



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA MECÂNICA

MARIA VANDERLY NASCIMENTO CAVALCANTE

PROPOSTA DE APROVEITAMENTO INTEGRADO DA BIOMASSA CÁRTAMO
(*CARTHAMUS TINCTORIUS L.*)

FORTALEZA

2024

MARIA VANDERLY NASCIMENTO CAVALCANTE

PROPOSTA DE APROVEITAMENTO INTEGRADO DA BIOMASSA CÁRTAMO
(*CARTHAMUS TINCTORIUS* L.)

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Processos, equipamentos e sistemas para energias renováveis

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Maria Alexsandra de Sousa Rios

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Ada Amélia Sanders Lopes

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- C364 Cavalcante, Maria Vanderly Nascimento.
Proposta de aproveitamento integrado da biomassa cártamo (*carthamus tinctorius* L.) / Maria Vanderly Nascimento Cavalcante. – 2024.
85 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2024.
Orientação: Profa. Dra. Maria Alexsandra de Sousa Rios.
Coorientação: Profa. Dra. Ada Amélia Sanders Lopes.
1. Oleaginosas. 2. Cártamo. 3. Biocombustível. 4. Biomassa. 5. Bioenergia.. I. Título.
CDD 620.1
-

MARIA VANDERLY NASCIMENTO CAVALCANTE

PROPOSTA DE APROVEITAMENTO INTEGRADO DA BIOMASSA CÁRTAMO
(*CARTHAMUS TINCTORIUS* L.)

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Processos, equipamentos e sistemas para energias renováveis

Aprovada em: 22/07/2024

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dra. Maria Aleksandra de Sousa Rios (Orientadora)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof.^a Dra. Ada Amélia Sanders Lopes (Coorientadora)

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dra. Francisca Imilena Pereira de Oliveira

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Tassio Lessa do Nascimento

Instituto Federal do Rio Grande do Norte (IFRN)

AGRADECIMENTOS

À Deus que abençoou para que tudo fosse realizado. Também agradecer minha família, que sempre está ao meu lado me apoiando em todas as situações e ao Ruan, por todo companheirismo e ajuda na escrita.

A todos do GRINTEQUI, da coordenação do PPGEM, na pessoa do Valdir e também do NPL que de maneira direta ou indireta contribuíram para este trabalho. Aos colegas de trabalho Kennedy, Eva, Marliete e Lucas que estiveram de modo mais intenso comigo nesta trajetória.

À professora Dr.^a Maria Alexsandra, por toda dedicação na pesquisa e na orientação, foi parte fundamental para concretização do mestrado.

À professora Dr.^a Ada Amélia, por sua solicitude de sempre, desde a graduação e agora como co-orientadora.

Aos meus amigos e irmãos da comunidade Shalom, por todo apoio e incentivo durante esses anos de estudo.

À FUNCAP por todo incentivo financeiro.

“Os homens da ciência só ajudarão realmente a humanidade se conservarem o sentido da transcendência do homem sobre o mundo e de Deus sobre o homem” (Paulo II, S. J., 1990).

RESUMO

Diante da questão energética, a busca pela diversificação e o aprimoramento de novas fontes para obtenção de uma energia cada vez mais sustentável se tornou uma necessidade mundial. Nesse sentido, este trabalho avaliou o uso das sementes de cártamo (*Carthamus tinctorius* L.) como potencial fonte renovável na produção de biocombustível, realizando um aproveitamento integrado da mesma, desde a produção e uso do óleo para biodiesel, até as análises térmicas das sementes após a extração do óleo visando a produção de bioenergia. Na extração do óleo, o método utilizado foi o Soxhlet e encontrou-se que o rendimento da extração ficou em torno de 29,32%. O índice de acidez do óleo e saponificação foram de 0,749 mg KOH/g e 180,811 mg KOH/g, respectivamente, revelando assim o potencial desta oleaginosa para produção de biodiesel. O óleo também foi avaliado pelas caracterizações de massa específica e viscosidade cinemática, além de caracterizações estruturais via FTIR, RMN ^1H e estabilidade oxidativa. O processo de produção do biodiesel se deu por meio da transesterificação em reator batelada. Alguns parâmetros avaliados conforme resolução ANP Nº 920/2023 foram massa específica a 20 °C, Viscosidade cinemática a 40 °C, Índice de acidez e Estabilidade à oxidação a 110 °C. O teor de éster foi avaliado por meio de RMN ^1H . Na produção de biomassa com o farelo, as análises realizadas foram imediata (teor de cinzas (NBR 16550), voláteis (ASTM D3175-20) e carbono fixo (ASTM D3172-13)) e elementar (teor em massa de nitrogênio (%N), hidrogênio (%H), carbono (%C), oxigênio (%) e enxofre (%S)), e teor de umidade (NBR 16550), por meio das quais realizou-se a estimativa do poder calorífico da biomassa. O biodiesel produzido apresentou índice de acidez de 0,2 mg KOH/g, massa específica de 881,7 Kg/cm³, viscosidade a 40 °C de 4,1 mm²/s e conversão em ésteres de 95,24%. A biomassa obteve teor de umidade (%) em torno de 11,84±0,13, teor de cinzas (%) de 8,68 ± 0,06, teor de massa de voláteis (%) de 79,44 ± 0,28 e carbono fixo (%) de 11,88±0,28. Na análise elementar, a composição média encontrada foi 45,24 de %C, 6,06 de %H, 35,33 de % O, 4,68 de % N e 0,00 de %S. O poder calorífico apresentou valores entre 17 MJ/kg e 19 MJ/kg, aproximadamente. Assim, por meio destes resultados pode-se testificar a proposta do aproveitamento integrado das sementes de cártamo como fonte de produção energética.

Palavras-chave: oleaginosas; cártamo; biocombustível; biomassa; bioenergia.

ABSTRACT

Faced with the energy issue, the search for diversification and improvement of new sources to obtain increasingly sustainable energy has become a global need. In this sense, this work evaluated the use of safflower seeds (*Carthamus tinctorius* L.) as a potential renewable source in the production of biofuel, carrying out an integrated use of it, from the production and use of oil for biodiesel, to thermal analysis of the seeds. after oil extraction for bioenergy production. In oil extraction, the method used was Soxhlet and it was found that the extraction yield was around 29,32%. The oil's acidity value and saponification were 0.749 mg KOH/g and 180.811 mg KOH/g, respectively, thus revealing the potential of this oilseed for biodiesel production. The oil was also evaluated by specific mass and kinematic viscosity characterizations, in addition to structural characterizations via FTIR, ^1H NMR and oxidative stability. The biodiesel production process took place through transesterification in a batch reactor. Some parameters evaluated according to ANP resolution N° 920/2023 were specific mass at 20 °C, Kinematic viscosity at 40 °C, Acid index and Oxidation stability at 110 °C. The ester content was evaluated using ^1H NMR. In the production of biomass with bran, the analyzes carried out were immediate (ash content (NBR 16550), volatile (ASTM D3175-20) and fixed carbon (ASTM D3172-13)) and elemental (nitrogen mass content (%N), hydrogen (%H), carbon (%C), oxygen (%) and sulfur (%S)), and moisture content (NBR 16550), through which the calorific value of biomass was estimated. The biodiesel produced had an acidity value of 0.2 mg KOH/g, specific mass of 881.7 kg/cm³, viscosity at 40 °C of 4.1 mm²/s and conversion into esters of 95.24%. The biomass had a moisture content (%) of around 11.84 ± 0.13 , ash content (%) of 8.68 ± 0.06 , volatile mass content (%) of 79.44 ± 0.28 and fixed carbon (%) of 11.88 ± 0.28 . In the elemental analysis, the average composition found was 45.24 %C, 6.06 %H, 35.33 % O, 4.68 % N and 0.00 %S. The calorific value show between 17 MJ/kg and 19 MJ/kg, approximately. Thus, through these results it is possible to testify the proposal for the integrated use of safflower seeds as a source of energy production.

Keywords: oilseeds; safflower; biofuel; biomass; bioenergy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Energia total primaria para suprir a carência de energia mundial, entre os anos de 2020-2050, sobre um cenário de queda de 1,5 °C no aquecimento global..... | 17 |
| Figura 2 - Bagaço de cana-de-açúcar..... | 18 |
| Figura 3 - Pellets para uso como biomassa..... | 18 |
| Figura 4 - Processo do pré-tratamento da amostra antes da extração..... | 21 |
| Figura 5 - Componentes do extrator Soxhlet..... | 22 |
| Figura 6 - Montagem do aparato para extração Soxhlet..... | 22 |
| Figura 7 - Prensa contínua “Expeller” | 23 |
| Figura 8 - Evolução da mistura do biodiesel ao diesel no Brasil..... | 26 |
| Figura 9 - Reação de transesterificação..... | 30 |
| Figura 10 - Planta de Cártamo..... | 34 |
| Figura 11 - Semente de cártamo..... | 34 |
| Figura 12 – Óleo de Cártamo..... | 35 |
| Figura 13 - Esquema da extração do óleo de cártamo..... | 39 |
| Figura 14 - Processo de degomagem do óleo de cártamo..... | 40 |
| Figura 15 - Produção de biodiesel de cártamo..... | 42 |
| Figura 16 - Farelo de cártamo..... | 46 |
| Figura 17 - Cadinhos contendo amostras pós análise de teor de cinzas..... | 47 |
| Figura 18 - Cadinhos contendo amostras pós análise de teor de massa de voláteis..... | 49 |
| Figura 19 - Espectro FTIR do óleo de cártamo..... | 53 |
| Figura 20 - Espectro de RMN ¹ H do óleo de cártamo..... | 55 |
| Figura 21 - Espectro dos grupos funcionais do biodiesel de cártamo..... | 58 |
| Figura 22 - Espectro de ¹ H do biodiesel de cártamo..... | 69 |
| Figura 23 - Integração dos sinais do espectro de RMN ¹ H do biodiesel de cártamo..... | 61 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Produção e capacidade instalada de produção de biodiesel no Brasil para 2030..... | 26 |
| Tabela 2 - Produção de biodiesel no Brasil..... | 27 |
| Tabela 3 - Consumo e emissões evitadas por meio do uso do biodiesel..... | 29 |
| Tabela 4 - Perfil de ácidos graxos do óleo de cártamo..... | 35 |
| Tabela 5 - Lista de equipamentos..... | 37 |
| Tabela 6 - Lista de reagentes..... | 38 |
| Tabela 7 - Equações utilizadas para cálculo de poder calorífico..... | 50 |
| Tabela 8 - Rendimento da extração..... | 50 |
| Tabela 9 - Valores de índice de acidez e saponificação do óleo de cártamo..... | 51 |
| Tabela 10 - Índice de acidez e saponificação do óleo de cártamo de acordo com a literatura..... | 52 |
| Tabela 11 - Valores de densidade e viscosidade do óleo de cártamo..... | 53 |
| Tabela 12 - Análise do óleo de cártamo por FTIR..... | 54 |
| Tabela 13 - Caracterização das bandas por meio do RMN ¹ H..... | 55 |
| Tabela 14 - Resultado das análises físico-químicas do biodiesel de cártamo..... | 56 |
| Tabela 15 - Propriedades de biodiesel utilizados para comercialização..... | 57 |
| Tabela 16 – Fragmentos da molécula de biodiesel de cártamo..... | 60 |
| Tabela 17 - Valores em quadruplicata do teor de umidade do farelo de cártamo..... | 62 |
| Tabela 18 - Valores de teor de cinza do farelo de cártamo..... | 63 |
| Tabela 19 - Massa de voláteis do farelo de cártamo..... | 64 |
| Tabela 20 - Teor de carbono fixo do farelo de cártamo..... | 65 |
| Tabela 21 - Análise dos elementos constituintes do farelo de cártamo..... | 66 |
| Tabela 22 - Poder Calorífico Superior do farelo de cártamo nesta pesquisa..... | 67 |
| Tabela 23 - Poder calorífico de algumas matérias-primas utilizadas para produção de biomassa..... | 67 |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 13 |
| 1.1 Justificativa..... | 14 |
| 2 OBJETIVOS..... | 15 |
| 2.1 Objetivo geral..... | 15 |
| 2.2 Objetivos específicos..... | 15 |
| 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 16 |
| 3.1 Energias renováveis..... | 16 |
| 3.2 Biomassa..... | 17 |
| 3.2.1 Caracterização de biomassa..... | 19 |
| 3.2.1.1 <i>Análise imediata.....</i> | 20 |
| 3.2.1.2 <i>Análise elementar.....</i> | 20 |
| 3.2.1.3 <i>Poder calorífico.....</i> | 20 |
| 3.3 Extração de óleos vegetais..... | 21 |
| 3.3.1 <i>Extração por solvente.....</i> | 22 |
| 3.3.2 <i>Extração por prensagem.....</i> | 23 |
| 3.4 Purificação de óleos vegetais..... | 23 |
| 3.4.1 <i>Degomagem</i> | 24 |
| 3.4.2 <i>Neutralização.....</i> | 24 |
| 3.4.3 <i>Branqueamento.....</i> | 24 |
| 3.4.4 <i>Desodorização.....</i> | 25 |
| 3.5 Biodiesel..... | 25 |
| 3.5.1 <i>Fontes de oleaginosas no Brasil para produção de biodiesel.....</i> | 27 |
| 3.5.2 <i>Análise das emissões com uso de biodiesel.....</i> | 28 |
| 3.6 Métodos de produção de biodiesel..... | 29 |
| 3.6.1 <i>Transesterificação.....</i> | 29 |
| 3.6.2 <i>Esterificação.....</i> | 30 |
| 3.6.3 <i>Craqueamento.....</i> | 31 |
| 3.7 Parâmetros de qualidade do óleo e biodiesel..... | 31 |

| | |
|--|-----------|
| 3.7.1 Parâmetros físico-químicos..... | 31 |
| 3.7.1.1 Índice de Acidez..... | 32 |
| 3.7.1.2 Densidade..... | 32 |
| 3.7.1.3 Viscosidade..... | 32 |
| 3.8 Métodos de caracterização estrutural do óleo e biodiesel..... | 33 |
| 3.8.1 Espectroscopia na Região do Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)..... | 33 |
| 3.8.2 Ressonância Magnética Nuclear (RMN) | 34 |
| 3.9 Cártamo como cultura energetica..... | 34 |
| 4 MATERIAIS E MÉTODOS..... | 37 |
| 4.1 Reagentes e equipamentos..... | 37 |
| 4.2 Extração do óleo de Cártamo..... | 38 |
| 4.3 Degomagem do óleo de cártamo..... | 39 |
| 4.4 Reação de transesterificação..... | 40 |
| 4.5 Caracterização físico-química do óleo e biodiesel de cártamo..... | 42 |
| 4.5.1 Índice de saponificação..... | 42 |
| 4.5.2 Índice de acidez..... | 43 |
| 4.5.3 Densidade e viscosidade..... | 44 |
| 4.6 Métodos de caracterização estrutural do óleo e biodiesel..... | 44 |
| 4.6.1 Espectroscopia de absorção na Região do Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)..... | 44 |
| 4.6.2 Ressonância Magnética Nuclear (RMN)..... | 45 |
| 4.7 Tratamento do farelo para biomassa..... | 46 |
| 4.8 Análise imediata..... | 46 |
| 4.8.1 Teor de umidade..... | 46 |
| 4.8.2 Teor de cinzas..... | 46 |
| 4.8.3 Massa de voláteis..... | 48 |
| 4.8.4 Carbono fixo..... | 49 |
| 4.9 Análise elementar..... | 49 |
| 4.10 Poder Calorífico Superior (PCS) | 49 |

| | |
|--|-----------|
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 50 |
| 5.1 Rendimento da extração e análises físico-químicas do óleo de cártamo..... | 50 |
| <i>5.1.1 Rendimento da extração.....</i> | <i>50</i> |
| <i>5.1.2 Índice de acidez e saponificação.....</i> | <i>51</i> |
| <i>5.1.3 Densidade e viscosidade do óleo.....</i> | <i>52</i> |
| 5.2 Caracterização estrutural do óleo de cártamo..... | 53 |
| <i>5.2.1 Espectroscopia de absorção na Região do Infravermelho com transformada de Fourier (FTIR).....</i> | <i>53</i> |
| <i>5.2.2 Ressonância Magnética Nuclear (RMN).....</i> | <i>54</i> |
| 5.3 Análises físico-químicas do biodiesel de cártamo..... | 56 |
| 5.4 Caracterização estrutural do biodiesel de cártamo..... | 58 |
| <i>5.4.1 Espectroscopia de absorção na Região do Infravermelho com transformada de Fourier (FTIR).....</i> | <i>58</i> |
| <i>5.4.2 Ressonância Magnética Nuclear (RMN).....</i> | <i>59</i> |
| 5.5 Análise imediata do farelo de cártamo..... | 62 |
| <i>5.5.1 Teor de umidade.....</i> | <i>62</i> |
| <i>5.5.2 Teor de cinzas.....</i> | <i>63</i> |
| <i>5.5.3 Massa de voláteis.....</i> | <i>64</i> |
| <i>5.5.4 Carbono fixo.....</i> | <i>64</i> |
| 5.6 Análise elementar do farelo de cártamo..... | 66 |
| 5.7 Poder Calorífico Superior (PCS) do farelo de cártamo..... | 66 |
| 6 CONCLUSÃO..... | 68 |
| REFERÊNCIAS..... | 70 |

1 INTRODUÇÃO

O biodiesel, atualmente, vem se apresentando como uma tecnologia bem consolidada no mundo e diversos tipos de oleaginosas, gorduras animais e óleos residuais, podem ser utilizados para sua produção (Moura, 2019; Neto *et al.*, 2023). O Brasil por ser um país com grande extensão de terra e com diferentes variações de vegetação, solo e clima, possui vantagem em relação a outros países, pois há uma rica biodiversidade e muitas espécies de planta se adaptam ao clima corroborando para que haja uma vasta opção de matérias-primas para produção deste biocombustível.

O uso do biodiesel nos motores ainda é realizado por meio da sua mistura ao diesel de petróleo, e no Brasil, o crescente percentual do biocombustível na mistura, que hoje chega a 14%, de acordo com a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2024), faz com que as pesquisas com novas fontes sejam instigadas.

Segundo dados do Balanço Energético Nacional (BEN, 2023) com base no ano de 2022, as principais matérias-primas utilizadas na produção do biodiesel são óleo de soja (65,8%), materiais graxos (16,2%), Gordura bovina (7,9%), entre outros. Pode-se observar que a produção por meio destes produtos advém do seu uso em outras atividades econômicas, porém o incremento de novos insumos para produção de biodiesel se apresenta como uma alternativa viável, pois as fontes para produção deste biocombustível no Brasil ainda são pouco exploradas.

Outra finalidade energética de insumo que se torna emergente dentro das energias renováveis é a biomassa sólida utilizada em substituição a lenha e carvão vegetal em diversos setores, como por exemplo nas termelétricas.

Hoje no Brasil, o maior insumo utilizado como fonte de matéria-prima para produção da bioenergia é o bagaço da cana-de-açúcar, e sua produção é bem avançada, segundo dados do Balanço Energético Nacional (BEN, 2023). Das 358 usinas de cana-de-açúcar, 244 comercializam o bagaço da cana como fonte de bioenergia, isso contribui para uma participação bastante significativa deste insumo no mercado de energia renovável bem como na diminuição do desmatamento e emissão de gases poluentes na atmosfera. Contudo, novas matérias-primas para diversificar o setor e potencializar a produção se torna uma alternativa promissora diante das riquezas de matéria-prima existentes no país.

Neste sentido, oleaginosas como o Cártamo (*Carthamus tinctorius L.*) se mostram como uma fonte energética atrativa para as pesquisas. Encontra-se na literatura diversos usos desta matéria-prima, que se dá desde a utilização em medicamentos até a utilização para produção energética.

De acordo com Queiroga *et al.*, (2021), o óleo de cártamo é reconhecido por sua alta qualidade, devido aos altos níveis de ácidos graxos, como linoleico e oleico, por isso é utilizado nas dietas humanas. O cártamo também é utilizado na produção de tintas, resinas alquídicas e revestimentos (Oyen; Umali, 2007).

O óleo de cártamo pode ser ainda utilizado na produção de biodiesel. Diversos estudos como o de Rashid; Anwar (2008), testificaram o sucesso do biocombustível em motores de ignição por compressão e diversos outros como Braga *et al.*, (2023); Hashemi *et al.*, (2020); Nogalis-Delgado *et al.*, (2021) apresentaram bons resultados de propriedades dos ésteres formados.

A torta de cártamo, que são os resíduos provenientes da extração do óleo, também possui algumas finalidades já constatadas na literatura como servir de ração para gados bem como para aves por ser rico em proteínas (Pereira, 2013; Oliveira, 2016) e na produção de Biochar pelo processo de pirólise (Bispo, 2022). Contudo, novas pesquisas com a utilização desta torta para produção de biomassa com fins energéticos se torna uma alternativa de aproveitamento total da semente de Cártamo.

Assim, este estudo propõe o aproveitamento integrado da semente de cártamo para fins energéticos, onde primeiramente é extraído o óleo da semente para produção de biodiesel e do farelo é proposto a obtenção de biocombustível sólido. A pesquisa foi sustentada por resultados de análises teóricas e analíticas.

1.1 Justificativa

Ao longo dos anos a produção de biocombustíveis tem-se tornado emergente não só para preservação ambiental mais também para suprir a necessidade mundial. O Brasil é um potencial na produção sustentável por sua riqueza de solos e de biodiversidade.

A produção de biodiesel por meio de oleaginosas é alvo de várias pesquisas, contudo, o aproveitamento de toda matéria-prima (farelo e óleo) torna-a mais atrativa comercialmente. Neste sentido, estudos com a semente de cártamo (*Carthamus Tinctorius* L.) tem sido avaliado, pois a semente produz óleo com características positivas para produção de biodiesel e o farelo, rico em proteínas vem sendo utilizado para ração animal e produção de biocarvão. No entanto, é possível analisar ainda, a produção de bioenergia por meio do farelo, finalidade da qual não foi encontrado estudos na literatura.

De acordo com o Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2018), a biomassa é uma fonte de energia renovável que pode substituir combustíveis fósseis em muitas aplicações que requerem altas temperaturas e o Brasil prevê reduzir a emissão de gases do efeito estufa até 2030 a partir do

aumento das parcelas de bioenergéticos na matriz, mais precisamente a produção de eletricidade por meio da biomassa e outras renováveis.

Este trabalho se justifica, portanto, no aproveitamento integrado da semente de cártamo para fins energéticos agregando mais um valor a esta oleaginosa, onde além da produção de óleo e biodiesel, o qual já se sabe apresentar boas características, por meio do farelo, resíduo da extração do óleo, se propôs a produção de biomassa com fins energéticos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Propor um aproveitamento integral da semente de cártamo (*Carthamus tinctorius* L.).

2.2 Objetivos específicos

- a) Extrair o óleo da semente de cártamo pelo método Soxhlet;
- b) Caracterizar por meio de análises físico-química e estrutural o óleo;
- c) Produzir biodiesel de cártamo por transesterificação alcalina;
- d) Realizar caracterizações físico-químicas e estruturais do biodiesel;
- e) Caracterizar o farelo de cártamo através de análises imediata, elementar e Poder Calorífico Superior (PCS);
- f) Avaliar o potencial energético do farelo de cártamo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Energias renováveis

Os recursos naturais renováveis são capazes de se regenerar em períodos relativamente curtos, por isso são considerados inesgotáveis e são as fontes das energias renováveis. As energias renováveis se consolidam, sob a égide de energia limpa por contribuírem com a diversificação da matriz energética e serem menos impactantes no ambiente ecológico (Farias *et al.*, 2021).

