



**UFPB**



**CEAR**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA – UFPB**  
**CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS – CEAR**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS – PPGER**

**DELOSMAR DA SILVA ALBUQUERQUE**

**ESTUDO DA OBTENÇÃO INÉDITA DE ETANOL ANIDRO DA ALGAROBA  
PARA INOVADORA APLICAÇÃO NA PRODUÇÃO DE BODIESEL**

**ORIENTADORA:**

**Profa. Dra. JOELDA DANTAS**

Área de concentração: Energias Renováveis

Linha de pesquisa: Materiais Aplicados às Energias Renováveis

**João Pessoa - PB**

**2022**

**PPGER/MESTRADO ACADÊMICO/Nº 91**

**DELOSMAR DA SILVA ALBUQUERQUE**

**ESTUDO DA OBTENÇÃO INÉDITA DE ETANOL ANIDRO DA ALGAROBA  
PARA INOVADORA APLICAÇÃO NA PRODUÇÃO DE BIODIESEL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis (PPGER) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) como requisito à obtenção do título de **Mestre em Energias Renováveis**.

**Orientadora:**

Profa. Dra. Joelda Dantas

**Coorientadora:**

Profa. Dra. Pollyana Caetano Ribeiro Fernandes

**João Pessoa - PB**

**2022**

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

A345e Albuquerque, Delosmar da Silva.

Estudo da obtenção inédita de etanol anidro da algaroba para inovadora aplicação na produção de biodiesel / Delosmar da Silva Albuquerque. - João Pessoa, 2022.

109 f. : il.

Orientação: Joelda Dantas.

Coorientação: Pollyana Caetano Ribeiro Fernandes.  
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Vagens de algaroba. 2. Destilação fracionada. 3. Zeólitas. 4. Álcool anidro. 5. Biodiesel. I. Dantas, Joelda. II. Fernandes, Pollyana Caetano Ribeiro. III. Título.

UFPB/BC

CDU 582.736.1(043)

**PPGER/MESTRADO ACADÊMICO/Nº 91**

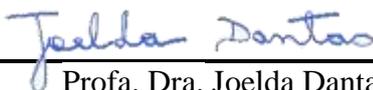
**DELOSMAR DA SILVA ALBUQUERQUE**

**ESTUDO DA OBTENÇÃO INÉDITA DE ETANOL ANIDRO DA ALGAROBA  
PARA INOVADORA APLICAÇÃO NA PRODUÇÃO DE BIODIESEL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis (PPGER) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) como requisito à obtenção do título de **Mestre em Energias Renováveis**.

Aprovado em: 24/02/2022.

**BANCA EXAMINADORA**



---

Profa. Dra. Joelda Dantas  
(Orientadora)  
PPGER/CEAR/UFPB



---

Profa. Dra. Pollyana Caetano Ribeiro Fernandes  
(Coorientadora)  
PPGER/CEAR/UFPB



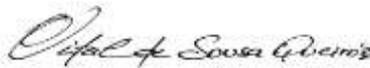
---

Profa. Dra. Kelly Cristiane Gomes da Silva  
(Examinadora Interna)  
PPGER/CEAR/UFPB



---

Profa. Dra. Elvia Leal  
(Examinadora Externa)  
UAEMa/CCT/UFCG



---

Prof. Dr. Vital de Sousa Queiroz  
(Examinador Externo)  
DEQ/CT/UFPB

**João Pessoa - PB**

**2022**

## **DEDICATÓRIA**

***A DEUS!***

*Também aos meus pais, Sr.  
Euclides Israel Pereira de  
Albuquerque e Sra. Maria de  
Lourdes da Silva Albuquerque.*

*Aos meus irmãos, Delano, Dileuse  
e Deyse.*

*Ao meu primo Clélio.*

***DEDICO ESTE TRABALHO!***

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por tudo na vida e por permitir realizar o meu Mestrado;

Agradeço especialmente aos meus pais, o Sr. Euclides Israel e Sra. Maria de Lourdes pelo amor, carinho e incentivo permanente;

Ao meu primo Clélio pelo incentivo;

Ao Dr. Clóvis Gouveia Silva, pessoa que me apresentou as primeiras informações sobre a importância da algaroba;

Ao Prof. Dr. Vital de Sousa Queiróz, que muito contribuiu para com este trabalho na elucidação de dúvidas;

A minha orientadora Profa. Dra. Joelda Dantas pelo incentivo, cooperação, apoio e compreensão, antes mesmo do meu ingresso oficial no PPGER/CEAR/UFPB, por ter acreditado em mim desde enquanto aluno especial, como também durante toda a minha trajetória na pós-graduação e na execução completa deste trabalho de Mestrado, lutando junto comigo para a concretização deste sonho.

Também agradeço a minha coorientadora Profa. Dra. Pollyana Caetano Ribeiro Fernandes pelo apoio;

Ao técnico do Laboratório em Hialotecnia da UFPB, o Ms. Josevaldo Crispim Duarte, por sua contribuição no desenvolvimento do sistema de destilação modificado;

Aos funcionários e alunos do Laboratório de Bebidas Alcoólicas da UFPB, na realização das análises;

A colaboração da Usina JB pela realização das análises dos álcoois;

Ao Laboratório de Síntese de Materiais Cerâmicos da UFCG, onde foram realizados os testes de produção de Biodiesel;

Aos ilustres professores que aceitaram compor a Banca Examinadora.

A todos que contribuíram direta e indiretamente na realização deste trabalho.

## RESUMO

O etanol anidro é um componente importante e essencial aos processos de produção de biodiesel. No Brasil, o etanol comercializado é quase que exclusivamente obtido a partir da cultura de cana-de-açúcar, gerando, portanto, a necessidade de se descobrir e disponibilizar novas e variadas fontes alternativas de matérias-primas para produção deste biocombustível, na intenção de torná-lo cada vez mais sustentável. Diante disto, objetivou-se de forma inédita obter etanol desidratado a partir de vagens da algarobeira mediante o uso de um meio ambientalmente benéfico com aplicação de zeólitas, sendo utilizado um microssistema simples de bancada, e também, um sistema de destilação fabricado que foi especialmente projetado para este fim. Além disto, foram avaliadas as características do álcool anidro obtido, e ainda, a sua inédita aplicação na produção de biodiesel. O sistema de destilação fabricado foi utilizado para testes de eficiência na obtenção de álcool de cana-de-açúcar como referência para posterior comparação aos testes com as vagens da algaroba. Dos testes realizados inicialmente no sistema convencional de destilação a nível de bancada a partir de uma solução hidroalcóolica de cana-de-açúcar, chegou-se a um resultado de apenas 81 °GL, e, após otimização operacional, num segundo teste realizado usando o sistema de destilação fabricado, chegou-se a 95 °GL e 100 °GL de produção de álcool hidratado e anidro, respectivamente. Daí em diante, adotando as condições otimizadas para os testes da algaroba como matéria-prima, e utilizando o sistema fabricado, alcançou-se 95 °GL no primeiro teste. E, no segundo teste, em apenas 2 h do acréscimo de zeólitas, foi possível alcançar 98 °GL e 100 °GL em 12 h de repouso. Consequentemente, como esperado, chegou-se a 100 °GL de álcool anidro em um terceiro teste, quando utilizado o sistema projetado proposto. O álcool anidro de vagens da algaroba, obtido do sistema fabricado, foi então testado na produção de biodiesel de soja, chegando-se a conversões de até 100 % do óleo em ésteres etílicos. Portanto, considerando o conjunto de resultados alcançados, diz-se que as metodologias otimizadas e utilizando zeólitas, como também o sistema projetado, foram bem-sucedidos para obtenção de álcool anidro orgânico de vagens de algaroba, além de representar excelente potencial para aplicação na produção de biodiesel. Tais resultados refletem um caráter de inovação e aprimoramento tecnológico nesta área, gerando difusão de conhecimento e promoção social, os quais convergem em importantes projeções do desenvolvimento sustentável de biocombustíveis, contribuindo aos acordos firmados a nível mundial para descarbonização.

**Palavras-chave:** Vagens de algaroba, destilação fracionada, zeólitas, álcool anidro, biodiesel.

## ABSTRACT

Anhydrous ethanol is an important and essential component of biodiesel production processes. In Brazil, the ethanol marketed is almost exclusively obtained from the culture of sugarcane, generating, therefore, the need to discover and make available new and varied alternative sources of raw materials for the production of this biofuel, with the intention of making it increasingly sustainable. In view of this, the objective was in an unprecedented way to obtain dehydrated ethanol from mesquite pods through the use of an environmentally beneficial means with the application of zeolites, using a simple benchtop microsystem, as well as a manufactured distillation system that has been specially designed for this purpose. In addition, the characteristics of the anhydrous alcohol obtained were evaluated, as well as its unprecedented application in the production of biodiesel. The modified distillation system was used for efficiency tests in obtaining sugarcane alcohol as a reference for later comparison to tests with mesquite pods. From the tests carried out initially in the conventional distillation system at bench level from a hydroalcoholic solution of sugar cane, a result of only 81 °GL was reached, and, after operational optimization, in a second test carried out using the distillation system manufactured, it was reached 95 °GL and 100 °GL of production of hydrated and anhydrous alcohol, respectively. From then on, adopting the optimized conditions for the mesquite tests as raw material, and using the manufactured system, 95 °GL was reached in the first test. And, in the second test, in just 2 h of zeolites addition, it was possible to reach 98 °GL and 100 °GL in 12 h of rest. Consequently, as expected, 100°GL of anhydrous alcohol was reached in a third test, when using the proposed manufactured system. The anhydrous alcohol from mesquite pods, obtained from the manufactured system, was then tested in the production of soybean biodiesel, reaching conversions of up to 100% of the oil into ethyl esters. Therefore, considering the set of results achieved, it is said that the optimized methodologies using zeolites, as well as the manufactured system, were successful in obtaining organic anhydrous alcohol from mesquite pods, in addition to representing excellent potential for application in the production of biodiesel. These results reflect a character of innovation and technological improvement in this area, generating knowledge diffusion and social promotion, which converge in important projections of sustainable development of biofuels, contributing to the agreements signed at a global level for decarbonization.

**Keywords:** Mesquite pods, fractional distillation, zeolites, anhydrous alcohol, biodiesel.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Total de publicações encontradas para “juliflora” por cada ano, no período de 1998 até o mês de fevereiro de 2022. ....	29
<b>Figura 2.</b> (a) Consumo final de etanol por tipo, e (b) Consumo final de biocombustíveis, por fonte.....	34
<b>Figura 3.</b> Variação na demanda energética global, 2017-2040. ....	35
<b>Figura 4.</b> Demanda final de energia no setor de transporte por combustível, entre 2015-2040. ....	35
<b>Figura 5.</b> Aumento da produção de biocombustíveis, 2019-2024.....	36
<b>Figura 6.</b> (a) Demanda primária de energia no Brasil, 2017-2040 e (b) Participação de renováveis na matriz energética primária, 2040. ....	37
<b>Figura 7.</b> Influência positiva e negativa macroambientais para o etanol brasileiro (197-2019). ....	40
<b>Figura 8.</b> Total de publicações encontradas para a busca juliflora ethanol por cada ano no período desde 1997 até fevereiro de 2022. ....	51
<b>Figura 9.</b> Total de Publicações encontradas por ano no período que envolve 1998 a fev., 2022. ....	56
<b>Figura 10.</b> Prosopis juliflora e seus frutos do agreste paraibano. ....	60
<b>Figura 11.</b> Captura fotográfica do sistema fabricado de destilação: simples (a) e fracionada (b) destinada a obtenção de álcool anidro das vagens da algarobeira usando zeólitas. ....	61
<b>Figura 12.</b> Ilustração da captura fotográfica do refratômetro para determinação quando do teor de açúcar. ....	64
<b>Figura 13.</b> Captura fotográfica do alambique próprio usado no processo de destilação. ....	66
<b>Figura 14.</b> Captura fotográfica ilustrando as pesagens das vagens da algarobeira. ....	67
<b>Figura 15.</b> Ilustração das vagens de algaroba: (a) após processo de seleção e pesagem e (b) após processo de fragmentação manual e hidratação para o seu cozimento.....	68
<b>Figura 16.</b> Captura fotográfica quando do controle de temperatura no cozimento das vagens de algaroba.....	69
<b>Figura 17.</b> Sistema para a coleta do substrato das vagens prensadas da algarobeira. ...	70
<b>Figura 18.</b> Captura fotográfica: (a) do mosto oriundo das vagens da algarobeira e (b) determinação do teor de açúcares por refratômetro.....	71

<b>Figura 19.</b> Ilustração da preparação do inóculo: (a) caldo e (b) pesagem com o inóculo. .....	72
<b>Figura 20.</b> Ilustração do processo de fermentação do mosto: (a) antes da fermentação e (b) após fermentação. ....	72
<b>Figura 21.</b> (a) Sistema fabricado de destilação simples e (b) coleta e medição do álcool hidratado de algaroba.....	74
<b>Figura 22.</b> (a) Pesagem das zeólitas, (b) Zeólitas introduzidas na coluna fraciona acoplada no sistema fabricado e (c) Álcool anidro das vagens da algarobeira a 100° GL em alcoômetro. ....	75
<b>Figura 23.</b> Fluxograma metodológico adotado para a obtenção dos álcoois hidratados de cana-de-açúcar e vagens de algaroba, como ainda do álcool anidro de vagens da algaroba. .....	76
<b>Figura 24.</b> Fluxograma metodológico adotado para a obtenção dos álcoois orgânicos hidratado e anidro de vagens de algaroba e a aplicação do anidro para biodiesel de soja. .....	79

## LISTA DE TABELAS

**Tabela 1.** Testes catalíticos usando álcool anidro das vagens da algaroba obtido no sistema de destilação modificado: Condições reacionais e quantidades dos insumos. ... 78

**Tabela 2.** Resultados das caracterizações dos álcoois de cana-de-açúcar e de vagens de algaroba produzidos no sistema de destilação adaptado especialmente para este fim. ... 88

**Tabela 3.** Especificação de qualidade do etanol anidro e hidratado de referência (EAR e (EHR). ..... 89

## **LISTA DE SIGLAS E SIMBOLOGIAS**

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

ASTM - American Society for Testing and Materials;

CO<sub>2</sub> - Gás carbônico;

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária;

EPE - Empresa de Pesquisa Energética;

GEEs - Gases de efeito estufa;

HVO - Óleo vegetal hidratado;

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis;

IEA - Instituto de Economia Agrícola;

INPM - É uma unidade de medida utilizada pelo Instituto de Pesos e Medidas.

MEG - Monoetileno Glicol;

MME - Ministério de Minas e Energia;

°Bx - Brix é uma escala numérica que mede a quantidade de sólidos solúveis em uma solução de sacarose;

°GL - Grau Lussac;

PNPB - Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel;

Proálcool- Programa Nacional do Alcool;

RenovaBio - Política Nacional dos Biocombustíveis;

SUDEMA - Superintendência de Administração do Meio Ambiente.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	13
1.1 PROBLEMÁTICA .....	16
1.2 JUSTIFICATIVA .....	16
1.3 OBJETIVOS .....	18
1.3.1 Objetivo Geral .....	18
1.3.2 Objetivos Específicos .....	18
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	19
2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA .....	19
2.2 A ALGAROBEIRA: UM PANORAMA GERAL .....	22
2.2.1 Utilização da Algaroba em Função de suas Propriedades .....	30
2.3 BIOCOMBUSTÍVEIS: CENÁRIO ATUAL E PERSPECTIVAS FUTURAS ...	33
2.4 BIOCOMBUSTÍVEIS .....	37
2.4.1 Etanol .....	40
2.4.1.1 Algarobeira como fonte para Biocombustível .....	45
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	60
3.1 ETAPA 1: PRODUÇÃO DE ETANOL DA ALGAROBA .....	60
3.1.1 Matérias-primas .....	60
3.1.1.1 Sistema de Destilação Simples e Fracionada Modificado .....	61
3.1.2 Métodos .....	62
3.1.2.1 Obtenção do Etanol Hidratado .....	62
3.1.2.2 Obtenção do Etanol Desidratado .....	62
3.1.2.3 Processo de Produção .....	63
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	80
4.1 Brix IDEAL PARA FERMENTAÇÃO .....	80
4.2 EXTRAÇÃO DO CALDO DA CANA-DE-AÇÚCAR E DAS VAGENS DA ALGAROBEIRA .....	80

4.3 FERMENTAÇÃO .....	81
4.4 DESTILAÇÃO .....	81
4.5 ANÁLISES QUÍMICA E FÍSICA DO ETANOL DE CANA-DE-AÇÚCAR E DE VAGENS DE ALGAROBA.....	84
4.5.1 Valores dos padrões de qualidade obtidos nas determinações analíticas do etanol de cana-de-açúcar e de vagens de algaroba, na Usina JB.....	85
4.5.1.1 <i>Hidratado de cana-de-açúcar</i> .....	85
4.5.1.2 <i>Anidro de cana-de-açúcar</i> .....	85
4.5.1.4 <i>Anidro de algaroba</i> .....	85
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>92</b>
<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>93</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>94</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>104</b>
<b>ANEXO I .....</b>	<b>105</b>
<b>ANEXO II.....</b>	<b>106</b>
<b>ANEXO III .....</b>	<b>107</b>
<b>ANEXO IV .....</b>	<b>109</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O contemporâneo avanço científico e tecnológico associado ao desenvolvimento da sociedade contribuem significativamente para deterioração do meio ambiente e para o significativo aumento da poluição, tornando os problemas ambientais uma questão bastante preocupante em todo o mundo. A queima de combustíveis fósseis vem gerando grandes problemas ambientais e intensificando o aquecimento global. Em conformidade com Zhou et al. (2023) a discussão sobre o consumo de combustível e/ou emissões de CO<sub>2</sub> colocou sérios desafios para mitigar os gases de efeito estufa (GEEs) e alcançar o pico e a neutralidade das emissões de carbono.

De acordo com os autores Rosa e Ordóñez (2022a) isto se deve às tendências desencadeadas pelo CO<sub>2</sub> atmosférico, que indicam a necessidade urgente de desenvolver soluções de energia renovável, e para tanto, as forças econômicas e de mercado que afetam as taxas de adoção de tecnologias energéticas deverão ser consideradas. Além disso, conforme Dantas et al. (2020), tendo em vista que o petróleo é uma fonte não renovável, há um interesse crescente na promoção da transição para combustíveis alternativos renováveis, sustentáveis e ecologicamente corretos, como o biodiesel.

Sobre o biodiesel, vem sendo reportado que este biocombustível fornecerá uma fonte significativa de energia renovável para transporte em um futuro próximo (JAHIRUL et al., 2021). Neste ínterim, constantemente busca-se o incremento de novas tecnologias para produção de biocombustíveis que atendam as expectativas do mercado (BENATTI et al., 2019). No que tem sido, assim, difundido o desenvolvimento de protocolos metodológicos mais sustentáveis que substituam ou contribuam em relação a etapas processuais de produção industrial (DANTAS et al., 2021). Desta forma, diversos estudos a procura de fontes sustentáveis vêm sendo praticados para que, além da valorização da biodiversidade, os combustíveis fósseis possam ter o seu uso reduzido.

A produção de biodiesel já é consolidada a nível global, no entanto, devido as demandas existentes, oportunizadas por incentivos governamentais, como no caso do Brasil por meio do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB), e mais recentemente a Política Nacional dos Biocombustíveis (RenovaBio), a diversificação das matérias-primas, como também as inovações que favoreçam os processos de produção já existentes, vêm sendo muito requisitadas, pois além de fomentar as pesquisas na área, ainda contribuem exponencialmente para agregação de valor a cadeia produtiva global de biodiesel.

Tanto é que, Zhang e Bai (2021) quando realizaram estudo para identificar e analisar os fatores que bloqueiam a adoção e promoção do biodiesel como combustível alternativo para veículos na China, resumiram que, dentre um conjunto de fatores que dificultam o desenvolvimento desse biocombustível de base agrícola, a escassez de suprimentos de matéria-prima, conflitos com o abastecimento de alimentos humanos e matérias-primas, são as maiores barreiras para o desenvolvimento do biodiesel. Com isto, os autores apresentaram algumas conclusões a partir dos aspectos de estratégias e medidas políticas, sendo que a promoção de matéria-prima não comestível, o investimento em plantações de palmeiras estrangeiras e introdução de espécies de palmeiras adequadas, a inovação e aprimoramento tecnológico, a difusão do conhecimento e promoção social para favorecer o desenvolvimento do biodiesel, estão entre os fatores mais relevantes.

O biodiesel tem sido reconhecido como uma alternativa potencial ao petrodiesel por sua biodegradabilidade, não toxicidade e atributos ecológicos (MUNIR et al., 2020). Isto se deve às fontes principais utilizadas na sua produção, que são os óleos vegetais, gorduras animais e óleos de fritura (DANTAS et al., 2021), sendo, portanto, o Brasil, um grande produtor de biocombustíveis porque possui uma considerável diversidade de espécies agrícolas e uma grande extensão territorial destinada a plantações e criação de animais (RAMOS et al., 2017). No entanto, a aplicação direta de óleos vegetais em motores de combustão interna por compressão é limitada por algumas propriedades físicas, destacando-se a sua alta viscosidade, sua baixa volatilidade e seu caráter poli-insaturado, os quais ocasionam problemas nesses tipos de motores, bem como contribui para combustão incompleta (GULDHE et al., 2017).

Assim, na finalidade de reduzir a viscosidade dos óleos, diferentes alternativas têm sido consideradas, tais como a diluição, micro emulsão com metanol ou etanol, craqueamento catalítico e principalmente a reação de transesterificação com metanol ou etanol (AHMAD et al., 2012; DANTAS et al., 2017). A reação de esterificação também encontra expressiva aplicação devido esse processo permitir a utilização de óleos e/ou gorduras com alto índice de acidez e baixo valor agregado (DANTAS, LEAL e COSTA 2021). Tem-se que, em nível global, as reações químicas comumente adotadas são a transesterificação e esterificação alcoólicas para o procedimento de redução da viscosidade das matérias-primas usadas na produção de biodiesel. Os álcoois mais utilizados são os de cadeia curta como o metanol e o etanol, sendo este último mais adequado ambientalmente devido ser proveniente de fonte renovável.

