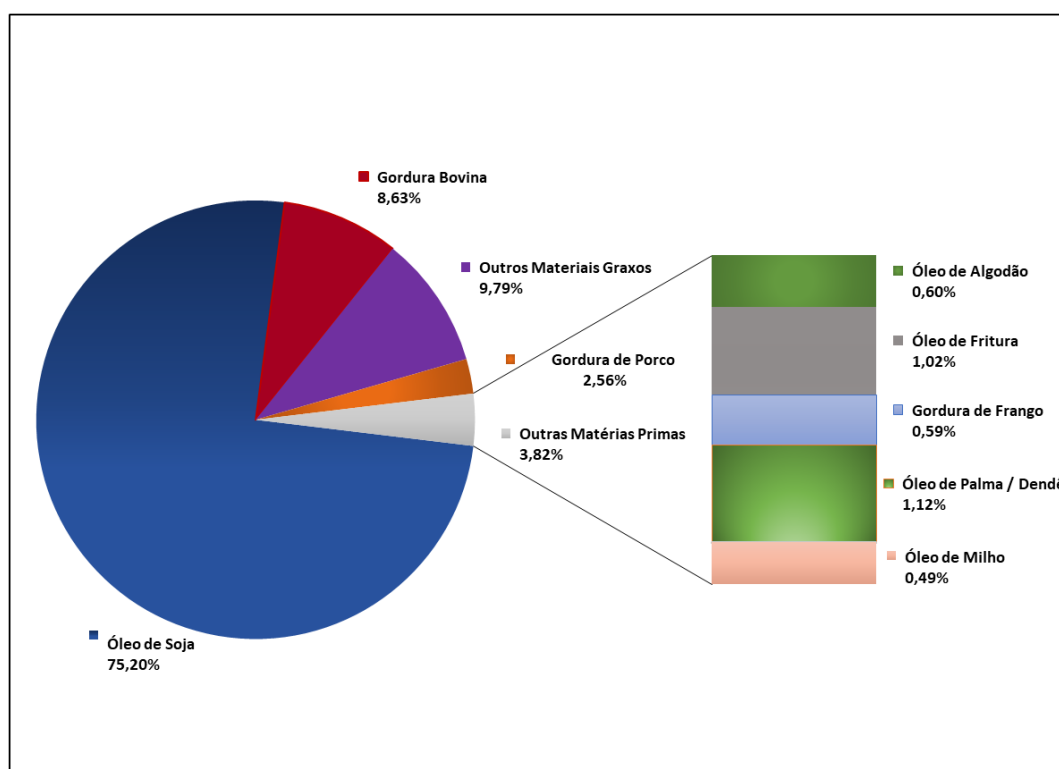
Tabela 3 - Perfil nacional de matérias-primas consumidas para produção de biodiesel

Descrição da matéria-prima	jan/20	fev/20	mar/20	abr/20
Óleo de Soja	74,00%	71,81%	82,98%	88,21%
Gordura Bovina	21,96%	19,27%	8,12%	6,15%
Óleo de Algodão	0,00%	0,00%	1,84%	0,96%
Outros Materiais Graxos	4,04%	6,62%	5,39%	4,55%
Óleo de Fritura usado	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Gordura de Porco	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Gordura de Frango	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Óleo de Palma / Dendê	0,00%	2,30%	1,67%	0,13%
Óleo de Girassol	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Óleo de Mamona	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Óleo de Nabo-forrageiro	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Óleo de pinhão-mansô	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Óleo de milho	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Óleo de colza/canola	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Fonte: ANP, 2020.

De acordo com a Tabela 3 e a Figura 5, pode-se observar um uso significativo do óleo de soja como matéria-prima primária na produção de biodiesel em nível nacional.

Figura 5 - Perfil nacional de matérias-primas consumidas para produção de biodiesel



Fonte: ANP, 2020.

4.5. Tratamento de efluentes do biodiesel

Normalmente, o efluente obtido da lavagem de biodiesel apresenta tonalidade branca opaca, teores elevados de sólidos, sais solúveis (cloreto e sulfato) e matéria orgânica, bem como a presença de ácidos graxos, sabões, álcool, glicerina e baixas concentrações de nitrogênio (GONÇALVES, 2015).

A maioria das pesquisas acerca de biodiesel está focada no processo de fabricação, no desenvolvimento de variedades vegetais com maior rendimento e produtividade, na análise de problemas relacionados ao cultivo de culturas primárias, propriedades de produção, potencial energético, estabilidade térmica, condições ideais de armazenamento e níveis de emissão atmosférica. Poucos estudos foram realizados para investigar novas tecnologias métodos de tratamento de efluentes de biodiesel, principalmente no que diz respeito ao uso de efluentes brutos de usinas com alto volume de saída (GONÇALVES, 2015)

Em seus experimentos Brito et al. (2012), utilizou um dispositivo de eletro floculação, de modo que essa água possa ser reutilizada no processo, reduzindo a quantidade de resíduos gerados pela produção de biodiesel bem como o impacto ambiental que este biocombustível pode causar, além de diminuir custos para as indústrias de manufatura.

Os dispositivos de eletro floculação simples são compostos por eletrodos de diferentes polaridades, certos ânodos e outros cátodos. Quando uma tensão é aplicada, o ânodo é oxidado e o cátodo é reduzido, resultando na geração eletroquímica do agente coagulante. O material de carga positiva pode reagir com a carga negativa da solução, fazendo com que ocorra a hidrólise da solução, liberando o hidróxido, um dos fatores mais importantes no tratamento de efluentes.

4.6. Tecnologias convencionais para produção de biocombustíveis

O uso de tecnologias de conversão de energia primária contida na biomassa em formas de energia secundária se divide em dois grandes eixos: geração de energia elétrica e produção de combustível líquido (VIEIRA, 2010).

Morello et al. (2020), em suas valorosas lições, sintetiza tecnologias de aproveitamento energético de biomassas como sendo:

Todas as tecnologias para obtenção da energia elétrica apoiado a Biomassa direciona a conversão da matéria-prima num produto intermediário que terá utilidade a uma máquina motriz. Através desta máquina é acionado um gerador que transformará a energia mecânica advinda da máquina motriz em energia elétrica.