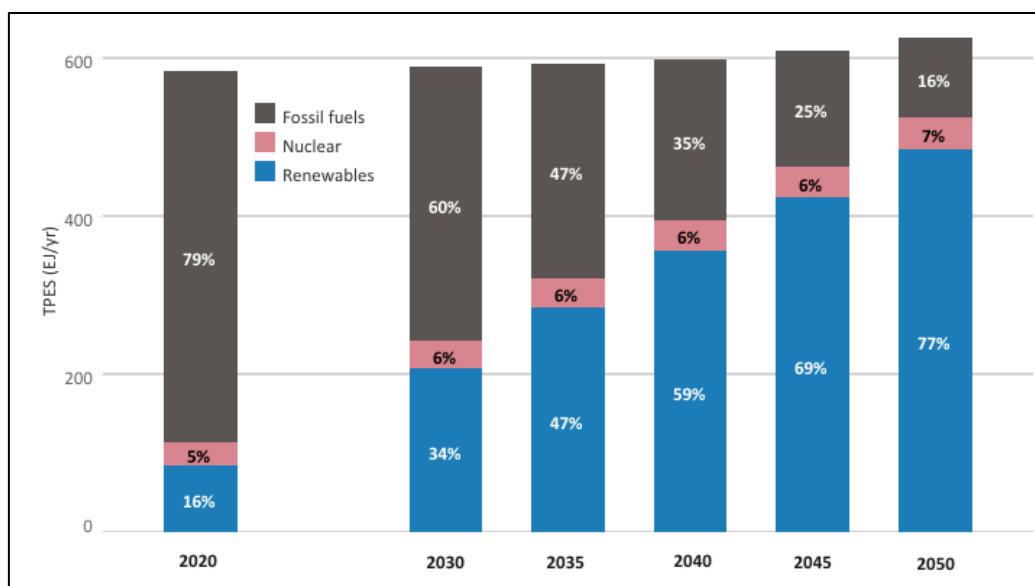
As energias renováveis podem ainda ser conceituada, segundo Júnior (2013) como aquelas em que sua existência e disponibilidade é contínua. São exemplos dessas fontes a energia solar/fotovoltaica, eólica, geotérmica, das marés e da biomassa. No caso pode-se ter essa energia na forma de energia elétrica, ou na forma de biocombustíveis.

Ao longo dos anos estas formas de energia têm ganhado destaque por serem viáveis e vantajosas em relação aos combustíveis fósseis. Reduzem significativamente as emissões dos gases do efeito estufa e possui abundância de matéria-prima no mundo (SEBRAE, 2023).

Segundo dados do Balanço Energético Nacional (BEN, 2023) a participação das energias renováveis no Brasil está em torno de 47,4%, um pouco abaixo do ano de 2020, onde a participação chegou a ser 48%. De acordo ainda com o mesmo documento, as energias renováveis que se usa no país são biomassa de cana-de-açúcar (15,4%), hidráulica (12,5%), eólica (2,3%), lenha e carvão vegetal (9,0%), lixo e outras renováveis (7,0%) bem como a energia solar (1,2%), onde nessa repartição “lixo e outras renováveis” encontra-se a participação do biodiesel.

A transição energética é um fato que se almeja no mundo, e nesta perspectiva recente relatório do International Renewable Energy Agency (IRENA, 2023) para alcançar o limitante de 1,5 °C no aquecimento global, meta abordada no Acordo de Paris, será necessário reduzir as emissões de dióxido de carbono (CO_2) a cerca de 37 gigas toneladas (Gt) a partir dos níveis de 2022 e alcançar emissões líquidas zero no setor energético até 2050. Neste cenário, um gráfico com a matriz energética mundial foi proposto para até o ano de 2050, mostrado na Figura 1.

Figura 1- Energia total primária para suprir a carência de energia mundial, entre os anos de 2020-2050, sobre um cenário de queda de 1,5 °C no aquecimento global.



Fonte: IRENA, (2023)

Observa-se que a perspectiva mundial é que a participação das energias renováveis chegue a 77% do total, enquanto que a participação dos derivados de combustível fóssil se torne apenas 16%, sendo, portanto, um cenário praticamente contrário ao observado em 2020.

Assim, diante desta busca pela transição das fontes de energia para que isto realmente possa acontecer é necessário o investimento nas fontes existentes bem como seu aprimoramento, a busca por novas fontes e o crescimento tecnológico dos países para se adaptar a este novo cenário.

O Brasil por possuir uma vasta biodiversidade, se torna um país promissor na transição energética, podendo ser modelo no crescimento tecnológico para aprimorar as fontes de energia renovável existentes bem como na busca por novas fontes de matérias-primas, nos diversos setores de energia, desde a produzida pelos ventos, incidência solar, até a produzida pelas águas e as energias provenientes de oleaginosas e biomassa.

3.2 Biomassa

Biomassa é todo material orgânico, não fóssil, que tenha conteúdo de energia química no seu interior, o que inclui todas as vegetações aquáticas ou terrestres, árvores, biomassa virgem, lixo orgânico, resíduos de agricultura, esterco de animais e outros tipos de restos industriais (Vidal; Hora, 2011).

Outros autores como Seye, (2003) afirma ainda que o termo biomassa é utilizado para denominar o grupo de produtos energéticos e matérias-primas renováveis, originados a partir da

matéria orgânica formada por via biológica. Do ponto de vista energético, biomassa é todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica (de origem animal ou vegetal) que pode ser utilizado para produção de energia.

A biomassa possui grande versatilidade, uma vez que ela pode ser queimada para a geração de calor ou eletricidade, ou ainda ser convertida em combustíveis líquidos, sólidos ou gasosos por meio de diversos processos físicos, químicos e biológicos (Cieslinski, 2014). Com essas transformações, a biomassa sólida e volumosa com baixa concentração energética, pode ser transformada em combustíveis com uma maior densidade energética, permitindo a viabilidade econômica de seu armazenamento e transporte (Haykiri-açma, 2003).

Os resíduos de natureza lignocelulósica estão entre as biomassas mais geradas no mundo e são os mais utilizados até o momento (Vieira *et al.*, 2020; Grotto *et al.*, 2021). A biomassa lignocelulósica pode ser obtida de diferentes matérias-primas tais como: madeira (florestas, bosques, cavacos desclassificados de eucalipto e pinus, serragem, etc.); resíduos agrícolas de cereais (casca de arroz, sabugo do milho, palha do trigo), bagaço de cana-de-açúcar e de sorgo sacarino; resíduos da indústria de papel e celulose; e resíduos municipais (Junior, 2013).

Nesse contexto, a cana-de-açúcar é uma das maiores culturas agrícolas do mundo, com uma produção anual de cerca de 1,9 bilhões de toneladas, sendo o Brasil o maior produtor mundial (Bilatto *et al.*, 2020; Devi *et al.*, 2020; Grotto *et al.*, 2021). Nas Figuras 2 e 3, observa-se o bagaço de cana-de-açúcar utilizado na produção energética e os pellets também utilizado como biomassa.

Figura 2- Bagaço de cana-de-açúcar



Fonte: Canaoeste, (2024)

Figura 3- Pellets para uso como biomassa



Fonte: Marrari, (2024)

A energia com base na biomassa pode ser classificada em energia primária, existente no estado natural da biomassa, como na madeira e nos resíduos agrícolas, ou em energia secundária, existente no estado não natural da biomassa, como no carvão vegetal e na eletricidade. Em razão

dos baixos níveis energéticos da biomassa em seu estado bruto, apenas pequena parte da energia primária é destinada ao consumo final (Vidal; Hora, 2011).

Analizando as tecnologias das fontes energéticas alternativas renováveis, já suficientemente maduras para serem empregadas comercialmente, somente a biomassa, utilizada em processos modernos com elevada eficiência tecnológica, possui a flexibilidade de suprir energéticos tanto para a produção de energia elétrica quanto para mover o setor de transportes (Cortez *et al.*, 2008).

A energia da biomassa ainda promove a criação de cadeias de valor locais, gera muitos empregos e alavanca o desenvolvimento regional. Sua comercialização transfere renda desde as indústrias e consumidores urbanos para o campo e os produtores rurais (BRASIL, 2018).

A combustão representa a maneira “mais simples” e direta da conversão da biomassa, onde, a energia das ligações químicas é liberada na forma de calor. Sua utilização ainda pode estar diretamente ligada à produção de eletricidade, por meio do uso de caldeiras e turbinas a gás (Dori, 2022; Klason, 2006; Araújo, 2008)

Durante o uso da biomassa, diferentes características e composições podem influenciar a sua combustão. De maneira geral, o uso com elevados teores de umidades e/ou cinzas pode ocasionar problemas com a ignição ou eficiência da combustão, por exemplo. Como as propriedades físicas da biomassa são muito amplas, se faz necessário a caracterização das propriedades que podem influenciar o comportamento do material (Araújo, 2008).

Diante das potencialidades sociais e econômicas da produção de biomassa pode-se considerar necessário a diversificação da matéria-prima produtora. Pode-se considerar ainda fontes onde não haja competição com fins alimentícios, já que no Brasil encontra-se uma infinidade de possibilidades.

3.2.1 Caracterização da biomassa

A análise composicional da biomassa pode ser dividida em várias etapas. Autores como Júnior (2013), destacam essas etapas como a determinação de sólidos totais, cinzas, proteínas, extrativos (materiais solúveis de meio aquoso e em meio orgânico), carboidratos estruturais, lignina e amido.

Outros autores como Marafon *et al.*, (2016) e Lora; Venturini, (2012) destacam a análise da composição química imediata, a química elementar, o poder calorífico, a composição granulométrica e a quantidade de cinzas, como informações fundamentais para uso apropriado da biomassa e uso empregado em sua plena capacidade.

Nesta seção, para caracterizar a biomassa, serão estudadas as análises imediata, elementar e o poder calorífico.

3.2.1.1 *Análise imediata*

A análise da composição imediata nos fornece informações a respeito da quantidade, em massa, de umidade, carbono fixo, voláteis e cinzas. O rendimento de carbono fixo apresenta uma relação diretamente proporcional aos teores de lignina, extrativos e densidade da biomassa e inversamente proporcional ao teor de holocelulose. Já os voláteis apresentam um papel importante no processo de ignição e etapas iniciais da combustão da biomassa, pois se degradam mais facilmente e ajudam a manter a chama da combustão (Marafon *et al.*, 2016; Cortez *et al.*, 2008).

A presença de umidade na biomassa acarreta na redução do seu poder calorífico, pois parte do calor gerado é consumido na evaporação da água e também no aquecimento dos vapores para atingir a temperatura dos demais gases, além de aumentar os custos com transporte, dificultar a queima, aumenta o volume dos produtos de combustão e a quantidade de monóxido de carbono presente no gás de exaustão (Santos *et al.*, 2013; Marafon *et al.*, 2016).

3.2.1.2 *Análise elementar*

A determinação da composição elementar da biomassa desempenha papel fundamental para entender o comportamento energético, pois uma variação de 1% de carbono e cinzas altera o poder calorífico da amostra em 0,39 MJ/kg e 0,2 MJ/kg, respectivamente (Marafon *et al.*, 2016).

Por meio da análise elementar da biomassa é possível determina o teor percentual, em massa, dos principais elementos químicos que constituem a amostra, como o hidrogênio (H), enxofre (S), carbono (C), oxigênio (O) e nitrogênio (N).

Os métodos para determinação desses elementos são muito variados, entretanto, a introdução de analisadores elementares automáticos trouxe avanços consideráveis, permitindo análises mais rápidas e confiáveis (Jimenez; Ladha, 1993).

3.2.1.3 *Poder calorífico*

O poder calorífico é a propriedade físico-química mais importante a considerar na escolha de um combustível para uso em processos termoquímicos. O poder calorífico, obtido experimentalmente empregando-se uma bomba calorimétrica, pode ser definido como a quantidade de energia na forma de calor durante a combustão completa da unidade de massa do combustível.

Sua quantificação se dá em termos da energia por conteúdo por quantidade de massa, sendo expressa em KJ/kg (Jenkins, 1998; Rendeiro, 2008; Marafon *et al.*, 2016).

De acordo com Lora; Venturini, (2012), o poder calorífico pode ser classificado em poder calorífico superior (PCS), que representa a quantidade máxima de energia obtida da transferência de calor do combustível, e poder calorífico inferior (PCI), correspondente a quantidade de calor liberado na combustão quando não se considera o calor latente de condensação da umidade presente e da água formada pela oxidação do hidrogênio presente no combustível.

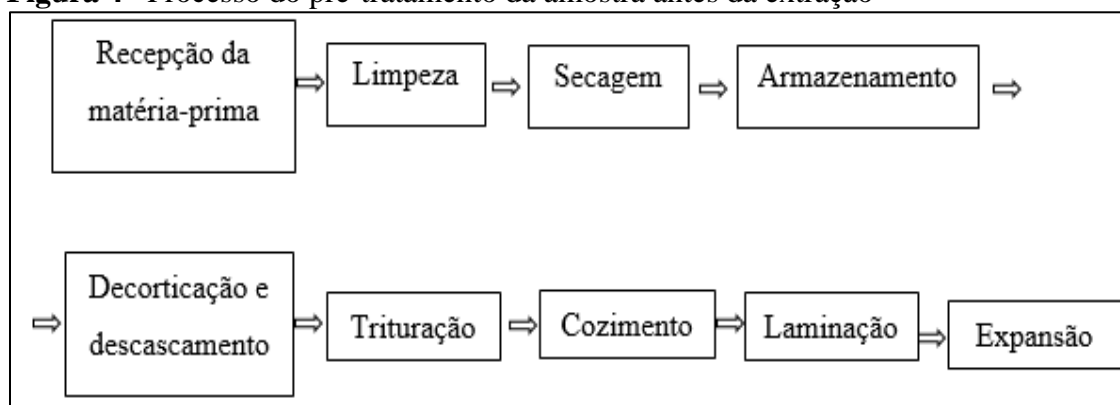
3.3 Extração de óleos vegetais

Os processos de extração de óleos vegetais são utilizados desde os tempos antigos. Afirma Nunes (2013), que as extrações têm como objetivo separar o óleo ou a gordura da matéria bruta de sua fonte, obtendo um produto isento de impurezas o quanto possível. Diversas fontes vegetais e animais podem ser usadas para a obtenção dos respectivos óleos ou gorduras.

Existem diferentes maneiras de se extrair óleo. As mais utilizadas em grande escala são a prensagem mecânica e a extração por solvente, sendo as extrações mecânicas para baixa capacidade e as extrações por solvente para elevada capacidade (Jorge, 2009).

No processo de extração de óleos, alguns procedimentos devem ser realizados para o preparo da amostra a qual se deseja extrair. Mais especificamente, necessita-se do tratamento das sementes antes de iniciar a extração. Alguns autores definem esses passos de forma geral como na Figura 4.

Figura 4 – Processo do pré-tratamento da amostra antes da extração



Fonte: Moretto (1998) e Shahid *et al.*, (2005, com adaptações)

Nas extrações de óleos vegetais se empregam denominações como a torta, que se refere ao subproduto na extração do óleo por prensagem, o farelo o qual diz respeito ao subproduto da extração com solvente, o solvente que é o líquido utilizado na extração e a miscela, mistura do óleo extraído com o solvente (Jorge, 2009).

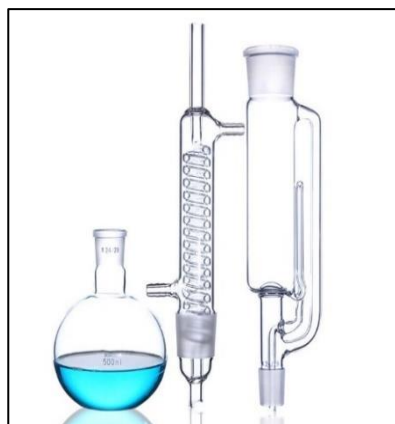
De acordo com Nunes, (2013) a extração de óleo pode ser feita por dois processos: prensagem ou extração com solvente. Geralmente uma combinação dos dois processos é realizada a fim de aumentar o rendimento do processo. Nesse caso, a torta (parte sólida separada do óleo) que deixa a prensa da extração é submetida à ação de um solvente, que extrai praticamente todo óleo residual da torta. O óleo separado do solvente é misturado ao óleo obtido por prensagem e então filtrado para eliminação de eventuais impurezas sólidas.

3.3.1 Extração por solvente

Neste tipo de extração, a obtenção da matéria oleosa, é feita por meio de solvente. De acordo com Moretto (1998) e Jorge (2013), o solvente utilizado atualmente é o hexano, um hidrocarboneto de petróleo leve, contendo de 45-90% de n-hexano e o restante sendo constituído de 2- e 3-metil-pentano, 2-3-dimetil-butano, metil-ciclo pentano e ciclo hexano com ponto de ebulição próximo à 70 °C. Durante o processo de extração, a velocidade do desengorduramento da semente é no começo muito rápido, decrescendo com o decurso do procedimento. Portanto, na prática não se pretende alcançar uma extração completa. O menor conteúdo do óleo no farelo após a extração é em torno de 0,5 a 0,6%.

Um dos extratores comerciais mais comumente utilizados é o Soxhlet, afirma Brum, (2009) que o aparelho produzido por Franz Von Soxhlet, em 1879, consiste no tratamento sucessivo e intermitente da amostra imersa em um solvente puro graças à sifonagem e subsequente condensação do solvente aquecido dentro do balão que está na base do aparelho. Possui vantagens como o contato da amostra com o solvente de forma demorada, é um processo simples, não havendo necessidade de especialistas para manusear aparelhos e apresenta bons resultados de rendimento da extração. Nas Figuras 5 e 6, observa-se imagens do extrator Soxhlet.

Figura 5- Componentes do extrator Soxhlet



Fonte: Cfactory, (2024)

Figura 6- Montagem do aparato para extração Soxhlet



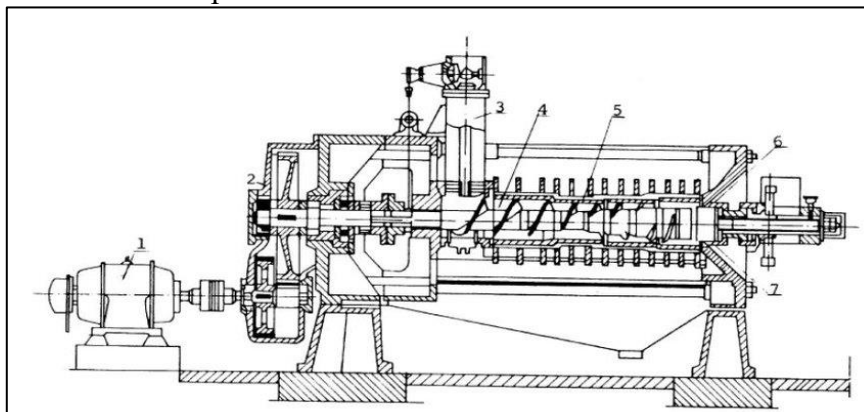
Fonte: Autor, adaptado de Amazon, (2024)

De forma geral, a extração Soxhlet consiste no uso da amostra seca, moída em pequenas partículas e depois colocada em cartucho poroso. De acordo com Tolentino *et al.*, (2015), esse cartucho é colocado na câmara de extração que está suspensa acima do balão que contém o solvente, e abaixo de um condensador. O balão é aquecido e evapora o solvente que se move na fase gasosa em direção ao condensador, o qual é convertido em um líquido que goteja no cartucho que contém a amostra. A câmara de extração é projetada de modo que quando o solvente em torno da amostra for superior a altura máxima do sifão, o líquido transborda para o balão onde é aquecido, e evapora, completando um ciclo.

3.3.2 Extração por prensagem

A prensagem mecânica é realizada em prensas sob altas pressões. Mandarino *et al.*, (2015), explica que os grãos entram na prensa ou “expeller” (Figura 7), por meio de um eixo alimentador. A prensa consiste em um cesto formado de barras de aço retangulares distanciadas por meio de lâminas. O espaçamento das barras é regulado para permitir a saída do óleo e, ao mesmo tempo, atuar como filtro para as partículas do resíduo da prensagem (torta).

Figura 7- Prensa contínua “Expeller”



Fonte: Moretto, (1998)

A pressão é regulada por meio de um cone de saída, sendo que a pressão inicial é de 300 – 400 kg/cm², aumentando gradativamente até a pressão final de 1.000 – 1.400 kg/cm². A capacidade de prensas em operações de pré-prensagem varia de 100 a 460 toneladas/dia (Jorge, 2009).

3.4 Purificação de óleos vegetais

De acordo com Mandarino *et al.*, (2015), a purificação de óleos pode ser definida como um conjunto de processos que visam transformar os óleos brutos em óleos comestíveis, embora existam casos de consumo de óleos brutos, como o azeite de oliva e o de dendê.

No processo de purificação dos óleos, alguns componentes são removidos como as substâncias coloidais, proteínas, fosfatídios e produtos de sua decomposição, ácidos graxos livres e seus sais, ácidos graxos oxidados, umidade entre outros (Moretto, 1998).

As etapas principais do processo são: degomagem, neutralização, branqueamento e desodorização.

3.4.1 Degomagem

Pode ser com aplicação de água e/ou de ácido. O tratamento com ácido fosfórico é a primeira etapa do refino, particularmente importante para alguns óleos. Em alguns casos não é imprescindível, mas melhora consideravelmente o produto final e reduz as perdas de refino por emulsão. Após tratado, o óleo degomado é transferido para neutralização (Carvalho, 2017).

O processo de degomagem tem a finalidade de remover do óleo bruto gomas que são constituídos principalmente por fosfolipídios, proteínas e substâncias coloidais, além de produzir

além de açúcares, resinas e traços de metais, e, produzir óleos crus capazes de serem refinados, por via química ou via física com a mínima contaminação ambiental (Jorge, 2009; Moretto, 1998).

3.4.2 Neutralização

De acordo com Carvalho (2017), o processo de neutralização consiste em baixar a acidez do óleo, eliminando os ácidos graxos livres por meio de adição de solução alcalina (soda cáustica e água). A separação pode ser por decantação (em pequena escala) ou por centrifugação. O óleo sai da centrífuga de neutralização e vai para o tanque de primeira lavagem.

As principais impurezas solúveis que se pretende eliminar no processo de neutralização são: ácidos graxos livres, fosfolipídios e seus complexos metálicos (especialmente ferro, cálcio e magnésio). Secundariamente pode-se obter também a remoção parcial de pigmentos e esteróis (JORGE, 2009).

3.4.3 Branqueamento

O processo de branqueamento, também chamado de clarificação ou descoramento, afirma Jorge, (2009) que este visa à redução na quantidade de corantes naturais (carotenoides e clorofila) nos óleos neutros, atendendo à preferência dos consumidores. Também são removidas parcialmente impurezas como sabões residuais, metais pró-oxidantes, compostos de enxofre, peróxidos e traços de aldeídos e cetonas provenientes da decomposição de hidroperóxidos. Como consequências, são melhorados o odor, o sabor e a estabilidade à oxidação do óleo desodorizado posteriormente.

3.4.4 Desodorização

A última etapa da refinação dos óleos é a desodorização, que visa a remoção dos sabores e odores indesejáveis. São removidos compostos como peróxidos, aldeídos, cetonas, álcoois, hidrocarbonetos, corantes (carotenoides) e ácidos graxos livres. Além, disso, remove também traços de pesticidas organoclorados utilizados durante o plantio da semente e solubilizados no óleo na etapa de extração (Moretto, 1998; Jorge, 2009).

A operação de desodorização consiste numa destilação de componentes voláteis por arraste de vapor, sob pressão reduzida. Os compostos responsáveis pelo sabor e aroma são mais voláteis

sob pressão reduzida e altas temperaturas e passam para o vapor de arraste por difusão, sendo eliminados do óleo (Carvalho, 2017; Jorge, 2009).

3.5 Biodiesel

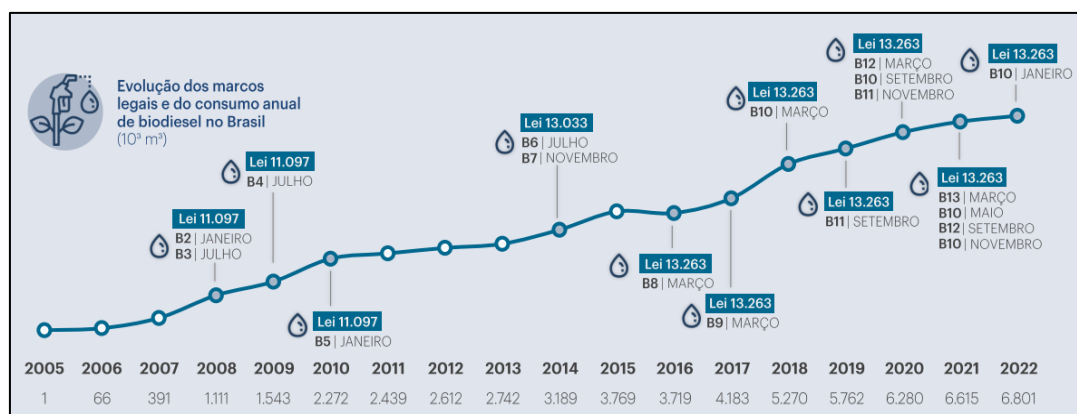
O biodiesel é um combustível renovável, biodegradável e ambientalmente correto, sucedâneo ao óleo diesel mineral, constituído de uma mistura de ésteres metílicos ou etílicos de ácidos graxos (Parente *et al.*, 2003). A ANP ainda define o biocombustível por meio da Resolução ANP n° 07 de 19/03/2008, como um combustível composto de alquil ésteres de ácidos graxos de cadeias longas derivados de óleos vegetais e/ou de gorduras animais.