Tem sido bastante difundido que o etanol hidratado é produzido comercialmente no Brasil a partir da cana-de-açúcar, sendo o álcool produzido desta biomassa exaustivamente estudado e aplicado como biocombustível em nível mundial. Outras fontes de biomassa para produção de etanol no Brasil estão em processo ainda embrionário, como o de milho, sendo que nos EUA essa é principal matéria-prima para produção de etanol (MAFIOLETTI, MARTINS e TURRA, 2011). Segundo a Agência Embrapa de Informação Tecnológica, as principais matérias-primas utilizadas na produção de etanol no mundo são a cana-de-açúcar, o milho, a aveia, o arroz, a cevada, o trigo e o sorgo (EMBRAPA).

O etanol pode ser obtido também através da beterraba, mandioca, batata, entre outras, em que a matéria-prima é submetida a uma fermentação alcoólica, com atuação do micro-organismo *Sacchromyces cerevisiae*. Porém, a cana-de-açúcar é a mais utilizada, pois apresenta maior produtividade. Após ser processado, o etanol pode ser utilizado puro (em motores adaptados) ou misturado com gasolina, como combustível. O Brasil se destaca no cenário global como sendo o país com tecnologia mais avançada na fabricação de etanol. A produção mundial desse combustível é da ordem de 40 bilhões de litros, sendo que o Brasil é responsável pela fabricação de 15 bilhões de litros. No país, a cada tonelada de cana-de-açúcar são produzidos 66 litros de álcool e 700 a 800 litros de vinhaça ou restilo (CERQUEIRA, 2021).

Encontram-se também difundidos estudos voltados para obtenção de etanol a partir das vagens da algarobeira (KANTIBHAI, 2010; FILHO, 2020), no entanto, ainda são escassos na literatura relatos com foco nesta matéria-prima alternativa, aliás, é praticamente inexistente até o momento pesquisas voltadas ao aprimoramento do álcool de algaroba na intenção de produzir etanol anidro.

No cenário da sustentabilidade, quando se detém a produção de biocombustíveis, um dos aspectos mais relevantes é o aproveitamento da energia da biomassa, sendo que isto deve ser realizado de forma adequada e racional. No semiárido brasileiro, tal aproveitamento deve estar relacionado a utilização de matérias-primas alternativas da região, que, na prática, podem fomentar novas vias para a produção de etanol e trazer resultados socioeconômicos que podem induzir projeções na viabilidade técnica e financeira da atividade. Muitas culturas no semiárido brasileiro são promissoras matérias-primas para a obtenção de etanol, dentre estas a *Prosopis juliflora* (Sw), sendo conhecida popularmente como algaroba, algarobeira ou algarobo, a qual é uma alternativa importante devido a quantidade de açúcares contidos em suas vagens.

Dentro desta contextualização, e ainda levando em consideração que o álcool é um insumo essencialmente necessário na cadeia de produção do biodiesel, foi proposto a obtenção de etanol anidro, a partir de matéria-prima não convencional, vagens da algarobeira, sendo para tanto, utilizado um sistema de destilação modificado e adaptado especialmente para este fim. Além disso, foi investigada a eficiência do uso do álcool anidro obtido na produção de biodiesel do óleo de soja. Por outro lado, embora o foco principal deste trabalho seja a obtenção de etanol desidratado, a matéria-prima objeto do estudo, sendo rica em glicose, poderá ser usada como uma possível alternativa para diversas bioconversões quando levado em consideração o conceito das biorrefinarias.

## 1.1 PROBLEMÁTICA

O planeta terra cada vez mais agoniza como consequência dos problemas ambientais. Os impactos provocados por fontes não degradáveis de transformação são devastadores e ameaçam as gerações futuras. Diante disso, os autores Adenuga, Idowu e Oyekunle (2020) reportaram que a conscientização mundial em relação aos crescentes casos de aquecimento global, mudanças climáticas e efeitos adversos à saúde, levou ao aumento da demanda por combustíveis ecologicamente corretos. Logo, paralelamente, existe também a necessidade de se disponibilizar fontes alternativas e variadas de matérias-primas para produção desses biocombustíveis e torná-los cada vez mais sustentáveis. No caso do biodiesel, todos os óleos vegetais da categoria de óleos fixos ou triacilglicerídeos, óleos residuais, como também gorduras animais, podem ser transformados nesse biocombustível por meio de reações químicas, que por sua vez, são realizadas em presença de álcool. Assim, a diversificação dos álcoois encontra grande relevância e importância, uma vez que a cana-de-açúcar tem sido praticamente a única fonte alternativa para obtenção desse bioproduto.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Uma forma potencial de garantir a segurança energética é o seu aprimoramento mediante incrementos sustentáveis provenientes de fontes renováveis de combustíveis, como a biomassa. A energia da biomassa possibilita o desenvolvimento da economia das sociedades no mundo todo, não obstante, ainda contribui efetivamente para mitigar a poluição desencadeada a partir dos gases de efeito estufa (GEE) e o esgotamento dos recursos naturais fósseis como o petróleo. Assim, quando é levado em conta esta

perspectiva, as pesquisas concentradas em iniciativas que preponderam as chances de alargar o viés da sustentabilidade, sem comprometer o acelerado desenvolvimento tecnológico atual, isto reflete significativa importância acadêmica e industrial.

Assim sendo, a proposta deste presente trabalho está alicerçada no incremento de novas matérias-primas e processos de produção mais viáveis e sustentáveis para as tecnologias já existente, o que reflete sua total relevância e pertinência às necessidades ambientais atuais.

No Brasil, as fontes de energias renováveis ocupam 45,3% da matriz energética (EPE, 2019), de forma que o estudo de fontes originárias da biomassa, que possam, de modo parcial ou total, serem inseridas em processos industriais já consolidados, como é a produção de biodiesel, em que se faz necessário a utilização de álcoois, possuem forte notoriedade.

Nesse sentido, os estudos preliminares de processos fermentativos desenvolvidos em laboratórios sinalizam a possibilidade de uso do substrato açucarado extraído das vagens da algarobeira (FILHO, 2020; SILVA, 2007) e cultivo desse substrato em sua flora natural, como fonte alternativa sustentável de matéria-prima para obtenção de álcool. A investigação e diagnóstico desses indícios podem potencializar estas propriedades e fomentar estudos que venham a culminar no desenvolvimento de novos produtos de caráter inovador a partir de um importante recurso natural plenamente adaptado e disponível em regiões semiáridas.

A possível inovação idealizada com o desenvolvimento deste presente trabalho pode ser respaldada na literatura especializada, especialmente pelo estudo de Alves, Santos e Silva (2019), sendo reportado que, até o momento, a utilização do álcool das vagens da algaroba tem a finalidade de utilização na produção de alimentos, bebidas alcoólicas e bioetanol. Ou seja, não se encontra um progresso para, a partir desta fonte, obter etanol anidro e nem a utilização do álcool de algaroba como constituinte da produção de biodiesel, até o presente momento.

Dessa forma, este estudo teve como foco o aproveitamento e transformação do potencial energético e biomássico das vagens da algarobeira em fonte alternativa de matéria-prima, para obter etanol hidratado e anidro a partir de um sistema de destilação adaptado e fabricado, de forma a viabilizar o incremento do anidro no processo de produção de biodiesel, e assim, conseqüentemente, prover um estágio posterior de avanço às pesquisas já desenvolvidas até o momento e validar o seu progresso.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo Geral

Estudar metodologias para obtenção de etanol hidratado e anidro, a partir de vagens da algarobeira e zeólitas, utilizando um sistema de destilação projetado especialmente para este fim, com vistas na aplicação do álcool anidro orgânico para produção de biodiesel.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Utilizar um microssistema convencional de destilação, em nível de bancada, para a obtenção de resultados preliminares visando comparar aos propostos;
- Desenvolver um protótipo com dimensões em maior escala para fabricar um sistema de destilação simples com capacidade de acoplar um sistema fracionado com suporte para zeólitas;
- Produzir etanol por bioconversão dos substratos extraídos das vagens da algarobeira pela otimização de metodologias para torná-lo anidro utilizando o sistema de destilação fabricado;
- Realizar algumas das principais determinações analíticas dos álcoois exigidas pela legislação vigente;
- Testar o álcool anidro de vagens da algarobeira obtido do sistema fabricado na produção de biodiesel, por rota homogênea (comercial), utilizando oleaginosa já consolidada como a soja.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

Na atualidade a maior parte da demanda de energia a nível mundial é atendida com petróleo bruto, carvão e gás natural. No entanto, em função das flutuações no preço do petróleo bruto, esgotamento dos combustíveis fósseis e aumento da preocupação com a poluição ambiental, o desenvolvimento de energia limpa e renovável é iminente. De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2016) ganham participação fontes com menor impacto no que tange às emissões de gases de efeito estufa. O único grupo de fontes renováveis que perde espaço até 2026 é o de lenha e carvão vegetal, que têm baixo rendimento energético e que são substituídos gradativamente por fontes mais eficientes.

Em termos de consumo de energia, espera-se que o setor industrial cresça à taxa de 2,2% anuais, alinhada com a perspectiva de valor adicionado, atingindo o montante de 101 milhões de tep em 2026. Destacam-se os segmentos de papel e celulose e de alimentos e bebidas, que ganham importância no horizonte decenal, em detrimento dos segmentos de cerâmica, ferro-gusa e aço, química e outras indústrias. Sob a ótica do consumo por fonte, o gás natural é a única fonte fóssil que ganha espaço na indústria brasileira. As demais fontes fósseis, notadamente o carvão mineral e derivados, além dos derivados de petróleo, têm redução de importância no período em análise. Por outro lado, ganham participação fontes com menor impacto no que tange às emissões de gases de efeito estufa. São elas: a eletricidade, os derivados da cana e as demais fontes, em especial a lixívia obtida no processo produtivo da celulose. O único grupo de fontes renováveis que perde espaço até 2026 é o de lenha e carvão vegetal, que têm baixo rendimento energético e que são substituídos gradativamente por fontes mais eficientes (EPE, 2016).

Em conformidade com o Ministério das Minas e Energia (MME, 2020), no indicador de segurança energética, o Brasil que historicamente foi dependente de importações de energia até 2017, em 2018 teve superávit de 1,4% e em 2019 este superávit aumentou para 4,9% (produção primária acima da demanda total). De acordo com o MME e a EPE o desempenho do setor de energia em 2019 chama a atenção em três importantes resultados, a saber, o crescimento do consumo das famílias, a renovabilidade e a segurança, sendo que o consumo de biocombustíveis líquidos no setor de transportes (etanol e biodiesel) teve crescimento de 11%, chegando a uma participação de 25,1% na energia total do setor, indicador 8 vezes maior que o mundial.

Dentro desta perspectiva e por apresentar diversas características como poder ser produzido a partir de fontes renováveis, a biomassa lignocelulósica desempenha um papel significativo por ter um potencial como substrato para a produção de bioetanol. No entanto, os principais obstáculos tecnológicos e econômicos estão impedindo a implantação bem-sucedida dessa tecnologia em nível comercial. Muitos estudos enfocam os desenvolvimentos recentes e das tecnologias de baixo custo aplicadas em processos de pré-tratamento, sacarificação e fermentação para conversão de biomassa em bioetanol (MOURA et al., 2020; SIVARATHNAKUMAR et al., 2019). E para complementar, substituir os combustíveis derivados do petróleo, em um futuro próximo, com a possível aplicação na produção do biodiesel, sendo isto também uma alternativa promissora e viável, caracteriza a transição necessária aos combustíveis renováveis. E vale ainda salientar, que a produção de biodiesel pode ser realizada por transesterificação e esterificação de óleos vegetais e gorduras animal, sendo para tanto utilizados somente álcoois simples, em que por razões de natureza física e química como cadeia curta e polaridade, o metanol é o mais utilizado nestes processos químicos de conversão (DANTAS et al., 2020; DANTAS et al., 2021).

Outros álcoois como o etanol, propanol, butanol e amil-álcool também são utilizados. Contudo, cada vez mais o etanol está se tornando mais popularmente difundido porque é um álcool renovável e muito menos tóxico que o metanol, assim, muito embora a reação química de transesterificação etílica seja notoriamente mais complexa que a rota metílica, ela tem a importante vantagem de ser mais limpa. Nos processos de produção de etanol pode-se originar um álcool de primeira geração e de segunda geração, sendo que a principal diferença está na matéria-prima de partida para produzi-los. No Brasil, tem-se que a principal matéria-prima utilizada na produção de etanol de primeira e segunda geração é a cana-de-açúcar, que é uma cultura agrícola a qual é muito rica em sacarose e bastante celulose no seu bagaço e na palha. Já o álcool etanol produzido em outros países, principalmente nos EUA, é originário de culturas agrícolas ricas em amido, como o milho.

Levando em consideração o ponto de vista químico industrial, o etanol de primeira geração é obtido pela bioconversão dos açúcares (sacarose, glicose e frutose) contido na matéria-prima pelos micro-organismos leveduras. E o etanol de segunda geração pode ser produzido a partir de material amiláceo, tubérculos e cana-de-açúcar, sendo necessário que o amido e/ou celulose da matéria-prima seja convertido por enzimas em açúcares de

moléculas menores como sacarose, glicose e frutose, para a partir dessa conversão enzimática, se desencadear uma fermentação alcoólica e se produzir o etanol.

A nível mundial essa configuração da produção de etanol, de primeira e segunda geração, já se apresenta como a alternativa mais viável dentro das biomassas utilizadas para diminuir problemas ambientais e energéticos, e isto se deve a fatores como o de tornar os processos mais sustentáveis, o que garante boa adesão pelas populações e governos globais, porque quando comparado aos combustíveis fósseis e ao álcool metanol que é tóxico, o etanol possui a marcante vantagem de ser uma fonte renovável de energia, ou seja, anualmente se tem matérias-primas como a cana-de-açúcar e outras culturas disponíveis. Além do mais, se tem a importante parcela de contribuição na redução das emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na atmosfera, isto justificado pela grande captura de gás carbônico via fotossíntese pela própria cana-de-açúcar e outras culturas quando do seu desenvolvimento vegetativo, gás este que é emitido quando da própria combustão do etanol.

Dados da Embrapa dão conta de que, com os recursos das engenharias, se produz em média 100 L de etanol por tonelada de cana, 280 Kg de bagaço e 180 a 200 Kg de palha. Segundo essa instituição, se toda essa biomassa (bagaço e palha) for convertida em etanol, se obtém em média 100 L de álcool por tonelada de cana-de-açúcar, ou seja, a produção chegaria por tonelada de cana ou por hectare de cana plantada, a ser no mínimo duplicada (EMBRAPA - Brasil, 2018).

Uma outra matéria-prima em abundância no nordeste brasileiro que pode contribuir com o aumento da produção de etanol combustível, principalmente em nível de agricultura familiar, é a algaroba. De acordo com Queiróz (2019) a algaroba em sua composição química apresenta de 32 a 35% de açúcares (sacarose, glicose e frutose), portanto, muito interessante para produção de etanol. Comparada a cana-de-açúcar que chega a ter de 15 a 20% de sacarose, a quantidade de etanol produzido por uma tonelada de algaroba em micro destilarias, poderia chegar a 130% a mais em relação a uma tonelada de cana-de-açúcar, mantendo o mesmo processo conversional dos açúcares em etanol.

O nome científico da algaroba é *prosopis juliflora*, e é uma cultura originária do Peru. Bastante resistente aos regimes de seca, as primeiras mudas chegaram ao Brasil em 1942, sendo até hoje estudada a sua composição e propriedades para muitas aplicações, embora seja principalmente usada para fins de alimentação animal. A *Prosopis juliflora* (Sx.) DC., é uma espécie arbórea adaptada no Brasil com valor alimentício

animal e ambiental para reflorestamento (MEIRA et al., 2020), para fins medicinais humano, animal e vegetal (COSTA e CAVALCANTE, 2018; NETA, 2019; ROCHA, 2019) e tantas outras importantes investigações.

Dentro desta contextualização, a algaroba se apresenta como uma fonte sustentável para produção de produtos e coprodutos voltados para a área de energias renováveis, visto que o seu potencial energético atende alguns requisitos fundamentais para a produção de biocombustíveis, delineando então a proposta deste presente trabalho, em que sequencialmente foram destacadas relevantes pesquisas dentro desta abordagem adotada. Isto configura grande importância no que diz respeito ao desafio de reduzir as emissões de exaustão dos combustíveis fósseis, substituindo-os pelo biodiesel.

## 2.2 A ALGOROBEIRA: UM PANORAMA GERAL

*Prosopis juliflora* é um arbusto da família das *Fabaceae*. É conhecida como uma planta bruta que cresce em climas quentes, com quase nenhuma água necessária para a sobrevivência. É uma espécie de algaroba, nativa do Caribe e da Ásia. Seus usos compreendem o manejo ambiental de madeira e forragem (ASOKAN et al., 2019).

De acordo com os autores Silva e Azevedo (1998) há mais de meio século na região Nordeste a algarobeira representa uma das várias espécies capazes de possibilitar aos animais e ao próprio homem uma atenuação aos efeitos adversos das periódicas secas. A algarobeira é altamente resistente à seca e tem um potencial de adaptação por demais favorável às condições edafoclimáticas (solo e clima) do semiárido, razão pela qual esta cultura despertou o interesse de autoridades governamentais, órgãos de pesquisa, universidades, técnicos e produtores rurais, contribuindo para o fortalecimento da economia agropecuária da região. Conforme Burnett (2017) a busca por alternativas para a alimentação dos rebanhos da região nordeste fragilizados pelas condições climáticas levou a implantação no século XX de plantas exóticas no Brasil, tendo destaque a *P. Juliflora* pela fácil adaptação a ambientes secos e com escassez de água. A algaroba cultivada no Nordeste do Brasil é do gênero *Prosopis* e da espécie *Prosopis juliflora* (S.w.) (D.C.), esta é uma leguminosa xerófila e não oleaginosa pertencente à família *Leguminosae* e sub-família *Mimosidae*. A algarobeira encontra-se amplamente difundida em certas regiões brasileiras, particularmente no Semiárido Nordestino, onde os Índices de Desenvolvimento Humano são historicamente baixos (SILVA, 1996; BARROS, 1981).

Conforme Burkart (1976) e Simpson (1977) existem cerca de 44 espécies desse gênero distribuídas em regiões áridas e semiáridas das Américas do Norte e do Sul, Norte da África e Leste da Ásia. Somente 3 são naturais da Ásia e uma da África; as 40 restantes são originárias da América: 9 da América do Norte e 31 da América do Sul. Das 31 espécies da América do Sul, 29 (93,55%) são nativas da Argentina. Os autores Ribaski et al. (2009) mais recentemente corroboram no relato que existe conhecimento de mais de 40 espécies deste gênero, estando elas distribuídas no continente americano, asiático e africano, sendo encontrada em todo continente americano, com maior concentração nas regiões de semiárido das quais 70% das espécies do gênero estão na América do Sul, sendo 93% originadas da Argentina.

Sendo uma cultura originária do deserto Piúra, no Peru, segundo Azevedo (1986) as primeiras sementes de algaroba foram introduzidas no Brasil em 1942, as quais se adaptaram e se reproduziram muito bem no Nordeste Brasileiro, passando a ocupar terras áridas e secas com capacidade de reprodução e expansão enormes. De acordo com Cunha e Silva (2012) a ideia da inserção da *P. Juliflora* partiu do professor J. B. Griffing, diretor de uma escola agrícola do estado de Goiás, o qual enviou sementes da algarobeira, originárias do Novo México, para Empresa Pernambucana de Pesquisa Agropecuária em Serra Talhada/PE, com objetivo de ofertar uma alimentação rica em proteínas e carboidratos, visto que a alimentação irregular dos rebanhos em tempos de estiagem possuía praticamente fibras de palmas e plantas secas. Nos anos seguintes, os demais estados nordestinos passaram a semear esta planta, inicialmente vista como milagrosa, devido ao seu potencial para forragem e também de suas múltiplas aplicações no uso da madeira. Damasceno, Ferrari e Giordani (2017) corroboram a este relato, reportando que a algaroba foi trazida inicialmente com o objetivo de ajudar ao reflorestamento e servir de alimento para os animais.

Desta maneira, na Caatinga, onde foi-se adaptando facilmente, de acordo com Braga (1960) e Gomes (1961) em seguida a algaroba disseminou-se no Rio Grande do Norte em 1944, na Fazenda São Miguel, Município de Angicos, e no Estado do Ceará em 1954, seguido pelos demais estados do polígono das secas. Segundo Arruda (1994) a algaroba por ser xerófita adaptou-se muito bem às condições de clima e solo inerentes ao Semiárido Nordestino. Este autor também reportou que as pesquisas inicialmente realizadas foram no sentido de atender a necessidade de alimentação animal e que posteriormente novas pesquisas surgiram com o propósito de explorar o alto potencial por ela oferecido. Por exemplo, Burnett (2018) relataram que com o tempo o objetivo da

utilização mudou e se começou a usar a algaroba para suprir a necessidade de madeira, para fornos, produção de carvão e confecção de cercas, dado o alto grau de desmatamento da Caatinga na região.

O Nordeste, nos últimos anos, sempre se manteve como o maior produtor de algaroba do Brasil, sendo que a cultura algarobeira nesses anos tem apresentado um aumento crescente de produção, isto se deve ao projeto Algaroba criado em 1984 por meio do Ministério da Agricultura, em que como resultados foram produzidas 3,3 milhões de mudas e plantadas 2,1 milhões delas entre 8,3 mil produtores rurais, no período de 1985 a 1988. Quase 19 mil hectares foram ocupados com plantio de algarobais, em 540 municípios nordestinos (BORGES, 2004; GALVÃO e LIMA, 1987). Atualmente é quase impossível não encontrar árvores robustas de algarobeira nas regiões de semiárido dos estados do Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia e norte de Minas Gerais, correspondendo cerca de 0,5 milhões de hectares (ROCHA, 2019).

Gomes (1973) relatou que a produção da algarobeira se mantém de 30 a 40 anos e que a sua frutificação se inicia no segundo ano, além disso tem capacidade de conservação verdejante mesmo nos meses mais secos do ano na região do Cariri Velho Paraibano, cujo índice de pluviosidade é na casa dos 400 mm. Santos e Diodato (2016) e Lima (2009) relataram que a algarobeira apresentou uma excelente adaptação visualmente comprovada após décadas e, em consequência, já foi identificada em grande escala em áreas de pouca preservação de vegetação nativa, mantendo-se verde e em bom estado mesmo nos períodos de seca. De acordo com Silva et al. (2009), a algaroba é três vezes mais produtiva (3000 a 8000 Kg/ha) do que o milho (600 Kg/ha) com uma precipitação pluviométrica duas vezes menor (30 mm). Mesmo diante das intempéries severas o seu crescimento é muito rápido. Em conformidade com o estudo de Mendes (1982) os solos pobres, rasos e pedregosos associados ao clima tropical semiárido, onde a irregularidade na distribuição, no tempo e no espaço das precipitações pluviométricas, torna a região imprópria para o cultivo de muitas plantas, porém, adequada ao desenvolvimento das lavouras xerófilas.