4.7. Processos de pirólise

O termo pirólise é usado para descrever a decomposição térmica de materiais contendo carbono na ausência total de oxigênio, ou em tal quantidade que a gaseificação não ocorre completamente. Esse processo é dividido em três fases: uma sólida, o carvão vegetal; outra gasosa, não condensável; e por fim uma fase líquida composta por duas frações, uma aquosa e outra oleosa, comumente designada de fração pirolenhosa. A proporção relativa desses estágios

varia de acordo com a temperatura, procedimento e tipo de reator utilizado. As temperaturas geralmente variam de 400 a 1000°C (KIMURA, 2009).

Em outras palavras, a pirolise é a degradação térmica de qualquer material orgânico na ausência parcial ou total de um agente oxidante, podendo até mesmo ocorrer em um ambiente com concentração de oxigênio suficiente para evitar a gaseificação intensa do material (PEDROZA, 2011).

A pirólise, também conhecida como carbonização, é a técnica mais básica e mais antiga de conversão de matéria orgânica em material produtor de energia. Este é um processo de decomposição termoquímica que ocorre em altas temperaturas na ausência de oxigênio, resultando em três fases: gases, líquidos e sólidos em proporções que variam de acordo com o tipo de biomassa e os parâmetros considerados, ou seja, variam de acordo com a temperatura de operação do reator, o tempo de residência das fases dentro do reator e assim por diante (OLIVEIRA, 2020).

A pirólise lenta se destaca por suas baixas taxas de aquecimento e longos tempos de residência. Esta abordagem visa maximizar o rendimento de carvão vegetal e reduzir as quantidades de bio-óleo e gás. A pirólise rápida é realizada em altas taxas de aquecimento e pequenos tempos de residência das fases gasosa e sólida no reator (KIMURA, 2009).

A pirólise rápida é um processo de alta temperatura em que a biomassa é rapidamente aquecida na ausência de oxigênio. Como resultado, ele se decompõe para produzir principalmente vapores e aerossóis e algum carvão. Para produzir líquido o tempo de residência de vapor deve ser muito baixo afim de minimizar reações secundárias de tipicamente 1 segundos, embora resultados aceitáveis possam ser obtidos em apenas 5 segundos se a temperatura do vapor for mantida abaixo de 400 C. Após resfriamento e condensação, forma-se um líquido cujo poder calorífico seja cerca de metade do óleo combustível convencional. Embora seja relacionada aos processos tradicionais de pirólise para produzir carvão, a pirólise rápida é uma técnica avançada que é meticulosamente controlada para proporcionar alto rendimento líquido (BRIGDWATER, 2011).

Em uma pirólise termocatalítica, os parâmetros podem ser alterados para aumentar o rendimento desejado. No entanto, espera-se que os catalisadores não reduzam as frações de

interesse, em vez disso, proporcionem melhor qualidade, como baixa acidez e viscosidade. Entretanto, deve-se levar em consideração o teor de material volátil, ou seja, a matéria orgânica que compõe o resíduo analisado, as condições e o tipo da pirólise e o modelo do reator (ALEXANDRE, 2013).

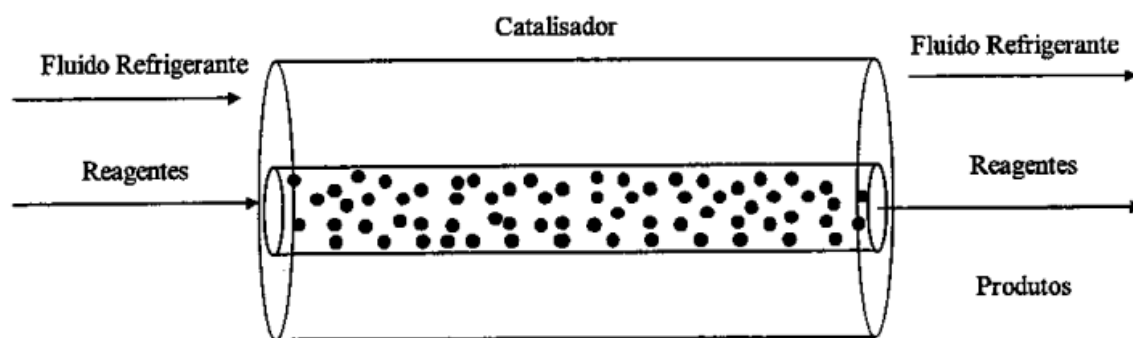
Sabe-se que a pirólise envolve a transformação das estruturas moleculares dos componentes da biomassa, principalmente celulose, hemicelulose e lignina, com formação de moléculas simples e obtenção de altos rendimentos líquidos. A composição e as propriedades finais do bio-óleo estão indissociavelmente ligadas à qualidade do tratamento da biomassa (OLIVEIRA, 2020).

4.8. Reatores de leito fixo

De acordo com Gonçalves (2017), os reatores de pirólise rápida foram e continuam a ser amplamente pesquisados para melhorar as condições operacionais, novas tecnologias e métodos vem sendo empregados afim de maximizar a produção de bio-óleo. Existem processos de pirólise rápida com tempos de residência mais curtos do que os necessários para pirólise lenta. Os tipos de reatores mais comuns são os de leito fixo e leito fluidizado borbulhante (GONÇALVES, 2017).

Os reatores de leito fixo, em sua forma mais simples, possuem estrutura cilíndrica preenchida por grandes quantidades de partículas de catalisadores. Em sua operação os reagentes passam pelo leito catalítico fixo onde são convertidos em produtos. Tais reatores, devido suas diversas vantagens se comparados a outros tipos de reatores catalíticos, são destaques na indústria química. Ademais, o arranjo do leito catalítico pode ser estruturado tanto em leito único como em múltiplos leitos dispostos horizontalmente ou em uma pilha vertical. A Figura 6 representa um esquema geral de um reator catalítico de leito fixo (HILL, 1970).