De acordo com Zuniga *et al.*, (2011), o biodiesel pode ser empregado como combustível puro ou em mistura com o diesel de mineral. Sua utilização está associada à substituição de combustíveis fósseis em motores de ignição por compressão, sem haver a necessidade de nenhuma modificação no motor. Esse biocombustível tem as características necessárias para substituir o óleo diesel, com a vantagem de ser praticamente livre de compostos orgânicos nocivos ao ser humano.

Segundo Beltrão *et al.*, (2007), o uso do biodiesel em substituição ao óleo diesel mineral, além da possível mitigação das emissões de dióxido de carbono, proporciona redução da emissão de gases e partículas pelos veículos que são diretamente prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente, como o monóxido de carbono, enxofre e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (compostos cancerígenos).

No Brasil, há mais de uma década já se vem utilizando o biocombustível na mistura ao diesel para ser usado nos motores, proporcionando ao biodiesel espaço para se desenvolver como uma alternativa geradora nos transportes e impulsionando a diversificação da matriz do país. O percentual da mistura, como se pode ver na Figura 8, tem sofrido aumentos gradativos.

Figura 8- Evolução da mistura do biodiesel ao diesel no Brasil



Fonte: EPE (2023)

Em 2024, o CNPE aumentou a mistura com o diesel no percentual de 14%, sendo, portanto, um impulso para novas pesquisas de oleaginosas propensas a produção no país.

A produção do biodiesel continua a ser principalmente feita a partir da soja e controladas por grandes companhias e detentores de terra, principalmente no Sul, sudeste e Centro-Oeste brasileiro, onde a cultura da soja já era feita em larga escala (ORSI, 2021). Dados do Plano Decenal de Expansão de Energia 2031, afirmam essa assertiva, mostrado na Tabela 1.

Tabela 1- Produção e capacidade instalada de produção de biodiesel no Brasil para 2031.

| Região | Milhões de litros | | |
|--------------|----------------------|---------------------|---------|
| | Capacidade instalada | Consumo obrigatório | Balanço |
| Norte | 932 | 1.515 | -583 |
| Nordeste | 1.240 | 1.783 | -543 |
| Sul | 5.057 | 2.438 | 2.619 |
| Sudeste | 1.130 | 3.949 | -2.819 |
| Centro-Oeste | 5.932 | 1.811 | 4.121 |
| Brasil | 14.291 | 11.496 | 2.795 |

Fonte: EPE, (2022, com adaptações)

De acordo com Milanez *et al.*, (2022), o desenvolvimento da cultura de soja elevou substancialmente a oferta dessa matéria-prima, o que ocasionou a dependência de uma única matéria-prima e se tornou um dos maiores desafios do setor. Uma maior diversificação de matérias-primas reduziria o grau de incerteza na produção. Além disso, essa variedade poderia contribuir para a desconcentração da produção do biodiesel e levar a produção para os outros estados do Brasil, como as regiões Norte e Nordeste.

3.5.1 Fontes de oleaginosas no Brasil para produção de biodiesel

O biodiesel é um componente essencial para garantir a sustentabilidade econômica e socioambiental de nossa sociedade. O Brasil pode produzir mais de 60% das demandas mundiais de energia renovável para substituir o petróleo e seus derivados, em especial o diesel mineral, que somente no país são consumidos por ano cerca de 40 bilhões de litros, dos quais seis bilhões são na agricultura (Beltrão *et al.*, 2007).

Os óleos vegetais, as gorduras animais e os óleos residuais são as principais fontes de triglicerídeos para a produção de biodiesel. A seleção da matéria prima a ser utilizada na produção do biocombustível é baseada na economia e na garantia da qualidade do produto (ORSI, 2021).

Atualmente, a matéria-prima para produção de óleo no Brasil encontra-se fortemente concentrada na cultura da soja. Cerca de 90 % dos atuais seis milhões de toneladas de óleo vegetal produzidos anualmente originam-se dessa oleaginosa. Outras oleaginosas tradicionais como, pinhão manso, mamona, algodão, girassol, canola e amendoim contribuem com pequenas quantidades de óleo, assim como o dendê (SEBRAE, 2008).

Observa-se a partir da Tabela 2, onde está descrito as principais regiões produtoras de biodiesel até este ano de 2024, que as maiores quantidades advêm das regiões centro-oeste, sudeste e sul, estando a região Nordeste apenas com produção na Bahia e na região Norte nos estados do Pará e Tocantins. As matérias-primas são: óleo de soja com 542,871 m³ (74,7%), outros materiais graxos com 101,149 m³ (13,9%), gordura bovina apresentando 44,741 m³ (6,2%), óleo de palma com 1,526 m³ (0,21%) e outras como gordura de frango, gordura do porco, óleo de algodão, canola, fritura usado e milho, que juntas somam 36,218 m³ (5%).

Tabela 2-Produção de biodiesel no Brasil

| Estado | Quantidade de matéria-prima (Kg) | Produção de biodiesel (m ³) |
|--------------------|-------------------------------------|---|
| Mato Grosso | 162,824 | 164,780 |
| Rio Grande do Sul | 145,269 | 144,746 |
| Goiás | 109,860 | 106,285 |
| Paraná | 103,159 | 106,188 |
| Bahia | 59,942 | 59,519 |
| Santa Catarina | 32,960 | 33,026 |
| Mato Grosso do Sul | 24,005 | 24,106 |
| São Paulo | 23,899 | 23,136 |
| Tocantins | 16,272 | 15,321 |
| Pará | 15,433 | 15,312 |
| Rio de Janeiro | 13,558 | 13,491 |

Fonte: ANP, (2024)

Diante dos dados, compreende-se o crescimento da utilização do óleo de soja como matéria-prima para produção do biodiesel ao longo dos anos, onde observando os valores de 2021 até 2024, houve um aumento de 8,9%, mostrando como o país tem se tornado dependente de uma única matéria-prima.

Fazendo uma comparação entre as oleaginosas predominantes nos Estados brasileiros e as matérias-primas hoje utilizadas na produção de biodiesel, depreende-se que ainda há muitas oleaginosas a serem exploradas para produção de biocombustível. Algumas culturas emergentes

podem ser encontradas na literatura com a finalidade de produção do biodiesel, como no caso da macaúba e o Buriti que se localizam em maior disponibilidade na região Norte (Moura *et al.*, 2019; Beltrão *et al.*, 2007). Outras espécies que podem pertecer a diferentes países também tem grande potencial de produção no Brasil, em especial no Nordeste, como é o caso do Cártamo (Deriven *et al.*, 2023; Braga, 2023), cultura adaptável as condições climáticas da região.

3.5.2 Análise das emissões com uso de biodiesel

Um dos fatores positivos para utilização dos biocombustíveis é a redução de gases poluentes na atmosfera. Esta característica ao longo dos anos vem sendo observada por alguns autores, como afirma os estudos de Leite *et al.*, (2019) ao avaliar as emissões com o uso de blends de biodiesel de soja, linhaça e crambe, onde constatou a redução dos gases CO, CO₂ e NOx.

De acordo com Gongora (2021), o principal motivo para redução de emissões de particulados com o uso do biodiesel pode ser o conteúdo de oxigênio na molécula de biodiesel que permite uma melhor combustão e promove a oxidação da fuligem, sendo a oxidação da fuligem no biodiesel até 6 vezes maior do que a do diesel.

Fazendo uma perspectiva da diminuição das emissões com o uso do biodiesel na mistura ao diesel entre os anos de 2011 e 2020, no cenário para uma mistura B10, Gazzoni, (2014) obteve os valores mostrados na Tabela 3.

Tabela 3- Consumo e emissões evitadas por meio do uso do biodiesel entre 2011 e 2020.

| FATOR | TOTAL |
|--|---------------------------|
| Consumo de biodiesel | 64,04 GL |
| Emissões do biodiesel | 47,26 Mt CO ₂ |
| Consumo equivalente de diesel | 60,42 GL |
| Emissões equivalentes de diesel | 179,43 Mt CO ₂ |
| Emissões evitadas por uso de biodiesel | 132,18 Mt CO ₂ |

Fonte: Gazzoni, (2014)

Observa-se a importância do uso do biodiesel para diminuição das emissões, tendo uma média de 132, 18 milhões de toneladas de emissão de CO₂ evitadas para a atmosfera.

O biodiesel de cártamo vem sendo estudado neste sentido por possuir baixa quantidade de enxofre, o que impede a formação de sulfato, um componente significativo de particulados no diesel (Ilkiliç *et al.*, 2011).

Estudos de Gongora *et al.*, (2022), fazendo um comparativo do biodiesel de soja e das misturas do diesel com o biodiesel de cártamo mostraram que a mistura B11 apresentou níveis baixos de

emissões de dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), óxido de nitrogênio (NOx) e gases de escape (EGT) em relação ao biodiesel de soja, reduzindo em até 15% as emissões de NOx.

Ao avaliar as emissões do biodiesel de cártamo com os aditivos de metil proxitol, etil proxitol e blendas destes com o biodiesel, Aydin (2020), obteve que as blendas do aditivo metil proxitol com o biodiesel de cártamo na proporção de 90% de biodiesel e 10% de metil proxitol, e 90% de biodiesel e 10% de etil proxitol obtiveram os melhores resultados e, comparando os valores com o a blenda de 50% de biodiesel de cártamo com 50% de diesel de baixos teores de enxofre, concluiu que as emissões de hidrocarbonetos voláteis (HC) e monóxido de carbono (CO) foram significativamente reduzidas enquanto de as emissões de NOx e CO_2 apresentaram valores mais elevados.

Assim, as propriedades do biodiesel de cártamo indicam que por meio da sua utilização há uma redução significativa de emissão dos gases poluentes, sendo uma de suas características principais a baixa presença de enxofre na sua composição.

3.6 Métodos de produção de biodiesel

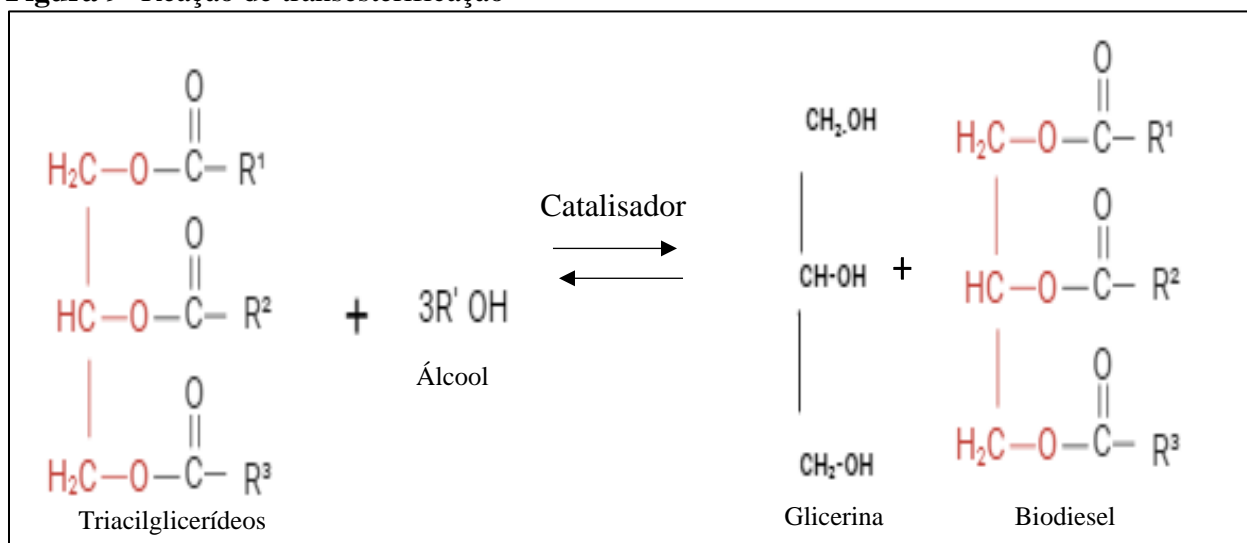
Existem diversos processos de produção do biodiesel e investe-se cada vez mais na pesquisa de novas tecnologias, ou aprimoramento das atuais (ORSI, 2021). Nesta subdivisão, serão comentados os processos de transesterificação, esterificação e craqueamento.

3.6.1 Transesterificação

É uma das tecnologias mais comumente utilizadas nas indústrias, devido as suas propriedades serem muito similares as do diesel, o produto de transesterificação de óleos vegetais, é considerado como o mais promissor substituinte do combustível diesel (Abreu, 2013; Miranda, 2011).

A reação de transesterificação é realizada na presença de um álcool (metanol ou etanol) acompanhado de catalizador ou não (processo supercrítico), onde forma o produto biodiesel e como subproduto a glicerina.

O processo de transesterificação é afetado pelo modo de condição de reação, razão molar de álcool para óleo, tipo de álcool, tipo e quantidade de catalisadores, tempo, temperatura de reação e pureza dos reagentes (Meher *et al.*, 2004). Na figura 9, pode-se observar uma ilustração da reação.

Figura 9- Reação de transesterificação

Fonte: Autor, (2024)

O processo de transesterificação pode ser classificado como catalítico e não catalítico. A produção não catalítica utiliza álcool em condições supercríticas. A transesterificação catalítica pode utilizar catalisador homogêneo ou heterogêneo, sendo esses ácidos ou básicos, ou também biocatalisadores (ORSI, 2021).

3.6.2 Esterificação

Na reação de esterificação, os ácidos graxos livres (AGL) reagem com álcool em presença de um catalisador ácido e como produtos obtém-se ésteres alquílicos de ácidos graxos (EAAG) e água (Silva; Neto, 2013). Processos de esterificação de ácidos graxos assumem grande importância para a produção de biodiesel ao serem consideradas rotas tecnológicas baseadas em matérias-primas de alta acidez, utiliza-se esse meio quando a acidez do óleo é superior a 3 mg KOH/g (Ramos, 2011; Martinelli, 2008).

Os principais fatores que influenciam a esterificação são excesso de um dos reagentes e uso de catalisadores. Uma desvantagem desse processo é a necessidade de mais tempo de reação e consumo energético (Martinelli, 2008).

3.6.3 Craqueamento

A pirólise, ou craqueamento térmico, de matrizes contendo triglicerídeos representa método alternativo para obtenção de bioprodutos renováveis e adequados para uso em combustíveis. Essa

opção é promissora nas áreas em que a indústria de hidrocessamento está bem estabelecida porque a tecnologia é semelhante à do refino no de petróleo convencional (Maher; Bressler, 2007)

O craqueamento de óleos vegetais consiste na quebra das moléculas em altas temperaturas, na presença ou não de catalisadores. Os produtos formados nessa reação são hidrocarbonetos muito semelhantes aos do petróleo, além de compostos oxigenados tais como ésteres, ácidos carboxílicos e aldeídos (Borges *et al.*, 2008; Rodrigues, 2007).

Pode-se apontar a reação como um processo com capacidade de agregar valor aos resíduos transformando matéria prima de alto peso molecular e baixo valor comercial em produtos com menor peso molecular e com valor comercial elevado (Oliveira, 2014).

Afirma Santos (2007), que a formação do biocombustível a partir do craqueamento termo catalítico depende de fatores tais como, temperatura, atmosfera, presença de catalisador, possuindo assim inúmeras rotas e mecanismos reacionais.

De acordo com Oliveira (2014), uma das rotas mais utilizadas atualmente é a que os triacilglicerídeos sofrem uma decomposição térmica formando ácidos graxos, cetenos e acroleína. Os cetenos e a acroleína, após reagir formam cetonas, aldeídos e ácido carboxílico que por sua vez se decompõem formando então os hidrocarbonetos.

Na sequência, afirma Suarez *et al.*, (2007), a decomposição térmica dos ácidos carboxílicos pode ocorrer por decarbonilação ou decarboxilação. No primeiro caso, tem-se a formação de água, CO e um hidrocarboneto com nova insaturação terminal, enquanto que no segundo são gerados CO₂ e um hidrocarboneto, sem a formação de novas insaturações.

3.7 Parâmetros de qualidade do óleo e biodiesel

No Brasil, o órgão que regulamenta alguns parâmetros de qualidade do óleo é a ANVISA, já para o biodiesel, o órgão que regulamenta é a ANP. Diante disso, classificou-se alguns parâmetros físico-químicos e estruturais que se designou pertinente nesta pesquisa, os quais são:

3.7.1 Parâmetros físico-químicos

Os parâmetros físico-químicos são úteis para avaliar a utilidade do óleo ou biodiesel. Essas propriedades, estão relacionadas com a composição química dos triacilgliceróis. Assim, contemplou-se os parâmetros de índice de acidez, saponificação densidade e viscosidade para argumentar nesta seção.

3.7.1.1 Índice de acidez

O índice de acidez, de acordo com Morreto *et al.*, (1998), é denominado como o número de miligramas de hidróxido de potássio (KOH) necessários para neutralizar os ácidos graxos livres de uma grama de gordura. A acidez livre de uma gordura decorre da hidrólise parcial dos glicerídeos, por isso não é uma constante ou característica, mas é uma variável intimamente relacionada com a natureza e a qualidade da matéria-prima, com a qualidade e o grau de pureza da gordura, com o processamento e principalmente, com as condições de conservação.

A ANP, por meio da resolução nº 920/2023, estabelece que o índice máximo do biodiesel seja 0,5 mg KOH/g. A determinação do índice de acidez para os biocombustíveis ainda é utilizada como parâmetro pelo qual a corrosão pode ser corrigida e a vida útil do motor preservada.

3.7.1.2 Densidade

Em óleos e gorduras é uma propriedade importante para se definir equipamentos de manuseio, a densidade das gorduras sólidas ou líquidas é bastante constante para os diferentes tipos de triacilgliceróis, mas a diferença é grande entre os estados sólido e líquido (Jorge, 2013).

De acordo com Folquenin (2008) e Zuniga *et al.*, (2011), a densidade do biodiesel, ligeiramente superior à do óleo diesel convencional, exerce efeito direto sobre o desempenho do motor. Assim, essa propriedade fluidodinâmica deve ser considerada na avaliação do funcionamento de motores a injeção por compressão (motores diesel). Como a bomba injetora alimenta o motor com volumes constantes para cada condição de operação, a variação da densidade promove alteração da massa de combustível injetada. No entanto, valores de densidades acima das faixas de regulação podem levar à mistura de ar/combustível, o que aumenta a emissão de poluentes como hidrocarbonetos, monóxido de carbono e material particulado. Valores baixos para a densidade podem favorecer a formação de mistura pobre de ar/combustível, levando à perda de potência do motor e ao aumento de consumo de combustível.

A ANP na resolução nº 920/2023, estabelece para o biodiesel o valor da densidade na temperatura de 20 °C o limite entre 850-900 kg/m³.

3.7.1.3 Viscosidade

A viscosidade aumenta com o comprimento das cadeias dos ácidos graxos dos triglicerídeos e diminui quando aumenta a insaturação, é, portanto, função das dimensões das moléculas e de sua

orientação, ou seja, aumenta com a hidrogenação (Moretto *et al.*, 1998). Para o biodiesel esta propriedade indica a resistência do fluido ao escoamento e tem grande influência da temperatura. Knothe, (2007) e Moraes, (2012), afirmam que a redução da viscosidade é uma das maiores razões pelas quais não se usa o óleo puro nos motores e sim os ésteres alquílicos, fato relacionado pela influência desta propriedade na operação de injeção do combustível no motor, a fluidez do combustível.

A ANP na resolução nº 920/2023, estabelece que para o biodiesel o valor da viscosidade na temperatura de 40 °C deve apresentar limite entre 3-5mm²/s.

3.8 Métodos de caracterização estrutural do óleo e biodiesel

3.8.1 Espectroscopia na Região do Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

Esta técnica diz respeito ao estudo dos grupos funcionais existentes na amostra que levam a estrutura da molécula e tanto o óleo como o biodiesel são sensíveis a este tipo de análise.

Assim como ocorre em outros tipos de absorção de energia, as moléculas quando absorvem radiação na região do infravermelho, são excitadas para atingir um estado de maior energia. A absorção na região do infravermelho é, como outros processos de absorção, um processo quantizado.

Em sua forma usual, o espectro é um gráfico de intensidade (% de transmitância ou absorbância) versus o número de onda ou frequência de absorção. As frequências geralmente são expressas em termos de número de onda (ν), cuja unidade é cm⁻¹. As intensidades das bandas são expressas em transmitância (T) ou absorbância (A). A transmitância é a razão da força radiante transmitada por uma amostra por força radiante incidente na amostra e a absorbância diz respeito ao logaritmo na base 10 da transmitância ($A = \log_{10} 1/T$).

3.8.2 Ressonância Magnética Nuclear (RMN)

A ressonância magnética nuclear (RMN) tornou-se ao longo de seu desenvolvimento o principal instrumento de avaliação dos óleos (Azeredo *et al.*, 2003). Para os estudos com óleo e biodiesel o método RMN pode ser usado para análise quantitativa com base no fato de que a amplitude de um campo magnético nuclear de próton, sinal da ressonância (RMN ¹H), é proporcional ao número de núcleos de hidrogênio contidos na molécula (Gelbard *et al.*, 1995; Knothe *et al.*, 2005). Afirmam ainda Satyarthi *et al.*, (2009) que, embora as técnicas de CG e HPLC

sejam mais sensíveis, o RMN é mais rápido e fácil de usar, além de ser mais adequado para quantificação da área dos prótons.

3.9 Cártamo como cultura energética

Diante do cenário de energia renováveis, novas matérias-primas para utilização nos biocombustíveis e biomassa vem sendo alargadas. Assim, o cártamo (*Carthamus tinctorius* L.), ganha destaque por ser uma cultura energética com propriedades para uso neste meio.

De acordo com Queiroga *et al.*, (2021), o cártamo (*Carthamus tinctorius* L.) é uma das culturas mais antigas do mundo, considerada uma oleaginosa pertencente à família Asteraceae. Foi levado para a Pérsia, Egito e Europa pelos árabes e comerciantes do Mediterrâneo. Hoje seu cultivo é difundido em todo o mundo e ainda tem pouca expressão econômica no Brasil. É uma planta muito interessante quando se trata do seu cultivo, porque se adapta a solos de baixa fertilidade, a diferentes climas e necessita de pouca água. A característica importante dessa oleaginosa é que conta com teor de óleo de 37 a 41%, contém 78% de ácido linoleico (ômega 6), 13,5% de ácido oleico (ômega 9) e apenas 8% de ácidos graxos saturados.

Nas Figuras 10 e 11, são mostradas imagens da planta e sua semente.

Figura 10- Planta de Cártamo



Fonte: Planta Sonya, (2024)

Figura 11- Semente de cártamo



Fonte: Autor (2024)

Em relação a composição do óleo de cártamo, a concentração de ácido oleico e linoleico é controlada pelas condições de ambiente, principalmente temperatura, e genótipos (Connor; Hall, 1997; Roche *et al.*, 2004). Assim, existe uma forte relação entre a temperatura e o grau de insaturação dos ácidos graxos. Na Tabela 4 é mostrado os principais ácidos graxos presentes no óleo da semente de cártamo, a partir de dados da literatura.

Tabela 4- Perfil de ácidos graxos do óleo de cártamo

| Ácido graxo | Estrutura molecular | Grupo de ácidos graxos | Peso molecular (g/mol) | Conteúdo presente (%) |
|--------------|---------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| Mirístico | C14:0 | Saturados | 228.4 | 0.0 |
| Palmítico | C16:0 | Saturados | 256.5 | 6.1 |
| Palmitoleico | C16:1 | Monoinsaturados | 254.5 | 0.0 |
| Esteárico | C18:0 | Saturados | 284.5 | 2.8 |
| Oleico | C18:1 | Monoinsaturados | 282.5 | 30.9 |
| Linoleico | C18:2 | Poli-insaturado | 280.5 | 56.40 |
| Linolênico | C18:3 | Poli-insaturados | 278.5 | 1.2 |
| Araquidônico | C20:0 | Saturados | 312.6 | 0.0 |
| Erúico | C20:1 | Monoinsaturados | 310.5 | 0.0 |
| Beénico | C22:0 | Saturados | 0,5 | 0.5 |
| Outros | - | | - | 1.4 |

Fonte: Deriven *et al.*, (2023, com adaptações)

Observa-se com esta tabela, a predominância de ácidos graxos poli-insaturados, seguido dos monoinsaturados. Estes resultados se assemelham aos vistos em estudos com o óleo de cártamo de Yesilyurt *et al.*, (2019) e também Medeiros (2011), onde houve a predominância destes ácidos nos valores de 30,07% e 28,8% para os monoinsaturados, respectivamente e 62,37% bem como 60,3% para os poli-insaturados, respectivamente.