A riqueza da algarobeira como alimento para o homem está nas vagens. Portanto, o seu conhecimento, sobretudo, em termos nutricionais, é fundamental para a determinação de sua eficácia alimentar, o valor biológico de sua proteína, o potencial energético efetivo de seus carboidratos redutores e não-redutores, além de sua adaptação à dieta humana (BORGES, 2004). As vagens de *prosopis* estão entre os alimentos mais

antigos utilizados pelo homem pré-histórico no Novo Mundo. Até hoje constitui fonte de carboidratos e proteínas para muitos habitantes dos desertos do norte e sul do continente americano (HABIT, 1985). As vagens da algarobeira são frutos palatáveis, aromáticos e doces, e se acham entre os alimentos mais antigos utilizados pelo homem, sendo observado durante a época do descobrimento o uso das vagens da algaroba na alimentação humana quando os espanhóis chegaram à América do Sul e encontraram os índios utilizando-os na alimentação, principalmente nas regiões semidesérticas, que se estendem do sul do Equador ao centro do Chile e da Argentina (FIGUEIREDO, 2004).

As vagens caem ao chão ao amadurecerem e diferenciam-se de outras leguminosas por não se abrirem ao secar, de modo que não perdem a polpa nem as sementes; são palatáveis, aromáticas e possuem valor alimentício que pode ser comparado ao da cevada e do milho (DELL VALLE et al., 1985; BECKER e GROSJEAN, 1980). Os frutos (vagens) doces, são ricos em proteínas e energéticos e contêm elevados teores de cálcio e ferro imprescindíveis na alimentação humana e para os animais (SILVA, 2009). Segundo Negreiros et al. (1988) as vagens são compridas, achatadas e em geral, levemente curvadas, apresentam elevado valor nutritivo e 77% de digestibilidade *in vivo*. Silva (1999) descreve as vagens como sendo frutos compostos por epicarpo coreáceo, de cor amarelo-claro, mesocarpo carnoso e rico em sacarose (20-25%) e açúcares redutores (10-20%) e endocarpo lenhoso contendo as sementes com (34-39%) de proteínas. Em estudo realizado por Baião et al. (1987), foi constatado que as sementes de algaroba possuíam um alto teor proteico (35,8%) e baixos teores de lipídios (4,5%), de carboidratos solúveis (6,8%) e de fibras (6,1%).

Ademais, essa espécie de grande aceitação popular é uma planta de reconhecido valor econômico, capaz de proporcionar vários benefícios, tais como o fabrico de móveis e artesanatos a partir da madeira, lenha de considerável poder calorífico, carvão de excelente qualidade, possibilidade de florestamento e reflorestamento em pleno semiárido de forma econômica, sombra protetora para os animais e plantas e para o solo, mesmo diante das intensas secas. Flores melíferas asseguram a exploração econômica de abelhas, pois floresce em pleno período seco, possibilita a recuperação de solos erodidos e salinizado onde nenhum vegetal de interesse econômico tem conseguido prosperar, fornecendo madeira para construções, dormentes, estacas e moirões; enriquecem o solo pela permanente deposição de matéria orgânica de suas folhas e pela fixação simbiótica do nitrogênio atmosférico (CORREA, 1926). A resina desta planta é conhecida como excelente tintura de cor negra para colorir lã ou algodão. Com propriedades

mucilaginosas, gomas e medicinais constitui uma alternativa produtiva para a família camponesa, proporcionando diversos produtos alimentícios (GIL, 2008). Encontram-se também registros da utilização de extratos e metabólitos secundários da algaroba como antitumoral (COSTA e CAVALCANTE, 2018); inseticida (CAVALCANTE, MOREIRA e VASCONCELOS, 2006) e fungicida (CUNHA, 2012), dentre outros.

Por outro lado, vale salientar que, mesmo sendo a algaroba consolidada nas pesquisas como uma cultura vantajosa para produção de matéria verde e lenha em locais inóspitos, alguns críticos a acusam de planta invasora e dominadora de ambientes naturais quando implantada nesse meio (FIGUEIREDO, 1975). Assim, do ponto de vista ambiental, após algumas décadas a algaroba foi deixando de ser a solução para o semiárido nordestino e foi ganhando a fama de “vilã”, uma vez que compete fortemente na retirada de água do solo dificultando o desenvolvimento de outras plantas ao seu redor e em consequência a destruição de plantações e espécies nativas (BURNETT, 2017). A biodiversidade brasileira está cada vez mais ameaçada, pois a implantação de espécies exóticas sem o controle ou monitoramento do espaço geográfico contribui para extinção da flora nativa. A caatinga, bioma exclusivamente pertencente ao território brasileiro, também tem sofrido impacto ecológico com a invasão em massa de plantas com propriedades alelopáticas e que competem pelos nutrientes do solo e recursos hídricos (ROCHA, 2019).

De acordo com Lima (2002) foi realizado um controle à invasão da espécie (algarobeira), que inibe a implantação natural das espécies nativas. Na área preservada foram encontradas cerca de 60 espécies arbóreas/arbustivas diferentes, estimadas em 902 plantas adultas/hectare enquanto na área totalmente degradada, encontrou-se apenas duas espécies, correspondendo a 18 plantas adultas/hectare, sendo a algarobeira a espécie dominante.

Pegado et al. (2006) avaliaram os impactos causados pela invasão biológica de *Prosopis juliflora* sobre a composição e a estrutura do componente arbustivo-arbóreo da Caatinga, tanto no estrato adulto quanto na regeneração natural, estes autores concluíram que a área invadida se apresentou muito mais pobre em relação à primeira, em todos os parâmetros avaliados. Os impactos causados pela invasora foram sentidos tanto na estrutura, quanto na diversidade biológica da comunidade. A Densidade Relativa de *P. juliflora* no estrato adulto da área invadida atingiu cerca de 90%, o que reflete a sua capacidade de competição e eliminação das demais espécies. Andrade (2007) relatou que a algarobeira é um sério problema ecológico não-resolvido, isto foi concluído por meio

do projeto de avaliação dos impactos da algaroba sobre a fitodiversidade e a estrutura da Caatinga. Nesse estudo, realizado em 6 (seis) municípios na Paraíba (PB) e no Rio Grande do Norte (RN), foram levantados dados alarmantes que levaram a indicação da necessidade do controle urgente da proliferação agressiva da algarobeira afim de salvar as espécies nativas, isto se deu porque a algarobeira chegou a dizimar várias espécies nativas em determinadas regiões, dentre elas a oiticica e a caibreira, árvores nativas importantes da vegetação ciliar do sertão, estão entre as espécies mais ameaçadas pela algaroba, conforme o trabalho.

Além do impacto ambiental causado pela falta de controle territorial da algarobeira, outros fatos negativos se agregaram ao uso da planta. Dentre eles uma doença que afeta os bovinos conhecida popularmente por “cara torta”, causada pela ingestão de 100% da vagem na ração animal. Estudos científicos de caráter biológico e sobre a composição química da planta levaram a crer que os metabolitos secundários da *P. juliflora*, principalmente os alcaloides que são os responsáveis pela toxicidade da planta, são os causadores da doença (TABOSA et al., 2000).

Dentro deste cenário, de acordo com Burnnet (2017), é possível observar no transcorrer do histórico da “saga” da algaroba, que os principais atores sociais na construção desse discurso da “salvação”, foram sem dúvida os engenheiros agrônomos da rede oficial de pesquisa e extensão agrícola e os pecuaristas nordestinos que são geralmente também agrônomos e/ou políticos. Dessa forma, o conhecimento tecnológico é usado politicamente para apoiar políticas públicas que justificam progresso e desenvolvimento econômico refletindo interesses de uma classe dominante. Portanto, conforme este autor, as questões ambientais e as questões sociais não mais estão separadas em campos diferentes, ao contrário, a ecologia está carregada de política, do social e do econômico, e o meio ambiente criado reflete os valores da sociedade. Verifica-se que o discurso da “salvação”, o qual foi construído por seus defensores e divulgadores refletiu os valores “desenvolvimentistas” da sociedade daquela época. De acordo com o autor, nas últimas décadas outros discursos se construíram, sendo o outro lado da moeda, o discurso da algaroba vilã, arrebatadora de água, justificando o corte irrestrito da espécie para servir de lenha, por ser exótica e invasora e para conservar as espécies nativas do Semiárido. Os administradores públicos do IBAMA e SUDEMA liberaram o corte da algaroba, por ela ser exótica e invasora, alegando, dessa forma, a proteção da flora nativa do corte para fins energéticos. Por outro lado, o corte da madeira das espécies nativas passou a ser taxado pecuniariamente por metro cúbico. Dessa forma, as mesmas

instituições técnicas e políticas que outrora divulgaram o discurso da algaroba como “salvadora” para o semiárido, hoje propagam um discurso de planta “invasora”.

No entanto, são evidentes as vantagens da algarobeira. Silva (2002) que reportou que no Estado da Paraíba a cultura algarobeira é mais forte na região do Cariri, também relatou que foram realizados trabalhos no semiárido, cujo objetivo foi favorecer subsídios para uma exploração produtiva da algaroba sem causar maiores danos à natureza. Além disso, em face às dificuldades encontradas nessas regiões em longos períodos de estiagem, este autor afirmou que, para o sertanejo, seria quase impossível sobreviver sem a algarobeira, tendo em vista a grande quantidade de frutos destinados à ração animal, além do elevado volume de madeira destinada a construções e instalações rurais (cercas, porteiras, cocheiras, mourões, carros-de-boi, apriscos, entre outros), extração de lenha e carvão para serem queimados em fornos cerâmicos, padarias, usinas e siderúrgicas, por todo o Nordeste.

A algarobeira é amplamente reconhecida pela resistência ao estresse hídrico e térmico, o que favorece a sua capacidade de se reproduzir em solos pouco férteis, sendo que outras culturas não possuem essa característica peculiar. Então, em suma e de maneira geral, de acordo com Suassuna (2007) a algarobeira tem contribuído de forma decisiva para que a economia do semiárido não entre em colapso, isto porque a possibilidade de sua ausência poderia provocar um desequilíbrio ambiental de grandes proporções, dado ao fato de estar inserida em todas as etapas do extrativismo vegetal, e por isto tendo a função de proteção à vegetação nativa. Os autores Gomes (1973) e Barbosa (1977) mencionaram que a produção da algarobeira se mantém durante trinta a quarenta anos, vegetando bem em quase todos os tipos de solo do Nordeste, pedregosos, de aluvião, sílico-argilosos, argilo-sílicosos e arenosos, servindo como cobertura para terrenos erodidos.

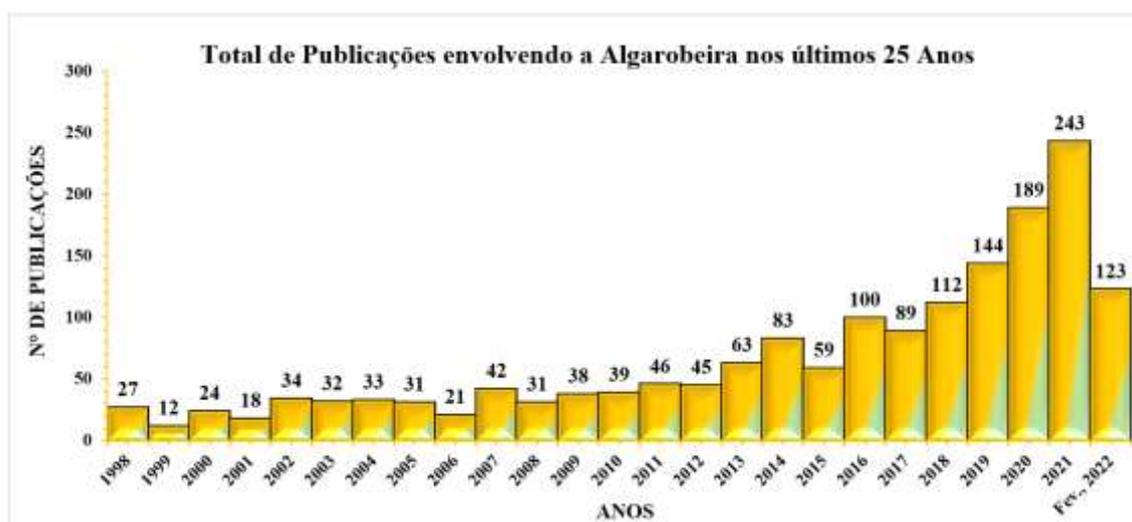
Em relação as potencialidades econômicas, Silva (2019) relatou que a algaroba, além de sua perfeita adaptação às condições de solo e clima no semiárido brasileiro, oferece potencialidades econômicas que poderão contribuir de maneira significativa para o desenvolvimento destas regiões. Oriunda de regiões áridas e semiáridas do planeta, a espécie (*prosopis juliflora*) predomina em quase todos os estados do Nordeste brasileiro. Essa leguminosa de rápido crescimento, resistente a seca e elevado potencial energético, possui inúmeras aplicações e usos no meio rural desde a antiguidade.

No meio científico são encontrados um número razoavelmente bom de publicações envolvendo o tema algarobeira. Tanto é que, em face de pesquisa realizada

no banco de dados internacional *sciencedirect*, usando as palavras-chave “*mesquite*”, são encontrados como resultados, até o momento, um número total de 5.650 publicações, as quais contemplam os últimos 25 anos (1998 até fev., 2022). E, quando usado o termo mais específico “*juliflora*”, são encontrados apenas 2.018 resultados no total de publicações, durante o mesmo período pesquisado. Finalmente, quando usado o termo composto “*prosopis juliflora*”, são encontrados como resultados um total de 1.836 publicações até o momento nos últimos 25 anos (1998 a fev., 2022) também. De forma geral, destes resultados, diz-se então que, a partir do ano de 1998 começou a se difundir os resultados dos trabalhos envolvendo a algarobeira (*juliflora*), em várias áreas.

Levando em consideração a palavra-chave “*juliflora*”, termo dentre as palavras-chaves utilizadas que resultou no número maior de publicações difundidas (2.018) até o momento, foi esquematizado graficamente na Figura 1 o total de publicações por cada ano.

**Figura 1.** Total de publicações encontradas para “*juliflora*” por cada ano, no período de 1998 até o mês de fevereiro de 2022.



Fonte. Autor, 2022.

Observa-se um aumento exponencial das pesquisas que envolvem a algarobeira, sendo que no ano inicial de 1998, ano tal que apareceram os primeiros resultados, foram encontradas, a nível mundial, apenas 27 publicações no total, e em 2021 fechou com um total de 243 publicações, representando isto um aumento em aproximadamente 89% no número de pesquisas envolvendo, direta ou indiretamente, a planta em questão. Outro dado importante a se destacar, é o número de publicações logo a partir do início do ano de 2022, que passaram apenas menos de 2 meses completos do início do primeiro

semestre, são encontrados um total de 123 publicações, o que sinaliza um crescimento maior até o fim deste corrente ano, podendo isto refletir em um maior grau de interesse pela algarobeira.

### 2.2.1 Utilização da Algaroba em Função de suas Propriedades

Muitos estudos apontam que a vagem da algarobeira está dentre os alimentos consumidos pelo homem desde a pré-história, nas regiões onde a planta é nativa. São palatáveis, aromáticas (lembrando baunilha) e doces em função do elevado teor de sacarose, que pode chegar a 30%. Sua proteína é de quantidade e digestibilidade razoáveis, equiparando-se às da cevada e do milho (FELKER e BANDURSKI, 1977; BECKER e GROSJEAN, 1980; DELL VALLE et al., 1985). De acordo com Machado (1994) e Figueiredo (2000) historicamente as vagens são trituradas para fazer uma espécie de farinha que serve para preparar um tipo de pão. Deixadas fermentar, graças ao elevado teor de sacarose, dão origem a uma bebida alcoólica. Vagens verdes podem ser cozidas à semelhança de vagens de feijão. Já o extrato aquoso obtido por maceração e cocção de vagens maduras, dá origem a um xarope comercializado em alguns países latino-americanos sob o nome de algarobina, e que pode ser usado como tônico e adoçante de café e outras bebidas. A partir desse extrato concentrado desenvolve-se uma bebida (à imitação de suco) refrescante, nutritiva e de sabor agradável. Conforme Grossi (1993) e Figueiredo (2000) pode-se, também, a partir desse extrato concentrado, obter geleias.

Gouveia e Figueiredo (2000) relataram que as vagens, quando quebradas em pedaços pequenos e torradas, depois de moídas, originam um pó que pode ser usado como substituto (total ou parcial) do café. As vagens colhidas e trituradas podem ser destinadas ao fabrico de rações podendo substituir, em parte, o milho. Segundo Figueiredo (1975) outro produto que pode ser produzido com a algaroba é a goma bruta, que é extraída do endosperma das sementes. Este produto é considerado seu constituinte mais nobre e corresponde à cerca de 30% da semente e a 3% do peso da vagem. Teoricamente, pode ser alcançada uma produção de 300 Kg de goma por hectare.

Devido ao valor nutritivo da sua vagem, a algarobeira é uma alternativa promissora nos programas de alimentação animal (BARBOSA, 1984; BARROS, 1981; RAO e REDDY, 1983). Segundo Silva (1996) a algaroba pode ser uma fonte útil de alimentação animal, substituindo ou reduzindo, a custos bem baixos, o uso de milho, soja e trigo os quais têm produção em escala muito limitada nas regiões semiáridas. A comparação do conteúdo proteico de suas vagens e folhas com outros alimentos comuns

das regiões áridas brasileiras, como a mandioca, milho, alfafa, capim da guine e *pineless cactus*, mostra que a algaroba possui um conteúdo proteico mais elevado do que todas as outras rações comuns das regiões áridas. Tanto é que, Belmont et al. (2016) reportaram conclusões científicas de dezenas de pesquisas, em que todas recomendam o uso racional da algaroba (vagem da algarobeira) na alimentação de diversas espécies de animais domésticos de importância econômica e social, no Nordeste.

Em relação a alimentação humana, o primeiro estudo amplo sobre a composição e propriedades das vagens, incluindo a descrição e a elucidação da estrutura do polissacarídeo da semente, foi publicado por Figueiredo (1975) e devido a este trabalho sobre a elucidação da estrutura do polissacarídeo da semente de algaroba, já existe no Brasil, tecnologia para produção industrial da goma da semente de algaroba em níveis similares às das gomas importadas. Inúmeras pesquisas realizadas em todo o mundo demonstram a semelhança química existente entre um polissacarídeo de alto peso molecular, denominado galactomanana (existente no endoplasma da semente da algarobeira), e os polissacarídeos encontrados no endosperma das sementes do feijão guar (*Ceratonia siliqua L.*), ambos importados e de grande utilidade na indústria de alimentos. Segundo este autor, a semente de algaroba é uma valiosa matéria-prima agroindustrial graças à presença de galactomanana (hidrocoloide) em seu endoplasma. Polímeros deste tipo, gomas LBG e Guar, são usados amplamente na formulação de sorvetes, queijos pastosos, molhos para saladas, iogurtes, entre outros.

A avaliação nutricional e bioquímica das proteínas de algaroba mostra que os seus produtos provenientes como xarope, farinha, café, bebidas alcoólicas, sorvete seriam ricos em proteínas, carboidratos e outros nutrientes. As vagens podem ser utilizadas na fabricação de produtos como melado, bebidas, aguardente, álcool, taninos, goma (NEGREIROS et al., 1988; GORGATTI NETO, 1987). Em conformidade com Campelo (1987) o elevado teor de açúcares associado aos altos níveis de nitrogênio das vagens da algarobeira, favorece os processos bioquímicos e viabiliza a tecnologia de produção de álcool, aguardentes, licor, vinho, mel, enzimas, ácidos, gomas, vinagre, açúcares e até bebida que substitui o café. Em alguns países andinos se fabricam outras bebidas, tais como aloja, chicha, etole e algarobina (um tipo de fortificante estomacal e afrodisíaco). Este autor constatou que 100 g dos frutos da algaroba proporcionaram 333 calorias, 13 g de água, 16 g de proteínas, 3,2 g de gorduras, 65,8 g de carboidratos, 1,6 g de fibra bruta, 3,3 mg de cinzas, 450 mg de cálcio, 627 mg de fósforo e 6,6 mg de ferro, além de 0,33 mg de vitamina B1 e 2,6 mg de vitamina B6.

O conteúdo de umidade, açúcares redutores, lipídios, proteínas, fibras, ferro, fósforo e água nas leguminosas são variáveis. A distribuição e qualidade desses componentes são os principais responsáveis pelas diferenças no valor nutritivo (LARRALDE e MARTINEZ, 1989). Além disso, as vagens da algarobeira são ricas em energia e possuem altos teores de ferro e fósforo. De acordo com Dell Valle et al. (1983) os níveis de açúcares redutores nas vagens integrais e pericarpo correspondem a 50% do total de carboidratos existentes, e que o pericarpo é mais rico em açúcares redutores (6,5%) do que a vagem integral (1,7%), porém a sacarose apresenta-se com valores idênticos (21,3%). No entanto, Silva (1986) obteve valores mais elevados para açúcares redutores nas vagens integrais (2,82%) e para a sacarose da farinha do pericarpo (26,07%), embora o conteúdo de açúcares redutores encontrados na farinha do pericarpo tendo sido inferior (4,15%).

Em conformidade com Silva (2009) a parede dos frutos da algarobeira é rica em açúcares, proteínas, sais minerais e outras substâncias que podem ser transformadas em matéria-prima na produção de bolos, pães, biscoitos, bebidas, condimentos, geleias, méis, pudins, sopas, papas e outros alimentos saborosos e nutritivos. A fermentação do xarope extraído das vagens da algarobeira, produz álcool etílico, ácido acético e ácido cítrico, enzimas e muitos outros componentes secundários, como aldeídos, metanol, álcoois superiores, ácidos e ésteres, que contribuem para a qualidade organoléptica das bebidas. Os pioneiros estudos brasileiros com a aguardente de algaroba foram desenvolvidos por Silva (2002), sendo estes o vetor impulsionador para novas pesquisas objetivando o aperfeiçoamento do processo de produção, como o maior aproveitamento do potencial de açúcares componentes e extraídos das vagens. Este mesmo autor detém três patentes relacionadas à vagem da algaroba, sendo a aguardente, o vinagre e o aparelho reator que produz este último.