Figura 6 - Esquema Geral de um Reator Catalítico de Leito Fixo



Fonte: TOLEDO, 1999

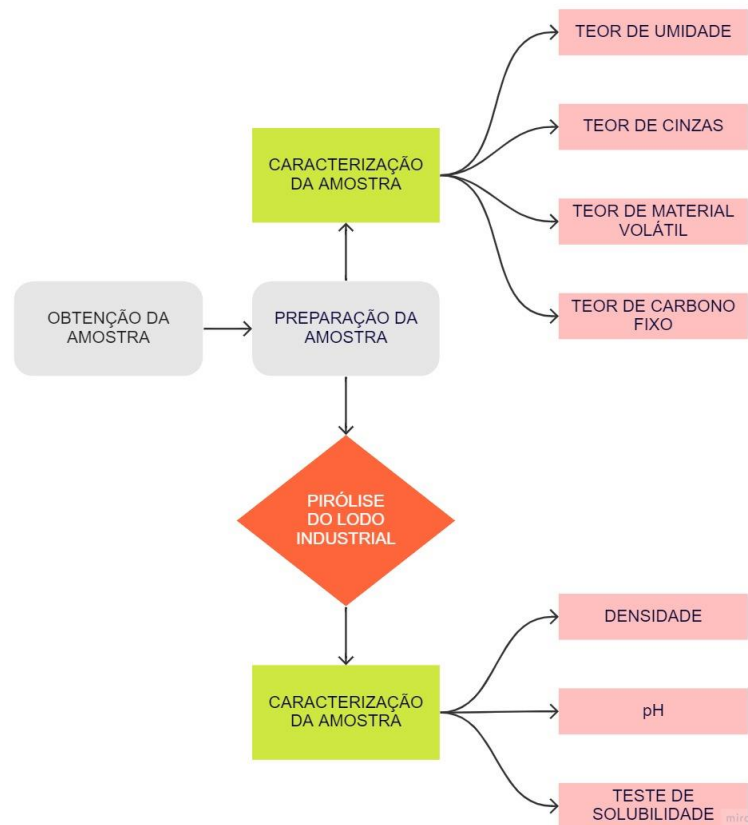
Os reatores de leito fixo possuem baixo custo de construção e manutenção além de ser facilmente manuseado. Possui ampla aplicação industrial na produção de biodiesel e na oxidação do etanol e acetaldeído. Ademais, sua estrutura permite altas taxas de conversão por unidade de catalisador além de ser bastante efetivo a elevadas temperaturas e pressões. Contudo, existem desvantagens associadas a estes reatores que tornam seu uso limitado ou difícil. A liberação de energia ao longo do comprimento do leito fixo pode não ser uniforme. Sendo assim, a maior parte da reação ocorre, tipicamente, na região de entrada do reator, levando a um aumento na temperatura (ANASTASOV, 2002; IORDANIDIS, 2002)

Outrossim, manter a distribuição uniforme do fluxo de reagente gasoso também é um problema típico em reatores de leito fixo. A distribuição desigual do fluido provoca um aumento na distribuição dos tempos de residência, o que tem efeitos negativos no desempenho do reator (HILL, 1977).

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Diante da problemática exposta, constitui o objeto deste capítulo descrever os procedimentos realizados para efetuar a pirólise de lodo industrial proveniente da indústria de biodiesel empregando o catalisador de óxido de cálcio (CaO) visando obter um material biocombustível. O método experimental desta pesquisa encontra-se representado pelo diagrama dado na Figura 7.

Figura 7 – Fluxograma das atividades realizadas



Fonte: Autor (2022)

O lodo proveniente desta pesquisa foi obtido na GRANOL, localizada no setor agroindustrial de Porto Nacional, Tocantins. O material se encontrava em estado líquido, com auxílio dos funcionários da empresa foi recolhido cerca de 15 Litros de lodo em um recipiente plástico apropriado e transportado até o Laboratório de Análise de Águas no Instituto Federal do Tocantins (IFTO) – Campus Palmas - TO.

Devido ao estado físico do material, o mesmo foi colocado para secagem *in natura*, onde permaneceu por cerca de 3 meses até está bem seco e sólido (Figura 8). Tendo em vista a natureza tóxica do material, seu manuseio foi feito com luvas e mascarar.

Figura 8 – Lodo industrial empregado na pesquisa.



Fonte: Autor (2022)

5.1. Procedimentos analíticos a serem empregados na caracterização química do lodo industrial bruto

5.1.1. Caracterização do lodo industrial bruto

A caracterização do lodo consiste na realização de ensaios para determinação do teor de umidade, teor de cinzas, teor de material volátil e teor de carbono fixo, todos os ensaios foram realizados em triplicatas. Essas análises imediatas do lodo foram realizadas no laboratório de Análises de Água do Instituto Federal do Tocantins (IFTO) – Campus Palmas.

5.1.2. Teor de Umidade

Para a determinação da umidade do material, seguiu-se a metodologia sugerida por PEDROZA (2011), primeiramente separou-se um cadinho de porcelana para ser lavado e colocado em mufla para secagem a 105°C por um período de 1 (uma) hora. Em seguida, o cadinho foi colocado em um dessecador para ser resfriado por 15 minutos. Após a preparação do cadinho, foi registrado seu peso.

Separou-se cerca de 2 g da biomassa dentro do cadinho e registrado o peso do conjunto. Em seguida, o cadinho com a amostra foi colocado, totalmente aberto, na mufla por um período de 1 (uma) hora a temperatura de 110°C.

Após isso, o cadinho com a amostra foi encaminhado para o dessecador, para resfriamento, por 15 minutos. Depois desse processo, o conjunto foi novamente pesado, registrando este valor como P1.

O teor de umidade foi determinado segundo a equação 1, descrita a seguir.

$$\% \text{ umidade} = \frac{(A - P1)}{A} \times 100$$

Equação 1 – Teor de umidade

Onde,

A = Peso do recipiente + Amostra (Em gramas).

P1 = Peso do recipiente + Amostra após o aquecimento em mufla (Em gramas).

5.1.3. Teor de Cinzas

O teor de cinzas foi determinado de acordo com o método sugerido por PEDROZA (2011). Dando sequência a metodologia aplicada no ensaio de Teor de Umidade, o conjunto, cadinho com a amostra seca, foi devolvido a mufla, totalmente fechado, durante 7 (sete) minutos a temperatura de 850°C.