O óleo de cártamo é utilizado para diversos fins, desde a utilização para produção de corantes e óleo de unguento cerimonial (Weiss, 1971), até a utilização em dietas humanas e na produção de biodiesel, esmaltes, sabões, tintas, vernizes (Mundel *et al.*, 2004) entre outros. Na Figura 12, pode-se observar o óleo de cártamo comercial.

Figura 12- Óleo de cártamo comercial

Fonte: Belezaeforma (2024)

O farelo de cártamo, por outro lado, é muito visada na pecuária para utilização como silagem e na alimentação de ruminantes e monogástricos (Arantes, 2011), fato observado pelo seu rico valor proteico. Também há estudos recentes com a utilização do farelo para produção de biocarvão, porém pouco se estuda sobre a utilização do farelo para produção de biomassa.

A cultura do cártamo foi recentemente inserida na Agenda de Inovação para a Cadeia Produtiva do Biodiesel do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento do Governo Federal do Brasil, como indicação prioritária para cultivo no semiárido nordestino (MAPA, 2019). Neste sentido, o cultivo desta oleaginosa se torna emergente na produção energética, e pesquisas com o objetivo de qualificar melhor o uso desta de forma integrada se torna uma necessidade.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Reagentes e equipamentos

Abaixo é mostrado a lista dos equipamentos bem como a marca e o modelo de cada um utilizado nesta pesquisa, Tabela 5. Por meio da Tabela 6, é mostrado ainda, a lista contendo os reagentes utilizados e as respectivas marcas.

Tabela 5- Lista dos equipamentos.

| Equipamentos | Marca e modelo |
|---|--|
| Viscodensímetro digital | Marca Anton Paar e modelo SVM 3000-Stabinger |
| Espectrômetro Ressonância Magnética Nuclear | Marca Varian e modelo Mercury 200 |
| Rotaevaporador | Marca fisatom e modelo 802 |
| Manta aquecedora | Marca Nalgon e modelo 3310 |
| Espectrofotômetro infravermelho FT-IR | Marca Thermo Scientific e modelo Nicolet IS5 com ATR |
| Estufa | Marca De Leo e modelo DL SE 42L |
| Mufla | Marca Quimis e modelo Q318M24 |

| | |
|---------------------------|---|
| Balança analítica | Marca Shimadzu e modelo AY220 |
| Analizador elementar CHNS | Marca Thermo Finnigan (Milan/Itália) e modelo Flash EA 1112 e |
| Placa aquecedora | Marca Fisaton e modelo 503-2 |

Fonte: Autor, (2024)

Tabela 6- Lista de reagentes

| Reagentes | Marca |
|------------------------------|----------|
| Hidróxido de potássio 85% PA | Dinâmica |
| Éter Etílico 95% PA | Dinâmica |
| Hidróxido de Sódio PA | Dinâmica |
| Etanol 95% PA | Synth |
| Hexano PA | Neon |
| Ácido Clorídrico 37% PA | Dinâmica |
| Metanol PA | Dinâmica |

Fonte: Autor, (2024)

4.2 Extração do óleo de Cártamo

A extração do óleo de cártamo se deu pelo processo Soxhlet com uso de solvente hexano, e as sementes foram cedidas pelo Instituto Federal do Rio Grande do Norte (IFRN).

Para início da técnica de extração, as sementes passaram por uma pré-limpeza simples, onde foram retirados corpos estranhos do meio das mesmas. Depois, as sementes foram sujeitas ao processo de trituração, pois como afirma Moretto *et al.*, (1998), a obtenção de óleos das sementes

é facilitada pelo rompimento do tecido e das paredes das células, diminuindo a distância entre o centro da semente e sua superfície e aumentando a superfície de saída do óleo.

O método Soxhlet empregado se deu com medidas de 35 g de sementes para 188 mL de hexano, respectivamente, com temperatura entre 60 °C e 70 °C (aproximadamente a temperatura de ebulição do hexano). Para alcançar esta temperatura utilizou-se manta aquecedora. O tempo decorrido para realização foi em torno de 1 hora de reação, segundo a quantidade de sementes e hexano que se utilizou. O esboço do processo pode ser observado na Figura 13.

Figura 13- Esquema da extração do óleo de cártamo



Fonte: Autor, (2024)

Decorrido o tempo de extração, como visto na etapa 3, o óleo junto ao hexano dentro do balão foi levado para rota evaporação por aproximadamente 15 minutos sob as condições de 60 °C no banho maria, rotação de 60 rpm e banho termostático a 16 °C. Ao final da etapa de extração do óleo de cártamo, realizou-se a pesagem e em consequência o cálculo do rendimento que se seguiu de acordo com a equação (1).

$$Rendimento (\%) = \frac{M_{\text{óleo}}(g)}{M_{\text{sementes}}(g)} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

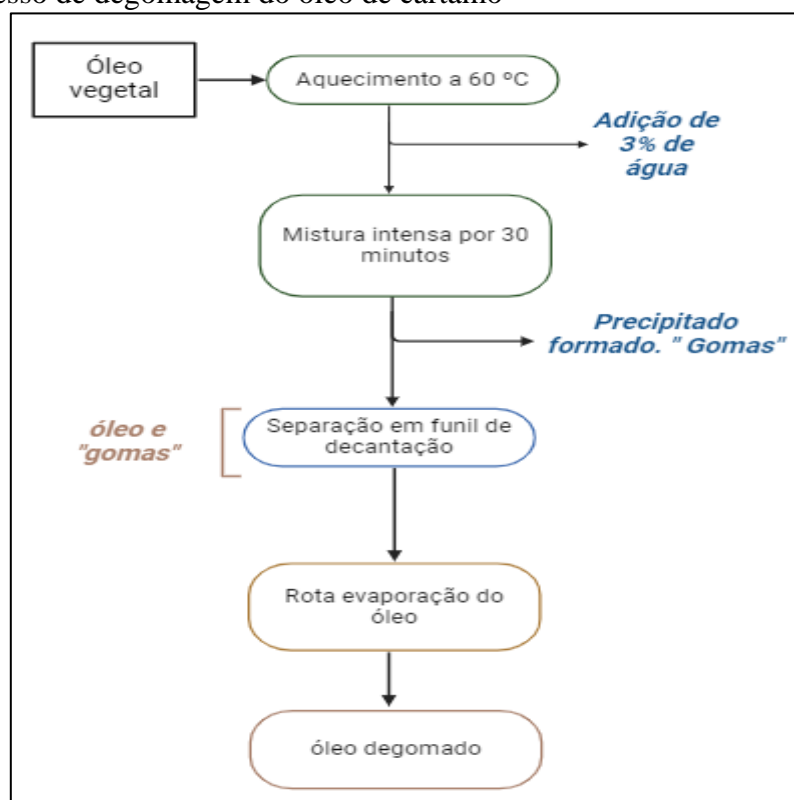
$M_{\text{óleo}}$ = É a massa do óleo após a extração dado em gramas;

M_{sementes} = É a massa das sementes antes da extração do óleo.

4.3 Degomagem do óleo de cártamo

Após realizado a extração, seguiu-se com o processo de degomagem do óleo para tratamento e posterior utilização. A degomagem consistiu como em Mandarino *et al.*, (2015) e Moretto *et al.*, (1998), onde adicionou-se 3% de água ao óleo bruto com temperatura entre 60 °C e 70 °C na chapa aquecedora, sob agitação constante, durante 30 minutos. Passado o tempo, o precipitado formado foi removido do óleo por meio de funil de decantação. Para retirada de umidade e outros compostos, o óleo foi novamente para rota evaporação à temperatura de aproximadamente 80 °C. Uma imagem contendo o fluxograma do processo pode ser observado na Figura 14.

Figura 14- Processo de degomagem do óleo de cártamo



Fonte: Autor, (2024)

Posteriormente ao tratamento com degomagem, iniciou-se as análises de índice de acidez, saponificação, FTIR e RMN do óleo de cártamo a fim de caracteriza-lo para futura utilização na produção de biodiesel.

4.4 Reação de transesterificação

A reação de transesterificação se deu semelhante à realizada por Braga, (2023), tendo como agente transesterificante o álcool metílico (CH_3OH) e catalisador o hidróxido de potássio (KOH). Tendo realizado o índice de saponificação do óleo e índice de acidez, utilizou-se as equações (2) e

(3) a seguir, para realização dos cálculos com o objetivo de quantificar os valores do álcool e do catalisador que seriam utilizados na reação junto ao óleo.

Massa do álcool (g)

$$\frac{2 \times m_{\text{óleo}} \times MM_{\text{álcool}} \times (IS - IA)}{MM_{\text{catalisador}} \times 1000} \quad (2)$$

Massa do catalisador (g)

$$\frac{\% \text{catalisador} \times m_{\text{óleo}}}{\text{Pureza do catalisador} \times 100} \quad (3)$$

Onde:

$m_{\text{óleo}}$: massa de óleo

$MM_{\text{álcool}}$: massa molar do álcool

$MM_{\text{catalisador}}$: massa molar do catalisador

IS: índice de saponificação

IA: índice de acidez

%catalisador: 1,5% (0,015)

Os valores de $MM_{\text{catalisador}}$, $MM_{\text{álcool}}$ e Pureza do catalisador foram obtidos de acordo com fabricante.

O processo se deu em duas etapas de acordo com Braga, (2023) chamadas de primeira e segunda síntese. Para a primeira, utilizou-se a razão molar entre quantidade de óleo e álcool de 1:6 e a concentração do catalisador foi 1,5% em relação a massa do óleo. O óleo foi pesado, depois pré-aquecido no reator batelada na temperatura de 60°C para atingir a temperatura de reação. O álcool e o catalisador foram primeiramente submetidos a agitação para que houvesse completa dissolução da base no álcool a temperatura ambiente em um Erlenmeyer e, posteriormente adicionado ao óleo dentro do reator batelada. A mistura reagiu por aproximadamente 1 hora. Após o tempo de reação ter passado, a mistura de ésteres foi transferida para um funil de separação, onde se pode ver as duas fases bem formadas, glicerina na parte inferior e biodiesel na parte superior. Como nas literaturas seguidas, o biodiesel permaneceu no balão por aproximadamente 2 horas, depois retirou-se a glicerina observada e logo após iniciou-se a etapa de lavagem para retirada total de glicerina e catalisador que ainda pudesse haver no biodiesel.

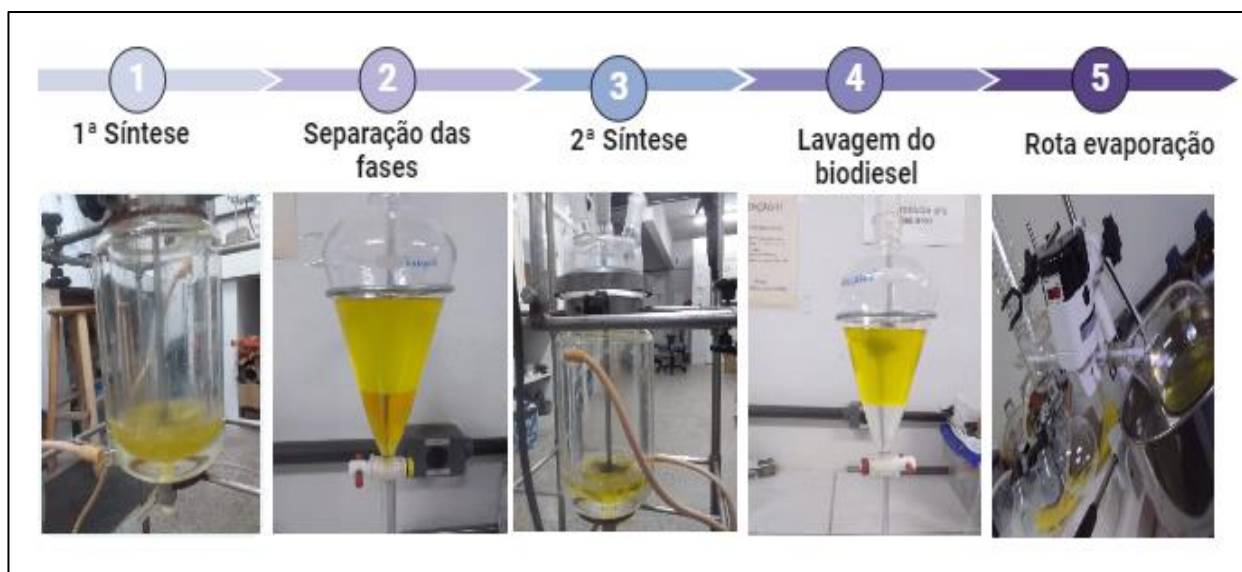
Foram necessárias duas lavagens até obter pH em torno de 7, com volume de água em cada lavagem de aproximadamente 15% do valor da massa inicial do óleo, e então, a mistura foi levada para rota evaporação para retirada de umidade, com temperatura em torno de 80 °C, a 50rpm e banho termostático de 16 °C. A rota evaporação se deu por 2 horas, finalizando a primeira síntese.

Para a segunda síntese, o cálculo de valores de álcool e massa de catalisador foram realizados da seguinte forma: o valor de álcool foi 15% do valor da massa inicial de metanol da

primeira síntese, já para o catalisador o valor foi de 0,5% em relação a massa inicial de catalisador da primeira síntese. Tendo mais uma vez colocado a mistura de ésteres da primeira síntese dentro do reator batelada para aquecer a temperatura de 60°C, pesou-se a massa de KOH e metanol, e logo depois esse álcool e base foram submetidos a agitação para dissolução um ao outro.

Após a diluição da base no álcool, a solução foi adicionada a mistura de ésteres pré-aquecido a 60 °C, agindo por mais 1 hora. Decorrido o tempo de reação, os ésteres foram transferidos mais uma vez para funil de separação, porém, diferentemente da primeira síntese, nesta não houve uma quantidade de glicerina formada visível, permanecendo no funil por aproximadamente 1 hora. Logo após este tempo, realizou-se as lavagens para retirada de glicerina e KOH que por ventura ainda pudessem estar junto a mistura. Necessitou-se de 6 lavagens nesta segunda síntese até alcançar pH igual a 7. Posteriormente a esta etapa, a mistura foi levada para rota evaporação com as mesmas condições reacionais da primeira, por aproximadamente 1 hora. Finalizando assim a etapa de produção do biodiesel. Um esquema do processo é mostrado na Figura 15.

Figura 15- Produção de biodiesel de cártamo.



Fonte: Autor, (2024)

4.5 Caracterização físico-química do óleo e biodiesel de cártamo

Para realizar os estudos sobre o óleo e biodiesel de cártamo, as caracterizações físico-químicas de índice de saponificação e acidez, viscosidade e densidade foram propostas. As análises de índice de acidez e saponificação foram realizadas no laboratório do Grupo de Inovações Tecnológicas e Especialidades Químicas (GRINTEQUI/UFC). Já as análises de densidade e

viscosidade foram realizadas no Núcleo de Pesquisas em Lubrificantes Prof. Ícaro Moreira (NPL/UFC).

4.5.1 Índice de saponificação

O índice de saponificação foi determinado de acordo com a metodologia descrita em Moretto *et al.*, (1998), onde foram feitas duas amostras, a primeira contendo 2 g de amostra em frasco Erlenmeyer de 250 mL com adição de 20 mL de solução alcoólica de hidróxido de potássio (KOH) a 4%. Essa mistura foi levada a um condensador acoplado em sistema de refluxo. Em seguida aqueceu-se a temperatura branda por 30 minutos. Ao passar do tempo foi retirado o procedimento, resfriou-se um pouco e posteriormente, iniciou-se a titulação com solução de ácido clorídrico (HCl) 0,5 M, com adição de 2 gotas de fenolftaleína. A titulação terminou quando a coloração rósea desapareceu.

A segunda amostra foi o “branco”, onde foi adicionado 20 mL de solução alcoólica de KOH a 4% num frasco de Erlenmeyer de 250 mL, esse procedimento também foi acoplado a um sistema de refluxo e aquecido a temperatura branda por 30 minutos. Passado o tempo, resfriou-se um pouco e se deu início a titulação, adicionando-se 2 gotas de fenolftaleína e titulando-se com HCl 0,5 M. O fim da titulação também se deu assim como na primeira amostra, quando a coloração rósea desapareceu. A diferença entre essas duas amostras em relação ao volume gasto para titulação em mL de HCl indica a quantidade de KOH gasto na saponificação. O cálculo se deu de acordo com equação (4).

$$I_s = ((V_b - V_a) \times f(HCL) \times 28,05) \div m_{\text{óleo}} \quad (4)$$

Onde:

V_b - É o volume em mL, gasto para o “branco”.

V_a - É o volume em mL, gasto para a primeira amostra.

$f(HCL)$ - Índica o fator de correção da solução de HCl 0,5 M.

$m_{\text{óleo}}$ - É referente ao valor pesado do óleo para a primeira amostra.

28,05- É o equivalente grama de KOH.

I_s - Índica o índice de saponificação dado por mg KOH/g de amostra.

4.5.2 Índice de acidez

O índice de acidez é uma das propriedades mais importantes a ser realizada para o óleo e biodiesel. Para realização deste método, preparou-se uma solução neutra de éter etílico e álcool etílico, onde foi colocado em um Béquer primeiramente 50 mL de álcool, adicionou 2 gotas de fenolftaleína e realizou-se uma titulação com solução de Hidróxido de Sódio (NaOH) 0,01 M. A titulação finalizou quando este álcool apresentou aparência levemente rósea, sinalizando a neutralização.

Após, misturou-se esse álcool a um volume de éter etílico de 100 mL, pois para realizar o índice de acidez é necessário de solução neutra na porcentagem de 2:1(éter: álcool). Tendo a solução neutra, em um Erlenmeyer de 125 mL, pesou-se 2 gramas de amostra e adicionou-se 25 mL de éter-álcool neutro, agitou-se e foi acrescentado mais 2 gotas de fenolftaleína para indicar o ponto de viragem. A titulação ocorreu com solução de NaOH 0,01 M e finalizou-se até obter coloração levemente rósea. O índice de acidez foi realizado em triplicata para as amostras do óleo e biodiesel de cártamo e o valor final se deu pela média entre os três valores encontrados respectivamente. Para os cálculos de índice de acidez, a equação (5) foi utilizada:

$$I_a = (V \times f(NaOH) \times 0,561) \div m \quad (5)$$

Onde:

V- Diz respeito ao número de mL de solução de NaOH 0,01 M gasto na titulação;

f (NaOH) - Indica o fator de correção da solução de NaOH 0,01 M;

m- É o número de gramas da amostra;

0,561- É o equivalente grama de KOH para a solução 0,01 M e,

I_a- É o índice de acidez em mg KOH/g.

4.5.3 Densidade e viscosidade

As análises de densidade e viscosidade foram realizadas por meio de densímetro digital para o óleo e biodiesel. Na realização, a amostra foi introduzida no densímetro, por meio de um tubo de sucção.

Após a ausência de bolhas, iniciou-se a leitura referente a densidade e viscosidade nas temperaturas de 20 °C, 40 °C e 100 °C para o óleo com o intuito de analisa-lo para diferentes temperaturas e para o biodiesel, seguiu-se conforme a ANP nº 920/2023, onde a norma ASTM D 1298/NBR 7148 rege a análise da densidade e a norma ASTM D 445/NBR 10441 rege a análise de viscosidade. Os dados foram realizados em triplicata para cada uma das temperaturas e ao final obteve-se uma média aritmética dos valores.

4.6 Métodos de caracterização estrutural do óleo e biodiesel

4.6.1 Espectroscopia de absorção na Região do Infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

A fim de caracterizar os grupos orgânicos existentes no óleo e no biodiesel de Cártamo, um gráfico de espectroscopia de absorção na região do infravermelho foi plotado a partir de dados do espectrômetro. O método utilizado para realizar esta análise consistiu na adição da amostra dentro de pastilha de brometo de potássio (KBr) a qual obteve valores dentro da faixa de 4000 a 400 cm^{-1} . As bandas foram analisadas na posição e intensidade para conhecimento dos compostos existentes no óleo e biodiesel.

4.6.2 Ressonância Magnética Nuclear (RMN)

As análises de Ressonância Magnética Nuclear foram realizadas utilizando espectrômetros Bruker, onde solubilizou-se cerca de 20 mg do óleo e do biodiesel em 0,7 mL de clorofórmio deuterado (CDCl_3).

Por meio desta análise pôde-se observar os principais constituintes do óleo e biodiesel bem como os deslocamentos químicos estimados para os ácidos graxos livres presentes nas amostras através de correlações com dados da literatura. Por meio destes dados também é possível estimar a conversão em ésteres metílicos do biodiesel. Como afirma Braga, (2023), analisa-se os sinais correspondentes aos hidrogênios metoxílicos dos ésteres ($-\text{CO}-\text{O}-\text{CH}_3$) identificados na região de

3,7 ppm e aos prótons metilênicos α carbonílicos ($-\text{CH}_2\text{-CO-O-}$) entre 2,2 –2,4 ppm. A taxa de conversão pode ser calculada através da equação (6).

$$\text{Conversão (\%)} = 100 \times \left(\frac{2A_{(\text{CH}_3)}}{3A_{(-\text{COOH}_2-)}} \right) \quad (6)$$

Em que:

$A_{(-\text{CH}_3)}$ - Corresponde ao valor da integral da área correspondente aos hidrogênios metoxílicos dos ésteres.

$A_{(-\text{COOCH}_2-)}$ - Corresponde ao valor da integral da área dos prótons metilênicos α -carbonílicos.

4.7 Tratamento do farelo para biomassa

O farelo de cártamo foi adquirido a partir de extração do óleo realizada no laboratório GRINTEQUI na UFC. Este passou primeiramente pelo processo de peneiração por meio da peneira de marca BETEL, de acordo com a ASTM 60. Na Figura 16 é apresentado uma imagem do farelo utilizado.

Figura 16- Farelo de cártamo



Fonte: Autor, (2024)

Depois de tratada, iniciou-se as análises de teor de umidade, cinzas, carbono fixo e massa de voláteis. A análise elementar do farelo da semente foi realizada em laboratório parceiro, onde a porcentagem de nitrogênio, carbono, hidrogênio e enxofre foram encontradas.

4.8 Análise imediata

4.8.1 Teor de umidade.

Na determinação do teor de umidade, seguiu-se uma metodologia onde utilizou-se estufa de secagem, de marca DELEO a 105 °C, balança analítica para pesagem dos cadinhos bem da amostra de torta de cártamo e dessecador para resfriamento. Para medição da amostra, primeiramente pesou-se o cadinho e posteriormente fez-se nota da massa.

Seguindo, realizou-se a pesagem da amostra, nesse caso trabalhou-se com 1 (um) grama de amostra. Depois da pesagem e anotação do valor, a amostra foi levada para a estufa por um período de 2 horas, na temperatura de 105 ± 3 °C, esta análise foi realizada em quadruplicata para ao final realizar uma média dos valores encontrados.

Passado o tempo de secagem, a amostra foi colocada em dessecador para resfriar e logo após, foi pesado o cadinho junto a amostra.

A realização desta etapa e o cálculo para obter o valor do teor de umidade foi dado de acordo com a NBR 16550, visto na equação 7:

$$TU(\%) = ((M_{amostra\ úmida} - M_{amostra\ seca}) / M_{amostra\ úmida}) \times 100\% \quad (7)$$

Onde,

TU (%) - É o valor do teor de umidade da amostra em %,

$M_{amostra\ úmida}$ - É o valor da massa inicial da amostra, em gramas,

$M_{amostra\ seca}$ - É a massa final da amostra, em gramas.

Realizou-se esse cálculo para as quatro amostras e logo em seguida, realizou-se a média entre os quatro.