No estudo de Arruda (1994) foi relatado a aplicação dos açúcares extraídos dos frutos maduros da algarobeira na obtenção do álcool etílico, sendo concluído que o mosto era um dos mais propensos a sofrer fermentação, isto porque já no primeiro momento, após a adição do fermento, deu-se o início da fermentação, sendo um fato que não ocorre com outras matérias-primas, além de fermentações com muito vigor e elevados rendimentos em álcool, teores de proteínas no resíduo sólido superiores a várias rações usadas nas regiões semiáridas, comprovando a sua viabilidade técnica e econômica.

Portanto, com base em toda a contextualização levantada e apresentada, se delinea o objetivo deste trabalho, que é a obtenção de etanol anidro das vagens da

algarobeira por meio de um sistema de destilação adaptado especialmente para este fim, e a sua inédita aplicação na produção de biodiesel. Com isto, se espera contribuir de forma técnica e científica nas pesquisas com foco na diversificação que gera inovações a partir do uso dessa cultura tão importante em todo Brasil e especialmente para o Nordeste.

### 2.3 BIOCOMBUSTÍVEIS: CENÁRIO ATUAL E PERSPECTIVAS FUTURAS

Recentemente, a necessidade de uma transição estável para sistemas alternativos de energia foi desencadeada pelas mudanças climáticas e segurança energética, sendo os biocombustíveis verdes as possíveis soluções sugeridas para questões de emissão de poluentes e dependência da sociedade de derivados fósseis.

Santos et al. (2020) reportaram que, com o ímpeto de substituir os combustíveis fósseis (petróleo, carvão e gás), ao menos parcialmente, surgiu nos últimos anos o interesse por fontes alternativas de energia, incluindo biomassa, solar, eólica, hidrelétrica, geotérmica, entre outras. Dentre essas fontes alternativas, a biomassa tem sido amplamente estudada, principalmente por seu potencial de produção de combustíveis sólidos, líquidos, eletricidade, biogás, bio-óleo e diversos produtos químicos. Por isso, grande parte dos países desenvolvidos ou em desenvolvimento, como o Brasil, está mobilizando grandes investimentos para que a biomassa tenha um papel significativo na matriz energética, principalmente na obtenção de biocombustíveis renováveis e sustentáveis. Estes autores apresentam a produção de etanol de segunda geração a partir de resíduos da cana-de-açúcar como sendo uma das tecnologias de biorrefinaria mais promissoras e abordaram todas as etapas da produção de etanol celulósico, desde a composição da biomassa lignocelulósica até o pré-tratamento, hidrólise e fermentação.

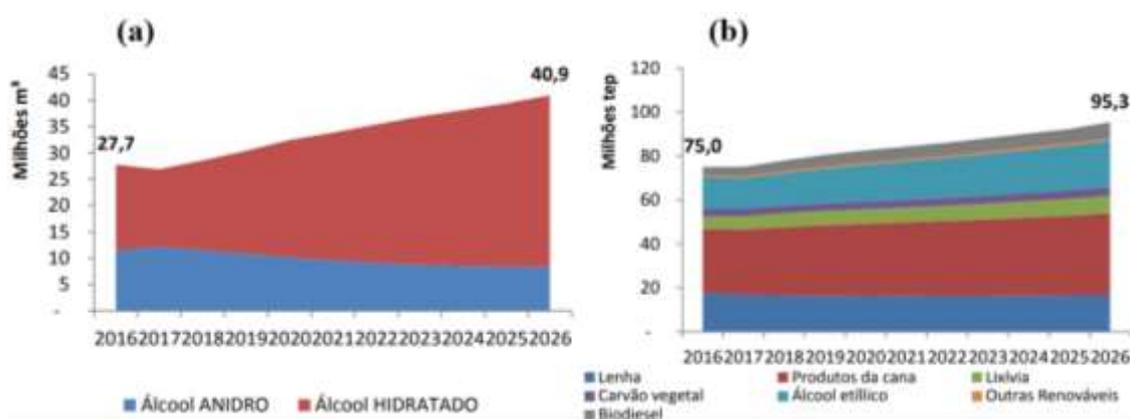
Conforme o plano decenal de expansão de energia 2026, publicado pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética) os derivados de petróleo mantêm-se como a principal fonte de energia final, com um crescimento médio de 0,4% anuais no decênio. Parte de seu mercado potencial é abatida pelo etanol e pelo biodiesel, que são biocombustíveis especialmente utilizados no setor de transportes. No que tange aos biocombustíveis, os que mais crescem de importância no consumo final de energia no decênio são o biodiesel (6,8% a.a.), o álcool etílico (3,9% a.a.) e a lixívia (3,7% a.a.). A demanda de biodiesel é catalisada pela premissa de aumento de sua participação no óleo diesel comercializado, que salta de 7,0%, em 2016, para 11,0%, em 2026. Já o etanol cresce de importância nos veículos leves, em detrimento da gasolina automotiva. No período 2016-2026, o etanol

tem um expressivo aumento do consumo final, sendo que boa parte deste incremento advém do etanol hidratado (7,2% anuais), a ser utilizado basicamente em veículos do ciclo Otto. Por outro lado, o etanol anidro tem uma redução média anual da demanda de 3,1%, atrelada ao cenário de consumo de gasolina C. Entre 2016 e 2026, o setor energético é o que mais ganha importância no consumo final de energia, influenciado principalmente pelo aumento de produção do pré-sal, aliado ao incremento da produção do setor sucroalcooleiro (EPE, 2016).

De acordo o relatório do *workshop* organizado pelo Fórum Internacional de Transporte, realizado em Paris, em junho de 2018, o setor de transporte consome uma grande parte dos combustíveis fósseis e mais de três quartos (3/4) dos usuários de automóveis são movidos a diesel (FURTADO, 2018). O biodiesel tem as vantagens de além de ser renovável, ser biodegradável e menos poluente, também é essencialmente semelhante ao diesel, de modo que pode abastecer os motores diesel existentes com pequenas modificações, se necessário.

Nas Figuras 2 (a) e (b) estão ilustradas graficamente o consumo final de etanol por tipo, e o consumo final de biocombustíveis, por fonte, respectivamente.

**Figura 2.** (a) Consumo final de etanol por tipo, e (b) Consumo final de biocombustíveis, por fonte.



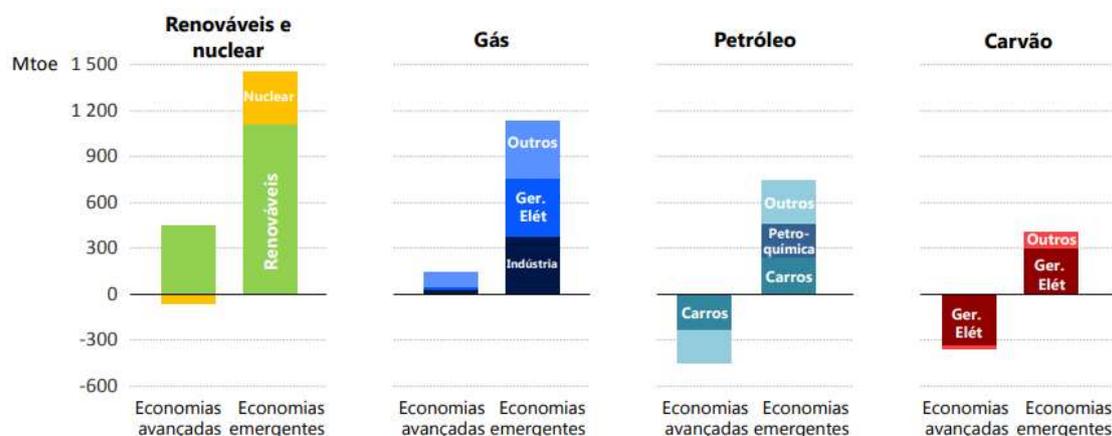
Fonte: EPE (2016).

Atendendo a demanda energética, de acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA, na sigla inglesa), sem progressos sustentados em eficiência energética, uma poderosa ferramenta para os problemas de sustentabilidade e de segurança do suprimento energético, o aumento da demanda seria o dobro (SIMONS, 2019). Conforme os autores Moriarty e Honnery (2016) a demanda global de energia deverá atingir  $10^3$  Exajoules ou mais até o final de 2050 se o crescimento econômico atual continuar. Na Figura 3 está

ilustrada graficamente a variação na demanda energética global, entre os anos de 2017 a 2040.

O Brasil mostra o caminho da descarbonização do transporte, pois os biocombustíveis refletem a cultura de baixo carbono requerida. Tanto é que, a grande penetração dos veículos *flex* no mercado nacional possibilitou atingir proporções de renováveis no setor de transporte muito maiores que no resto do mundo. Os biocombustíveis e os veículos elétricos são soluções complementares na descarbonização dos transportes.

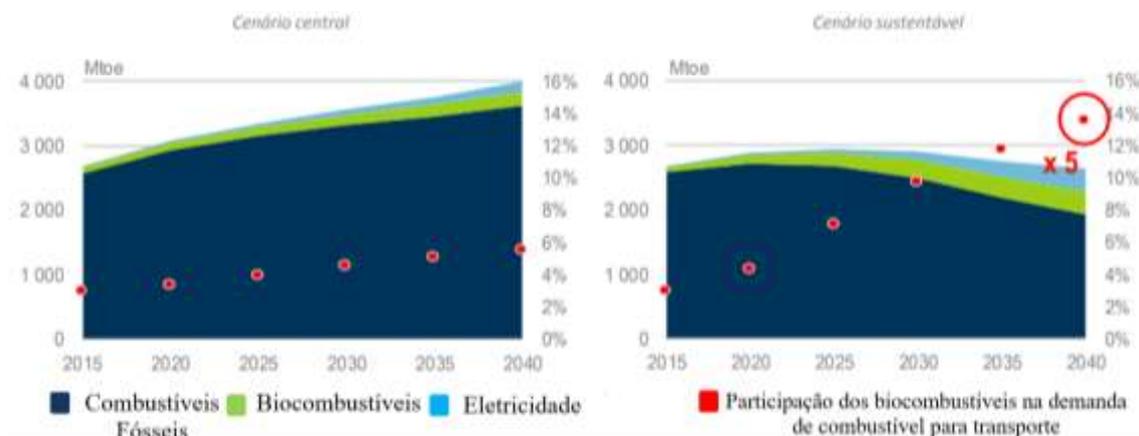
**Figura 3.** Variação na demanda energética global, 2017-2040.



Fonte: IEA (2019).

No cenário sustentável, a participação dos biocombustíveis nos transportes quintuplica até 2040 (Simons, 2019), como ilustrado graficamente na Figura 4.

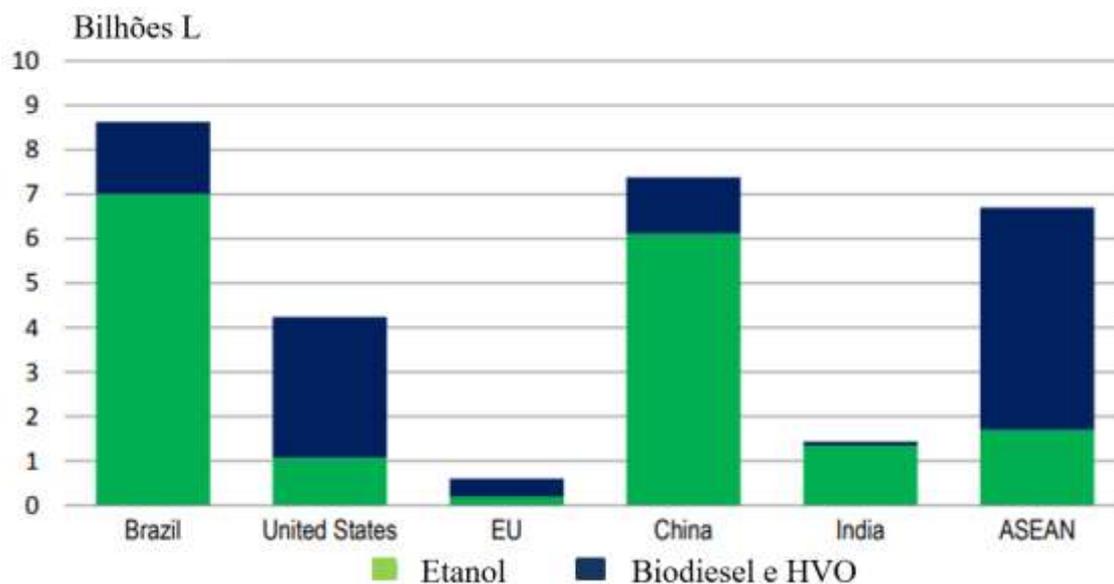
**Figura 4.** Demanda final de energia no setor de transporte por combustível, entre 2015-2040.



Fonte: Adaptada de IEA (2019).

Recentemente, a necessidade de uma transição estável para sistemas alternativos de energia foi desencadeada pelas mudanças climáticas e segurança energética. O Brasil lidera o crescimento da produção de biocombustíveis, pois graças à RenovaBio, o Brasil é o país cuja produção registrará o maior aumento nos próximos anos. Os países emergentes da Ásia respondem por metade da previsão de crescimento da produção (Simons, 2019). Na Figura 5 está ilustrado graficamente o aumento da produção de biocombustíveis, entre os anos de 2019 a 2024, sendo o etanol, o biodiesel e o óleo vegetal hidrotratado (HVO, na sigla em inglês) conhecido como diesel verde ou diesel renovável, são estes biocombustíveis.

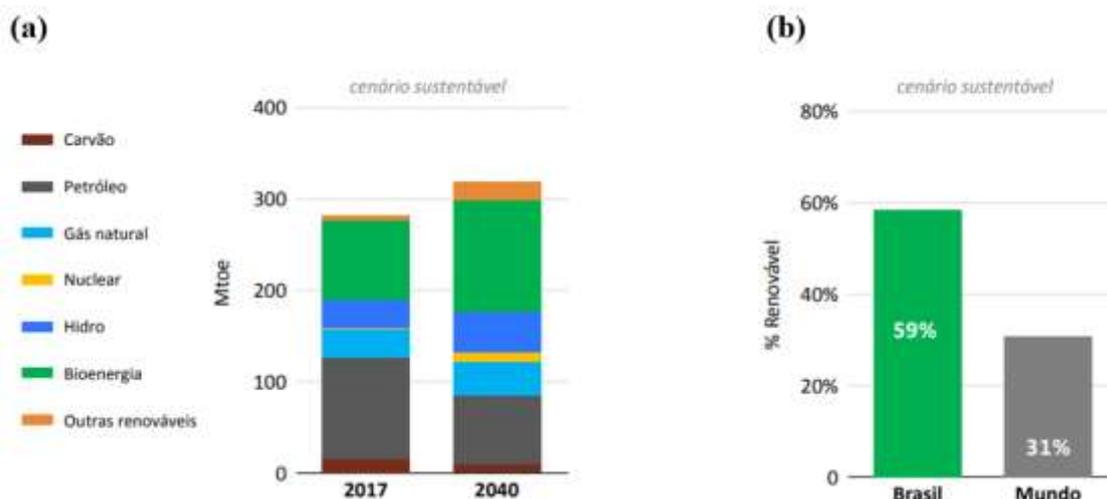
**Figura 5.** Aumento da produção de biocombustíveis, 2019-2024.



Fonte: Adaptada de IEA (2019).

Ainda conforme a IEA, a matriz energética brasileira ficará ainda mais limpa, porque o país tem hoje uma das matrizes energéticas mais renováveis do mundo. A participação das renováveis continuará sendo maior que a média mundial nas próximas décadas (Simons, 2019). Na Figura 6 está ilustrada graficamente a demanda primária de energia no Brasil, entre os anos de 2017 a 2040, bem como a participação de renováveis na matriz energética primária, em 2040.

**Figura 6.** (a) Demanda primária de energia no Brasil, 2017-2040 e (b) Participação de renováveis na matriz energética primária, 2040.



Fonte: IEA (2019).

Dentro desta ótica, estudos oferecem uma visão mais clara sobre as possibilidades, consequências e influências de uma estrutura regulatória sobre biocombustíveis no Brasil para a transição energética da América Latina, prevendo a possibilidade de aumentar o uso de tecnologia para gerenciar o processo de certificação e comércio de notas (DENNY, 2020).

## 2.4 BIOCOMBUSTÍVEIS

Combustível é caracterizado por ser qualquer substância que, ao reagir com o oxigênio, produz calor, gases ou chamas. A energia liberada durante esse processo é de fundamental importância para as atividades humanas e, principalmente, para a produção industrial, pois grande parte das máquinas funciona a partir de energia combustível. Várias substâncias podem ser utilizadas na fabricação de combustível, sendo os de origem fóssil os mais populares (petróleo, carvão e gás natural). Porém, a necessidade de desenvolver alternativas que possam substituir, gradativamente, os combustíveis de origem fóssil, impulsionou as pesquisas para a obtenção de biocombustível. A cana-de-açúcar, os resíduos agropecuários, o dendê, plantas oleaginosas e a biomassa florestal são as principais matérias-primas na produção do biocombustível, que é um dos menos agressivos ao meio ambiente, pois a emissão de gases poluentes é praticamente nula. O Brasil é um país com uma extraordinária biodiversidade e tem se tornado referência em pesquisas na área de biocombustíveis, sendo isto refletido pelos crescentes e relevantes

trabalhos de cunho científico, os quais possibilitam a aplicação tecnológica (DANTAS et al., 2021).

Os biocombustíveis, como o próprio nome já indica, são um tipo de combustível de origem biológica ou natural. Trata-se de uma fonte renovável de energia que é utilizada por meio da queima da biomassa ou de seus derivados, tais como o etanol (álcool para combustível), o biodiesel, o biogás, o óleo vegetal e outros. A biomassa é tida como qualquer material de constituição orgânica que pode ser empregado para algum tipo de produção de energia. Assim, os biocombustíveis correspondem a uma das formas sob as quais a biomassa pode ser empregada, além de serem tidos como uma alternativa econômica e ambiental para reduzir a queima dos combustíveis fósseis. Geralmente, os tipos de biomassa utilizados como matérias-primas dos biocombustíveis são as plantas oleaginosas, ou seja, aqueles vegetais que possuem substâncias em formas de óleos e gorduras que podem ser extraídas a partir de determinados processos. Entre os vegetais mais comumente empregados, principalmente no Brasil, estão a cana-de-açúcar, a mamona, a palma, o girassol, o babaçu, a soja, o milho e outros. O milho é mais utilizado nos Estados Unidos, país que, assim como o Brasil, produz etanol em larga escala. Atualmente, o Brasil possui uma produção de etanol que supera os 21,5 milhões de barris por ano, o que equivale a um montante de aproximadamente 3,52 bilhões de litros. As perspectivas, segundo a Agência Internacional de Energia, é que essa produção aumente cerca de 200% até o ano de 2050, o que tornaria o Brasil uma referência internacional em biocombustíveis

As vantagens dos biocombustíveis são várias, saber, menor índice de poluição com a sua queima e processamento; podem ser cultivados e, portanto, são renováveis; geram empregos em sua cadeia produtiva; diminuem a dependência em relação aos combustíveis fósseis; além de aumentarem os índices de exportações do país, favorecendo a balança comercial. Por outro lado, entre as desvantagens dos biocombustíveis, pode-se mencionar a necessidade de amplas áreas agricultáveis, podendo intensificar o desmatamento pela expansão da fronteira agrícola; pressão sobre o preço dos alimentos, que podem ter sua produção diminuída para dar lugar à produção de biomassa; entre outros fatores.

De toda forma, a produção de biocombustíveis se dá de maneira mais favorável em países que possuem uma larga extensão territorial e grandes espaços produtivos, capazes de produzirem uma grande quantidade de matérias-primas para serem processadas e convertidas em óleos e combustíveis. Esse cenário favorece, especialmente,

o Brasil e os Estados Unidos, líderes mundiais na produção e consumo dessa importante fonte de energia.

São produzidos a partir da biomassa, ou seja, de matéria orgânica animal e vegetal. Dois biocombustíveis muito produzidos e utilizados atualmente são o etanol, produzido no Brasil a partir da cana-de-açúcar e, em outros países, como os Estados Unidos, a partir do milho; e o biodiesel, obtido a partir de óleos vegetais, residuais (como de frituras) e gorduras animais (FOGAÇA, 2021). O etanol e o biodiesel são combustíveis comerciais renováveis candidatos à substituição por fontes fósseis, especialmente em motores a diesel, que são geralmente mais eficientes do que os motores de ignição por centelha. Misturas ternárias de diesel, biodiesel e etanol formam estratégias de substituição parcial do diesel aplicáveis aos motores a diesel sem a necessidade de grandes adaptações (KULANTHAIVEL et al., 2021).