Após isso, o conjunto foi colocado para resfriamento em dessecador por 50 minutos. Em seguida o conjunto foi pesado, registrando seu valor como P2.

O teor de cinzas foi determinado de acordo com a equação 2, descrita a seguir:

$$\% \text{ cinzas} = \frac{A - P2}{P0} \times 100$$

Equação 2 – Teor de Cinzas

Onde,

A = Peso do recipiente + Amostra (Em gramas).

P2 = Peso do recipiente + Amostra após o aquecimento em mufla (Em gramas).

P0 = Peso da amostra (Em gramas).

5.1.4. Teor de Material Volátil

O teor de material volátil foi determinado de acordo com o método sugerido por PEDROZA (2011). Dando sequência a metodologia aplicada no ensaio de Teor de Cinzas, o conjunto, cadinho com a amostra seca, foi devolvido a mufla, totalmente aberto, durante 1 (uma) hora a temperatura de 710°C.

Após isso, o conjunto foi colocado para resfriamento em dessecador por 50 minutos. Em seguida o conjunto foi pesado, registrando seu valor como P3.

O teor de cinzas foi determinado de acordo com a equação 3, descrita a seguir:

$$\% \text{ material volátil} = \left[\frac{(P + P0) - P3}{P0} \right] \times 100$$

Equação 3 – Teor de Material Volátil

Onde,

P = Peso do cadinho vazio (Em gramas).

P0 = Peso da amostra inicial (Em gramas).

P3 = Peso do recipiente + Amostra final (Em gramas).

5.1.5. Teor de Carbono Fixo

O teor de carbono fixo será definido por diferença, por meio da *Equação 4*:

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

Equação 4 – Teor de Carbono Fixo

5.2. Pirólise Catalítica

5.2.1. Metodologia aplicada no processo 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 foi previamente aquecido por forno bipartido reclinável (marca FLYEVER, modelo FE50RPN e linha 05/50) conforme as Figuras 9 e 10, operando em regime de batelada. O gás de arraste empregado na reação foi de vapor d'água aquecido a 130 °C em autoclave (Figura 11). O ensaio foi realizado em 2 (dois) ciclos de 30 minutos, sendo o primeiro ciclo a 200 °C e o segundo a 650 °C, totalizando 60 minutos de reação. A taxa de aquecimento foi de 25 °C/min, até chegar na temperatura desejada. O reator utilizado foi conectado a um sistema de resfriamento de vapores para a condensação e coleta de bio-óleo (Figura 12).

Figura 9 – Reator de leito fixo utilizado no ensaio da pirólise



Fonte: Autor (2022)

Figura 10 – Reator de leito fixo utilizado no ensaio da pirólise.



Fonte: Autor (2022)

Figura 11 - Autoclave utilizada no ensaio da pirólise.

Figura 11 – Autoclave utilizado no ensaio da pirólise.



Fonte: Autor (2022)

Figura 12 – Sistema empregado para o resfriamento dos vapores.



Fonte: Autor (2022)

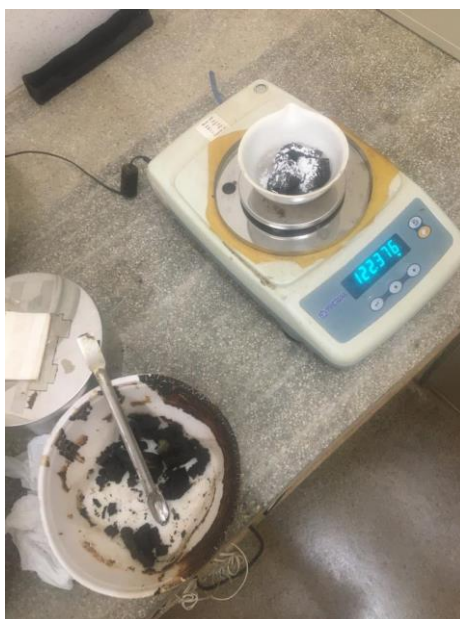
5.2.2. Procedimentos aplicados para Pirólise

Para a realização do processo de pirolise, foi adicionado em um cadinho de porcelana limpo, com peso previamente definido, o lodo industrial. Em seguida, pesou-se o conjunto, registrando o valor encontrado.

Nesse processo de pirolise, foi utilizado o óxido de cálcio (CaO) na razão mássica de 2 %, como agente catalisador. Para isso, separou-se em um cadinho de porcelana limpo, com peso previamente definido, 2 % da massa de lodo coletada no primeiro recipiente.

Após definir a porção de catalisador a ser utilizada, foi adicionado todo o catalisador ao recipiente que contém o lodo (Figura 13), misturando-o com auxílio de uma espátula dupla (Figura 14).

Figura 13 – Recipiente contendo o lodo industrial com o catalisador (CaO).



Fonte: Autor (2022)

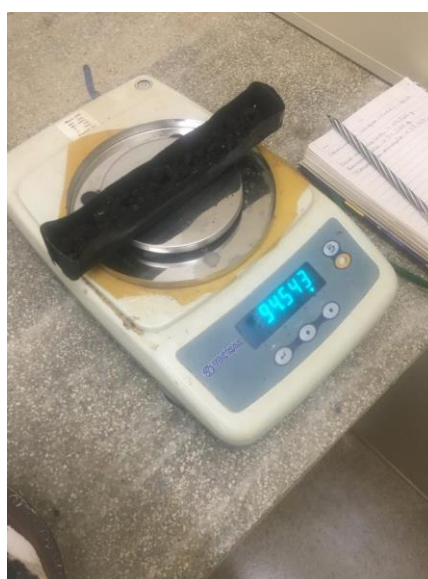
Figura 14 – Recipiente contendo o lodo industrial com o catalisador (CaO), apoiado sobre a balança está o recipiente “barca” utilizado na pirólise.



Fonte: Autor (2022)

Em seguida, a amostra com o catalisador foi colocada em um recipiente metálico próprio para reator (barca) com peso previamente definido (Figura 15). Todo o conjunto foi pesado e seu valor registrado.