4.8.2 Teor de cinzas

Para analisar o teor de cinzas da amostra, seguiu-se a metodologia e os cálculos de acordo com NBR 16550 e Neto *et al.*, (2023), onde os mesmos cadinhos em que se realizou as amostras de umidade foram pesados novamente para logo em seguida ser pesado a massa de 1 grama de amostra e depois colocados em mufla, cuja temperatura de reação foi de 575 ± 25 °C, por um período de 4 horas.

Ao final, as amostras foram retiradas da mufla e colocadas em dessecador até resfriar. Essa análise também foi feita em quadruplicata. Seguindo-se com a pesagem das massas depois de realizado o procedimento, o cálculo utilizado para teor de cinzas foi como mostrado nas equações 8-10.

$$TS(\%) = 100 - TU(\%) \quad (8)$$

$$M_{cinzas} = M_{cadinho+cinzas} - M_{cadinho\ vazio} \quad (9)$$

$$A(\%) = \left(\frac{M_{cinzas} \times 100}{M_{amostra\ úmida} \times TS(\%)} \right) \times 100\% \quad (10)$$

Onde,

$TS(\%)$ - É o valor do teor de sólidos de cada amostra,

$A(\%)$ - É o valor do teor de cinzas,

$TU(\%)$ – É o teor de umidade de cada amostra,

M_{cinzas} – É o valor em gramas, da massa final de resíduos.

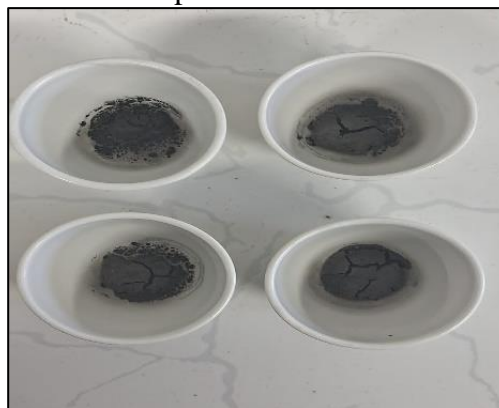
$M_{cadinho+cinzas}$ - É o valor da massa em gramas, do cadinho mais massa final de resíduos,

$M_{cadinho\ vazio}$ – É o valor da massa, em gramas do cadinho inicial, vazio,

$M_{amostra\ úmida}$ - É o valor da massa inicial da amostra, em gramas.

Após a realização dos cálculos, foi feito a média dos valores. Na Figura 17, observa-se uma imagem contendo as amostras do final do processo.

Figura 17- Cadinhos contendo amostras pós análise de teor de cinzas



Fonte: Autor, (2024)

4.8.3 Massa de voláteis

Para a análise de voláteis, o procedimento inicial foi semelhante aos do teor de cinzas e umidade. Fazendo uso dos mesmos cadinhos, pesou-os e o valor foi anotado, logo em seguida a massa de 1 grama de amostra foi pesada em cada um. Estando a mufla a 950 °C, o cadinho contendo a amostra foi introduzida em seu interior e deixada lá por 7 minutos. Passado o tempo, os cadinhos

foram colocados dentro do dessecador para resfriamento. Para a massa de voláteis, o cálculo realizado foi de acordo com a norma ASTM D3175-20 mostrado como abaixo, na equação (11).

$$MV(\%) = \left[\frac{(M_{\text{cadinho+amostra úmida}} - M_{\text{cadinho+cinzas}})}{(M_{\text{cadinho+amostra úmida}} - M_{\text{cadinho vazio}})} \times 100\% \right] - TU(\%) \quad (11)$$

Onde,

$MV(\%)$ - É o teor de massa de voláteis da amostra,

$TU(\%)$ - É o teor de umidade de cada amostra,

$M_{\text{cadinho+cinzas}}$ - É o valor da massa em gramas, do cadinho mais massa final de resíduos,

$M_{\text{cadinho vazio}}$ - É o valor da massa, em gramas do cadinho inicial, vazio,

$M_{\text{cadinho+amostra úmida}}$ - É o valor da massa inicial do cadinho junto a amostra, em gramas.

Ao final, também foi realizado uma média dos valores encontrados. É possível observar na Figura 18, uma imagem do final do processo de obtenção da massa de voláteis.

Figura 18- Cadinhos contendo amostras pós análise de teor de massa de voláteis



Fonte: Autor, (2024)

4.8.4 Carbono fixo

O carbono fixo foi calculado a partir dos valores de teor de cinzas e massa de voláteis encontrados para a torta de cártamo. A metodologia seguiu-se de acordo com ASTM D3172-13(2021), onde é proposto uma equação como em equação 12.

$$CF(\%) = 100 - A(\%) - MV(\%) \quad (12)$$

4.9 Análise elementar

Por meio da análise elementar foi possível obter os valores de Nitrogênio (%), carbono (%), hidrogênio (%) e enxofre (%). As análises foram realizadas em triplicata, com massa de amostra entre 2 e 3 gramas. O equipamento utilizado foi o Analisador Elementar Flash EA 1112, Thermo Scientific, com erro de precisão de 5%, utilizado no laboratório de Divisão de Técnicas de Química Analítica (DQA), da Universidade Federal do ABC (UFABC).

A realização se deu por meio de separação dos gases formados (cromatografia gasosa) após a combustão das amostras e analisadas sob a forma de CO_2 , N_2 , H_2O , H_2SO_3 , respectivamente. Estes gases são arrastados pelo gás hélio através de uma coluna e são detectados por condutividade térmica, enquanto que os resíduos permanecem sob a forma de cinzas.

4.10 Poder Calorífico Superior (PCS)

O poder calorífico foi determinado a partir de equacionamentos correlatados pela literatura. Foram enumerados 8 equacionamentos, dos quais relacionam entre si os dados encontrados na análise imediata (teor de umidade, cinzas e voláteis), e também relacionam os dados encontrados na análise elementar (%H, %N, %C, %O, %S e %A).

O cálculo do poder calorífico por meio de análise elementar se dá a partir da fórmula universal de Parikh *et al.*, (2002), onde os valores dos compostos estão na faixa de $0\% \leq C \leq 92,25\%$, $0,43\% \leq H \leq 25,15\%$, $0,00\% \leq O \leq 50,0\%$, $0,00\% \leq N \leq 5,60\%$, $0,00\% \leq S \leq 94,08\%$, $0,00\% \leq A \leq 71,4\%$, e o erro absoluto se encontra na ordem de 1,45%. Por meio da equação (13) é apresentado o cálculo.

$$\text{PCS} = 0,3491C + 1,1783H - 0,1034O - 0,0151N - 0,0211A + 0,1005S \quad (13)$$

Os cálculos de poder calorífico por meio de análise imediata foram equacionados de acordo com Neto *et al.*, (2023) e Ozyuguran *et al.*, (2017), os quais são descritos na Tabela 7.

Tabela 7- Equações utilizadas para cálculo de poder calorífico.

| Poder Calorífico Superior (PCS)(MJ/kg) | Eq. |
|--|------|
| $\text{PCS} = -2,057 - 0,092 \cdot A(\%) + 0,279 \cdot MV(\%)$ | (14) |
| $\text{PCS} = 0,1905 \cdot MV(\%) + 0,2521 \cdot CF(\%)$ | (15) |
| $\text{PCS} = 0,15734 \cdot (MV(\%) + CF(\%)) + 4,24397$ | (16) |

$$PCS = 0,365 \cdot CF(\%) + 0,131 \cdot MV(\%) + \frac{1,397}{CF(\%)} + \frac{328,568 \cdot MV(\%)}{10283,138 \cdot (CF(\%))^2 \cdot A(\%) - 6,863 \cdot (CF(\%))^2 \cdot A(\%)} \quad (17)$$

$$PCS = 10.982 + 0.1136 \cdot MV(\%) - 0.2848 \cdot A(\%) \quad (18)$$

$$PCS = -17.507 + 0.3985 \cdot MV(\%) + 0.2875 \cdot CF(\%) \quad (19)$$

$$PCS = 18.297 - 0.4128 \cdot A(\%) + \frac{35.8}{CF(\%)} \quad (20)$$

Fonte: Neto *et al.*, (2023) e Ozyuguran *et al.*, (2017) com adaptações.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Rendimento da extração e análises físico-químicas do óleo de cártamo

5.1.1 Rendimento da extração

O cálculo do rendimento, baseado conforme equação (1) foi realizado a partir dos dados de 20 extrações. A tabela 8, mostra os dados das extrações.

Tabela 8- Rendimento da extração

| | Peso sementes para extração (g) | Peso do óleo obtido (g) | Rendimento (%) | Rendimento médio (%) |
|-------------|------------------------------------|----------------------------|----------------|-------------------------|
| Extração 1 | 35,0030 | 8,5222 | 24,35 | |
| Extração 2 | 35,0039 | 13,36 | 38,20 | |
| Extração 3 | 35,0176 | 12,090 | 34,53 | |
| Extração 4 | 35,0073 | 8,5218 | 24,34 | 29,3225 |
| Extração 5 | 35,0067 | 12,6235 | 36,06 | |
| Extração 6 | 35,0035 | 10,8230 | 30,92 | |
| Extração 7 | 35,0095 | 11,0265 | 31,50 | |
| Extração 8 | 35,00 | 9,1162 | 26,05 | |
| Extração 9 | 35,00 | 18,3337 | 52,38 | |
| Extração 10 | 35,0059 | 9,1798 | 26,22 | |
| Extração 11 | 35,0280 | 8,9655 | 36,03 | |
| Extração 12 | 35,0008 | 8,7660 | 25,05 | |
| Extração 13 | 35,0060 | 9,0864 | 25,96 | |

| | | | |
|-------------|---------|--------|-------|
| Extração 14 | 35,0138 | 8,7910 | 25,11 |
| Extração 15 | 35,0572 | 8,9758 | 25,60 |
| Extração 16 | 35,0043 | 8,7459 | 24,99 |
| Extração 17 | 35,0163 | 8,8152 | 25,17 |
| Extração 18 | 35,0325 | 8,6254 | 24,62 |
| Extração 19 | 35,0035 | 8,5984 | 24,56 |
| Extração 20 | 35,0000 | 8,6847 | 24,81 |

Fonte: Autor, (2024)

Considerando os erros de medição, em geral, podemos concluir que a extração do óleo obteve rendimento médio de 29,3225%. Alguns autores como Deriven *et al.*, (2023), Vieira *et al.*, (2019), Conte *et al.*, (2016) e Morais (2012), realizando estudos com a extração de óleo de cártamo pelo método Soxhlet e hexano como solvente obtiveram valores entre 29% e 36,56% de rendimento de extração, sendo, portanto, esse valor encontrado dentro da faixa da literatura.

Fazendo uma comparação em termos percentuais de óleo em sementes, mais especificamente em sementes de soja, que atualmente é a mais utilizada pela população brasileira e também a mais utilizado na produção de biodiesel segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2023), os valores de teor de óleo chegam a variar entre 15% a 25%, segundo dados apresentados por Mandarin *et al.*, (2015). Assim, pode-se estimar que as sementes de cártamo se apresentam como oleaginosas promissoras em termos percentuais de óleo.

5.1.2 Índice de acidez e saponificação

Os valores de índice de acidez e saponificação foram calculados de acordo com a equação (2) e (3), respectivamente. Na Tabela 9 são apresentados esses valores.

Tabela 9- Valores de índice de acidez e saponificação do óleo de cártamo

| Óleo de cártamo produzido | |
|------------------------------------|---------|
| Índice de acidez (mg KOH/g) | 0,749 |
| Índice de saponificação (mg KOH/g) | 180,811 |

Fonte: Autor, (2024)

Análogo a estes valores, a fim de comparar os dados alcançados com valores da literatura, foi descrito na Tabela 10 alguns resultados encontrados para o índice de acidez e saponificação do óleo de cártamo de acordo com outros autores.

Tabela 10- Índice de acidez e saponificação do óleo de cártamo de acordo com a literatura

| Óleo de cártamo literatura | | Referência |
|------------------------------------|--------------|-------------------------------|
| Índice de acidez (mg KOH/g) | 0,06-2,73 | Braga, (2023); Morais, (2012) |
| Índice de saponificação (mg KOH/g) | 163,4-220,27 | Braga, (2023); Morais, (2012) |

Fonte: Autor, (2024)

Pode-se observar que os valores encontrados para índice de acidez e saponificação do óleo de cártamo produzido neste trabalho estão em comum com os encontrados na literatura.

O valor do índice de acidez indica importantes características sobre o óleo e para produção de biodiesel, um óleo com acidez elevada primeiramente deve passar por um processo de neutralização, para que aconteça a reação de transesterificação com maior eficiência.

O índice de saponificação se eleva quanto menor for o peso molecular dos ácidos graxos existentes no óleo. Se seu valor for elevado, haverá maior probabilidade de acontecer reações indesejáveis nos processos de produção de biodiesel, mais especificamente na reação de transesterificação do óleo.

Os valores de índice de acidez e saponificação do óleo são importantes ainda pelo fato de serem utilizados na esterificação para mensurar o valor de álcool que será utilizado na reação.

5.1.3 Densidade e viscosidade do óleo

A densidade e viscosidade do óleo foram avaliadas com o intuito de estimar se as mesmas se adequavam para produção de biocombustível. Os dados encontrados para temperaturas de 20 °C, 40 °C e 100 °C estão na Tabela 11.

Tabela 11- Valores de densidade e viscosidade do óleo de cártamo.

| | Temperaturas | | |
|----------------------------------|--------------|--------|--------|
| | 20 °C | 40 °C | 100 °C |
| Densidade (Kg/m ³) | 909,6 | 896,03 | 854,03 |
| Viscosidade (mm ² /s) | 45,56 | 23,105 | 6,027 |

Fonte: Autor, (2024)

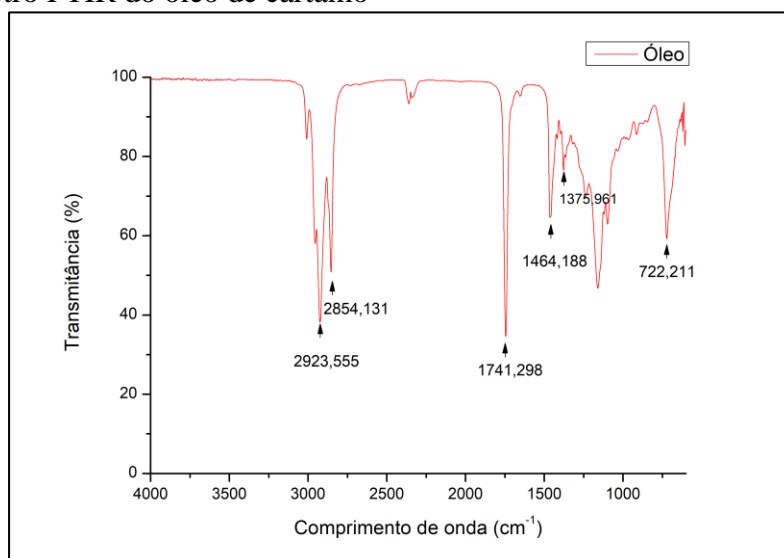
Os valores de viscosidade encontrados, comparado aos encontrados por Yesilyurt *et al.*, (2019) nas temperaturas de 40 °C e 100 °C foram na faixa entre 26,8 e 34,21 para 40 °C e de 7,706 para 100 °C. Já os autores Vieira *et al.*, (2019) para as temperaturas de 40° C e 100 °C, encontraram valores de 26,18 e 6,94, respectivamente.

5.2 Caracterização estrutural do óleo de cártamo

5.2.1 Espectroscopia de absorção na Região do Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

Uma imagem do espectro FTIR do óleo pode ser vista na Figura 19, com suas principais bandas.

Figura 19- Espectro FTIR do óleo de cártamo



Fonte: Autor (2024)

Uma análise contendo os compostos de acordo com o valor do comprimento de onda foi elaborada, os dados são mostrados na Tabela 12.

Tabela 12- Análise do óleo de cártamo por FTIR.

| Tipo de vibração | | Frequência (cm^{-1}) | Intensidade |
|------------------|---------------|--------------------------|-------------|
| C – H | Alcano | 3000-2850 | Forte |
| | (Estiramento) | | |
| C = O | Éster | 1760-1620 | Forte |
| –CH ₃ | Alcanos | 1465 | Média |
| | (Dobramento) | | |
| –CH ₃ | Alcano | 1375 | Fraca |
| | (Dobramento) | | |
| C – C | Alcano | 723 | Média |

Fonte: Autor, (2024)

De acordo com Castro *et al.*, (2021), a caracterização como óleo graxo pode ser observada na banda que se encontra na região de 1.760 a 1.620 cm^{-1} , região característica do estiramento

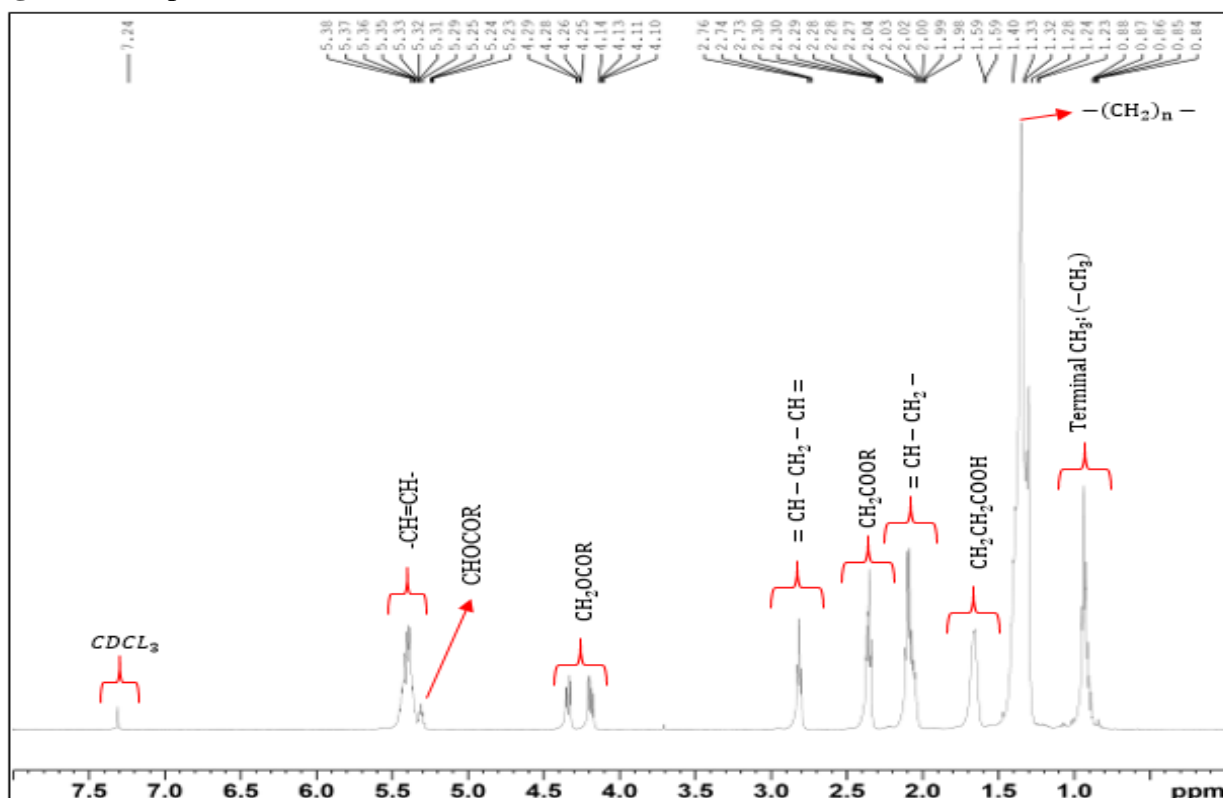
C=O, onde em torno de 1.740 cm^{-1} corresponde aos estiramentos C=O de grupos éster (Zhang *et al.*, 2021) e 1.710 cm^{-1} corresponde aos estiramentos C=O de grupos ácido carboxílico (Araújo *et al.*, 2021).

A região em torno de 3.400 cm^{-1} indica a presença de ácidos graxos livres. No presente espectro não se observa uma grande elevação nesta região, que corresponde às interações do tipo ligação de hidrogênio, realizadas por grupos O-H (Buratto *et al.*, 2019; Castro *et al.*, 2021).

Os alcanos apresentam pouquíssimas bandas de absorção em espectros do infravermelho, e neste espectro produziu apenas dois próximos a 3000 cm^{-1} além de picos de dobramento de CH_2 e CH_3 entre 1475 cm^{-1} e 1365 cm^{-1} . Pode-se observar que a espectroscopia do óleo é semelhante à de outros, como por exemplo o de *Moringa oleífera* Lam estudado por Bhutada *et al.*, (2016), semelhante também ao do óleo de babaçu, buriti, macaúba e pinhão-manso, estudados por Moura *et al.*, (2019) e semelhante também ao estudados em outras pesquisas com óleo de cártamo, como apresentado por Deriven *et al.*, (2023).

5.2.2 Ressonância Magnética Nuclear (RMN)

Por meio desta análise, os principais constituintes do óleo foram identificados e os principais deslocamentos químicos estimados para os ácidos graxos livres. O método RMN também pode ser usado para fornecer o teor de óleo em sementes, como visto nos estudos de Satyarathi, *et al.*, (2009), também pode ser utilizado nas análises de índice de saponificação, massa molecular médio e índice de iodo, através do programa PROTEUS RMN ^1H (Reda; Carneiro, 2007). Assim, a partir da Figura 20, observa-se os resultados encontrados para esta amostra.

Figura 20- Espectro de RMN ^1H do óleo de cártamo

Fonte: Autor, (2024)

Os picos foram caracterizados de acordo com os apresentados por Deriven *et al.*, (2023). A Tabela 13 apresenta esses picos de forma mais detalhada.

Tabela 13 – Caracterização das bandas por meio do RMN ^1H .

| Prótons | Fragmentos da molécula | Óleo de cártamo (ppm) |
|---|--|-----------------------|
| $(\text{CH}_3) - \text{C}$ | Hidrogênios metílicos dos demais ésteres | 0,8-1,01 |
| $-(\text{CH}_2)_n -$ | Cadeia principal CH_2 | 1,25-1,41 |
| $\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$ | hidrogênios β -carboxílicos | 1,6-1,70 |
| $= \text{CH} - \text{CH}_2 -$ | Hidrogênios alílicos externos | 2,02-2,09 |
| CH_2COOR | Hidrogênios α -carboxílicos | 2,31-2,35 |
| $= \text{CH} - \text{CH}_2 - \text{CH} =$ | Hidrogênios alílicos internos | 2,77-2,80 |
| CH_2OCOR | Grupo metilênicos (H1 e H3) do glicerol | 4,14-4,19 e 4,30-4,33 |
| CHOCOR | hidrogênio metínico em H2 do glicerol | 5,27-5,31 |
| $-\text{CH}=\text{CH}-$ | Hidrogênios olefínicos | 5,34-5,42 |

Fonte: Satyarathi *et al.*, (2009, com adaptações)

Pode-se observar no espectro que na região entre 0-6,0 ppm vários sinais de intensidade significativos de triglicerídeos apresentam-se composto na estrutura principal e como é sabido, na reação de transesterificação para produção de ésteres metílicos, a composição do biodiesel se dá pelas diversas cadeias antes ligadas à composição do glicerol nos triacilgliceróis.

Observa-se ainda que a cadeia do óleo de cártamo se trata de uma cadeia poli-insaturada, resultando em presença de hidrogênios alílicos externos e internos e maior quantidade de hidrogênios olefínicos. Estas características devem influenciar as interações intermoleculares e facilitar reações de oxidação lipídica que podem iniciar-se com a retirada de um hidrogênio alílico (Farmer *et al.*, 1942; Yaakbo *et al.*, 2014).

5.3 Análises físico-químicas do biodiesel de cártamo

Os resultados encontrados para análise físico-química do biodiesel são mostrados na Tabela 14, onde também poderá ser comparado com os valores estipulados pela Resolução ANP nº 920/2023 e também por alguns autores que realizaram a produção do biocombustível com óleo de cártamo.