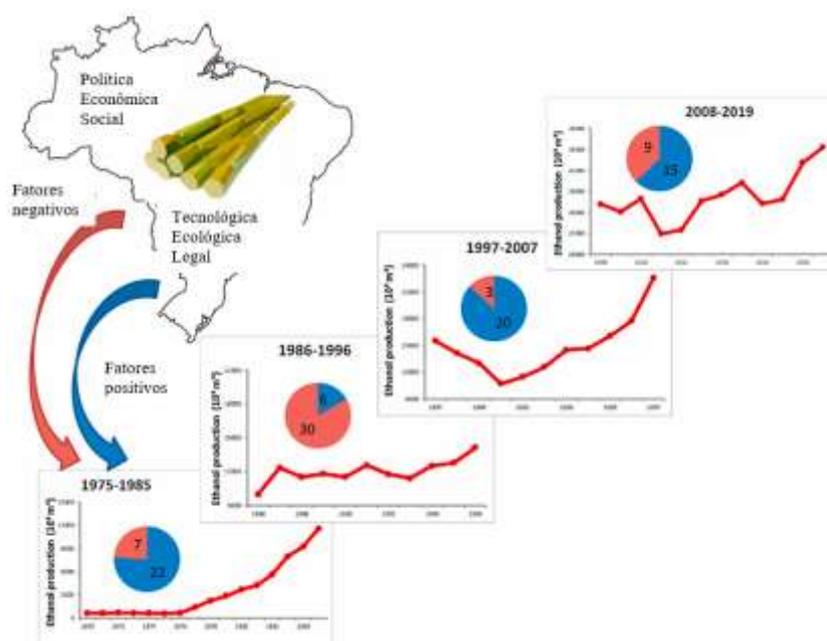
O Proálcool (Programa Nacional do Álcool) consistiu em uma iniciativa do governo brasileiro de intensificar a produção de álcool combustível (etanol) para substituir a gasolina. Essa atitude teve como fator determinante a crise mundial do petróleo, durante a década de 1970, pois o preço do produto estava muito elevado e passou a ter grande peso nas importações do país. Nesse sentido, em 1975, foi criado o Proálcool, sendo oferecidos vários incentivos fiscais e empréstimos bancários com juros abaixo da taxa de mercado para os produtores de cana-de-açúcar e para as indústrias automobilísticas que desenvolvessem carros movidos a álcool. Na primeira década do Proálcool, os resultados foram positivos, visto que os consumidores priorizavam os automóveis movidos a álcool e, em 1983, as vendas desses veículos dominaram o mercado brasileiro. Em 1991, aproximadamente 60% dos carros do país (cerca de 6 milhões) eram movidos por essa fonte energética. Porém, apesar de substituir parcialmente o petróleo, o Programa Nacional do Álcool promoveu uma série de problemas: elevação da dívida pública em consequência dos benefícios concedidos; aumento dos latifúndios monocultores de cana-de-açúcar; elevação dos preços de alguns gêneros alimentícios (pois ocorreu a redução do cultivo de alimentos em substituição à cana-de-açúcar), entre outros. Para agravar ainda mais, durante a década de 1990, houve a redução do preço do barril de petróleo. Esse fato fez com que a diferença entre a gasolina e o álcool diminuísse. Os usineiros passaram a destinar a produção de açúcar para o mercado internacional, pois o mercado interno tornou-se menos lucrativo. Todos esses aspectos contribuíram para que os consumidores e fabricantes de veículos voltassem a priorizar automóveis movidos à gasolina. Contudo, em 2003, uma nova crise do petróleo

impulsionou a fabricação de novos carros a álcool. Dessa vez, entretanto, as indústrias automobilísticas inovaram e desenvolveram motores *flex*, que permitem aos consumidores a opção de uso tanto do álcool quanto da gasolina. O álcool combustível possui vantagens como alto índice de octonas, libera grande quantidade de energia ao ser queimado e tem preço acessível (CERQUEIRA, 2021).

#### 2.4.1 Etanol

O Brasil é pioneiro na produção e consumo em larga escala de etanol combustível. Durante seus mais de 40 anos de história, a indústria do etanol enfrentou crises e críticas. Também tem contribuído para a redução da emissão de poluentes e para a melhoria da economia do país. As organizações produtivas e as condições naturais envolvidas com a plantação de cana-de-açúcar não foram as únicas responsáveis pelo desenvolvimento do mercado de etanol, pois existem ambientes organizacionais e diversos fatores que podem ter desempenhado um papel significativo de forma integrada e dinâmica, como por exemplo, os fatores políticos e econômicos, os fatores tecnológicos e, os fatores sociais e ambientais. Estes macroambientes exerceram uma grande influência no desenvolvimento do etanol brasileiro entre 1975 e 2019. Durante este período, estes fatores macro ambientais foram positivos e negativos, como ilustrado na Figura 7, mas exerceram presença essencial e quase equilibrada (CASTAÑEDA-AYARZA e GODOI, 2021).

**Figura 7.** Influência positiva e negativa macroambientais para o etanol brasileiro (197-2019).



**Fonte.** Adaptada de Castañeda-Ayarza e Godoi, 2021.

Na primeira e na terceira décadas, o macroambiente exerceu uma influência positiva mais significativa, enquanto na segunda década, os fatores negativos retrataram o ambiente mais adverso para o etanol brasileiro. Os fatores políticos e econômicos mantiveram relevância, enquanto os tecnológicos se destacaram positivamente nos períodos mais desafiadores do setor. Na atualidade, os fatores sociais e ambientais têm assumido um papel preponderante, sobretudo tendo em conta o futuro do setor (CASTAÑEDA-AYARZA e GODOI, 2021).

Em meio à crise do petróleo mundial, o etanol foi a alternativa econômica encontrada como combustível. O Proálcool foi o principal programa de incentivo à produção de etanol no país. Atualmente, o país produz aproximadamente dez bilhões de litros por ano. A produção de cana-de-açúcar no país cresceu muito e a instalação de usinas sucroalcooleiras deu um salto quantitativo enorme. Os estados que mais produzem cana-de-açúcar no país são, respectivamente, São Paulo, Paraná, Minas Gerais, Goiás e Mato Grosso do Sul. Existem, aproximadamente, 400 usinas instaladas no país. É importante salientar que nos últimos dez anos a quantidade de carros *flex* fabricados no país saiu de zero para quase três milhões. Hoje, representam pouco mais de 90% carros fabricados no país (ALMEIDA, 2021).

Produzido através da fermentação de amido e de outros açúcares, em especial da cana-de-açúcar, o etanol, também chamado de álcool etílico, é um biocombustível altamente inflamável e incolor, sendo muito utilizado em automóveis porque não produz dióxido de enxofre quando é queimado, ao contrário da gasolina que polui a atmosfera. A tecnologia adotada para produzir o etanol é bastante consolidada e é relativamente madura, ela envolve a fermentação de açúcares, como sacarose e glicose, que por sua vez são provenientes da cana, em grande parte pela levedura *Saccharomyces cerevisiae*. Assim, o processo de produção consiste em fermentar a cana de açúcar pela ação de bactérias e fungos. A produção de etanol segue procedimentos como moagem da matéria-prima, produção e fermentação de melão, e finalmente destilação do mosto fermentado, sendo que em relação a este último passo, o mosto que é o produto, passa por processo de destilação fracionada, a qual origina uma solução cuja composição deve ser formada por 96% GL (Gay-Lussac) de etanol (teor alcoólico) e 4% de água (CERQUEIRA, 2021; SOUZA, 2021).

De acordo com Castro (2013) e Barbosa e Vaz (2012) a fermentação alcohólica realizada por intermédio do microrganismo (*Saccharomyces cerevisiae*), a qual transforma os açúcares em etanol e gás carbônico, formando o vinho, que após separação

das leveduras, segue para o processo de destilação, resulta em flegma e vinhaça. O *flegma*, com graduação alcoólica de 45 a 50° GL, é usado na produção de álcool hidratado, o qual possui uma concentração de 97%, podendo ainda ser desidratado para produção de álcool anidro com 99,7° GL.

Essa substância é renovável, pois sua matéria-prima é obtida através de plantas cultivadas pelo homem, como milho, beterraba, mandioca, batata e até a madeira, sendo por isto o álcool uma alternativa ao petróleo, por ser um combustível ecologicamente correto devido não afetar a camada de ozônio. Um dos grandes desafios das usinas é reduzir a quantidade dos subprodutos (bagaço e vinhaça) gerados durante a fabricação de etanol. Algumas destilarias utilizam o bagaço como combustível durante o processo produtivo. Outra alternativa eficaz é realizar a fermentação contínua, reduzindo a quantidade de vinhaça em até 75%. Numa tentativa de reduzir a utilização do petróleo, o etanol surge como uma alternativa eficiente, limpa (emite menos gases poluentes) e mais barata. Porém, seu uso sem o devido planejamento pode gerar uma série de transtornos socioeconômicos como aumentos dos latifúndios monocultores de cana-de-açúcar, elevação dos valores de alguns gêneros alimentícios, esgotamento do solo, erosão (CERQUEIRA, 2021).

O etanol anidro é um dos biocombustíveis produzidos hoje e é um subconjunto da energia renovável. É considerado um excelente combustível alternativo de queima limpa à gasolina. O etanol anidro é produzido comercialmente por hidratação catalítica de etileno ou fermentação de biomassa. Qualquer material biológico que contenha açúcar, amido ou celulose pode ser utilizado como biomassa para a produção de etanol anidro. Uma vez que a solução etanol-água forma um azeótropo com ebulição mínima de composição de 89,4 mol% de etanol e 10,6 mols% de água a 78,2 °C e pressão atmosférica padrão, as soluções diluídas de etanol-água produzidas pelo processo de fermentação podem ser retificadas continuamente para dar o melhor soluções contendo 89,4 mol% de etanol à pressão atmosférica padrão. Portanto, um processo especial para a remoção da água remanescente é necessário para a fabricação do etanol anidro. Vários processos para a produção de etanol anidro têm sido usados/sugeridos. Estes incluem: (i) processo de desidratação química, (ii) desidratação por processo de destilação a vácuo, (iii) processo de destilação azeotrópica, (iv) processos de destilação extrativa, (v) processos de membrana, (vi) processos de adsorção e (vii) destilação por difusão processar. Esses processos de fabricação do etanol anidro têm sido aprimorados continuamente devido aos

requisitos cada vez mais rígidos de quantidade e qualidade desse produto (KUMAR, SINGH e PRASAD, 2010).

A ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) mediante o Regulamento Técnico ANP nº 3/2011, anexo da Resolução ANP nº 7 de 9 de fevereiro de 2011, regulamenta as características de qualidade do álcool hidratado e do álcool anidro produzidos nas destilarias. Além da ANP, o Inmetro desenvolve pesquisas com álcool anidro e hidratado, onde são levados em conta os aspectos normativos referentes à produção, ao transporte e à comercialização do álcool combustível. O etanol hidratado possui diferentes especificações dependendo da destinação pretendida, sendo que a sua utilização comercial passa pelos seguimentos da indústria alimentícia, farmacêutica, de cosméticos, entre outras, no entanto, como já mencionado, sua aplicação majoritária é como combustível automobilístico. Em relação ao etanol anidro, tem-se como característica marcante a quantidade reduzida de água em sua composição, isto porque sofre um processo de desidratação durante a sua fabricação por meio de separação de misturas azeotrópicas, tornando-o propício a ser utilizado junto à gasolina, favorecendo o aumento da octanagem e diminuição da emissão de gases agravantes do efeito estufa.

Ou seja, para produzir álcool anidro, o álcool hidratado passa por uma desidratação que pode ocorrer através da destilação azeotrópica, onde ciclohexano é adicionado no topo, resultando no álcool anidro no fundo, com 99,7° GL. O ciclohexano que é rico em água é posteriormente enviado para uma coluna de recuperação e é reciclado ao processo. Porém, algumas desvantagens no processo como a contaminação do etanol pelo desidratante e o alto consumo de vapor tornou a desidratação alvo de muitos estudos, os quais resultaram em métodos alternativos, como a destilação extrativa com monoetileno glicol (MEG) e as peneiras moleculares que usam zeólitas (MATUGI, 2013).

Críticas têm sido levantadas sobre os rendimentos líquidos de energia e a diminuição de GEE dos processos convencionais de produção do etanol de milho (FARRELL et al., 2006). Já os processos de etanol de cana-de-açúcar são considerados de fato renováveis e sustentáveis, uma vez que o bagaço da cana é capaz de suprir toda a energia necessária para a fase industrial da produção do etanol, embora existam questões relacionadas às queimas praticadas no canavial durante a etapa de colheita. Entretanto, a situação do etanol de milho nos Estados Unidos, é um pouco diferente, uma vez que a produção do etanol apresenta uma alta demanda de energia proveniente de fontes fósseis. Estudos indicaram que as tecnologias de etanol de milho atuais são menos intensivas no

uso de petróleo do que a gasolina, mas usam muito mais carvão e gás natural, possuindo assim emissões de GEE semelhantes às da gasolina (FARRELL et al., 2006).

Um outro fator crítico está relacionado a produção de biocombustíveis de primeira geração, visto que compete diretamente com a produção de alimentos ao utilizar matérias-primas nobres e de uso alimentar e, muito embora isto não desloque alimentos para uso energético, deslocam a produção de alimentos ao ocupar terras férteis, as quais poderiam ser destinadas para o cultivo. No Brasil, a incorporação de novas áreas à agricultura de energia tem ocorrido sem competição com a agricultura de alimentos. Existe grande disponibilidade de terras com pastagens degradadas, nas quais a inserção da cana-de-açúcar é capaz de beneficiar também o pecuarista, que pode ter aumento na rentabilidade de sua propriedade rural e, ainda, melhorar a condição de fertilidade do solo (GOLDEMBERG et al., 2004).

Todavia, no contexto norte-americano, o aumento do uso de milho para os biocombustíveis implica em preços mais elevados para os usuários do milho, incluindo a pecuária e setores de exportação. Neste contexto, cada vez mais o mundo se volta para a exploração de biomassas residuais. O aproveitamento de resíduos provenientes da agroindústria pode ajudar a resolver problemas ambientais associados à disposição dos mesmos no meio ambiente. O desenvolvimento de processos biotecnológicos que aproveitem estes resíduos aparece com grande potencial devido à possibilidade de agregar valor a uma matéria-prima subutilizada. Adicionalmente, a sua utilização pode ocorrer sem que haja competição com a produção de alimentos. O uso desses insumos, que possuem baixo custo, pode ainda impactar positivamente a economicidade dos processos de produção de etanol. No caso dos Estados Unidos, por exemplo, os custos com o milho, principal matéria-prima, equivalem a cerca de 60% do total dos custos operacionais das plantas industriais (PIMENTEL e PATZEK, 2005; PERKIS, TYNER e DALE, 2008).

Não existem dúvidas quanto aos biocombustíveis serem renováveis, tendo em vista que sua matéria-prima pode ser replantada e pelo fato de possuírem potencial de redução das emissões de GEE. Além disso, podem fornecer segurança energética, reduzindo a dependência de petróleo estrangeiro, e ajudar o desenvolvimento em áreas rurais. Entretanto, estes efeitos benéficos dependem do tipo de biocombustível a ser produzido, da forma de condução do processo e da fonte de carboidrato a ser utilizada (TAYLOR et al., 2009). Os materiais de biomassa que têm sido usados para geração de energia nesses projetos incluem casca de arroz, caule de algodão, caule de mostarda,

*prosopis juliflora (vilayati babul)*, cama de frango, bagaço, palha de cana, entre outros (ABBASI e ABBASI, 2010).

Todo esse contexto vem impulsionado além do desenvolvimento de inovações na cadeia de produção, um crescimento exponencial na busca por diferentes matérias-primas que sejam viáveis, ideais e que por sua vez possuam disponibilidade, preço, qualidade em relação ao processo de conversão e sustentabilidade ambiental. Em face disso, estudar a viabilidade de novas matérias-primas alternativas e promissoras como fonte de etanol, encontra grande importância na atualidade. Dentre estas, as vagens da algarobeira desponta como um alvo potencial.

#### *2.4.1.1 Algarobeira como fonte para Biocombustível*

O crescimento da população, o aumento da taxa de consumo de energia per capita e o aumento dos níveis atmosféricos de CO<sub>2</sub> definem o cenário para os atuais desafios globais de energia. Na atualidade tem sido abordado o objetivo de fornecer um contexto para melhor avaliar as inter-relações entre os recursos energéticos do planeta, o crescimento populacional e a evolução da taxa de utilização de energia, sendo que as tendências do CO<sub>2</sub> atmosférico, indica a necessidade urgente de desenvolver soluções de energia renovável e, as forças econômicas e de mercado que afetam as taxas de adoção de tecnologias energéticas devem ser consideradas (ROSA e ORDÓÑEZ, 2022a).

Dentro desta abordagem, diz-se que as necessidades e desejos da população humana neste planeta influenciam a forma como as florestas e os recursos naturais são administrados. Embora a história mostre que os produtos específicos de que os humanos precisam mudam com o tempo, uma floresta saudável tem a capacidade de fornecer uma ampla variedade de produtos derivados de madeira e não derivados de madeira. A sociedade está explorando métodos para usar madeira, resíduos de madeira, gramíneas e resíduos agrícolas como matéria-prima para a produção de bioetanol, bio-óleo e outros combustíveis líquidos. Alguns segmentos da sociedade também veem as florestas e os recursos naturais como ferramentas para desenvolver e revitalizar as economias rurais (GREBNER et al., 2022).

Por exemplo, no segmento industrial, trabalhos inteiros são dedicados a orientar como a interação das vantagens comparativas relacionadas aos negócios e ao meio ambiente de uma empresa prediz o desempenho ambiental em termos de retorno sobre os recursos naturais, oferecendo às empresas orientação estratégica sobre como desenvolver

uma combinação pertinente de medidas orientadas para os negócios e ambientais para melhorar o uso dos recursos ambientais (FIGGE e HAHN, 2020).

Conforme Zobot et al. (2021) a obtenção de uma ampla gama de bioprodutos e biocombustíveis a partir de recursos renováveis é um tópico na vanguarda da inovação para uma nova bioeconomia. Para acompanhar a evolução da sociedade, os investidores têm investido em tecnologias modernas, verdes e promissoras para a obtenção de bioprodutos. De acordo com Srivastava et al. (2021) resíduos de matéria orgânica de origem vegetal ou outras fontes agrícolas, biopolímeros ou matérias orgânicas complexas (celulose, hemiceluloses, amidos ou proteínas não consumíveis) podem ser usados como recursos de carbono bruto baratos para produzir biocombustíveis para atender às demandas cada vez maiores de energia. Estes autores citam exemplos representativos de fontes de biomassas usadas para produção de bioenergia e discutem a produção de bioenergia a partir de matéria orgânica de base vegetal, além disso, destacam os biocombustíveis avançados, os quais podem ser oriundos de matéria orgânica com processos microbianos e químicos eficientes para a promoção da produção de biocombustíveis a partir da utilização de biomassas vegetais.

Por exemplo, Rosa e Ordóñez (2022b) apresentaram alguns dos caminhos usados para transformar biomassa em diferentes tipos de combustível, familiarizando um pouco da química orgânica por trás das conversões que são importantes para fins energéticos e apresentando uma visão simplificada do processo de fotossíntese do ponto de vista da engenharia.

Godbey (2022) se dedicou em apresentar a fermentação e as propriedades que a definem, bem como o potencial da celulose como uma fonte de glicose a montante, relatando as vias de glicólise de Embden-Meyerhoff e Entner-Doudoroff para mostrar duas maneiras principais pelas quais as células podem obter um estoque de açúcar, como a glicose, sendo o etanol o principal produto da fermentação, que é produzido tanto para cerveja quanto para biocombustíveis.

Soto et al. (2021) estudaram o diesel-farnesano e o biodiesel, mostrando a obtenção de ambos os biocombustíveis a partir da cana-de-açúcar por meio de biologia sintética que requer fermentação. Estes autores relataram que o diesel-farnesano apresentou as menores emissões específicas de material particulado e que as emissões de óxidos de nitrogênio (NOx), específicas do óleo diesel, ficaram acima do limite padrão, enquanto o biodiesel de cana-de-açúcar produziu as menores emissões.

Com relação ao etanol no contexto dos biocombustíveis para transportes, Mohammed et al. (2021) relataram que os efeitos negativos do uso de combustíveis tradicionais para motores sobre as mudanças climáticas e o alerta global produziram um cenário de alta competição para encontrar um combustível alternativo mais amigável ao meio ambiente. O álcool combustível foi considerado muito prático para ser misturado com o combustível (gasolina) projetado para o motor, pois a potência, o consumo específico de combustível do freio e a eficiência térmica melhoram com o aumento da concentração de etanol. Além disso, a adição de etanol reduz os gases de escape prejudiciais, e outros parâmetros são aprimorados com a adição de etanol ao combustível do motor.

Porém, conforme circular produzido pela Embrapa, outro fator que tem aumentado a discussão sobre a produção e uso de biocombustíveis é como isso pode afetar a produção e o preço dos alimentos. Afinal de contas, no Brasil, a principal matéria-prima usada na produção do etanol é a cana-de-açúcar, usada também na produção de açúcar e materiais amiláceos. Nos Estados Unidos, usa-se o milho para produzir o etanol, que é muito usado para produzir cereais matinais e rações para aves. É certo que a produção do etanol afetou o preço desses materiais e dos custos de produtos bovinos e suínos, já que o milho é usado nas suas rações também. Entre as possíveis soluções para esse problema estão a segunda e a terceira geração da produção do bioetanol, que se trata, respectivamente, do uso de celulose das plantas e do uso das algas. A celulose das plantas envolve o uso de biomassa não usada na alimentação, tais como os restos do processamento de alimentos, como troncos, folhas e palhas - no caso da cana-de-açúcar, usa-se o bagaço, além de vegetais que não são consumidos, como a grama e pequenos arbustos. Já as algas vêm se mostrando eficazes também porque além de não serem usadas como alimentos, elas representam um rendimento muito alto em relação às culturas da cana-de-açúcar e do milho. O Brasil também apresenta uma grande vantagem quanto a isso, pois é agraciado com uma grande extensão de terras agricultáveis, tem variações de solo e clima, além de grande diversidade de espécies de plantas para cada região. Isso permite a exploração de outras culturas que não afetem a alimentação (JARDINE e BARROS, 2021).

Entretanto, é importante ressaltar que o aumento no preço dos alimentos e a baixa produção deles não têm como único vilão os biocombustíveis, é preciso se levar em conta outros fatores. Entre eles estão os subsídios agrícolas importados dos Estados Unidos e da União Europeia, tendo em vista que eles impedem que produtores de países emergentes

consigam competir em pé de igualdade com eles. Para resolver essa questão seria necessário que países ricos eliminassem as barreiras e os subsídios que sufocam a produção nos países emergentes. Para evitar também essas possíveis crises alimentares, os programas de produção de biocombustíveis devem estabelecer regras eficazes. Como aconteceu no caso do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel no Brasil, que incentivou a agricultura familiar e exigiu que os produtores de matéria-prima para a produção de biocombustíveis também tivessem uma área de cultivo desses vegetais destinada para a produção de alimentos. Também é necessário investimento em técnicas que aumentem a produção de alimentos e combatam fatores climáticos, como as secas, que diminuem a produção de alimentos e aumentam seus preços (JARDINE e BARROS, 2021).

O Brasil é um dos maiores produtores mundiais de etanol proveniente da cana-de-açúcar. Devido às grandes áreas necessárias para a produção da cana, pesquisadores estão buscando novas fontes energéticas para a produção de etanol. O etanol proveniente da cana-de-açúcar constitui o principal componente da matriz brasileira de biocombustíveis, mas existem estudos sendo conduzidos pela Embrapa e outras instituições de pesquisa no país e no exterior, sobre fontes alternativas para obtenção do etanol, como o etanol amido e a celulose proveniente de resíduos agrícolas e do bagaço e palha da cana-de-açúcar, que aumentarão a sustentabilidade e consolidarão o programa de energia renovável brasileiro (JARDINE e BARROS, 2021).