Figura 15 – Barca com amostra de lodo industrial com o catalisador.



Fonte: Autor (2022)

Após isso, o conjunto foi colocado dentro do reator de leito fixo para início do processo de pirolise (Figuras 16,17, 18 e 19).

Figura 16 – Barca com amostra de lodo industrial sendo inserida dentro do reator de leito fixo.



Fonte: Autor (2022)

Figura 17 – Reator de leito fixo em funcionamento.



Fonte: Autor (2022)

Figura 18 – Frasco separador de fases, presença de espuma amarelada característica do bio-óleo produzido.



Fonte: Autor (2022)

Figura 19 – Frasco separador de fases, término do processo de pirólise.



Fonte: Autor (2022)

Para fins de balanço de massa, após resfriamento da planta de pirólise, todos os produtos foram pesados e armazenados. O material sólido foi recuperado do reator e armazenado para

pesquisas futuras e o bio-óleo resultante da pirólise foi coletado do funil de separação de fases para ser caracterizado (Figura 20).

Figura 20 – Bio-óleo resultante do processo de pirólise.



Fonte: Autor (2022)

5.3. Procedimentos analíticos empregados para caracterização do bio-óleo produzido

A caracterização do bio-óleo produzido, consiste na realização de ensaios para determinação da densidade, PH e solubilidade. Essas análises do bio-óleo foram realizadas no laboratório de Análises de Água do Instituto Federal do Tocantins (IFTO) – Campus Palmas.

5.3.1. Densidade

Para a determinação da densidade do bio-óleo, foi utilizado um picnômetro de vidro de 10 mL, sendo registrado o peso do picnômetro vazio e o peso do picnômetro com a amostra de bio-óleo. A densidade foi determinada de acordo com a equação 5, descrita a seguir:

$$Densidade = \frac{Massa\ da\ amostra}{Volume\ da\ amostra}$$

Equação 5 – Densidade

5.3.2. Análise do pH

O pH do líquido foi determinado em pHmetro digital, da marca Tecnal (Figura 21).

Figura 21 – pHmetro digital, análise do pH do bio-óleo produzido.



Fonte: Autor (2022)

5.3.3. Teste de solubilidade

O bio-óleo proveniente da pirolise do lodo com emprego do catalisador de óxido de cálcio, foi testado com vários solventes, tais como: água, clorofórmio, diclorometano, álcool e hexano. Para o ensaio, foi colocado um volume de amostra de 0,2 mL, medido com auxílio de uma pipeta graduada, em um tubo de ensaio contendo o bio-óleo produzido. O material foi manualmente agitado e em seguida observado à solubilidade do material no solvente empregado (Figura 22).

Figura 22 – Tubo de ensaio com bio-óleo originado no processo de pirólise em contato com solventes polares e apolares.



Fonte: Autor (2022)

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1. Caracterização química do lodo industrial

As características químicas do lodo industrial proveniente da indústria de processamento da soja, foram obtidos através de ensaios realizados no laboratório de Análises de Águas, localizado nas dependências do Instituto Federal do Tocantins, campus Palmas – TO.

6.1.1. Análise imediata

Os valores obtidos nos ensaios de teor de umidade, teor de cinzas, teor de material volátil e carbono fixo, realizados em triplicatas, encontram-se na descritos na Tabela 4 e Tabela 5.

Tabela 4 – Resultados da análise imediata, valores de entrada.

Amostra (Biomassa)	P0	Amostra	P1 (100 °C)	P2 (850 °C)	P3 (710 °C)
-----------------------	----	---------	-------------	-------------	-------------

A	33,681	1,119	34,756	33,740	33,731
B	35,152	1,117	36,200	35,188	35,179
C	33,094	1,032	34,065	33,107	33,101

Fonte: Autor (2022)

Tabela 5 - Resultados das análises imediatas, média aritmética das triplicatas.

Amostra (Biomassa)	Umidade (%)	Material Volátil (%)	Cinzas (%)	Carbono fixo (%)
Lodo Industrial	5,340	91,408	2,521	0,730

Fonte: Autor (2022)

O teor de umidade está diretamente ligado a avaliação do consumo energético durante o processo de pirólise. O teor de umidade elevado representa maior gasto energético para conversão da biomassa, aumentando os custos do processamento, além de acrescentar a necessidade de realizar a secagem prévia da biomassa. A amostra resultou no teor de umidade de 5,34%, caracterizando-a como uma biomassa apta para combustão, pois aumenta a quantidade de energia convertida em calor.

O teor de cinzas refere-se à presença de compostos inorgânicos na biomassa, onde um maior percentual de teor de cinzas, maior será o rendimento da fração sólida e gasosa, além da significativa diminuição da fração líquida (OLIVEIRA, 2020). A amostra produziu um teor de cinzas igual a 2,521 %, representando uma baixa produção de resíduos e significativo aumento no poder calorífico.

O teor de material volátil representa a facilidade que o material possui para passar pelo processo de combustão, ou seja, maior facilidade de queima. O teor de material volátil da amostra é de 91,408 %, logo a amostra é favorável para combustão. (VIEIRA et al., 2013). Já o teor de carbono fixo da amostra é de 0,73%, essa análise determina a massa restante após a eliminação dos compostos voláteis.

Segundo estudos realizados por OLIVEIRA (2020), no processo de pirólise do lodo industrial proveniente da indústria do biodiesel, sem a presença de catalisador, a amostra obteve teor de umidade de 7,86% e teor de material volátil de 84,49 %. Ademais, pesquisas feitas por PEDROZA (2011), no processo de conversão termoquímica do lodo residual, proveniente da estação de tratamento de esgoto doméstico, a amostra obteve teor de umidade de 12 % e teor de material volátil de 52,9 %.

6.2. Caracterização do bio-óleo originado do processo de pirólise catalítica do lodo industrial

As características do bio-óleo obtido através do processo de pirólise do lodo industrial, com adição do catalisador de óxido de cálcio, são apresentadas a seguir.