Tabela 14- Resultado das análises físico-químicas do biodiesel de cártamo.

| Propriedades | Biodiesel de cártamo produzido | Resolução ANP nº 920/2023 de 04 de Abril |
|---|-----------------------------------|---|
| Índice de acidez mg KOH/g | 0,2 | 0,5 máx. |
| Massa específica a 20 °C (Kg/cm ³) | 881,7 | 850-900 |
| Viscosidade cinemática a 40 °C(mm ² /s) | 4,1 | 3-5 |

Fonte: Autor (2024)

Fazendo uma avaliação geral dos resultados obtidos, observa-se que os valores encontrados estão dentro da norma. Alguns dados da literatura como em Morais, (2016), Nogales-Delgado *et al.*, (2021) e Hachemi *et al.*, (2020), obtiveram valores de índice de acidez entre 0,01-0,399 mg KOH/g, massa específica a 20 °C entre 875,1-890 Kg/cm³ e viscosidade cinemática a 40 °C entre 3,7-6,2 mm²/s, logo, observa-se que os valores encontrados estão semelhantes aos dados de outros autores para o mesmo biocombustível.

A viscosidade cinemática é um importante fator para o biocombustível, pois diz respeito ao adequado funcionamento do sistema de injeção e bombas além de também influenciar na etapa de combustão, sendo inversamente proporcional a eficiência do motor, logo, quanto maior a viscosidade, menor a eficiência. Como pode ser visto, a ANP estima o valor entre 3 a 5 mm²/s, e o biodiesel produzido neste trabalho se encontra dentro deste parâmetro. Em relação a literatura, o valor encontrado também se encontra análogo aos dados de outros autores. Os dados de índice de acidez e densidade, estão com valores conforme a norma indica e semelhantes ao encontrado na literatura.

Fazendo uma comparação dos parâmetros estudados com o cártamo e com outras matérias-primas já utilizadas na produção de biodiesel comercializado no Brasil, encontra-se os seguintes valores (Tabela 15):

Tabela 15- Propriedades de biodiesel utilizados para comercialização.

| Propriedades | | | | |
|--------------|------------------------------|---|---|--------------------------------------|
| | Índice de acidez mg KOH/g | Massa específica a 20 °C (Kg/cm ³) | Viscosidade cinemática a 40 °C (mm ² /s) | Referência |
| Soja | 0,16 | 883,6-885 | 3,97 -4,38 | Shimamoto, (2017) |
| Dendê | 0,5 | 872,74 -873,2 | 3,44-4,66 | Matos, 2015; Shimamoto, (2017) |

Fonte: Autor (2024)

Observa-se que os valores encontrados das propriedades de biodiesel com oleaginosas utilizadas para comercialização do biocombustível se encontram próximos aos valores do biodiesel de cártamo, tornando, portanto, essa matéria-prima promissora para a indústria.

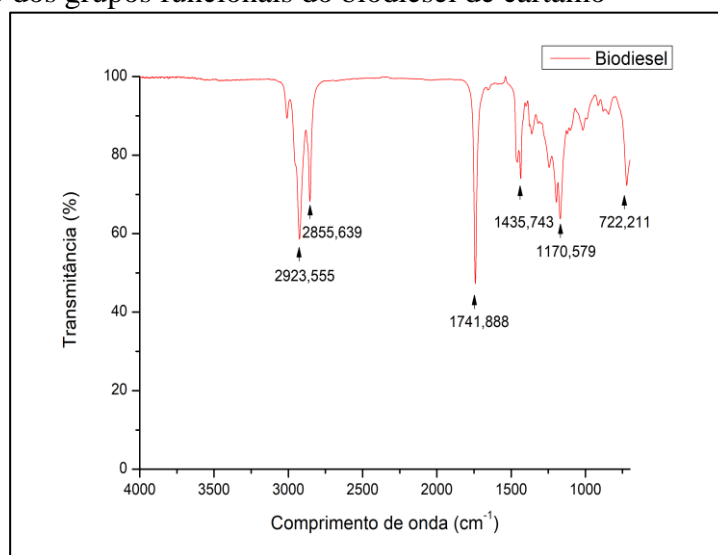
5.4 Caracterização estrutural do biodiesel de cártamo

A seguir serão apresentados os resultados das análises de FTIR e RMN, encontrados para o biodiesel de cártamo.

5.4.1 Espectroscopia de absorção na Região do Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

Na Figura 21 é possível observar os grupos funcionais presentes no biodiesel de cártamo. Os espectros estão variando comprimento de onda entre 4000 cm^{-1} a 400 cm^{-1} .

Figura 21- Espectro dos grupos funcionais do biodiesel de cártamo



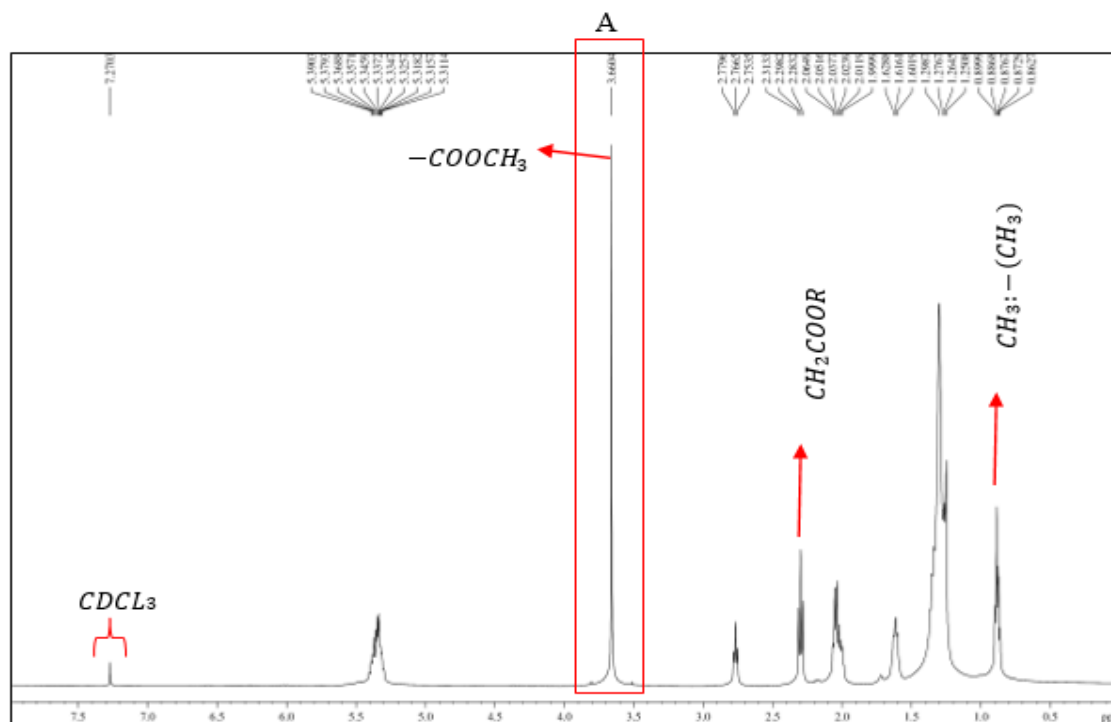
Fonte: Autor, (2024)

Como observado pela Figura 23, a forte vibração de deformação axial da ligação do grupo funcional C=O entre 1750 e 1735 cm^{-1} e a vibração de deformação axial assimétrica da ligação C-O entre 1200 a 1000 cm^{-1} indicam a presença de éster. Também é possível observar a presença de longas cadeias carbônicas (C-H) de cadeia aberta, na faixa entre 3000 e 2840 cm^{-1} . De acordo com Goes (2018), as ligações de CH_2 são representadas por duas bandas, onde em aproximadamente 1435 cm^{-1} tem-se a absorção do dobramento angular assimétrica e em aproximadamente 722 cm^{-1} o dobramento angular simétrico do tipo tesoura de alifáticos.

Este espectro se assemelha ao encontrado por Cairo *et al.*, (2016), ao estudar a produção de biodiesel com óleo residual, e com o espectro encontrado por Moraes (2012), ao pesquisar sobre o óleo e biodiesel de cártamo.

5.4.2 Ressonância Magnética Nuclear (RMN)

Na Figura 22 é apresentado o espectro obtido por meio da caracterização do biodiesel por Ressonância Magnética Nuclear.

Figura 22-Espectro de ^1H do biodiesel de cártamo

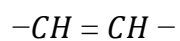
Fonte: Autor, (2024)

Neste espectro da Figura 22, de RMN ^1H observa-se diferentes picos. Como mostrou os estudos de Martini, (2010), pode-se confirmar a produção de ésteres metílicos por meio desta análise pelo aparecimento do pico em $\delta = 3,6$ ppm (pico A), referente aos hidrogênios de metila da função éster e o desaparecimento de picos entre $\delta = 4,1$ - $4,3$ ppm que dizem respeito aos hidrogênios dos grupos metilenos do glicerol.

A partir do espectro de RMN ^1H , uma análise dos grupos funcionais existentes pode ser realizada, como mostra a Tabela 16.

Tabela 16- Fragmentos da molécula de biodiesel de cártamo

| Prótons | Fragmentos da molécula | δ (ppm) |
|---|---|----------------|
| CH_3-C | Terminal do grupo metil | 0,8-1,0 |
| $-(\text{CH}_2)_n-$ | Cadeia principal CH_2 | 1,22-1,42 |
| $-\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$ | Próton β -metileno | 1,55-1,69 |
| $=\text{CH}-\text{CH}_2-$ | Grupo α -metileno com uma ligação dupla | 1,93-2,10 |
| $-\text{CH}_2\text{COOR}$ | Grupo de α -metileno éster | 2,31 |
| $=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-$ | Grupo α -metileno com duas ligações duplas | 2,77 |
| $-\text{COOCH}_3$ | Grupo de metil éster | 3,67 |



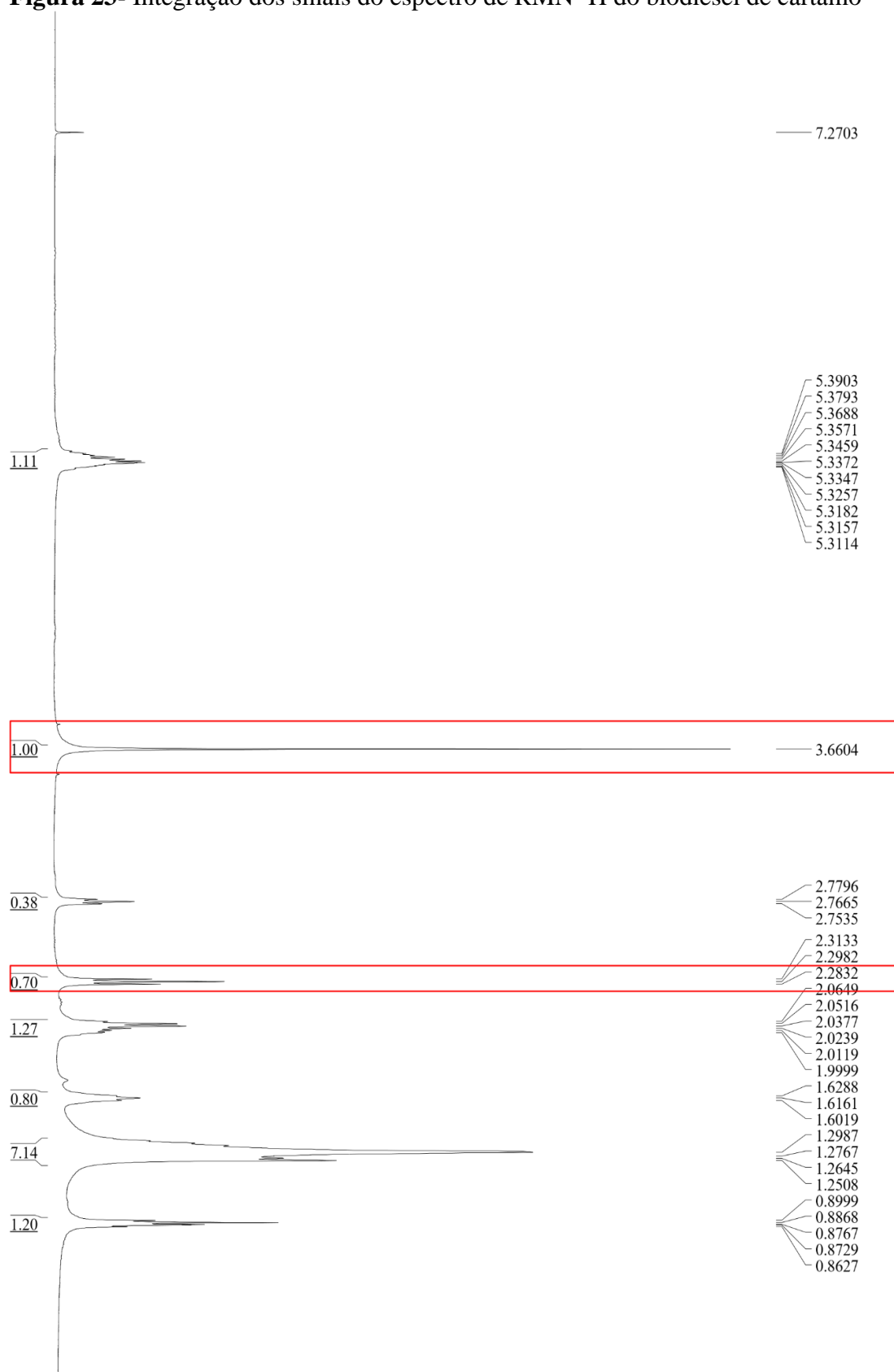
Prótons olefínicos

5,27-5,41

 Fonte: Autor, (2024)

Através da integração de alguns picos é possível realizar a conversão da reação de transesterificação, o qual será mostrado a partir da Figura 23.

Figura 23- Integração dos sinais do espectro de RMN ^1H do biodiesel de cártamo



Fonte: Autor, (2024)

Utilizando os cálculos realizados por Braga (2023), para encontrar a conversão, é necessário a integração correspondente em $\delta = 3,6$ ppm e entre $\delta = 2,2 - 2,4$ ppm os quais indicam os sinais correspondentes à os do grupo metoxi nos ésteres metílicos e os grupos carbonil metileno, respectivamente. A fórmula se dá conforme equação 6.

Onde:

$A_{(-CH_3)}$ - corresponde ao sinal em $\delta = 3,6$ ppm e

$A_{(-COOCH_2-)}$ - corresponde ao sinal entre $\delta = 2,2 - 2,4$ ppm.

Logo, por meio da Figura 23, temos que:

$$\text{Conversão (\%)} = 95,24$$

Assim, a conversão em ésteres por meio da transesterificação do óleo de cártamo obteve valor de 95,24 % em massa.

5.5 Análise imediata do farelo de cártamo

A partir das análises de teor de umidade, cinzas, voláteis e carbono fixo realizado em laboratório, os seguintes resultados foram encontrados.

5.5.1 Teor de umidade

Na Tabela 17, são apresentados os valores de teor de umidade encontrados para o farelo de cártamo e a partir deles a média dos valores.

Tabela 17- Valores em quadruplicata do teor de umidade do farelo de cártamo

| | Teor de umidade (%) |
|--------------|-----------------------|
| 1 | 11,8649 |
| 2 | 11,9984 |
| 3 | 11,8502 |
| 4 | 11,6270 |
| Média | 11,8351 ± 0,13 |

Fonte: Autor, (2024)

Não foram encontrados dados na literatura sobre o teor de umidade do cártamo, porém fazendo um comparativo do valor com dados encontrados para o bagaço de cana-de-açúcar que é atualmente o mais utilizado na indústria e outros também muito estudados como a casca de coco, pode-se considerar que o valor encontrado neste estudo está dentro do padrão.

Estudos de Bezerra (2016), mostra que o teor de umidade do briquete do bagaço de cana e de casa de coco apresenta valor de 11%. Pesquisa de Souza (2013), com bagaço de cana-de-açúcar, encontrou valor médio de 18,38%, sendo bem mais elevado.

Os valores de teor de umidade podem variar de acordo com fatores externos de tratamento da amostra. Pode-se considerar que no processo de peneiração há perdas de umidade para o meio, entre outros fatores como armazenamento. Segundo Klautau (2008) valores de teor de umidade acima de 50% são determinantes para não utilização da biomassa por liberar energia de forma insuficiente para a combustão. Já valores abaixo de 30% são considerados ótimos para o rendimento da combustão (Freitas, 2016). Assim, o valor encontrado para o cártamo se encontra dentro dos padrões considerados positivo.

5.5.2 Teor de cinzas

Na Tabela 18 são apresentados os valores de teor de cinzas encontrados para o farelo de cártamo, realizado em quadruplicata, e a partir deles foi encontrado a média dos valores.

Tabela 18- Valores de teor de cinza do farelo de cártamo

| | Teor de cinzas (%) |
|--------------|--------------------|
| 1 | 8,7574 |
| 2 | 8,6549 |
| 3 | 8,6012 |
| 4 | 8,7191 |
| Média | 8,6831±0,06 |

Fonte: Autor, (2024)

Os valores de teor de cinzas afetam negativamente o poder calorífico da madeira, pois diminui a eficiência da combustão causado pelo aumento de consumo de oxigênio necessário para derreter as cinzas. Uma quantidade de cinzas muito alta no farelo de cártamo poderá influenciar diretamente no poder calorífico da biomassa, fato que deverá ser compensado pelo teor de voláteis. (Souza, 2013).

O teor de cinzas para o cártamo encontrado nesta análise foi de 8,68 %. Avaliando o teor de cinzas encontrado para pesquisas com bagaço de cana-de-açúcar, em estudos de Nunes *et al.*, (2020) e Cieslinski (2014), encontrou-se valores de 18,64 % e 18,8% respectivamente, valores bem mais elevados que o encontrado nesta pesquisa. Outros estudos como o de Dori (2022), Sánchez (2010), e Arantes (2014), encontrou-se valores de 3,07%, 4,4% e 4,6% respectivamente, valores menores do que o encontrado para o cártamo.

Para a casca de coco foram encontrados valores de 8,25% e 13,24 % (Schurhaus 2007; Marcelino, 2017), sendo valores próximos ao do cártamo nesta pesquisa. Pode-se considerar que este valor é positivo, uma vez que a alta concentração de cinzas, pode reduzir a eficiência do processo de combustão e neste caso não houve um valor tão elevado em relação aos demais encontrados pela literatura.

5.5.3 Massa de voláteis

Na Tabela 19 são apresentados os valores de teor de voláteis alcançado para o farelo de cártamo, realizado em quadruplicata.

Tabela 19- Massa de voláteis do farelo de cártamo

| | Teor de voláteis (%) |
|--------------|----------------------|
| 1 | 79,5790 |
| 2 | 79,8011 |
| 3 | 79,2946 |
| 4 | 79,0719 |
| Média | 79,4366±0,28 |

Fonte: Autor, (2024)

A massa de voláteis indica o comportamento na combustão das biomassas, ou seja, os combustíveis que apresentam alto teor de materiais voláteis são mais fáceis de oxidarem e queimam mais rapidamente (Vasconcelos, 2017), isso pode ser considerado positivo, em relação a ignição da biomassa, porém, pode também proporcionar uma queima rápida, o que não favorece o processo, se apresentar baixa resistência.

Na literatura foram encontrados valores de massa de voláteis para o bagaço de cana-de-açúcar dentro da faixa de 66,4 a 91,20% (Cieslinski, 2014; Dori, 2022; Sánchez, 2010; Arantes, 2014, Souza, 2013). Para a casca de coco, encontrou-se valores na literatura dentro da faixa de 67,95 a 79,20 % (Schurhaus 2007; Marcelino, 2017; García *et al.*, 2012), valores um pouco abaixo do encontrado para o cártamo. É possível considerar a partir dos dados encontrados que, para esta análise, o cártamo se encontra dentro da faixa das biomassas utilizadas industrialmente: bagaço de cana-de-açúcar e casca de coco.

5.5.4 Carbono fixo

Por meio da Tabela 20 são apresentados os valores de teor de carbono fixo encontrado para o farelo de cártamo. Estes valores foram calculados a partir do teor de cinzas e da massa de voláteis.

Tabela 20 - Teor de carbono fixo do farelo de cártamo

| | Carbono fixo (%) |
|--------------|---------------------|
| 1 | 11,6635 |
| 2 | 11,5439 |
| 3 | 12,1042 |
| 4 | 12,2091 |
| Média | 11,8802±0,28 |

Fonte: Autor, (2024)

O teor de carbono fixo está diretamente ligado à formação de carvão produzido no final da reação e influenciará significativamente no poder calorífico superior da biomassa. Valores de carbono fixo baixos indicam que o combustível apresenta baixa resistência térmica e assim ocorrerá a combustão de forma mais rápida (Marcelino, 2017; Souza, 2013), o que não torna o processo eficiente.

O carbono fixo do farelo de cártamo encontrado neste trabalho, calculado a partir da equação 12, apresentou média de 11,88 %. Esse valor comparada as biomassas de cana-de-açúcar, por exemplo onde se pode encontrar variação de valores entre 5,73% a 16,1% (Cieslinski, 2014; Dori, 2022; Sánchez, 2010; Arantes, 2014, Souza, 2013), o farelo de cártamo se encontra dentro da média. Para a casca de coco foram encontrados valores entre 11,20% a 23,8% (Schurhaus 2007; Rout *et al.*, 2016; García *et al.*, 2012) de teor de cinzas. A média obtida para o cártamo também se encontra dentro destes padrões.

Considerando, portanto, que o teor de carbono fixo encontrado neste trabalho para o farelo de cártamo não se apresenta com valor discrepante em relação à por exemplo, a biomassa de cana-de-açúcar, podendo ser utilizado também para este fim como forma de aproveitar toda a matéria-prima renovável de forma energética.

5.6 Análise elementar do farelo de cártamo

Por meio da análise elementar foi possível obter a porcentagem na composição do farelo de cártamo dos elementos nitrogênio (%N), carbono (%C), hidrogênio (%H) e enxofre (%S). Através destes dados foi possível mensurar o teor de oxigênio (%O). Souza, (2013), admite que o teor de oxigênio pode ser calculado a partir de: $\%O = 100 - (\%N + \%C + \%H + \%S + \%A)$.

O teor de cinzas mostrado, refere-se ao teor de cinzas descrito na Tabela 18. Para o cálculo foi utilizado a média de %A. Os resultados podem ser observados na Tabela 21.

Tabela 21- Análise dos elementos constituintes do farelo de cártamo.

| Análise elementar | | | | | | | |
|--------------------------|---------|---------------|-------------|----------|-------------|----------|-----------|
| Nome | Amostra | Massa (mg) | %nitrogênio | %carbono | %hidrogênio | %enxofre | %oxigênio |
| CT02 | 8,1 | 2,141 | 5,873 | 44,253 | 5,985 | 0,000 | 35,206 |
| | 8,2 | 2,227 | 6,222 | 45,903 | 6,293 | 0,000 | 32,899 |
| | 8,3 | 2,200 | 1,953 | 45,575 | 5,899 | 0,000 | 37,890 |

Fonte: Autor, (2024)

Onde CT02 diz respeito a semente de cártamo pós-extração que passou só em uma peneira. Observa-se que os maiores teores são de carbono e oxigênio na composição do farelo de cártamo, respectivamente. Baixos valores de nitrogênio bem como de hidrogênio e não apresenta valores de enxofre.

Afirma Mckendry (2002), que as altas concentrações de carbono e oxigênio e baixos valores do hidrogênio indica que a amostra não apresentará valor energético elevado. De acordo com García *et al.*, (2012), as emissões de óxido de enxofre (SOx) da mistura são muito pequenas comparado a outras emissões de atividades industriais, e, portanto, pode ser ignorado. Já os valores encontrados de nitrogênio são consideráveis, podendo ter emissão de óxidos de nitrogênio (NOx), porém também quando comparado a outras emissões, considera-se um valor irrisório.

Não foram encontrados dados na literatura referente a análise elementar do farelo de cártamo, assim, comparado com os valores obtidos por autores com estudos de bagaço de cana-de-açúcar, por exemplo, observa-se que as maiores concentrações também são de carbono e oxigênio, podendo ser observado a presença de enxofre na composição e baixos valores de nitrogênio (Souza, 2013), já comparando a casca de coco, tem-se que as maiores composições também são de carbono e oxigênio, porém o teor de nitrogênio e enxofre mostraram-se irrelevantes na pesquisa (Marcelino, 2017).

5.7 Poder Calorífico Superior (PCS) do farelo de cártamo

O cálculo do poder calorífico é um importante fator em termos de quantificação da liberação de energia a ser liberada pelo processo de queima do combustível. Na Tabela 22 é apresentado os valores apresentados de acordo com 7 equações (14-20), onde foram encontrados diferentes valores, porém com pequenos desvios padrões em relação uns aos outros.