Outra fonte promissora é a algarobeira, e estudos como o de Burkart (1952) salientam isto mostrando que a polpa doce de algaroba contém 62,7%, e representa 74% do peso do fruto; assim, 100 Kg de fruto contêm 46,4 Kg de açúcar que, teoricamente, dão 27,2 litros de álcool absoluto; desta forma, vê-se que o rendimento de álcool que se pode obter, é elevado. Este autor enfatiza que a elaboração do álcool etílico por meio da fermentação e destilação do extrato açucarado da algaroba, é uma alternativa importante que se deve levar em conta, tendo em vista o baixo custo da matéria-prima e a sua impressionante riqueza em monossacarídeos diretamente fermentescíveis.

Gupta, Sharma e Kuhad (2009) relataram que a *Prosopis juliflora* (Mesquite) é uma matéria-prima para a produção sustentável de etanol celulósico a longo prazo. Estes autores utilizaram o pré-tratamento ácido, a deslignificação e a hidrólise enzimática para avaliar o pré-tratamento para produzir mais açúcar, a ser fermentado em etanol. A fermentação de hidrolisados ácidos e enzimáticos, contendo 18,24 g/L e 37,47 g/L de

açúcares, com *Pichia stipitis* e *Saccharomyces cerevisiae* produziu 7,13 g/L e 18,52 g/L de etanol com rendimentos correspondentes de 0,39 g/g e 0,49 g/g, respectivamente.

Nota-se, há necessidade de otimização de processos para maximização da conversão de novas fontes lignocelulósicas como a algaroba para a produção de etanol, inclusive usando o substrato mais barato como o melão e outros materiais diretamente fermentáveis. A fim de aumentar a competitividade da produção de bioetanol a partir destas matérias-primas, a algarobeira é uma alternativa valiosa que pode viabilizar projetos.

Os seus frutos são importantes fontes nutrientes, dentre os quais, se destaca o elevado teor de açúcares fermentescíveis. Estes açúcares, quando associados a outros nutrientes da sua composição, potencializam as reações de transformações bioquímicas e favorecem o processo de fermentação para obtenção do etanol com elevado rendimento. Milhares de toneladas de vagens da algarobeira são desperdiçadas no campo ou subaproveitadas por comunidades rurais, que desconhecem as suas propriedades mais nobres, e a utiliza basicamente para alimentação de animais. De acordo com Silva (2009) e Rocha (2019) a algarobeira é uma leguminosa do gênero *Prosopis*, originárias de regiões áridas e semiáridas do planeta, apresenta como principal característica o seu aproveitamento integral desde as raízes até as folhas.

No meio científico, praticamente ainda não são encontrados trabalhos envolvendo o tema etanol oriundo da algarobeira, indicando que há muito o que se explorar quando levado em consideração a riqueza em monossacarídeos diretamente fermentescíveis desta planta leguminosa. Tanto é que, de acordo com pesquisa realizada no banco de dados internacional *sciencedirect*, usando as palavras-chaves associadas “*mesquite and ethanol*”, a busca não origina nenhum trabalho encontrado. Por outro lado, quando da utilização destas mesmas palavras-chaves em conjunto, *mesquite and etanol* ou *mesquite etanol*, na busca são encontradas, desde 1998 até o presente momento de 2022, um número razoavelmente baixo de publicações, apenas 978 trabalhos, valendo destacar que nestes, em análise panorâmica, não há ligação direta entre estas duas palavras-chaves usadas.

Ademais, quando usado as palavras-chaves associadas “*mesquite alcohol*”, não existem resultados encontrados até o momento. E, para as palavras-chaves *mesquite and alcohol* ou *mesquite alcohol*, são encontradas apenas 668 publicações difundidas de 1998 até o presente momento de 2022, sendo também importante destacar, de forma geral, que dentre estes, não há ligação direta entre as duas palavras-chaves usadas.

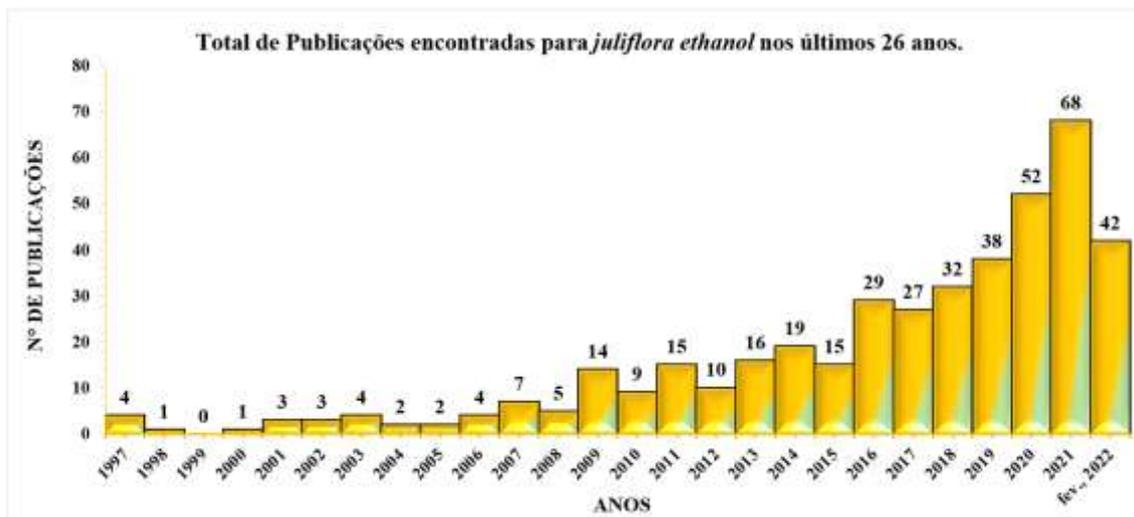
Quando usado na busca o termo mais específico, “*Juliflora and ethanol*”, de forma associada, encontra-se apenas 1 artigo, no entanto, sem ligação direta (no sentido do tema deste presente trabalho de mestrado) entre estas palavras. No entanto, quando usado as palavras-chaves conjuntas, *Juliflora and ethanol* ou *Juliflora ethanol*, são encontrados 455 resultados no total de publicações, as quais contemplam os últimos 26 anos (1997 até o presente momento de 2022). E, para *Juliflora alcohol*, a busca ocorre em 416 resultados. Ressalta-se que, dentre estes artigos, pode ser verificada a produção de etanol em sua forma hidratada (Gupta, Sharma e Kuhad, 2009; Naseeruddin, Desai e Rao, 2017), entretanto, os autores utilizaram métodos não benéficos ao meio ambiente, como pré-tratamentos ácidos.

Finalmente, quando usado o termo associado “*Prosopis Juliflora and ethanol*”, não existem resultados encontrados até o momento. Outrossim, quando usado as palavras-chaves conjuntas, *Prosopis Juliflora and ethanol* ou *Prosopis Juliflora ethanol*, foi encontrado um total de apenas 420 publicações nos últimos 26 anos, contemplando os anos de 1997 ao presente momento de 2022. Além disso, para a busca usando as palavras-chaves conjuntas, *Prosopis Juliflora alcohol*, o total de publicações difundidas caiu para 384 resultados. E ainda, não ocorreu nenhum resultado quando foi usado o termo associado “*Prosopis Juliflora alcohol*”. De forma geral, diz-se então que, a circulação de trabalhos envolvendo a algarobeira na aplicação para produção de etanol, ainda está em estágio pouco avançado, sendo isto uma lacuna importante a ser preenchida.

Assim, levando em consideração a espécie em caso (*Juliflora*), como também as palavras-chaves que ocorreu no maior número de resultados encontrados durante as buscas praticadas (*Juliflora ethanol*), foi esquematizado graficamente na Figura 8 o total de publicações por cada ano.

Observa-se que ainda são pouco difundidas as pesquisas envolvendo, de forma direta ou indireta, a espécie *Juliflora* e o etanol. Entretanto, pode ser observado também entre os anos de 2017 a 2021, a ocorrência de um discreto aumento, o qual se evidenciou de forma crescente e quase uniforme, no número de publicações difundidas. Por outro lado, se considerado o ano de 1997 (a partir do qual a plataforma de busca mostra os 4 primeiros resultados que envolvem o tema), tem-se que houve um aumento de 94,12% até fechado o ano de 2021. Além disso, o ano de 2022 sinaliza um possível aumento das ocorrências de trabalhos envolvidos, apresentando 42 publicações, passados apenas 2 meses do corrente ano.

**Figura 8.** Total de publicações encontradas para a busca *juliflora ethanol* por cada ano no período desde 1997 até fevereiro de 2022.



Fonte. Autor, 2022.

De acordo com Rangel (1999) o interesse pelo cultivo de plantas chamadas de “uso múltiplo” tem crescido bastante. A variedade de produtos que podem ser obtidos e o número de usos que tais plantas podem oferecer as coloca como prioridades no desenvolvimento de áreas rurais. Portanto, vários estudos como os de Sivarathnakumar et al. (2019) e Naseeruddin, Desai e Rao (2017) comprovam a potencial viabilidade de obtenção do etanol a partir dos açúcares extraídos da algaroba.

Em relação as tecnologias, cita-se Kantibhai (2010) com a produção de bioetanol a partir do açúcar contido na vagem da algaroba, sendo esta uma patente depositada. O processo protegido consiste na preparação de uma pasta, a qual é inoculado com um microrganismo adequado, iniciando um processo fermentativo a uma temperatura entre 26 a 30°C e pH entre 4 a 6,5. O bioetanol resultante é purificado e utilizado como combustíveis em automóveis, etanol industrial e também para adição em bebidas.

Outrossim, saindo agora da escala acadêmica e científica, e adentrando em áreas tecnológicas, reporta-se os autores Alves, Santos e Silva (2019) quando realizaram o estudo do monitoramento das aplicações tecnológicas da *Prosopis Juliflora* (Algaroba), os quais objetivaram o levantamento de suas principais características tecnológicas. Estes autores relataram que a planta apresenta uma aplicabilidade bastante elevada resultando em produtos diversificados como biocombustíveis e alimentos, no entanto, concluíram como resultado de uma busca em 43 patentes, as quais foram analisados sobre os aspectos quantitativos, cronológicos, países depositantes e instituições detentoras, após uma filtragem destas, foram selecionadas apenas 2 (duas) patentes de interesse, sendo que

estas abordando tecnologias sobre a produção de etanol (KANTIBHAI, 2010) e aguardente (SILVA, 2004). O monitoramento apontou que são poucas as tecnologias protegidas nos últimos 20 anos sobre o tema, e, quando se trata das tecnologias de interesse, apenas 2 (duas) patentes foram encontradas. Ademais, vale ressaltar que, estas patentes tratam de etanol hidratado, ou seja, na forma não anidra.

A principal forma de extração de etanol brasileiro é por meio do processo fermentativo da cana-de-açúcar. Um decreto foi criado determinando a mistura de álcool anidro à gasolina, sendo a fração de etanol anidro regido por órgãos competentes. Conforme o Art. 3º da Resolução Nº 807, de 23 de janeiro de 2020, as gasolinas automotivas classificam-se em:

I - Gasolina A comum: combustível produzido a partir de processos utilizados nas refinarias, nas centrais de matérias-primas petroquímicas e nos formuladores, destinado aos veículos automotivos dotados de motores de ignição por centelha, isento de componentes oxigenados;

II - Gasolina A *premium*: combustível de elevada octanagem, produzido a partir de processos utilizados nas refinarias, nas centrais de matérias-primas petroquímicas e nos formuladores, destinado aos veículos automotivos dotados de motores de ignição por centelha cujo projeto exija uma gasolina com maior octanagem, isento de componentes oxigenados;

III - Gasolina C comum: combustível obtido a partir da mistura de gasolina A comum e de etanol anidro combustível, nas proporções definidas pela legislação em vigor;

IV - Gasolina C *premium*: combustível obtido a partir da mistura de gasolina A *premium* e de etanol anidro combustível, nas proporções definidas pela legislação em vigor.

Em conformidade com o Art. 4º da mesma Resolução, somente os distribuidores de combustíveis líquidos poderão realizar a adição de etanol anidro combustível à gasolina A para formulação da gasolina C. Um parágrafo único discorre que o etanol anidro combustível a ser adicionado à gasolina A deverá atender à regulamentação vigente da ANP.

Assim, dentro de toda esta abordagem apresentada, que por sua vez evidencia a relevância do etanol, especialmente como combustível, como ainda em vista das demandas da necessidade de sua obtenção a partir de outras fontes alternativas, e ainda considerando que este insumo é essencial na cadeia de produção de biodiesel, o qual também é um combustível de origem renovável e já consolidado a nível mundial, é que se sustenta a proposta inovadora e principalmente inédita deste trabalho, que é a obtenção

de etanol anidro (desidratado) das vagens da algarobeira e a sua aplicação na produção de biodiesel.

As mais recentes pesquisas continuam destacando a colaboração positiva do biodiesel e do etanol ao meio ambiente. De acordo com Stančín et al. (2020) para substituir a dependência do combustível fóssil, o biodiesel tem sido pesquisado intensamente e ainda é uma área de pesquisa prioritária.

Soto et al. (2021) demonstraram que o biodiesel de cana-de-açúcar apresenta potencial significativo para redução de emissões nocivas do transporte rodoviário brasileiro. O estudo apresentou o efeito dos biocombustíveis da cana-de-açúcar, em comparação com o óleo diesel comum, no desempenho e nas emissões de um motor a diesel moderno de médio porte, seguindo o procedimento de teste *European Steady Cycle* (ESC). As emissões de hidrocarbonetos totais específicos (THC) ficaram bem abaixo dos limites padrão para todos os combustíveis testados. Em relação às emissões reguladas para motores a diesel (g/h), o uso de biodiesel de cana-de-açúcar resultou em reduções de materiais particulados e NOx de 32,4% e 37,3%. Essas reduções notáveis em emissões prejudiciais apoiam a aplicação de biocombustíveis no transporte rodoviário.

Furtado (2018) reportou que o transporte rodoviário de mercadorias consome cerca de 50% de todo o combustível diesel e é responsável por 80% do aumento líquido global no uso de diesel desde 2000. As projeções apontam a atividade de frete rodoviário pelo menos dobrando até 2050, compensando ganhos de eficiência e aumentando as emissões de CO<sub>2</sub> de frete rodoviário.

No estudo de Kulanthaivel et al. (2021) foram realizadas avaliações experimentais em um motor diesel multicilíndrico, abastecido com misturas de diesel, biodiesel de algas *Chlorella Vulgaris* (até 20% no conteúdo volumétrico) e etanol anidro (até 20% no conteúdo volumétrico). Cada *blend* ternário foi composto por diferentes proporções de álcool e sempre com concentração volumétrica de 1% de aditivo estabilizador de *blend*. Os testes associaram substituições parciais de diesel por biocombustíveis com avaliações de desempenho do motor e combustão das misturas sob algumas condições de carga, regimes de rotação e instantes de injeção de combustível. A busca por instantes otimizados na injeção de combustível trouxe melhorias no desempenho do motor, permitiu conversões de energia mais vantajosas do etanol no diesel em relação à ignição por centelha, além de minimizar os efeitos do etanol em retardar o início da combustão.

Muitas políticas públicas são voltadas ao incentivo na produção de biocombustíveis, também ao desenvolvimento de variadas novas fontes de obtenção,

como o marco regulatório estabelecido pela Lei 13.576/2017, que instituiu a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), e pela Resolução ANP 758/2018, que dispõe sobre a certificação e critérios para emissão de notas negociáveis a produtores e importadores, que são a base do mecanismo de comércio estabelecido pela RenovaBio.

Diante da importância que o etanol anidro oriundo da cana-de-açúcar exerce ao longo dos anos, muitos estudos são voltados a este insumo, no entanto, em se tratando de etanol em sua forma anidra, obtido a partir de outras fontes, os estudos são inexistentes até momento na literatura especializada. Com isto, afim de estabelecer estes argumentos, foram realizadas buscas no banco de dados internacional *sciencedirect*, usando o conjunto de palavras-chaves "*juliflora*" e "*anhydrous ethanol*" e "*biodiesel*", "*prosopis juliflora*" e "*anhydrous ethanol*" e "*biodiesel*", para levantamento do número de artigos científicos, artigos de revisão, capítulos, entre outros, que demonstrassem uma margem para comparação com o etanol anidro da cana-de-açúcar e de outras matérias-primas, ou mesmo que sinalizassem algum progresso das pesquisas neste âmbito.

Como resultado destas buscas, quando usado os termos referidos em associação, foram encontradas apenas 2 publicações, as quais são dos anos de 2010 e 2011, sendo que nenhuma delas se trata do tema particular investigado. Por outro lado, quando usado os mesmos termos, porém, de forma apenas conjunta, tem-se que existem 8 publicações como resultados da busca. Entretanto, quando estas publicações foram investigadas de forma mais detalhada, observou-se que, dentre estas, o trabalho (Ramalingam et al., 2020) que se aproxima do tema presente, diz respeito a obtenção de biodiesel a partir do óleo das sementes das vagens de algaroba pirolisadas.

Quando usado de maneira associada "*mesquite*" e "*anhydrous ethanol*" e "*biodiesel*" a busca resultou em apenas 4 documentos dos anos de 2011, 2012, 2014 e 2020, sendo que nenhum deles tem ligação ao tema particular investigado. Quando usado de forma apenas conjunta, incorre em 8 documentos, sendo àquele supracitado (Ramalingam et al., 2020) o trabalho que mais se aproxima do presente tema.

Quando usado "*juliflora*" e "*dehydrated ethanol*", a busca ocorreu em apenas 1 resultado, até o presente momento de 2022, que por sua vez, sendo um trabalho que não trata do tema específico envolvido. Quando usado os termos de forma conjunta, tem-se que a busca origina um resultado contendo 105 publicações, porém, sem relação com o tema presente proposto.

Desta maneira, evidencia-se a marcante inexistência da circulação de trabalhos envolvendo especificamente a obtenção de etanol anidro da algaroba, e

consequentemente, de sua aplicação na produção de biodiesel, logo, tornando a produção do álcool anidro desta fonte, como também a sua aplicação na produção de biodiesel, inéditos e passíveis de inovação tecnológica.

O biodiesel é uma excelente fonte de bioenergia devido à sua viabilidade industrial e adaptabilidade ao motor. No entanto, o estoque de recursos de biodiesel ainda carece de flexibilidade de matéria-prima em escala comercial e depende principalmente de óleos vegetais para a produção. Isso cria um problema de destinação de recursos para a produção de biodiesel, às custas do abastecimento de alimentos. Uma alternativa é considerar as fontes de óleo não comestíveis de baixo grau, que contêm altos ácidos graxos livres, como rejeitos de refino de óleo vegetal bruto e óleo de cozinha usado (DANTAS et al., 2021; MAMTANI, SHAHBAZ e FARID, 2021).

O biodiesel é uma fonte de energia combustível composta por ésteres monoalquílicos de ácidos graxos de cadeia longa, utilizados alternativamente ao diesel fóssil, que pode ser produzido a partir de fontes biológicas renováveis, como óleos vegetais e gorduras animais. No caso dos ésteres etílicos, o biodiesel pode ser considerado totalmente bio, pois o etanol é comumente derivado de recursos renováveis, como milho nos EUA e cana-de-açúcar no Brasil, o que impulsiona a procura por outras fontes renováveis de álcool visando atender demandas futuras. Na produção de biodiesel os álcoois são essenciais, logo, o desenvolvimento de rotas alcoólicas mais limpas, mais baratas e mais sustentáveis incrementam positivamente as metodologias alternativas para a cadeia de produção deste biocombustível.

O biodiesel e o álcool estão praticamente intrinsecamente ligados quando é levado em consideração os processos da cadeia de produção do biodiesel, e isto tem sido observado em uma série de estudos ao longo dos anos. Para estabelecer uma comparação, levantou-se o número de artigos científicos, artigos de revisão, bem como de capítulos publicados, entre outros tipos de trabalhos, visando observar o perfil de publicação no assunto e o grau de interesse nos últimos anos.

Para tanto, realizou-se buscas direcionadas com os conjuntos de palavras-chaves, nas quais foram usados os termos mais genéricos como “*ethanol*” e “*biodiesel*”; e os termos mais específicos como “*dehydrated ethanol*” e “*biodiesel*”; e “*anhydrous ethanol*” e “*biodiesel*”; na base de dados internacional *sciencedirect*, sequencialmente. Os resultados mostraram um total de 24.447 publicações para o termo mais genérico usado de forma conjunta, abrangendo um período de 25 anos (1999 a 2023). Para os termos mais específicos, sendo usados de forma conjunta, as buscas resultaram em um

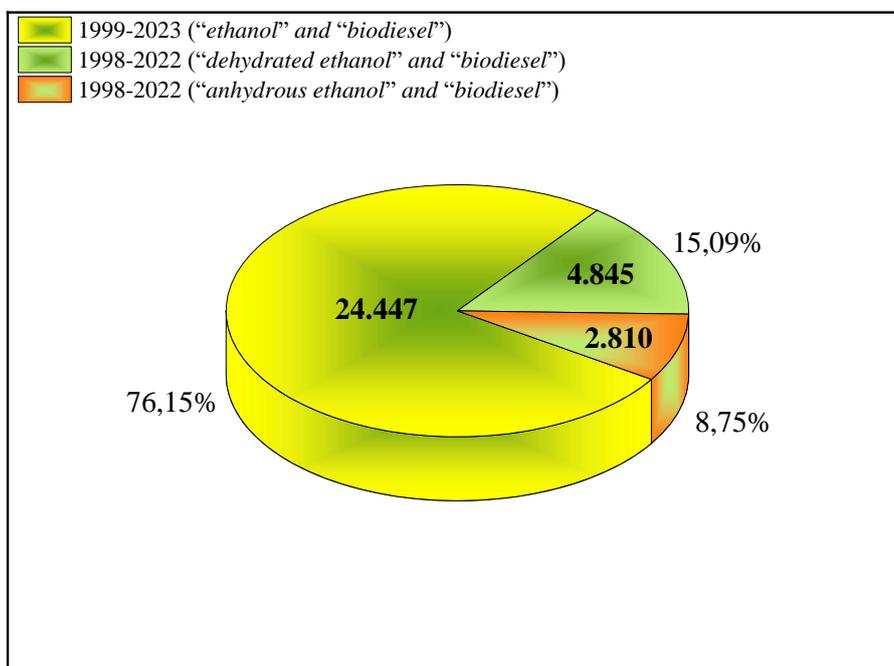
total de 4.845 e de 2.810 trabalhos, respectivamente, contemplando o período de 1988 a 2022.