6.2.1. Rendimento do bio-óleo produzido durante a pirólise do lodo residual

O maior resultado obtido na análise do rendimento do bio-óleo, através do balanço de massa, foi de 83 %, sendo obtido nas seguintes condições: (a) Temperatura igual a 650 °C e (b) Taxa de aquecimento igual a 25 °C/min. O rendimento do carvão obtido foi de 5 %.

6.2.2. Teste de solubilidade

Para o teste de solubilidade foram utilizados diversos tipos de solvente afim de verificar a afinidade do bio-óleo produzido com substâncias polares e apolares (Tabela 6). O bio-óleo produzido não apresentou capacidade de dissolução na água natural, porém formou uma mistura homogênea nos demais solventes.

Tabela 6 – Teste de solubilidade aplicado ao bio-óleo obtido no processo de pirólise.

Tipo de solvente	Resultado
Água Natural	Insolúvel
Clorofórmio	Mistura Homogênea (solução)
Diclorometano	Mistura Homogênea (solução)
Álcool	Mistura Homogênea (solução)
Hexano	Mistura Homogênea (solução)

Fonte: Autor (2022)

A solubilidade do bio-óleo depende do modo em que é armazenado bem como do tempo de armazenamento. O processo de polimerização dos compostos presentes no bio-óleo dificulta sua interação com outras substâncias (OLIVEIRA, 2020). Vale ressaltar, que o bio-óleo produzido, em temperatura ambiente, apresentou-se solúvel em grande parte dos solventes definidos no ensaio, mostrando que pode ser produzido um material com propriedades benéficas ao setor industrial, tendo como base o bio-óleo como componente.

6.2.3. Análise de pH e densidade

A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos na análise de pH e densidade do bio-óleo produzido na pesquisa. Foi obtido um valor de pH ácido (3,68). A densidade do bio-óleo foi de 1,1 g/mL. Os valores de densidade e pH foram próximos dos obtidos por outros autores em trabalhos com o lodo industrial proveniente do processamento da soja.

Tabela 7 – Valor do pH e densidade do bio-óleo produzido.

Amostra	pH (-)	Densidade (g/mL)
1	3,68	1,1

Fonte: Autor (2022)

7. CONCLUSÕES

A sistematização do presente trabalho consiste no estudo da possibilidade de se utilizar subprodutos originados do processamento da soja em fonte de energia renovável, por meio de tecnologias que assegurem a preservação ambiental e proporcionem menores impactos ao meio ambiente, visando alternativas sustentáveis para a demanda energética da sociedade.

Vários autores, em pesquisas sobre o aproveitamento energético das biomassas provenientes da soja, obtiveram êxito ao produzir compostos com grande potencial energético, através de processos de conversão termoquímica. Gerando energias mais limpas e formando novos materiais com composição química de caráter sustentável. Além da reutilização de materiais e substâncias que são descartados como subproduto do processamento da soja, o que

gera a problemática do acúmulo desses resíduos, o processo de conversão termoquímica traz a possibilidade de transformar tais resíduos em produtos que possam ser utilizados na indústria.

O elevado teor de material volátil e o baixo teor de cinzas, coloca o lodo industrial, proveniente da indústria de biocombustíveis, como componente promissor para a produção de biocombustíveis de origem renovável.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, Frederique Rosa; VIEIRA, José Nilton de Souza; RAMOS, Simone Yuri (org.). Programa Nacional para a Produção e Uso do Biodiesel Diretrizes, desafios e perspectivas. **Revista de Política Agrícola**, n. 3, p. 5-18, jul. 2006. Trimestral. Disponível em: <https://seer.sede.embrapa.br/index.php/RPA>. Acesso em: 22 mar. 2022.

ABREU, Yolanda Vieira de; OLIVEIRA, Marco Aurélio Gonçalves de; GUERRA, Sinclair Mallet-Guy. **Energia, Economia, Rotas Tecnológicas. Textos selecionados**. Palmas: Eumed.Net, 2010. 330 p. Disponível em: <http://eumed.net/>. Acesso em: 15 mar. 2022.

AFONSO, Luana Ferreira; YOKOYAMA, Lidia; CAMMAROTA, Magali Christe. Avaliação de tecnologias de tratamento para reúso de efluente na indústria de biodiesel. In: Congresso ABES – FENASAN 2017, São Paulo. **Proceedings [...]**. São Paulo: AESABESP, 2017. v. 1, p. 1-10. Disponível em: Disponível em: <https://tratamentodeagua.com.br/>. Acesso em: 15 mar. 2022.

ALEXANDRE, Gerso Pereira. **Avaliação da produção de bio-óleo por termocatálise com óxido de cálcio de lodo de esgoto doméstico**. 2013. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agroenergia, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2013.

BRASIL, DISTRITO FEDERAL. MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO. **BIODIESEL**. Brasília, 2006. 32 slides, color. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/>. Acesso em: 27 mar. 2022.

BRASIL, Alex Nogueira; OLIVEIRA, Geraldo do Carmo Santos; SANTANA, Luiz Felipe de Sousa; BRASIL, André Nogueira; OLIVEIRA, Moisés Martins de. CHEM - Novas tecnologias para a produção mais eficiente de biodiesel. In: congresso técnico científico da

engenharia e da agronomia, 73., 2016, Foz do Iguaçu. **Proceedings [...]**. Foz do Iguaçu: SOEA, 2016. p. 1-5. Disponível em: <http://www.confea.org.br>. Acesso em: 15 mar. 2022.

BRIDGWATER, A.V.; MEIER, D.; RADLEIN, D.. An overview of fast pyrolysis of biomass. **Organic Geochemistry**, [S.L.], v. 30, n. 12, p. 1479-1493, dez. 1999. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0146-6380\(99\)00120-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0146-6380(99)00120-5). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/>. Acesso em: 22 mar. 2022.

BRITO, Juliana Ferreira de; FERREIRA, Laís de Oliveira; SILVA, Joaquim Paulo da; RAMALHO, Teodorico Castro. Tratamento da água de purificação do biodiesel utilizando eletrofloculação. **Química Nova**, [S.L.], v. 35, n. 4, p. 728-732, 2012. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422012000400014>. Disponível em: <https://tratamentodeagua.com.br/>. Acesso em: 22 mar. 2022.