Tabela 22- Poder calorífico superior do farelo de cártamo nesta pesquisa

| Poder Calorífico Superior (PCS) | Eq. | Resultado (MJ/kg) |
|---|------|----------------------|
| $PCS = -2.057 - 0.092 \cdot A(\%) + 0.279 \cdot MV(\%)$ | (14) | 19,3082 |
| $PCS = 0.1905 \cdot MV(\%) + 0.2521 \cdot CF(\%)$ | (15) | 18,1283 |
| $PCS = 0,15734 \cdot (MV(\%) + CF(\%)) + 4,24397$ | (16) | 18,6123 |
| PCS $= 0,365 \cdot CF(\%) + 0,131 \cdot MV(\%) + \frac{1,397}{CF(\%)}$ $+ \frac{328,568 \cdot MV(\%)}{10283,138 \cdot (CF(\%))^2 \cdot A(\%) - 6,863 \cdot (CF(\%))^2 \cdot A(\%)}$ | (17) | 17,5783 |
| $PCS = 10.982 + 0.1136 \cdot MV(\%) - 0.2848 \cdot A(\%)$ | (18) | 17,5343 |
| $PCS = -17.507 + 0.3985 \cdot MV(\%) + 0.2875 \cdot CF(\%)$ | (19) | 17,5653 |
| $PCS = 18.297 - 0.4128 \cdot A(\%) + \frac{35.8}{CF(\%)}$ | (20) | 17,7274 |

Fonte: Autor, (2024)

Os resultados obtidos do poder calorífico a partir da análise imediata variaram entre 17 MJ/kg a 19 MJ/kg para o farelo de cártamo, sendo estes valores considerado médio em relação a outras matérias como o bagaço de cana-de-açúcar, borra de café e casca de coco, utilizados na produção de biomassa, como mostra a Tabela 23, onde contém alguns dados da literatura.

Tabela 23- Poder calorífico de algumas matérias-primas utilizadas para produção de biomassa.

| Biomassa | PCS (MJ/kg) | Referências |
|--------------------------|-------------|-------------------------------|
| Bagaço de cana-de-açúcar | 16,7373 | Souza, (2013) |
| Borra de café | 20,08 | Soares <i>et al.</i> , (2015) |
| Casca de coco | 19,864 | Alves <i>et al.</i> , (2022) |

Fonte: Autor, (2024)

O poder calorífico também pode ser dado seguindo-se como na equação (13), onde é obtido a partir da análise elementar. O resultado é mostrado abaixo.

$$PCS = 0,3491C + 1,1783H - 0,1034O - 0,0151N - 0,0211A + 0,1005S \quad (13)$$

A partir dos valores médios de:

$$\% C = 45,244$$

$$\% H = 6,059$$

$$\% O = 35,332$$

$$\% N = 4,683$$

$$\% A = 8,683$$

% S = 0

Encontra-se que:

$$\text{PCS} = 19,027 \text{ MJ/kg.}$$

Valor próximo ao encontrado pela equação (14), utilizando os dados da análise imediata. Logo, pode-se considerar o poder calorífico do farelo de cártamo com valores próximos aos de biomassas já consolidadas na indústria, como é o caso de valores encontrados em pesquisas para o bagaço de cana-de-açúcar, sendo, portanto, uma potencial matéria-prima na produção atual para os meios combustíveis como forma de aproveitamento energético integrado.

6 CONCLUSÃO

A produção de óleo de cártamo bem como o rendimento do óleo em relação a dados da literatura mostrou-se bem avaliada, sendo ainda uma forma prática, estimando-se assim, a extração por meio do equipamento Soxhlet como satisfatória. Os parâmetros físico-químicos avaliados para o óleo foram o índice de acidez, saponificação, viscosidade e densidade. Já a análise estrutural do óleo se deu por meio de FTIR e RMN. A produção de biocombustível a partir do óleo de cártamo apresentou em sua grande maioria, características dentro dos padrões exigidos pela ANP nº 920/2023. O biodiesel produzido se assemelhou aos realizados em outros estudos, confirmando assim uma alternativa viável dentro das indústrias de produção em larga escala para comercialização nos postos. Foi caracterizado por meio de índice de acidez, viscosidade cinemática e densidade. A análise estrutural foi caracterizada por meio de FTIR e RMN, onde por meio deste último foi possível mensurar o valor de conversão, que apresentou 95,4% de éster. O farelo do cártamo, caracterizado por meio de análise imediata e elementar apresentou grande potencial de produção energética por meio da biomassa. Na literatura se pode observar que as pesquisas com relação a este assunto ainda não são desenvolvidas. Alguns dados de análise imediata obtiveram valores próximos ao encontrado na literatura para o bagaço de cana-de-açúcar, o mais utilizado industrialmente como fonte energética, como exemplo tem-se o teor de carbono fixo. Outros valores como percentual de teor de umidade, para o farelo de cártamo, foi considerado melhor do que o de bagaço de cana e por fim, o teor de materiais voláteis e teor de cinzas para o bagaço de cana-de-açúcar foi superior ao alcançado pelo farelo de cártamo. Essas propriedades indicam fatores importantes da biomassa e mesmo com massa de materiais voláteis abaixo do encontrado para a cana-de-açúcar, o poder calorífico constatado a partir destas análises apresentou um resultado considerável.

Outro fator que também merece destaque é o poder calorífico obtido por meio da análise elementar, que obteve valor positivo em relação aos encontrados na literatura para outras biomassas utilizadas na indústria. Destaca-se ainda a porcentagem de enxofre mostrada nos resultados como uma informação positiva, pois significa que na queima, a produção de óxidos por meio deste elemento não irá ser realizada.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16550: Bagaço de Cana– Caracterização Química**. Brasília, 2018. Disponível em: <<https://www.normas.com.br/autorizar/visualizacao-nbr/11796/identificar/visitante>>. Acesso em: 20 maio 2024.

ABREU, P. S. M. **Análise econômica dos processos de produção do biodiesel de soja: rota química x rota enzimática**. 2013. 84 f. Dissertação (Mestrado em processos bioquímicos) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <http://epqb.eq.ufrj.br/wp-content/uploads/2021/04/13_60.pdf>. Acesso em: 31 maio 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (BRASIL). **Resolução RDC nº 482, de 23 de setembro de 1999 aprova o Regulamento Técnico para Fixação de Identidade e Qualidade de Óleos e Gorduras Vegetais**. Brasília, 1999. Disponível em: <http://portal.anvisa.gov.br/wps/wcm/connect/a2190900474588939242d63fbc4c6735/RDC_482_1999.pdf?MOD=AJPERES>. Acessado em: 10 maio 2024.

ALVES, M.B.F.; CANDEIA, R.A.; LEITE, J.C.A.; SANTOS, A.F. Produção e Caracterização de Biocombustível Sólido a Partir de Resíduos Orgânicos Sem Tratamento Térmico/Production and Characterization of Solid Biofuel from Organic Waste without Thermal Treatment. **Brazilian Journal Development**, v. 8, pp. 8925–8945, 2022. Disponível em: <<https://scholar.archive.org/work/wmatlcdoazha3kn3v7ur32a56y/access/wayback/https://www.brazilianjournals.com/ojs/index.php/BRJD/article/download/43640/pdf>>. Acesso em: 18 maio 2024.

AMAZON. **[Experimental Soxhlet Extractor 500ml 10 Glass Meandering Fat extractors with Electric Heating Jacket]**. Brasília, 2024. Disponível em: <https://www.amazon.com/Experimental-Extractor-Meandering-extractors-Electric/dp/B096ZCX7H>. Acesso em: 20 maio 2024.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D1298- Standard Test Method for Density, Relative Density, or API Gravity of Crude Petroleum and Liquid Petroleum Products by Hydrometer Method**. West Conshohocken, PA, USA, 2017. Disponível em: 10.1520/D1298-12BR17. Acesso em: 3 maio 2024.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D445-24- Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity)**. West Conshohocken, PA, USA, 2024. Disponível em: 10.1520/D0445-24. Acesso em: 3 maio 2024.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D3172-13-International Standard Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke**. West Conshohocken, PA, USA, 2021, pp. 1–2. Disponível em: 10.1520/D3172-13R21E01. Acessado em: 20 maio 2024.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D3175-20- International Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke**. West Conshohocken, PA, USA, 2020, pp. 1–14. 53. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1520/D3175-20>. Acessado em: 20 maio 2024.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D3174-12- International Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal**. West

Conshohocken, PA, USA, 2018. Disponível em: 10.1520/D3174-12R18E01. Acessado em: 20 maio 2024.

ARANTES, A. M. **Cártamo (*Carthamus tinctorium* L.) produção de biomassa, grãos, óleo e avaliação nutritiva da silagem**. 2011. 34f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia). Instituto de Zootecnia, Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios, Nova Odessa -SP, 2011. Disponível em: <https://iz.agricultura.sp.gov.br/publica.php?id=176>. Acessado em: 4 maio 2024.

ARANTES, D. C. **Bagaço de cana-de-açúcar: análise térmica e energética de biomassa**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia- MG, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14971>. Acesso em: 17 maio 2024.

ARAUJO, R. O.; SANTOS, V. O.; RIBEIRO, F. C.; CHAAR, J. da S.; PEREIRA, A. M.; FALCAO, N. P.; DE SOUZA, L. K. Magnetic acid catalyst produced from acai seeds and red mud for biofuel production. **Energy Conversion and Management**, v. 228, p. 113636, 2021. ISSN 0196-8904. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890420311638>>. Acesso em: 01 jul. 2024.

ARAÚJO, D. S. S. **Co-Combustão de biomassa e carvão em leito fluidizado: Impactos nas emissões atmosféricas de NOx, SO2, CO, dioxinas e furanos e material particulado**. 2008. 141p. Dissertação (Mestrado em Bioenergia), Faculdade de bioenergia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2008. Disponível em: < <https://www.proquest.com/openview/f7ecfdb591084ffebf6c4e80df57530d/1?pqorigsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>> Acesso em: 21 maio 2024.

AYDIN, S. Detailed evaluation of combustion, performance and emissions of ethyl proxitol and methyl proxitol-safflower biodiesel blends in a power generator diesel engine. **Fuel**, v. 270, p. 117492, 2020. ISSN 0016-2361. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236120304877>>. Acesso em: 27 jun. 2024.

AZEREDO, R.; COLNAGO, L.; SOUZA, A.; ENGELSBERG, M. Continuous wave free precession: Practical analytical tool for low-resolution nuclear magnetic resonance measurements. **Analytica Chimica Acta**, v. 478, n. 2, p. 313–320, 2003. ISSN 0003-2670. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003267002015143>>. Acesso em: 31 maio 2024.

BELEZAEFORMA. **[Óleo de Cártamo: Emagrece? Benefícios e tudo sobre!]**. Brasília, 2024. Disponível em: <https://belezaeforma.com/suplemento/oleo-de-cartamo/>. Acesso em: 20 maio 2024.

BELTRÃO, N. E. M.; OLIVEIRA, M. I. P.; Oleaginosas potenciais do Nordeste para a produção de biodiesel. EMBRAPA. Campina Grande, 2007. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/277417/1/DOC177.pdf>. Acesso em: 05 maio 2024

BEZERRA, J. M. M. **Estudo do potencial energético de briquetes produzidos a partir de resíduos da casca de coco verde e bagaço de cana**. 2016. 41 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em engenharia mecânica) – Departamento de Engenharia mecânica, Universidade

Federal do Ceará, Fortaleza, 2016. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/36274>. Acesso em: 18 maio 2024.

BHUTADA, P. R.; JADHAV, A. J.; PINJARI, D. V.; NEMADE, P. R.; JAIN, R. D. Solvent assisted extraction of oil from moringa oleifera lam. seeds. **Industrial Crops and Products**, v. 82, p. 74–80, 2016. ISSN 0926-6690. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669015305926> Acesso em: 2 maio 2024.

BILATTO, S.; MARCONCINI, J. M.; MATTOSO, L. H.; FARINAS, C. S. Lignocellulose nanocrystals from sugarcane straw. **Industrial Crops and Products**, v. 157, p. 112938, 2020. ISSN 0926-6690. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669020308554> Acesso em: 25 maio 2024.

BISPO, A. M. **Avaliação dos parâmetros de pirólise na capacidade de adsorção pelo biocarvão obtido da torta de cártamo**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Química do Petróleo) - Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/52640>. Acesso em: 17 maio 2024.

BORGES, J., FELICI, P., ÁVILA, M., GAZZONI, D., PORTUGAL, F. **Caracterização da miniusina de craqueamento de óleos vegetais instalada na Embrapa Soja**. 2008. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/458215/1/ID29003.pdf>. Acessado em: 31 maio 2024.

BRAGA, E.; DAMASCENO, L.; SILVA, C. B. de S.; SILVA, L.; CAVALCANTE, M.; BARRETO, C.; SILVA, S.; LUNA, F. M. T.; BERTINI, L.; NASCIMENTO, T.; RIOS, M. 1h nmr and uv-vis as analytical techniques to evaluate biodiesel conversion and oxidative stability. **Fuels**, v. 5, n. 1, p. 107–122, 2024. ISSN 2673-3994. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2673-3994/5/1/7>. Acesso em: 15 maio 2024.

BRAGA, E. F. **Avaliação da estabilidade oxidativa do biodiesel de óleo de cártamo (Carthamus tinctorius L.) utilizando antioxidantes sintéticos e naturais**. 2023. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica). Departamento de Engenharia mecânica- Universidade Federal do Ceará, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/74066>. Acesso em: 3 maio 2024.

BRASIL. Agência nacional do petróleo, gás natural e biocombustíveis. **Resolução ANP nº 7, de 19 de março de 2008**. Diário Oficial [da República Federativa do Brasil], Brasília, DF, 20 mar. 2008. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-7-2008->. Acesso em: 08 maio 2024.

BRASIL. Agência nacional do petróleo, gás natural e biocombustíveis. **Especificação do biodiesel e as obrigações quanto ao controle de qualidade a serem atendidas pelos agentes econômicos que comercializem o produto em território nacional**. Brasília, DF, 2023. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-920--estabelece-a-especificacao-do-biodiesel-e-as-obrigacoes-quanto-aocontrole-da-qualidade-a-serem-atendidas-pelos-agentes-economicos-quecomercializem-o-produto-em-territorionacional?origin=instituicao&q=920/2023>. Acesso em: 3 fev. 2024.

BRASIL. Ministério da agricultura, pecuária e abastecimento. **Mulheres rurais se destacam em diferentes atividades e buscam acesso a direitos**, 2019. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/noticias/mulheres-rurais-se-destacam-em-diferentes-atividades-e-buscam-visibilidade-para-seus-direitos> Acesso em: 05 maio 2024.

BRUM, A. A. S. **Métodos de extração e qualidade da fração lipídica**. 2004. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 2004. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11141/tde-26042005-141101/publico/aelson.pdf>. Acesso em: 2 maio 2024.

BURATTO, R. T.; COCERO, M. J.; MARTÍN Ángel. Characterization of industrial açai pulp residues and valorization by microwave-assisted extraction. **Chemical Engineering and Processing - Process Intensification**, v. 160, p. 108269, 2021. ISSN 0255-2701. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0255270120307315>>. Acessado em: 1 jul. 2024.

CAIRO, F. M.; ARAUJO, C. R.; FIGUEIREDO, E. S. Síntese e caracterização de biodiesel obtido a partir de óleo residual por suas propriedades físico-químicas e FTIR. *In*: 6º Congresso da Rede Brasileira de Tecnologia e Inovação de Biodiesel, 2019, Florianópolis. **Anais [...]**. Santa Catarina, SC. Disponível em: <https://ubrabio.com.br/wp-content/uploads/2019/09/Biodiesel-10-anos-de-pesquisa-V2-409-410.pdf>. Acessado em: 4 maio 2024.

CANAOESTE. **[Biomassa da cana representa 62% de toda a cogeração feita no País]**. Brasília, 2024. Disponível em: <https://www.canaoeste.com.br/noticias/biomassa-da-cana-representa-62-de-toda-a-cogeracao-feita-no-pais/>. Acessado em: 20 maio 2024.

CASTRO, R. C.; COSTA, L. F. S.; COSTA, L. M. D. de A.; MARTINS, G. B. C. Extração e análise de propriedades físico-químicas do óleo de açai (*Euterpe oleracea* Mart.). **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 10, n. 8, p. e24610817358, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i8.17358. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/17358>. Acesso em: 1 jul. 2024.

CFACTORY. **[Experimental Soxhlet Extractor 500ml 10 Glass Meandering Fat extractors with Electric Heating Jacket]**. 2024. Disponível em: <https://cfactorypt.bedandbreakfaststamford.org/content?c=extrator+soxhlet&id=33>. Acesso em: 20 maio 2024.

CIESLINSKI, J. **Estudo da emissão e controle dos gases e particulados provenientes da queima de biomassa**. 2014. 157 f. Tese (Doutorado em engenharia mecânica) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/e0be63bc-143a-4da5-8215-df606e34b811>. Acesso em: 17 maio 2024.

CONNOR, D. J.; HALL, A. J. Sunflower physiology. *In*: SCHNEITER, A. A.; SEILER, A. A. (Ed.). **Sunflower technology and production**. Madison: American Society of Agronomy, 1997, p.113-182 (Agronomy monograph, v.35). Disponível em: <https://doi.org/10.2134/agronmonogr35.c4>. Acessado em: 4 maio 2024.

CONTE, R.; GULLICH, L. M. D.; BILIBIO, D.; ZANELLA, O.; BENDER, J. P.; CARNIEL, N.; PRIAMO, W. L. Pressurized liquid extraction and chemical characterization of safflower oil: A comparison between methods. **Food chemistry**, v. 213, p. 425—430, December 2016. ISSN

1873-7072. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.06.111>>. Acessado em: 2 maio 2024.

CORTEZ, L.A.B., LORA, E.E.S., GÓMEZ, E.O. **Biomassa para energia**. Editora UNICAMP. Campinas-SP, 2008. Disponível em: <https://www.nipe.unicamp.br/docs/publicacoes/inte-biomassa-energia070814.pdf>. Acessado em: 21 maio 2024.

DAMIAN, A.; ZUNIGA, G.; MARTINS, M.; COIMBRA, J.; COIMBRA, R.; OLIVEIRA, E. C.; MARTINS, A.; XAVIER, D.; SILVA, D.; TELIS-ROMERO, J. **Revisão: Propriedades físico-químicas do biodiesel**. 12 2011. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/pesticidas/article/viewFile/25939/17311>. Acesso em: 10 maio 2024.

DEVI, G. K.; VIGNESH, K.; CHOZHAVENDHAN, S. 12 - effective utilization of sugarcane trash for energy production. In: KUMAR, R. P.; GNANSOUNOU, E.; RAMAN, J. K.; BASKAR, G. (Ed.). **Refining Biomass Residues for Sustainable Energy and Bioproducts**. Academic Press, 2020. p. 259–273. ISBN 978-0-12-818996-2. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128189962000120>>Acessado em: 10 maio 2024.

DEVIREN, H; AYDIN, H. Production and physicochemical properties of safflower seed oil extracted using different methods and its conversion to biodiesel. **Fuel**, v. 343, p. 128001, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128001>. Acessado em: 1 maio 2024.

DORI, D. J. L. **Análise do bagaço de cana-de-açúcar como fonte de energia**. 2022. 62 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em engenharia mecânica) -Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/15941>. Acesso em: 22 maio 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2031**. 2022. Disponível em: <https://bit.ly/3E2x6rG>. Acesso em: 15 maio 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2023**. 2023. Disponível em:< <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023>. Acesso em: 14 maio 2024.

FARIAS, M. E. A. C. de; MARTINS, M. de F.; CÂNDIDO, G. A. Agenda 2030 e energias renováveis: sinergias e desafios para alcance do desenvolvimento sustentável. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 17, p. e13101723867–e13101723867, 2021. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/23867>. Acesso em: 30 jun. 2024.

FARMER, E. H.; BLOOMFIELD, G. F.; SUNDRALINGAM, A.; SUTTON, D. A. The course and mechanism of autoxidation reactions in olefinic and polyolefinic substances, including rubber. **Transactions of The Faraday Society**, v. 38, p. 348–356, 1942. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:98055860>>. Acesso em: 30 jun. 2024.

FOLQUENIN, E. K. F. **Validação das análises físico-químicas exigidas pela anp para misturas diesel – biodiesel**. 75 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Instituto de Química, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2008. Disponível em: <http://tede2.uepg.br/jspui/handle/prefix/2053>. Acesso em: 31 maio 2024.

FREITAS, G. M. D. **Biomassa, uma fonte de energia**. 2016. 124 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação de engenharia elétrica) – Escola Politécnica- Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em: <http://repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10018701.pdf>. Acessado em: 21 maio 2024.

FREITAS, J. P. A. **Avaliação do efeito antioxidante de extratos naturais na estabilidade oxidativa de biodiesel**. 2018. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2018. Disponível em: <<https://ri.ufs.br/handle/riufs/17104>>. Acesso em: 14 jan. 2024.

GARCÍA, R., PIZARRO, C., LAVÍN, A. G., BUENO, J. L. Characterization of Spanish biomass wastes for energy use. **Bioresource technology**, v. 103, n. 1, p. 249–258, 2012. ISSN 0960-8524. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852411014313>>. Acessado em: 17 maio 2024.

GAZZONI, D. L. **Balanco de emissões de CO2 por biocombustíveis no Brasil: histórico e perspectivas**. Londrina: Embrapa Soja, 2012. 101 p. (Embrapa Soja. Documentos, 334). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/102960/1/Doc-334-online.pdf>. Acessado em: 27 jun. 2024.

GELBARD, G.; BRES, O.; VARGAS, R. M.; VIELFAURE, F.; SCHUCHARDT, U. ¹H nuclear magnetic resonance determination of the yield of the transesterification of rapeseed oil with methanol. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 72, p. 1239–1241, 1995. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:84734618>>. Acesso em: 10 maio 2024.

GOES, H. H. D. **Estudo da produção de biodiesel por transesterificação catalisada por líquidos iônicos**. 2018. (Master's thesis) - Instituto Politécnico de Bragança, Portugal, 2018. Disponível em: https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/19238/1/Goes_Higgor.pdf. Acesso em: 1 jul. 2024.

GONGORA, B. **Desempenho e Emissões de Motor Gerador utilizando Biodiesel de Cártamo**. 2021. 62 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel-PR. 2021. Disponível em: https://tede.unioeste.br/bitstream/tede/5364/6/Benhurt_Gongora2021.pdf. Acesso em: 27 jun. 2024.

GONGORA, B.; SOUZA, S. N. M. de; BASSEGIO, D.; SANTOS, R. F.; SIQUEIRA, J. A. C.; BARICCATTI, R. A.; GURGACZ, F.; SECCO, D.; TOKURA, L. K.; SEQUINEL, R. Comparison of emissions and engine performance of safflower and commercial biodiesels. **Industrial Crops & Products**, v. 179, p. Not Available, May 2022. ISSN 0926-6690. Disponível em: <<http://europepmc.org/abstract/AGR/IND607678831>>. Acesso em: 27 jun. 2024.

GROTTO, C. G. L.; COSTA, A. M. F.; COLARES, C. J. G.; PEREIRA, D. H. Caracterização da biomassa de bagaço de cana-de-açúcar com vistas energéticas. **For Science**, v. 9, 2021. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:233572250>>. Acesso em: 30 maio 2024.

HASHEMI, S. S; MIRMOHAMADSADEGHI, S; KARIMI, K. Biorefinery development based on whole safflower plant. **Renewable energy**, v. 152, p. 399-408, 2020. ISSN 0960-1481.

Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148120300549>>. Acesso em: 2 maio 2024.

HAYKIRI-AÇMA, H. Características de combustão de diferentes materiais de biomassa. **Conversão e Gestão de Energia**, v. 44, n. 1, pág. 155-162, 2003. ISSN 0196-8904. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S019689040100200X>>. Acesso em: 20 maio 2024.

ILKILIÇ, C., AYDIN, S., BEHCET, R., AYDIN, H. (2011). Biodiesel from safflower oil and its application in a diesel engine. **Fuel processing technology**, v. 92, n. 3, p. 356–362, 2011. ISSN 0378-3820. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382010003280>>. Acesso em: 27 jun. 2024.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. [World energy transities outlook summary]. 2023. Disponível em: https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net//media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Jun/IRENA_World_energy_transitions_outlook_summary_2023.pdf?rev=bdaa6280cdef47dcb7bf5dfcfc75b88f. Acesso em: 15 maio 2024.