Com isto, diz-se que o leque de publicações foi significativamente menor quando comparado a busca mais genérica, representando uma queda de 80,67 e 88,48% para os termos específicos *dehydrated* e *anhydrous*, respectivamente. Quando levado em consideração a totalidade das buscas, observa-se mediante a Figura 9 que, 76,15% no número de publicações incidiu para o termo genérico, e incidiram 15,09 e 8,75% para os termos mais específicos, respectivamente.

Para o termo genérico *ethanol* em conjunto com *biodiesel*, tem-se o número de publicações dividido das seguintes formas, 3.024 artigos de revisão, 13.901 artigos de pesquisa, 318 enciclopédias e 2.179 capítulos de livro. Dos artigos encontrados para o termo específico *dehydrated* em conjunto com *biodiesel*, 749 foram artigos de revisão, 2.310 artigos de pesquisa, 84 enciclopédias e 608 capítulos de livro.

E, finalmente, para o termo específico *anhydrous* em conjunto com *biodiesel*, o número de publicações foi dividido em 297 artigos de revisão, 1.765 artigos de pesquisa, 38 enciclopédias e 228 capítulos de livro.

**Figura 9.** Total de Publicações encontradas por ano no período que envolve 1998 a fev., 2022.



Fonte. Autor, 2022.

Então, de maneira geral, de acordo com os tipos de publicações encontradas, verifica-se uma maior incidência para os artigos de revisões e de pesquisas. Assim, observa-se com base no número de artigos científicos um evidente interesse pelo tema relacionado, e quando levado em consideração o número de artigos de revisões, isto configura, de certa forma, a geração de propriedade intelectual e transferência de tecnologia.

Outrossim, quando usado o termo genérico *ethanol* em conjunto com *biodiesel*, destaca-se um recente estudo divulgado sobre um álcool hidratado oriundo de matéria-prima alternativa, em que os autores Siddique et al. (2021) desenvolveram um processo de produção contínua de biodiesel sustentável a partir de biomassa totalmente não comestível em substituição ao de primeira geração de metanol derivado de fósfil e óleos comestíveis. O bioetanol hidratado obtido da biomassa lenhosa (sem a desidratação padrão que requer uma entrada significativa de energia) e ácidos graxos residuais gerados como subprodutos do refino de óleo comestível foram usados como matérias-primas. A esterificação foi realizada usando uma resina de troca catiônica porosa em conjunto com etanol com níveis de água de 0 a 15% em peso, em ambos os sistemas descontínuo e contínuo. Elevadas conversões de ácidos graxos de mais de 90% foram obtidas em ambos os sistemas otimizando o tempo de reação, mesmo com uma concentração de água no etanol de até 15% em peso. Os autores esperam que, como a resina manteve sua atividade catalítica ao longo do tempo, essa tecnologia ajude no desenvolvimento de futuros sistemas de combustível sustentável.

Cita-se também o estudo de Gabriel et al. (2019) os quais relataram pesquisas dando conta de que, infelizmente uma das limitações do biodiesel em relação aos combustíveis fósseis é a disponibilidade das principais matérias-primas. Também que, sendo o biodiesel uma mistura de ésteres monoalquílicos de ácidos graxos de cadeia longa (FAME) originada de uma matéria-prima lipídica renovável, requer que esses materiais estejam prontamente disponíveis. Movidos por estes fatos, e também por razões de que atualmente o álcool comum, conhecido por ser tóxico, é usado como matéria-prima na produção de biocombustíveis, foi proposto para o estudo a produção de bioetanol anidro a partir do vinho de palma para reagir com o óleo de palma, matéria-prima para a produção de biodiesel, via transesterificação. Nisto foi demonstrado que o álcool anidro obtido do vinho de palma é uma alternativa potencial como principal matéria-prima para a produção de biocombustíveis. O objetivo foi melhorar o álcool anidro obtido do vinho de palma com base nas condições de armazenamento. Os autores relataram que, embora

esse tipo de álcool anidro já tenha sido produzido, está demonstrado que o método atual é mais eficiente que o anterior. Os processos implementados no estudo foram o fracionamento e a destilação extrativa. Duas simulações numéricas foram realizadas utilizando processos de destilação extrativa para avaliar uma mistura de etanol e água, ou seja, etilenoglicol ou glicerídeo. Os resultados mostraram que é possível obter álcool anidro de excelente qualidade, adequado para a produção de pequenos biocombustíveis, cada vez mais procurado nas aldeias rurais da África Subsaariana, podendo isto ser percebido como uma pequena contribuição para aumentar a disponibilidade de biodiesel, pelo menos inicialmente.

Os autores Rozina et al. (2017) reportaram que o principal limite para adoção do biodiesel em escala industrial como combustível alternativo é o alto custo do seu processo de síntese com metanol bruto durante a reação de transesterificação. Usar a abordagem de biorrefinaria e matéria-prima barata (óleo de alta qualidade) é um meio eficaz de produzir biodiesel de baixo custo. Neste estudo, a *Saussurea heteromalla* que é uma nova semente não comestível com alto teor de óleo (30% em peso), foi submetida pela primeira vez à síntese integrada de biodiesel e etanol. Transesterificação e sacarificação simultânea juntamente com o processo de fermentação foram aplicadas para produzir biodiesel e etanol, respectivamente. O pré-tratamento alcalino com hidróxido de sódio (8% p/v) a 100 °C foi usado para aumentar o rendimento do etanol de 30% a 80%. Um rendimento mais alto de biodiesel de 99% foi alcançado por meio de parâmetros otimizados de razão 6:1 de álcool para óleo com 0,26% em peso de catalisador em 55 minutos a 65 °C de temperatura usando a Metodologia de Superfície de Resposta. Observou-se que  $112,2 \pm 1,6$  g de biodiesel e  $42,0 \pm 0,5$  g de etanol foram produzidos a partir de 1 kg de óleo de semente de *Saussurea heteromalla*. Além disso, as propriedades do combustível do biodiesel preparado estavam de acordo com as normas ASTM D6751 e EN 14214.

Entretanto, ressalta-se que, embora os estudos supracitados utilizem fontes alternativas de etanol (hidratado e desidratado) para produção de biodiesel, nenhuma das fontes é oriunda da algarobeira.

Logo, sendo o alto custo do processo de síntese com metanol, o principal limite para adoção do biodiesel em escala industrial como combustível alternativo, tem-se que, no viés das biorrefinarias e matérias-primas baratas (óleo e álcool alternativos de alta qualidade) isto se configura numa forma eficaz de incrementar o grau de sustentabilidade na cadeia de produção de biodiesel.

Assim, a possibilidade de aplicar o álcool (hidratado e anidro) da algaroba como adjunto para obtenção de biodiesel, pode viabilizar diversos benefícios de origens sociais, econômicos e ambientais, inclusive ajudando a nortear a limitação da forma de cultivo em lavouras controladas e sob técnicas específicas para garantir produtividade e segurança ao meio-ambiente. Sob o ponto de vista socioeconômico, a geração de emprego e renda e o desenvolvimento nos polos de produção da matéria-prima. Na área ambiental os benefícios são incalculáveis para minimizar os impactos provocados pelo uso e exploração irracional dos já escassos recursos naturais disponíveis, além de tornar a cadeia de produção de biodiesel ainda mais sustentável. Isto reflete consonância com os crescentes esforços para reduzir a emissão de gases poluentes, uma vez que a finalidade passa pela contribuição aos programas que fomentam a utilização de biocombustíveis em transportes e para a produção de energia, além da possível possibilidade de inserção de novas metodologias mais sustentáveis e novos produtos tecnológicos para este fim.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1 ETAPA 1: PRODUÇÃO DE ETANOL DA ALGAROBA

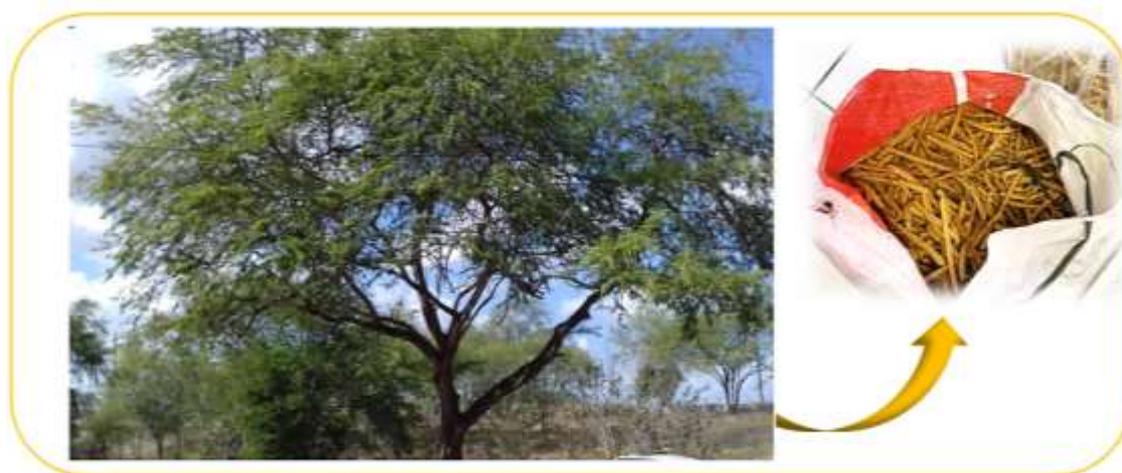
A metodologia para o pré-tratamento das vagens da algarobeira, até a fase de sua destilação em alambique, foi adaptada de Silva (2009) quando este autor produziu cachaça a partir desta fonte. Também adaptada de Filho (2020) quando este autor produziu etanol de primeira geração a partir de vagens de algaroba.

O procedimento metodológico, em relação a obtenção do álcool hidratado, foi adaptado de Gupta, Sharma e Kuhad (2009); Naseeruddin, Desai e Rao (2017) e Filho (2020), exceto quando da utilização do sistema de destilação fabricado especialmente para o fim deste presente trabalho. Assim como também os demais procedimentos que dizem respeito a obtenção do álcool anidro de vagens de algarobeira, bem como a sua aplicação na produção de biodiesel, foram realizados de forma inédita, usando esta fonte.

##### 3.1.1 Matérias-primas

As matérias-primas utilizadas foram os frutos (vagens) da algarobeira (*Prosopis juliflora*) provenientes da cidade de Caldas Brandão, no distrito do Cajá, as margens da BR 230, no Agreste Paraibano (Figura 10). As vagens da safra do ano de 2020 foram coletadas manualmente após queda natural, e em laboratório foram selecionadas, pesadas, sanitizadas, fragmentadas e prensadas para obtenção do substrato.

**Figura 10.** *Prosopis juliflora* e seus frutos do agreste paraibano.



**Fonte.** Acervo pessoal, 2021.

Na etapa de sanitização, visando a qualidade da solução hidroalcolica, as vagens foram selecionadas, sendo excluídas todas aquelas que apresentassem doença causada por

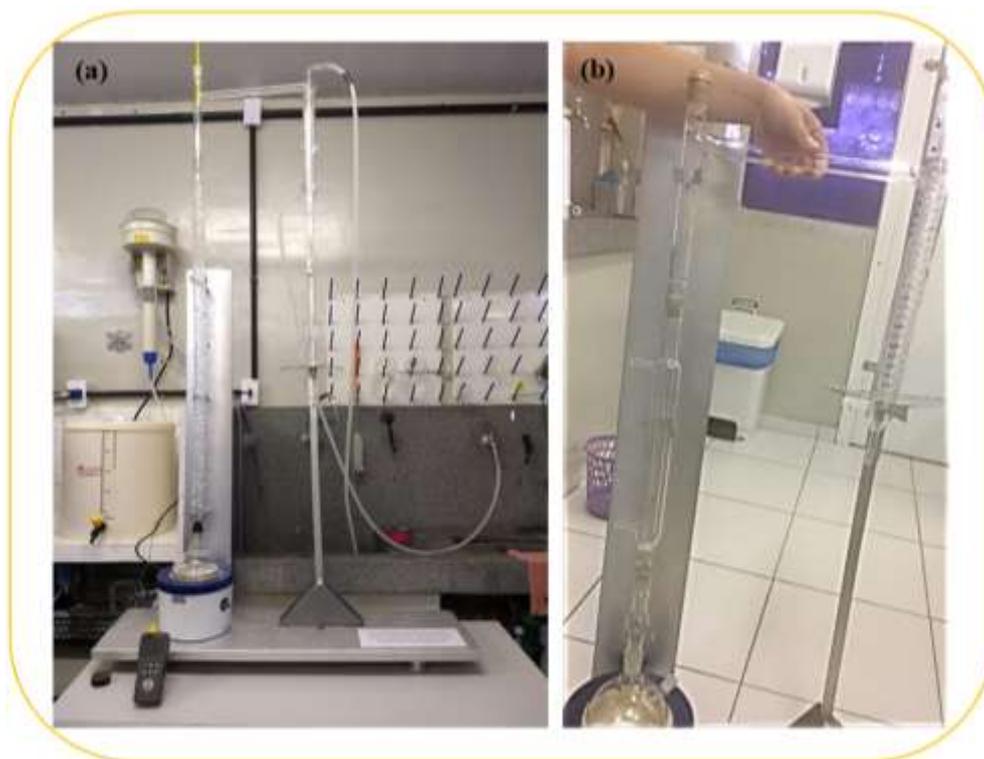
fungos, pragas ou outros problemas. Aquelas de boa qualidade foram lavadas com água e cloro, sendo usado um recipiente grande com a mistura de 200 mL de hipoclorito de sódio + 40 L de água, e secas em temperatura ambiente.

Além disso, utilizou-se a matéria-prima cana-de-açúcar como referência na finalidade de comparação dos resultados, sendo estas adquiridas de um Quiosque situado no Restaurante Universitário da UFPB, que quando em laboratório foram submetidas semelhantemente ao processo de sanitização reportado para as vagens de algarobeira.

### 3.1.1.1 Sistema de Destilação Simples e Fracionada Modificado

Com objetivo de possibilitar o processo de produção do etanol hidratado, quando levado em consideração a ineficiência de uma coluna convencional de laboratório disponível, como também de propiciar a sua desidratação, foi idealizado um projeto com dimensionamento em maior escala, sendo fabricado um sistema modificado de destilação, o qual foi composto por uma coluna de destilação simples e com capacidade de acoplamento para destilação fracionada, contendo um suporte com furos para receber recheio com zeólitas (Figura 11).

**Figura 11.** Captura fotográfica do sistema fabricado de destilação: simples (a) e fracionada (b) destinada a obtenção de álcool anidro das vagens da algarobeira usando zeólitas.



Fonte. Autor, 2021.

O sistema dimensionado foi fabricado no Laboratório de Hialotecnia (HIALOTEC) da UFPB, conforme dimensões e ajustes intencionalmente diferenciados, na finalidade especial de melhorar e progredir o método convencional comumente utilizado, oportunizando condições de favorecer a obtenção do etanol em sua forma anidra proposto neste trabalho.

O sistema foi produzido especialmente para o fim de promover condições ideais para produção de álcool hidratado atendendo ao critério regulamentado em relação ao teor alcoólico e para conseqüentemente favorecer a produção de álcool desidratado de algaroba, porém, podendo ser utilizado para uso de outras matérias-primas lignocelulósicas. A coluna simples para obter etanol hidratado foi dimensionada e fabricada com medidas de 117,0 por 6,0 cm de diâmetro, incluindo juntas, tendo o sistema capacidade de acoplamento para receber coluna fracionada e balões. A coluna fracionada, por sua vez, foi dimensionada e fabricada com medidas de 119,0 cm de comprimento e 6,5 cm de diâmetro, e ainda uma base de vidro (prato) contendo orifícios (furos) como função de suporte as zeólitas. Além disto, na coluna fracionada foi colocada uma junta de aproximadamente 20 cm, para acoplar balões de 1 L com soluções hidroalcoólicas.

### 3.1.2 Métodos

#### 3.1.2.1 *Obtenção do Etanol Hidratado*

Inicialmente, adotando a cana-de-açúcar, foram extraídos por meio de moenda 13 L de caldo, com °Brix 21, a fim de determinar a melhor graduação alcoólica, resultante do processo de fermentação, que variou de 10 a 20 °Brix.

O etanol foi obtido por meio de fermentação alcoólica do substrato extraído na etapa anterior e a condução do processo foi monitorada para controle e determinação das principais variáveis responsáveis pelo bom desempenho operacional e rendimento do processo. Em seguida, o fermentado foi destilado em um sistema composto por destilador simples e complementado por outro mais complexo e controlado, para obter o etanol hidratado.

Adotando as vagens da algarobeira, o processo consistiu em extrair o caldo das vagens em prensa manual na proporção de 1:2 (1 Kg de vagem para 2 L de água). O caldo inicial foi corrigido para °Brix 16.

#### 3.1.2.2 *Obtenção do Etanol Desidratado*

Neta etapa, foi utilizado o sistema de destilação simples com acoplamento de uma coluna fracionada com suporte para zeólitas, modificado conforme dimensões intencionalmente diferenciadas, na finalidade especial de melhorar e progredir o método anterior (3.1.2.1) já comumente utilizado, propiciando, a partir disto, condições favoráveis para obter álcool hidratado a 95,5 °GL e conseqüentemente etanol anidro, propostos neste trabalho.

O sistema de bancada idealizado em maior escala foi montado no Laboratório de Análises e Pesquisas de Bebidas Alcoólicas (LBA), local onde foi realizada a obtenção dos álcoois de cana-de-açúcar e algaroba. Também contando com o apoio logístico da Empresa EcoLimp, situada em Pilar/PB, onde ocorreu o processo de destilação em alambique. Ainda com o apoio do Laboratório Piloto de Química (LAPQ), Laboratório de Produtos Fermento-Destilados (LPFD), Laboratório de Engenharia de Alimentos (LEA), Laboratório de Materiais e Química Ambiental (LabMaQ), todos da UFPB, e o Laboratório de Síntese de Materiais Cerâmicos (LabSMaC) da UFCG, onde foi produzido o biodiesel de álcool anidro de algaroba.

### *3.1.2.3 Processo de Produção*

O processo de produção adotando as matérias-primas foi sequencialmente desenvolvido conforme os seguintes passos:

#### **I - A partir da cana-de-açúcar:**

- Aquisição;
- Seleção;
- Moagem;
- Filtração do caldo extraído;
- Preparação do mosto do caldo de cana;
- Fermentação usando fermento industrial;
- Destilação do mosto (vinhoto);
- Produto destilado (solução hidroalcoólica) no alambique (etanol hidratado);
- Produto destilado (solução hidroalcoólica) no sistema simples (etanol hidratado);
- Produto destilado (solução hidroalcoólica) no sistema fracionado (etanol anidro);
- Acondicionamento.

#### **Procedimentos Experimentais:**

1. Filtração do caldo da cana-de-açúcar

Nesta etapa preparou-se para a fermentação. O caldo de cana-de-açúcar foi filtrado em malha doméstica e armazenado em recipientes de 5 L.

## 2. Diluição

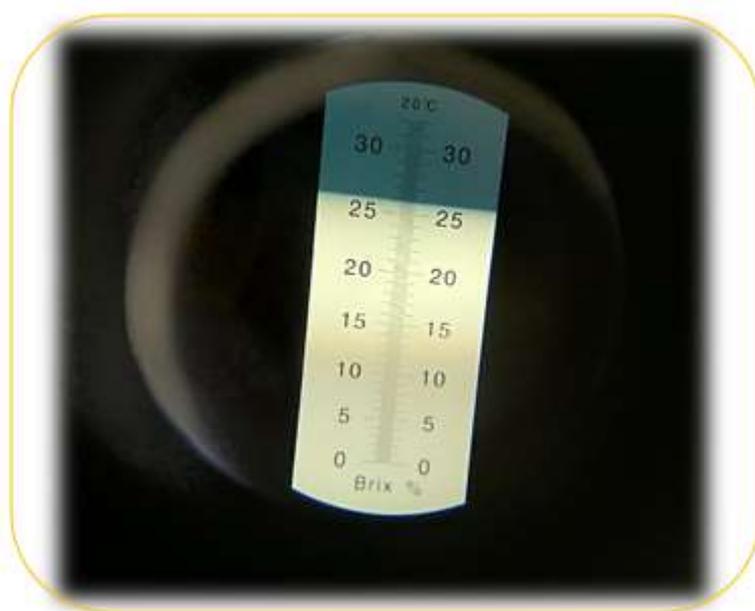
Após a moagem e filtração da cana, o caldo foi submetido a uma diluição para ajustar-se aos parâmetros exigidos ( $^{\circ}$ Brix, pH, temperatura) para o processo de fermentação, chamando-se a partir de então de mosto.

## 3. Preparação do mosto

Após a obtenção e correção para as condições ideais de fermentação, foram analisados os constituintes mais importantes responsáveis por promover a obtenção da solução hidroalcolica, ou seja, os açúcares redutores totais e açúcares infermentescíveis. Durante a preparação do mosto foram tomados os cuidados de higiene, principalmente com os materiais, vidrarias e utensílios utilizados na operação, para a não infecção e contaminação durante o processo de fermentação.

A correção do teor de sacarose no mostro foi feita com a adição de água mineral, de maneira que o seu  $^{\circ}$ Brix representasse o teor de sólido solúveis ideais a fermentação. A determinação do teor de açúcar no mosto foi determinada utilizando um refratômetro (Figura 12), antes da fermentação, em que foi medido a faixa de  $^{\circ}$ Brix.

**Figura 12.** Ilustração da captura fotográfica do refratômetro para determinação quando do teor de açúcar.



Fonte. Autor, 2021.

#### 4. Fermentação do mosto

A fermentação do mosto foi realizada pela inoculação de um fermento industrial (*Saccharomyces cerevisiae*). Para tanto, foram adotados processos convencionais idênticos aos praticados em fábricas de cachaças. Inicialmente, o fermento industrial para panificação que contém o microorganismo *Saccharomyces cerevisiae* foi preparado para uso em dornas de fermentação na proporção 15 g/L de mosto.

Em seguida, o micro-organismo foi adicionado ao mosto no interior de dornas de fermentação que, ao recebê-lo, iniciou-se o processo de fermentação. O processo de fermentação foi observado quanto ao °Brix, pH, grau alcoólico (°GL) e temperatura após 12 h da adição do inóculo. A condução de todo o processo fermentativo teve seu término quando a concentração de sólidos solúveis (°Brix) no mosto fermentado (vinho) chegou a aproximadamente zero (0), ou seja, quando todos os açúcares foram consumidos.