Biomassa Para Energia/Organização: Luís Augusto Barbosa Cortez, Electo Eduardo Silva Lora, Edgardo Olivares Gómez. – Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2008.

CÂMARA, G. M. S. **Introdução ao agronegócio da soja**. Piracicaba, USP/ESALQ – Departamento de Produção Vegetal, 2014. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/>. Acesso em: 22 mar. 2022.

CANAKCI, M.; VAN GERPEN, J.. Biodiesel production from oils and fats with high free fatty acids. **Transactions Of The Asae**, [S.L.], v. 44, n. 6, p. 1429-1436, 2001. American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE). <http://dx.doi.org/10.13031/2013.7010>. Disponível em: <https://elibrary.asabe.org/>. Acesso em: 22 mar. 2022.

CARVALHO, L.; BUENO, R. C.; CARVALHO, M.; FAVORETO, A. L.; GODOY, A. F.. Cana-de-açúcar e álcool combustível: histórico, sustentabilidade e segurança energética. **ENCICLOPÉDIA BIOSFERA**, [S.L.], v. 9, n.16, p. 530-543, 2013. Disponível em: <https://conhecer.org.br/>. Acesso em: 22 mar. 2022.

CORREIA, Lígia Araújo Ramos. **Estudo do processo de pirólise para o aproveitamento sustentável de lodo digerido doméstico**. 2013. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agroenergia, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2013.

FERRARI, Roseli Aparecida; OLIVEIRA, Vanessa da Silva; SCABIO, Ardalla. Biodiesel de soja – taxa de conversão em ésteres etílicos, caracterização físico-química e consumo em gerador de energia. **Química Nova**, Ponta Grossa, v. 28, n. 1, p. 19-23, nov. 2004. Disponível em: <http://quimicanova.sbq.org.br/>. Acesso em: 22 mar. 2022.

FIORELLI, Francisco Carlos Cardoso. **Pirólise de resíduos plásticos: revisão e perspectivas futuras**. 2020. 87f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2020.

FONTES, Lúcio ângelo de Oliveira. **Desenvolvimento de uma unidade pirolítica com reator de cilindro rotativo: obtenção de bio-óleo**. 2011. 123 f. Tese (Doutorado em Pesquisa e Desenvolvimento em Ciência e Engenharia de Petróleo) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

FREITAS, Márcio de Campos Martins de. A cultura da soja no Brasil: o crescimento da produção brasileira e o surgimento de uma nova fronteira agrícola. **Enciclopédia Biosfera: Centro Científico Conhecer**, Uberlândia, v. 7, n. 12, p. 1-12, maio 2011. Disponível em: <https://conhecer.org.br>. Acesso em: 22 mar. 2022.

FREITAS, Silene Maria de; BARBOSA, Marisa Zeferino; FRANCA, Terezinha J. F.. Cadeia de produção de soja no Brasil: o caso do óleo. **Informações Econômicas**, São Paulo, v. 30, n. 12, p. 30-41, 2000. Disponível em: <http://www.iea.sp.gov.br>. Acesso em: 22 mar. 2022.

GAZZONI, Decio Luiz. A soja no Brasil é movida por inovações tecnológicas. **Ciência e Cultura**, [S.L.], v. 70, n. 3, p. 16-18, jul. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.21800/2317-66602018000300005>. Disponível em: <http://cienciaecultura.bvs.br>. Acesso em: 15 mar. 2022.

GEBARA, Dib. **Desempenho De Um Reator Aeróbio De Leito Fluidizado No Tratamento De Esgoto Sanitário**. 2006. 402 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia,

Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/>. Acesso em: 22 mar. 2022.

GOLDEMBERG, José; COELHO, Suani Teixeira; NASTARI, Plinio Mário; LUCON, Oswaldo. Ethanol learning curve—the Brazilian experience. **Biomass And Bioenergy**, [S.L.], v. 26, n. 3, p. 301-304, mar. 2004. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0961-9534\(03\)00125-9](http://dx.doi.org/10.1016/s0961-9534(03)00125-9). Disponível em: <https://www.researchgate.net/>. Acesso em: 22 mar. 2022.

GONCALVES, Luciano de Oliveira. **Tratamento de efluentes da produção de biodiesel pela combinação de processos biológicos e oxidativos avançados**. 2015. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Meio Ambiente, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/>. Acesso em: 15 mar. 2022.

GONÇALVES, Rui Pedro Santos. **Dimensionamento de um Reator de Pirólise de Leito Fluidizado Borbulhante para Produção de Bio Óleo**. 2017. 141 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2017. Disponível em: <https://recipp.ipp.pt/>. Acesso em: 23 mar. 2022.

GONDIN, Pedro Henrique Rodrigues. **Industrialização da soja no Brasil**. 2019. 24 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/>. Acesso em: 10 mar. 2022.

HILL, Charles G. **Introduction to chemical engineering kinetics & reactor design**. New York: Wiley, 1977, 1937. 594 p. Disponível em: <https://www.worldcat.org/>. Acesso em: 25 mar. 2022.

KIMURA, Lygia Maestri. **Uma contribuição à pirólise de biomassa: avaliação de alguns resíduos da agroindústria como fonte de energia alternativa**. 2009. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

KRAUSE, Laíza Canielas. **Desenvolvimento do processo de produção de biodiesel de origem animal**. 2008. 147 f. Tese (Doutorado) - Curso de Química, Programa de Pós

Graduação em Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/>. Acesso em: 25 mar. 2022.

LARSEN, Andrea C.; GOMES, Benedito M.; GOMES, Simone D.; ZENATTI, Dilcemara C.; TORRES, Douglas G. B.. Anaerobic co-digestion of crude glycerin and starch industry effluent. **Engenharia Agrícola**, [S.L.], v. 33, n. 2, p. 341-352, abr. 2013. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-69162013000200013>. Disponível em: <https://www.researchgate.net/>. Acesso em: 15 mar. 2022.

LAZZARI, Juanna. **Análise do potencial energético de lodos obtidos no tratamento de esgoto**. 2018. 83 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2018. Disponível em: <https://ambiental.ufes.br/>. Acesso em: 20 mar. 2022.