JENKINS, B.; BAXTER, L.; MILES, T.; MILES, T. Combustion properties of biomass. **Fuel Processing Technology**, v. 54, n. 1, p. 17–46, 1998. ISSN 0378-3820. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382097000593>>. Acesso em: 21 maio 2024.

JIMENEZ, R. R.; LADHA, J. K. Automated elemental analysis: a rapid and reliable but expensive measurement of total carbon and nitrogen in plant and soil samples. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Taylor & Francis, v. 24 n. 15-16, p 1897-1924, 1993. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/00103629309368926>>. Acesso em: 21 maio 2024.

JORGE, N. Química e tecnologia de óleos vegetais. **São Paulo: Cultura Acadêmica**. Universidade Estadual Paulista, PROGRAD, São Paulo, 2009. p. 165. ISBN 9788598605722. Disponível em: <https://www.culturaacademica.com.br/catalogo/quimica-e-tecnologia-de-oleos-vegetais/> Acesso em: 15 maio 2024.

KLASON, T. **Modelling of Biomass Combustion in Furnaces**. 2006. Tese (Doutorado em energia) Department of Energy Science Lund Institute of Technology, Lund, 2006. Disponível em: <https://www.academia.edu/download/80394714/2006TK.pdf>. Acesso em: 22 maio 2024.

KLAUTAU, J. V. P. **Análise experimental de uma fornalha a lenha de fluxo cocorrente para secagem de grãos**. 2008. Dissertação (Mestrado em recursos hídricos e ambientais). Departamento de Hidráulica e Saneamento - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1884/17778>. Acesso em: 15 maio 2024.

KNOTHE, G. Some aspects of biodiesel oxidative stability. **Fuel Processing Technology**, v. 88, n. 7, p. 669-677, 2007. ISSN 0378-3820. Biofuels for Transportation. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2007.01.005>. Acesso em: 31 maio 2024.

KNOTHE, G.; VAN, J.; KRAHL, J.; RAMOS, L. P. Manual do biodiesel. **São Paulo: Edgard Blucher**, v. 1, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1201/9781003040262>. Acesso em: 15 maio 2024.

LEITE, D., SANTOS, R. F., BASSEGIO, D., DE SOUZA, S. N. M., SECCO, D., GURGACZ, F., DA SILVA, T. R. B. Emissions and performance of a diesel engine affected by soybean, linseed, and crambe biodiesel. **Industrial Crops and Products**, v. 130, pp. 267-272, 2019. ISSN 0926-6690. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669018311543>> Acessado em: 27 jun. 2024.

LORA, E. E. S.; VENTURINI, O. J. Biocombustíveis. **Rio de Janeiro: Interciência**, 1ª. Ed. v. 2, p. 1200, 2012. ISBN: 9788571932289. Disponível em: <https://www.estantevirtual.com.br/livro/biocombustiveis-2-volumes-G5O-4217-000>. Acesso em: 20 maio 2024.

MAHER, K.; BRESSLER, D. Pyrolysis of triglyceride materials for the production of renewable fuels and chemicals. **Bioresource Technology**, v. 98, n. 12, p. 2351–2368, 2007. ISSN 0960-8524. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852406005852>>. Acesso em: 25 maio 2024.

MANDARINO, J. M.G; HIRAKURI, M. M. H. ROESSING, A. C. **Tecnologia para produção do óleo de soja: descrição das etapas, equipamentos, produtos e subprodutos**. 2. ed. Londrina:[sn], 2015. v. 2176, p. 2937. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/126080/1/Doc171-OL.pdf>>. Acesso em: 15 maio 2024.

MARAFON, A. C.; SANTIAGO, A. D.; AMARAL, A. F. C.; BIERHALS, A. N.; PAIVA, H. L.; GUIMARAES, V. dos S. **Uso da Biomassa para a geração de energia**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2016. Documentos, 211, 30 p. Acesso em: 20 maio 2024.

MARCELINO, M. M. **Biomassa residual do coco para obtenção de energia e intermediários químicos via gaseificação: caracterização, modelagem e simulação**. 2017. Dissertação (Mestrado em engenharia industrial) - Escola Politécnica- Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/handle/ri/24412>. Acesso em: 17 maio 2024.

MARRARI. **[Biomassa: a energia do futuro]**. Brasília, 2024. Disponível em: <https://www.marrari.com.br/biomassa/biomassa-a-energia-do-futuro/>. Acesso em: 20 maio 2024.

MARTINELLI, F. L. **Produção de biodiesel etílico a partir da esterificação de ácidos graxos livres**. 2008. Dissertação (Mestrado em engenharia química). Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008. Disponível em: https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/6405/1/arquivo2527_1.pdf. Acesso em: 31 maio 2024.

MARTINI, D. D. S. **Polímeros derivados do biodiesel do óleo de linhaça: obtenção e propriedades físico-químicas**. 2010. Tese (Doutorado em química) - Instituto de Química- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/26619>. Acesso em: 30 maio 2024.

MATOS, V. D. S. **Avaliação da qualidade do óleo de palma e frações (Elaeis guineenses) armazenados em diferentes condições de estocagem**. 2015. Dissertação (Mestrado em Alimentos, Nutrição e Saúde) – Escola de nutrição- Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2015. Disponível em: <http://repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/18974>. Acesso em: 3 maio 2024.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 3): gasification technologies. **Bioresource Technology**, v. 83, n. 1, p. 55–63, 2002. ISSN 0960-8524. Reviews Issue. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852401001201>>. Acesso em: 20 maio 2024.

MEDEIROS, P. T. **Viabilidade técnica do biodiesel metílico do óleo de duas variedades de *Carthamus tinctorius* L. como substituto do diesel de petróleo.** 2011. 88 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, Paraíba. 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/16509>. Acesso em: 10 maio 2024.

MEHER, L. C.; NAIK, S. N.; DAS, L. M. Methanolysis of pongamia pinnata (karanja) oil for production of biodiesel. **Journal of Scientific Industrial Research**, v. 63, p. 913–918, 12 2004. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Satya-Naik2/publication/228767917_Methanolysis_of_Pongamia_pinnata_karanja_oil_for_production_of_biodiesel/links/0c96052cd85f09e5ef000000/Methanolysis-of-Pongamia-pinnata-karanja-oil-for-production-of-biodiesel.pdf>. Acesso em: 15 maio 2024.

MILANEZ, A. Y.; MAIA, G. B. da S.; GUIMARÃES, D. D. F.; CLEITON L. A. **Biodiesel e diesel verde no Brasil: panorama recente e perspectivas.** BNDES Setorial, Rio de Janeiro, v. 28, n. 56, set. 2022, p. [41]-71. Disponível em: <http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/22585>. Acesso em: 25 maio 2024.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Biomassa para energia no Nordeste: atualidade e perspectivas.** Brasília, 2018. Disponível em: https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/migration/br/Livro_APNE_NE_AGO20.pdf. Acesso em: 21 maio 2024.

MIRANDA, S. E. O. **Produção de biodiesel por rotas etílicas e metílicas promovidas por irradiação de micro-ondas oriundas de um forno doméstico não modificado.** 2011. Dissertação (Mestrado). Universidade federal dos vales do jequitinhonha e mucuri, 2011. Disponível em: <http://acervo.ufvjm.edu.br/jspui/handle/1/520>. Acesso em: 31 maio 2024.

MORAIS, E. K. L. **Estudo do óleo das sementes de *Carthamus tinctorius* L. Para produção de biodiesel.** 2012. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/17707>. Acessado em: 2 maio 2024.

MORETTO, E.; FETT, R. Tecnologia de óleos e gorduras vegetais na indústria de alimentos. **São Paulo: Varela**, 1998. 150 p. ISBN 85-85519-41-X. Disponível em: https://minerva.ufrj.br/F/?func=direct&doc_number=000368050&local_base=UFR01. Acesso em: 3 maio 2024.

MOURA, C. V. R. de; SILVA, B. C. da; CASTRO, A. G. de; MOURA, E. M. de; VELOSO, M. E. da C.; SITTOLIN, I. M.; ARAUJO, E. C. E. Caracterização físico-química de óleos vegetais de oleaginosas adaptáveis ao Nordeste Brasileiro com potenciais para produção de biodiesel. **Revista Virtual de Química**, v. 11, n. 3, p. 573-595, maio/jun. 2019. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1110781/1/CaracterizacaoOleosVegetaisRevVirtQuimica2019.pdf>. Acesso em: 19 maio 2024.

MÜNDEL, H.-H.; BLACKSHAW, R.; BYERS, J.; HUANG, H.; JOHNSON, D.; KEON, R.; KUBIK, J.; MCKENZIE, R.; OTTO B., ROTH, B.; STANFORD, K. Safflower production

on the canadian prairies. **Agriculture and Agri-Food Canada**, 2004. Disponível em: https://s3.wp.wsu.edu/uploads/sites/2171/2017/08/SafflowerProduction_Canada.pdf. Acesso em: 3 maio 2024.

NOGALES-DELGADO, S.; ENCINAR, J. M.; CORTÉS, Á. G. High oleic safflower oil as a feedstock for stable biodiesel and biolubricant production. **Industrial Crops and Products**, v. 170, p. 113701, ISSN 0926-6690. 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669021004659>> Acesso em: 3 maio 2024.

NUNES, C. A. Tecnologia de óleos e gorduras para engenharia de alimentos. **Lavras : Ed. UFLA**. 2013. 69 p. Disponível em: < <http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/41440>>. Acesso em: 3 maio 2024.

NUNES, J. V. D. S; NOGUEIRA, K. M. V; LIMA, R. A. D; GUALBERTO, V. S; MARQUES, R. B; MALVEIRA, J. D. Q; RIOS, M. A. D. S. **Briquetes de bagaço-de-cana (Saccharum spp): avaliação da produção em escala de bancada**. 2020. Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS. Disponível em:<<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/964>>. Acesso em: 17 maio 2024.

OLIVEIRA, R. F. **Craqueamento catalítico de óleo residual para a produção de biocombustível**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Energia) -Universidade de Brasília. Brasília-DF, 2014. Disponível em:< <https://bdm.unb.br/handle/10483/9285>>. Acesso em: 31 maio 2024.

OLIVEIRA, V. C. K. **Análise do cártamo como cultura energética**. 2016. 47f. Dissertação (Mestrado em energia na agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2016. Disponível em: <http://tede.unioeste.br/handle/tede/3491>. Acesso em: 3 jan. 2024.

ORSI, H. M. **Tecnologias de produção de biodiesel: uma revisão**. 2021. 46f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em engenharia química) - Departamento de Engenharia Química - Universidade Federal de São Carlos, 2021. Disponível em; <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/15395>. Acesso em: 18 maio 2024.

OZYUGURAN, A; YAMAN, S. Prediction of calorific value of biomass from proximate analysis. **Energy Procedia**, v. 107, p. 130–136, 2017. ISSN 1876-6102. 3rd International Conference on Energy and Environment Research, ICEER 2016, 7-11 September 2016, Barcelona, Spain. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610216317386>>Acesso em: 18 maio 2024.

PARENTE, E. de S. Biodiesel: uma aventura tecnológica num país engraçado. **Tecbio**, 2003. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=FaAjYAAACAAJ>>.Acesso em: 15 maio 2024.

PARIKH, J.; CHANNIWALA, S.; GHOSAL, G. A correlation for calculating hhv from proximate analysis of solid fuels. **Fuel**, v. 84, n. 5, p. 487–494, 2005. ISSN 0016-2361. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236104003072>>. Acesso em: 15 maio 2024.

PEREIRA, G. M. **Carthamus tinctorius L.: armazenamento de sementes, viabilidade do óleo para biodiesel e da torta para alimentação animal**. 2013. Dissertação (Mestrado

desenvolvimento e meio ambiente/PRODEMA) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/26929>. Acesso em: 19 maio 2024.

PLANTASONYA. [**Características e cultivo do Cártamo (Carthamus tinctorius)**]. 2024. Disponível em: <https://www.plantasonya.com.br/cercas-vivas-e-arbustos/caracteristicas-e-cultivo-do-cartamo-carthamus-tinctorius.html>. Acesso em: 20 maio 2024.

QUEIROGA, P.; GIULIANO, E.; ESTHER, G.; BARROS, M. **Cártamo (Carthamus tinctorius L.) tecnologias de plantio e utilização**. [S.l.: s.n.], 2021. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/VicenteQueiroga/publication/349992376_CARTAMO_Carthamus_tinctorius_L_TECNOLOGIAS_DE_PLANTIO_E_UTILIZACAO/links/604a7deb458543166f1de4/CARTAMO-Carthamus-tinctorius-L-TECNOLOGIAS-DE-PLANTIO-EUTILIZACAO.pdf>. Acesso em: 21 maio 2024.

RAMOS, L. P.; SILVA, F. R. da; MANGRICH, A. S.; CORDEIRO, C. S. Tecnologias de produção de biodiesel. **Revista virtual de química**, v. 3, n. 5, p. 385–405, 2011. Disponível em: <<https://rvq-sub.sbq.org.br/index.php/rvq/article/view/190>>. Acesso em: 15 maio 2024.

RASHID, U.; ANWAR, F. Production of biodiesel through optimized alkaline-catalyzed transesterification of rapeseed oil. **Fuel**, v.87, n.3, p.265-273, 2008. ISSN 0016-2361. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236107002141>>. Acesso em: 10 maio 2024.

REDA, S.; CARNEIRO, P. Óleos e gorduras: Aplicações e implicações. **Revista Analytica**, v. 27, p. 60–67, 01 2007. Disponível em: <<https://cursos.unipampa.edu.br/cursos/engenhariadealimentos/disciplinas/files/2008/04/art07.pdf>>. Acesso em: 1 maio 2024.

RENDEIRO, G. **Combustão e gasificação de biomassa sólida**. [S.l.]: Ministério de Minas e Energia (MME), 2008. Disponível em: <<http://livroaberto.ibict.br/handle/1/863>>. Acesso em: 21 maio 2024.

ROCHE, J.; BOUNIOLS, A.; BARRANCO, T.; MOULOOUNGUI, Z. Variation of fatty acid content in seeds under scarce water resources for oleic and standard sunflowers. **In: Proc. 16th International Sunflower Conference (28 Août–2 Septembre (2004), Fargo, USA, Vol II:783-792**. [S.l.: s.n.], 2004. Disponível em: <<https://www.isasunflower.org/fileadmin/documents/aaProceedings/16thISCFargovol2/fargo783-791.pdf>>. Acesso em: 4 maio 2024.

RODRIGUES, J.P.; **Avaliação da produção de combustível em processo de craqueamento térmico de óleo de soja em regime contínuo**. 2007. 50f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Química-Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2007. Disponível em: http://www.realp.unb.br/jspui/bitstream/10482/2895/1/2007_JulianaPetrocchiRodrigues.pdf. Acesso em: 10 maio 2024.

ROUT, T.; PRADHAN, D.; SINGH, R.; KUMARI, N. Exhaustive study of products obtained from coconut shell pyrolysis. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 4, n. 3, p. 3696–3705, 2016. ISSN 2213-3437. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343716300689>>. Acesso em: 14 maio 2024.

SÁNCHEZ, C. G. Tecnologia da gaseificação de biomassa, 2010. **Campinas, SP: Editora Átomo**. pp.550-560, 2010. Disponível em: https://www.livrariadafisica.com.br/detalhe_produto.aspx?id=145427. Acesso em: 04 abr. 2024.

SANTOS, A. L. F. **Produção de bio-óleo a partir do craqueamento térmico de gorduras residuais derivadas de biomassa animal e vegetal**. 2007. 252 f. Dissertação (Mestrado em química) - Universidade de Brasília, Brasília, 2007. Disponível em: <http://repositorio2.unb.br/jspui/handle/10482/3140>. Acesso em: 31 maio 2024.

SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. **Bioenergia e biorrefinaria: canade-açúcar e espécies florestais**. Viçosa: UFV, 2013. 551 p. Disponível em: <<http://ceiba.agro.uba.ar/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=45447>>. Acesso em: 21 maio 2024.

SATYARTHI, J. K.; SRINIVAS, D.; RATNASAMY, P. Estimation of free fatty acid content in oils, fats, and biodiesel by 1h nmr spectroscopy. **Energy & Fuels**, ACS Publications, v. 23, n. 4, p. 2273–2277, 2009. Disponível em:< <https://doi.org/10.1021/ef801011v> >. Acesso em: 1 maio 2024.

SCHURHAUS, P. **Produtos e propriedades energéticas da madeira**. Fundação municipal centro universitário da cidade de união da Vitória, Paraná, 2007. Disponível em: <<https://engmadeira.yolasite.com/resources/Energia%20da%20madeira.pdf>>. Acesso em: 17 maio 2024.

SCHMELZER, G.; GURIB-FAKIM, A.; ARROO, R.; BOSCH, C.; de Ruijter, A.; SIMMONDS, M.; LEMMENS, R.; OYEN, L. **Plant Resources of Tropical Africa 11(1) : Medicinal plants 1**. Netherlands: PROTA, 2008. (Plant Resources of Tropical Africa, 11(1)). ISBN 9789057822049. Disponível em: <https://edepot.wur.nl/417238>. Acesso em: 4 maio 2024.

SERVIÇO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS. **Cartilha Energias Renováveis Goiás**. GOIÁS, GO, 2023. Disponível em: <https://sebrae.com.br/Sebrae/Portal%20Sebrae/UFs/GO/Sebrae%20de%20a%20a%20Z/Cartilha_Energia_Renovavel_GO.pdf>. Acesso em: 10 maio 2024.

SERVIÇO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS. **Oleaginosas nos estados brasileiros**. 2008. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/NT00035116_000gihb7tn102wx5ok05vadr1szzvy3n.pdf>. Acesso em: 21 maio 2024.

SEYE, O. **Análise de ciclo de vida aplicada ao processo produtivo de cerâmica estrutural tendo como insumo energético capim elefante (Pennisetum purpureum Schaum)**. 2003. 167 f. Tese (Doutorado em engenharia mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/Busca/Download?codigoArquivo=472132>. Acesso em: 2 maio 2024.

SHAHID, F. **Bailey's industrial oil and fat products**. 6th ed. New York: J. Wiley, 2005. Disponível em<<https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5516437/course/section/6014434/Baileys%20Sixth%20Edition%20Shahidi.pdf>>. Acesso em: 4 abr. 2024.

SHIMAMOTO, G. G. **Métodos para simplificar a caracterização e para determinar**

parâmetros de qualidade de óleo vegetal, de biodiesel e de blenda diesel-biodiesel. 2017. Tese (Doutorado em ciência) - Instituto de Química - Universidade Estadual de Campinas, 2017. Disponível em: <<https://repositorio.unicamp.br/Busca/Download?codigoArquivo=506186>>. Acesso em: 1 maio 2024

SILVA, T. A. R.; NETO, W. B. Estudo da redução da acidez do óleo residual para a produção de biodiesel utilizando planejamento fatorial fracionado. **Revista Virtual de Química**, v. 5, n. 5, p. 828-839, 2013. Disponível em: <https://rvq-sub.sbq.org.br/index.php/rvq/article/view/334>. Acesso em: 25 maio 2024.

SIMÃO NETO, F.; NETA, M. M.; SOUSA, A.; DAMASCENO, L.; SOUSA, B.; MEDEIROS, S.; MELO, R.; LOPES, A.; SANTOS, J.; RIOS, M. Analysis of the fuel properties of the seed shell of the neem plant (*azadirachta indica*). **Processes**, v. 11, n. 8, 2023. ISSN 2227-9717. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2227-9717/11/8/2442>>. Acesso em: 26 mar. 2024.

SOARES, L. d. S.; MORIS, V. A. d. S.; YAMAJI, F. M.; PAIVA, J. M. F. d. Utilização de resíduos de borra de café e serragem na moldagem de briquetes e avaliação de propriedades. **Rio de Janeiro: Matéria, SciELO Brasil**, v. 20, n. 2, p. 550–560, 2015. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rmat/a/3crnHzYmkJFNVHwXzSyLxGf/?format=pdf>>. Acesso em: 23 maio 2024.

SOUZA, A. F. R. C. **Estudo da viabilidade da produção de bio-óleo a partir do processo de pirólise rápida do bagaço da cana-de-açúcar.** 2013. 74 f., il. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Energia). Universidade de Brasília, Gama-DF, 2013. Disponível em: <<https://bdm.unb.br/handle/10483/6909>>. Acesso em: 18 maio 2024.

SUAREZ, P. A. Z.; MENEGHETTI, S. M. P. 70º aniversário do biodiesel em 2007: evolução histórica e situação atual no Brasil. **Quím. Nova [online]**. 2007, v. 30, n. 8, pp. 2068-2071. ISSN 0100-4042. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/qn/a/R5RxCXPLkpZff5XvHJFwBbT/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 31 maio 2024.

TOLENTINO, S. S.S. ; EVA, E. B; LUDWIG, R. R; MORO, J. L.; LIMA , C. P.; OLIVEIRA , N. N.; MULLER, P. S.; VALANDRO, J. O.; SALAZAR, L. N. Extração de lípidos: método Soxhlet. **In: Seminário unicruz. XX seminário interdisciplinar.** 2015. Anais. Disponível em: <<https://unicruz.edu.br/seminario/anais/anais2015/XX%20SEMIN%C3%81RIO%20INTERINSTITUCIONAL%202015%20-%20ANAIS/Graduacao/Graduacao%20-%20Resumo%20-%20Ciencias%20Biologicas%20e%20da%20Saude/EXTRACAO%20DE%20LIPIDIOS-%20METODO%20SOXHLET.pdf>>. Acesso em: 2 maio 2024.

VASCONCELOS, R. B. **Análise imediata e avaliação do poder calorífico das espécies: eucalipto (*eucalyptus globulus*), marmeleiro (*croton sonderianus*) e ipê roxo (*handroanthus impetiginosus*).** 2017. 45 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) -Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. Disponível em: <<https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/54933>>. Acesso em: 10 maio 2024.

VAZ JUNIOR, S. **Aproveitamento de resíduos agroindustriais: uma abordagem sustentável.** Brasília, DF: Embrapa, 2020. Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1126255>>. Acesso em: 10 maio 2024.

VAZ JUNIOR, S. **Biomassa para Química Verde**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2013. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/967574.%20>. Acesso em: 5 maio 2024.

VIDAL, A. C. F.; HORA, A. B. d. Perspectivas do setor de biomassa de madeira para a geração de energia. **BNDES Setorial**, n. 33, p. 261-314, Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2011. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2523>>. Acesso em: 25 maio 2024.

VIEIRA, M.G; BATISTA, L. R; MUNIZ, A. S; FILHO, N. R. A. Estudo da fração lipídica da semente de Cártamo (*Carthamus tinctorius* L.) como potencial matéria-prima para produção de biodiesel. *In*: Congresso da Rede Brasileira de Tecnologia e Inovação de Biodiesel, 7, 2020, Florianópolis, Santa Catarina. **Anais [...]**. Santa Catarina: SC, 2020, p. 149-150. Disponível em: <https://ubrabio.com.br/wp-content/uploads/2020/09/Anais-CBiodiesel-2019-149-150.pdf>> Acesso em: 3 maio 2024.

VIEIRA, S.; BARROS, M. V.; SYDNEY, A. C. N.; PIEKARSKI, C. M.; de Francisco, A. C.; VANDENBERGHE, L. P. de S.; SYDNEY, E. B. Sustainability of sugarcane lignocellulosic biomass pretreatment for the production of bioethanol. **Bioresource Technology**, v. 299, p. 122635, 2020. ISSN 0960-8524. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852419318656>>. Acesso em: 26 maio 2024.

WEISS, E. A. Castor, sesame and safflower. *In* :[s.n.], 1971. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:82980295>>. Acesso em: 01 maio 2024.

YESILYURT, M. K.; CESUR, C.; ASLAN, V.; YILBASI, Z. The production of biodiesel from safflower (*carthamus tinctorius* l.) oil as a potential feedstock and its usage in compression ignition engine: A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 119, p. 109574, 2020. ISSN 1364-0321. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119307828>>. Acesso em: 01 maio 2024.

ZHANG, X.; LIAO, X.; GONG, Z.; LI, X.; JIA, C. Formation of fatty acid methyl ester based microemulsion and removal mechanism of pahs from contaminated soils. **Journal of Hazardous Materials**, v. 413, p. 125460, 2021. ISSN 0304-3894. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389421004234>>. Acesso em: 01 jul. 2024.