LEAL, Edina Ruth Mendes. **Aplicação do processo de pirólise lenta ao lodo de esgoto adicionado de óxido de cálcio e ferro para obtenção de bioóleo combustível**. 2010. 260 f. Monografia (Especialização) - Curso de Agroenergia, Programa de Pós Graduação em Agroenergia, Universidade Federal do Tocantins, Palmas – To, 2010. Disponível em: <https://brazilianjournals.com>. Acesso em: 15 mar. 2022.

LEITE, Rogério Cezar de Cerqueira; LEAL, Manoel Régis L. V.. O biocombustível no Brasil. **Novos Estudos - Cebrap**, [S.L.], n. 78, p. 15-21, jul. 2007. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0101-33002007000200003>. Disponível em: <https://www.researchgate.net/>. Acesso em: 15 mar. 2022.

LIMA, Alice Medeiros de. Estudos recentes e perspectivas da viabilidade técnico-econômica da produção de biodiesel. **Embrapa Agroenergia**, Brasília, v. 2, p. 23, 2011.

MELLO, Fabiana Ortiz Tanoue de; PAULILLO, Luiz Fernando; VIAN, Carlos Eduardo de Freitas. O BIODIESEL NO BRASIL: panorama, perspectivas e desafios. **Informações Econômicas**, São Paulo, v. 37, n. 1, p. 28-40, jan. 2007. Mensal.

MELO, André Felipe Xavier de; SILVA, Italo Felipe da; OLIVEIRA, Ana Karla Costa de. Reutilização do óleo residual produzindo biodiesel metílico. In: Congresso internacional da

diversidade do semiárido, 2., 2017, Campina Grande. **Proceeding [...]** . Natal: Conidis, 2017. p. 31-36.

MIRANDA, Gilliani Peixoto. **Modelagem e simulação de reatores de leito fluidizado para gaseificação da biomassa**. 2014. 130 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Química, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Rio de Janeiro, 2014.

MIRANDA, Hiago Vieira de. **Simulação, controle e avaliação das configurações de troca térmica no processo de desidratação de etanol em reator de leito fixo**. 2017. 110 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2017.

MORAES, Marília Ramalho de Figueiredo dos Santos. **Pirólise catalítica de biomassa vegetal para produção de biocombustíveis**. 2017. 103 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

OLIVEIRA, Jairo Pinto de. **Estudo da Geração de Biodiesel a partir de Resíduos Oleosos do Saneamento Ambiental**. 2012. 93 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

OLIVEIRA, Meriele Cristina Costa Rodrigues de. **Degradação termoquímica de lodo residual proveniente da indústria de processamento da soja visando à produção de bioóleo**. 2020. 81 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2020.

PEDRONI, Alex Fieni. **Simulação baseada em planejamento experimental de um reator de leito fluidizado para gaseificação de bagaço de cana**. 2015. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2015.

PEDROZA, Marcelo Mendes. **Bio-óleo e Biogás da degradação termoquímica de lodo de esgoto doméstico em cilindro rotativo**. 2011. 236 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

PEREIRA, Francisco Sávio Gomes. **Biomassa de oleaginosa como fonte alternativa de energia**. 2007. 103 f. Monografia (Especialização) - Curso de Tecnologia Ambiental, Associação Instituto de Tecnologia de Pernambuco, Recife, 2007.

PINHO, David Mark Mendes. **Lodo de esgoto da ETE Samambaia e Chlorella sp. como matérias primas para a produção de biodiesel**. 2017. 75 f. Monografia (Especialização) - Curso de Tecnologias Química e Biológica, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

PINHO, Lorena de Andrade; TEIXEIRA, Francisco Lima Cruz. 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, v. 2, n. 6, p. 141-161, out. 2015.

REGITANO-D'ARCE, Marisa Aparecida Bismara; VIEIRA, Thais Maria Ferreira de Souza. **Produção de biodiesel exige agentes e cuidados específicos**. Visão Agrícola, Piracicaba, 2008.

RIBEIRO, Ricardo da Silva. **Investigação experimental e integração de um sistema de geração de energia elétrica por gaseificação de biomassa para comunidades isoladas**. 2007. 106 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

RIBEIRO, Vinícius Souza. Mercado do biodiesel no brasil: uma análise da produção, desenvolvimento tecnológico e objetivos sociais do pnpb. **Desenvolvimento Regional em Debate**, Mafra, v. 9, n. 2, p. 18-41, nov. 2019. Mensal.

SANTOS, Cleiton de Sousa. **Processamento da soja (Glycine max (L.) Merrill): Um enfoque na qualidade de fabricação do óleo comestível**. 2015. 16 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Produção, Universidade da Rio Verde, Rio Verde, 2015.

SANTOS, Kássia Graciele dos. **Aspectos fundamentais da pirólise de biomassa em leite de jorro: fluidodinâmica e cinética do processo**. 2011. 166 f. Monografia

(Especialização) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

SANTOS, Sóstenes Fernandes dos *et al.* Avaliação das características químicas por cg-em da fase gasosa do lodo digerido residual obtida a partir da pirólise lenta. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, Ribeirão Preto, v. 7, n. 4, p. 465-481, mar. 2018. Mensal.

SILVA, Fabrício Machado *et al.* Rotas tecnológicas empregadas no aproveitamento de resíduos da indústria da soja. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, Ribeirão Preto, v. 8, n. 1, p. 326-363, maio 2019. Mensal.

SILVA, Fabrício Machado *et al.* Conversão térmica do lodo da estação de despejo da agroindústria da soja. **Brazilian Journal Of Development**, [S.L.], v. 6, n. 1, p. 3000-3008, 2020. Brazilian Journal of Development. <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv6n1-217>.

TOLEDO, Eduardo Coselli Vasco de. **Modelagem, simulação e controle de reatores catalíticos de leito fixo**. 1999. 391 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

VIDAL, Maria de Fatima. PRODUÇÃO E USO DE BIOCOMBUSTÍVEIS NO BRASIL. **Caderno Setorial: ETENE**, Fortaleza, v. 4, n. 79, p. 13-26, maio 2019.