O grau alcoólico (°GL) do mosto e a sua temperatura após a adição do inóculo foi verificada em aparelho ebulliômetro, sendo pela régua determinada a sua graduação alcoólica.

#### 5. Destilação

Precedendo a destilação dos álcoois utilizando o sistema fabricado, procedeu-se com a destilação para obtenção da solução hidroalcoólica, quando para tanto, utilizou-se um alambique simples de cobre com capacidade para 25 L (Figura 13), de propriedade particular. De início, foi adicionado no alambique, o vinho oriundo das dornas, ocupando aproximadamente 2/3 de sua capacidade total, e então, fechado. Utilizando um fogão industrial a gás butano acoplado a panela do alambique, o sistema foi aquecido de forma lenta e moderada para promover o início do processo de separação da solução hidroalcoólica do mosto fermentado (vinho).

A condução operacional do processo destilatório basicamente foi desenvolvida controlando-se a temperatura e o nível da carga de produto a ser destilado no alambique, atingindo-se temperatura entre 85-90°C, e ainda uma pressão da base da panela em torno de 1,0 m.c.a (metro de coluna de água), sendo os vapores induzidos por meio do capitel do alambique até o sistema de condensação de serpentina, onde adquiriu a temperatura (aproximadamente ambiente) ideal para ser coletado e armazenado.

Concluída a destilação, esperou-se a temperatura da panela chegar em torno de 50 °C na finalidade de se evitar o “murchamento” do aparelho, para, então, ser aberta a válvula de escape e descarregar o resíduo (vinhoto), e assim, recomeçar um novo ciclo.

**Figura 13.** Captura fotográfica do alambique próprio usado no processo de destilação.



**Fonte.** Autor, 2021.

As primeiras frações destiladas contêm relativamente muito álcool e é denominada de cabeça. Estas porções contêm grande quantidade de substâncias mais voláteis do que o álcool etílico e são tóxicas, o que prejudica a qualidade da cachaça (aguardente) no caso de sua produção, e aproveitada no caso da produção de etanol. Com isto, foi utilizado o todo (cabeça, coração e cauda) do produto destilado, para a partir desta solução e utilizando o sistema de destilação fabricado, produzir o álcool hidratado e posteriormente o álcool anidro.

## **II - A partir das vagens da algarobeira:**

- Coleta das vagens;
- Seleção das vagens;

- Pesagem das vagens de boa qualidade;
- Sanitização;
- Fragmentação das vagens;
- Prensagem e filtração das vagens;
- Preparação do mosto;
- Fermentação usando fermento industrial;
- Destilação do mosto (vinhoto);
- Produto destilado (solução hidroalcoólica) no sistema simples modificado (etanol hidratado);
- Produto destilado (solução hidroalcoólica) no sistema fracionado modificado, usando zeólitas (etanol anidro);
- Acondicionamento;
- Caracterizações.

### Procedimentos Experimentais:

#### 1. Pesagem das vagens

Inicialmente as vagens selecionadas foram pesadas com o objetivo de determinar o rendimento para cada destilação, como ilustrado na Figura 14.

**Figura 14.** Captura fotográfica ilustrando as pesagens das vagens da algarobeira.



Fonte. Autor, 2021.

## 2. Fragmentação e diluição das vagens

Realizado manualmente, o procedimento de quebra teve como objetivo favorecer a extração e o melhor aproveitamento dos açúcares contidos e disponíveis nas vagens da algarobeira. Para a obtenção do caldo foi utilizado a proporção de 1:2 Kg de vagem para cada 2 L de água. Na produção foram acrescentados 28 L de água potável para cada 14 Kg de vagens (SILVA, 2009). Na Figura 15 estão ilustradas capturas fotográficas as vagens inteiras, pós fragmentação e hidratadas para cozimento.

**Figura 15.** Ilustração das vagens de algaroba: (a) após processo de seleção e pesagem e (b) após processo de fragmentação manual e hidratação para o seu cozimento.



**Fonte.** Autor, 2021.

## 3. Cozimento

No processo de cozimento foi utilizado um recipiente grande (tipo tacho) e um fogão industrial a gás butano, todos de propriedade particular.

As vagens diluídas foram cozidas a 60 °C, controlados por um termômetro digital (Figura 16), durante um intervalo de 10 minutos em fogo baixo.

**Figura 16.** Captura fotográfica quando do controle de temperatura no cozimento das vagens de algaroba.



**Fonte.** Autor, 2021.

#### 4. Prensagem

No procedimento de prensagem foi utilizado uma prensa hidráulica manual com capacidade de até 30 toneladas de pressão, com acoplamento de um sistema projetado (Figura 17) para coleta do substrato de vagens da algarobeira, consistindo de um copo grande de inox (29 cm de diâmetro maior, 25 cm de altura e 25 cm de diâmetro menor) e um copo menor vazado também de inox (20 cm de diâmetro e 36 cm de altura). Na prensagem das vagens foram impostas 15 toneladas de pressão.

A prensagem das vagens fragmentadas foi realizada no intuito de extrair o máximo possível os açúcares do restante das fibras, visto que a presença de açúcares no mosto durante o processo de fermentação pode ocasionar a precipitação de massa celular, e, conseqüentemente, o processo não ocorrerá com rendimento satisfatório.

**Figura 17.** Sistema para a coleta do substrato das vagens prensadas da algarobeira.



**Fonte.** Autor, 2021.

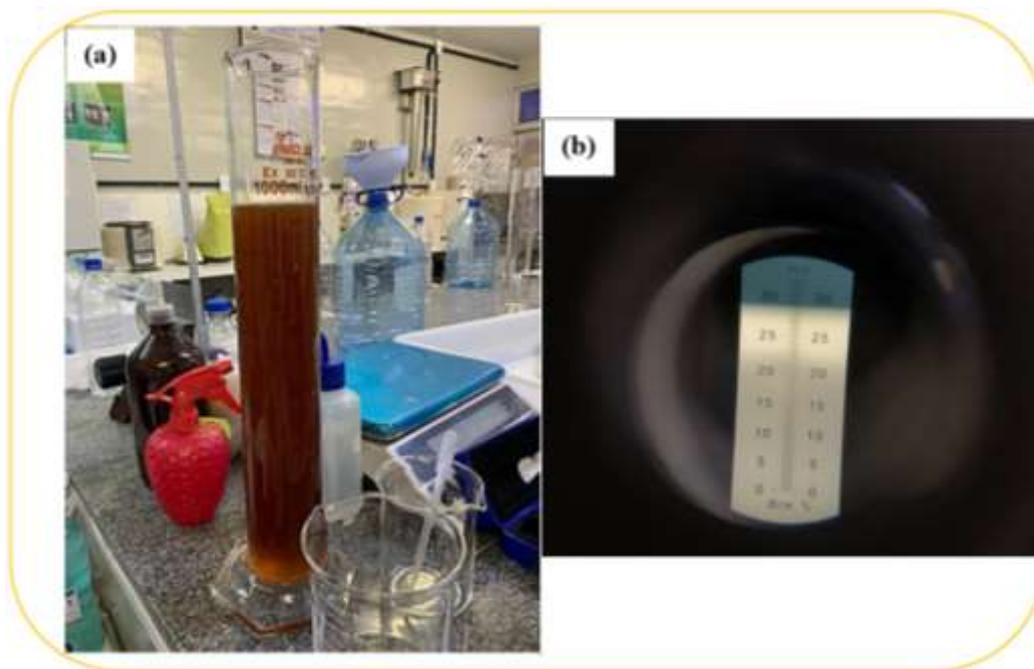
O caldo então passou por papel filtro em funil, e posteriormente foi preparado para fermentação. De acordo com Silva (2009) o caldo obtido por prensagem deve ser preparado para a filtração e fermentação, muito embora ainda exista pequena perda de sacarose na fibra.

## 5. Preparação do mosto

Nesta etapa foram realizadas a correção e a obtenção de condições ideais de fermentação, onde foram analisados os constituintes mais importantes responsáveis pela obtenção da solução hidroalcoólica, como os açúcares redutores totais e açúcares fermentescíveis. Visando a não ocorrência de eventuais sérios problemas de contaminação na fermentação, foram tomadas medidas cuidadosas de higiene, principalmente em relação aos materiais, vidrarias e utensílios utilizados na operação.

A correção do teor de sacarose no mosto foi realizada de maneira que, o seu °Brix representasse o teor de sólidos solúveis ideais a fermentação. Esta correção foi realizada com água mineral. A determinação do teor de açúcar no mosto (Figura 18a) foi determinada por aparelho refratômetro (Figura 18b).

**Figura 18.** Captura fotográfica: (a) do mosto oriundo das vagens da algarobeira e (b) determinação do teor de açucares por refratômetro.



Fonte. Autor, 2021.

O grau alcoólico (°GL) do mosto e a sua temperatura após a adição do inóculo foi verificada em aparelho ebuliômetro, sendo pela régua determinada a sua graduação alcoólica.

#### 6. Preparação da fermentação

A partir do mosto foi calculado o volume de água que seria adicionado ao caldo para a correção do seu °Brix ideal. Para tanto, foi utilizada a seguinte fórmula descrita.

$$V_a = V_c \times (B_i - B_f) / B_f$$

onde: **V<sub>a</sub>** é o volume de água,

**V<sub>c</sub>** é o volume do caldo,

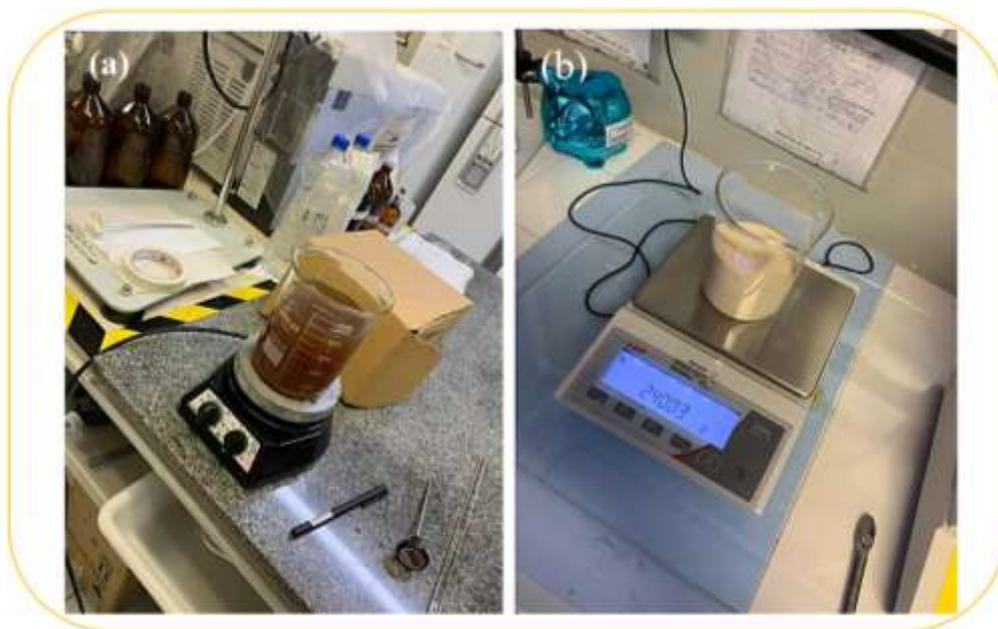
**B<sub>i</sub>** é o °brix inicial e

**B<sub>f</sub>** é o °brix final.

#### 7. Preparação do inóculo

Neste procedimento, uma quantidade do caldo já diluído foi aquecida em temperatura de 32 °C, sob agitação magnética em placa agitadora (Figura 19a), sendo adicionado o inóculo para ocorrência da fermentação (Figura 19b).

**Figura 19.** Ilustração da preparação do inóculo: (a) caldo e (b) pesagem com o inóculo.

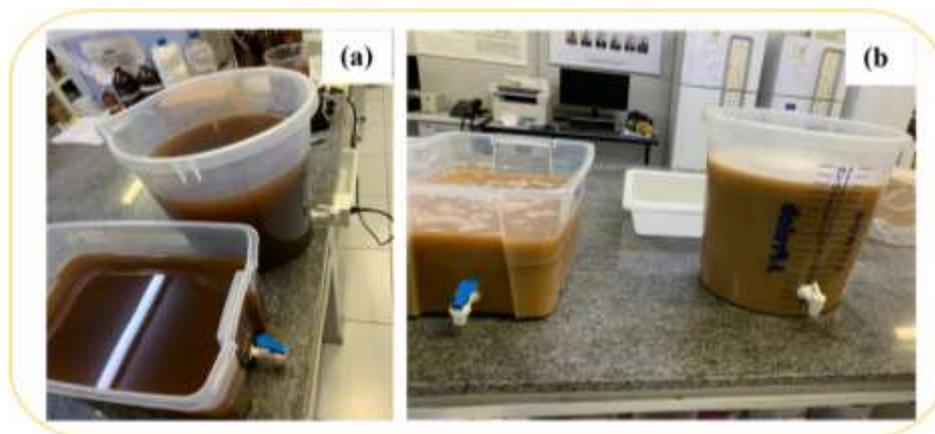


Fonte. Autor, 2021.

## 8. Fermentação do mosto

A fermentação do mosto se deu pela inoculação de fermento industrial (*Saccharomyces cerevisiae*). O procedimento seguido foi o mesmo dos convencionais utilizados em fábricas de cachaças. Inicialmente o fermento industrial para panificação, o qual contém o micro-organismo *Saccharomyces cerevisiae*, foi preparado para uso em dornas de fermentação na proporção 15 g/L de mosto. Em seguida, o fermento foi adicionado ao mosto no interior de dornas de fermentação, que ao recebê-lo iniciou-se o processo de fermentação (Figura 20a).

**Figura 20.** Ilustração do processo de fermentação do mosto: (a) antes da fermentação e (b) após fermentação.



Fonte: Autor, 2021.

## 9. Destilação do vinho

O procedimento de destilação foi realizado em um alambique de cobre de 25 L, igualmente ao utilizado para a cana-de-açúcar (Figura 13). Este procedimento foi baseado no estudo de Silva (2009) que utilizou metodologia proposta por Arruda (1994), o qual reportou que o vinho, produto resultante da fermentação do mosto, possui uma composição complexa, com componentes de natureza sólida, líquida e gasosa. O álcool etílico, principal componente líquido, aparece nos vinhos industriais numa proporção de 5 a 10% em volume, dependendo da composição do mosto que lhe deu origem. Leveduras e bactérias são os principais componentes sólidos do vinho e o representante principal dos componentes de natureza gasoso é o CO<sub>2</sub> (gás carbônico). O processo que se vale da diferença do ponto de ebulição, para a separação de um ou mais compostos de uma mistura, é chamado de destilação.

Quando o vinho é submetido ao processo de destilação, resultam 2 (duas) frações, a saber, o *flegma* e a vinhaça. O *flegma*, mistura hidroalcoólica impura, tem sua graduação muito variável, depende do aparelho de destilação utilizado, porém, nunca superior a 54° GL. Para obtenção do álcool hidratado, o *flegma* é submetido a uma nova destilação, em outra coluna, a fim de atingir a graduação de 95,5° GL. E o anidro, em outra coluna também, de retificação, para se chegar a 99,6° GL. A vinhaça, que contém todas as substâncias fixas do vinho, deve ter graduação alcoólica nula.

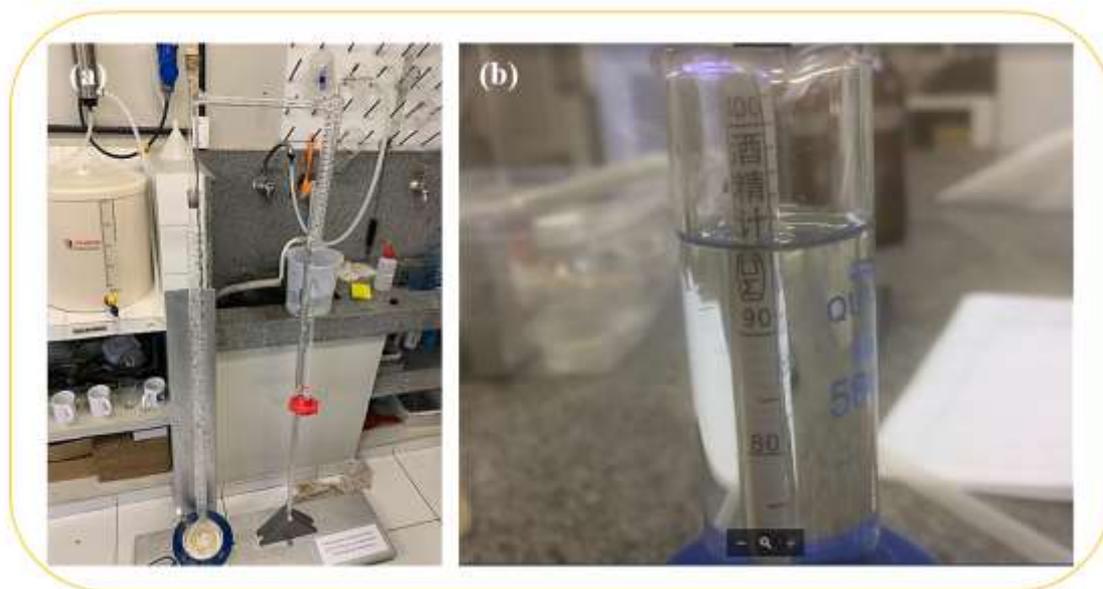
## 10. Destilação do vinho no sistema fabricado

O sistema de destilação fabricado foi utilizado ineditamente, tanto para a matéria-prima cana-de-açúcar quanto para matéria-prima vagens de algarobeira. A destilação foi realizada na coluna simples, porém dimensionado, contendo obstáculos (imitando pratos) ao longo de seu comprimento, para dificultar a passagem da água e facilitar a separação do álcool e água. Assim, 500 mL da solução hidroalcoólica oriunda da destilação do mosto das vagens foi colocada num balão de 1 L de capacidade. Aqueceu-se lenta e moderadamente o balão por meio de uma manta aquecedora, dando início ao processo de separação do álcool com a água. A condução operacional do processo destilatório basicamente foi desenvolvida controlando a temperatura e o nível de solução a ser destilado no sistema.

Atingindo-se uma temperatura entre 78-90 °C, e não deixando ultrapassar, os vapores alcoólicos começaram a ascender por meio da coluna simples com serpentina e

de dimensões modificadas (1,17 m de comprimento por 6,0 cm de diâmetro) até o sistema de condensação para a obtenção do álcool (Figura 21a). Numa temperatura ideal, em torno de 78 °C, foram coletadas as primeiras frações de etanol hidratado a 95,5° GL (Figura 21b), processo realizado com auxílio de proveta e alcoômetro Gay Lussac Cartier (0 a 100%).

**Figura 21.** (a) Sistema fabricado de destilação simples e (b) coleta e medição do álcool hidratado de algaroba.



Fonte. Autor, 2021.

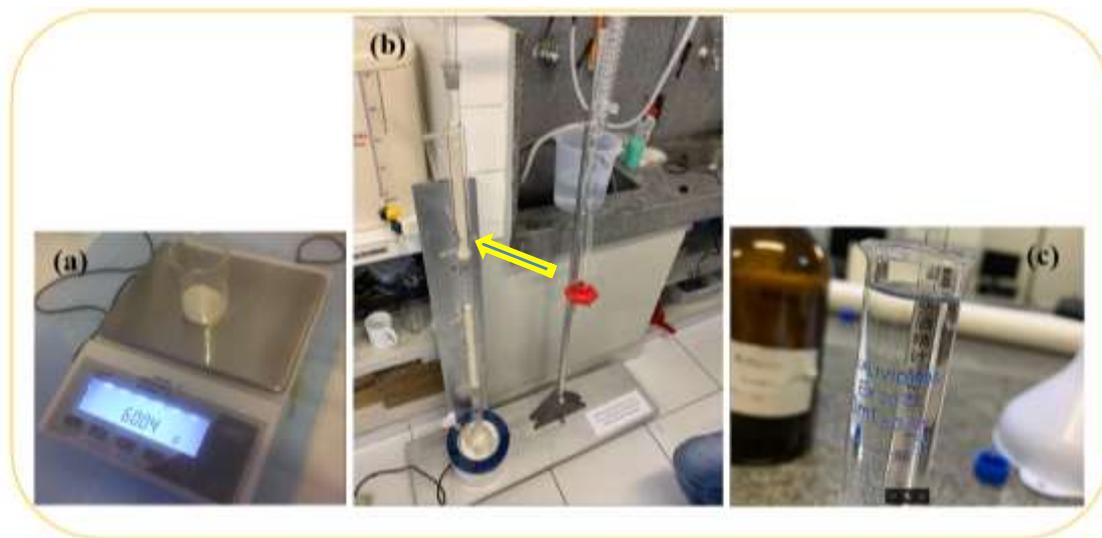
#### 11. Destilação do etanol a 95° GL no sistema fabricado com acoplamento de coluna fracionada

Esta etapa foi realizada usando tanto a cana-de-açúcar como as vagens da algarobeira. A destilação foi realizada no sistema modificado e com capacidade para acoplamento fracionado, ou seja, trocando-se a coluna do hidratado e utilizando uma outra de retificação com as zeólitas. A coluna fracionada foi dimensionada e fabricada com 1,19 m de comprimento por 6,5 cm de diâmetro, e com a inserção de orifícios (furos) intencionais no interior para função de apoio às zeólitas, além disto, na coluna fracionada foi colocada uma junta de 20 cm aproximadamente, para acoplar um balão de 1 L.

Cerca de 60,0 g de zeólitas foram adicionadas na coluna fracionada com o intuito de dificultar a passagem de água, bem como facilitar a separação entre álcool e água (Figura 22a), ou seja, foram usadas para desidratação do etanol. No balão com capacidade de 1 L foram adicionados 500 mL de etanol hidratado a 95 °GL, solução tal que foi

oriunda da destilação do *flegma* de algaroba. A solução no balão foi aquecida de forma lenta e moderada por meio de uma manta aquecedora, dando início ao processo de separação do álcool e água (Figura 22b).

**Figura 22.** (a) Pesagem das zeólitas, (b) Zeólitas introduzidas na coluna fraciona acoplada no sistema fabricado e (c) Álcool anidro das vagens da algarobeira a 100° GL em alcoômetro.

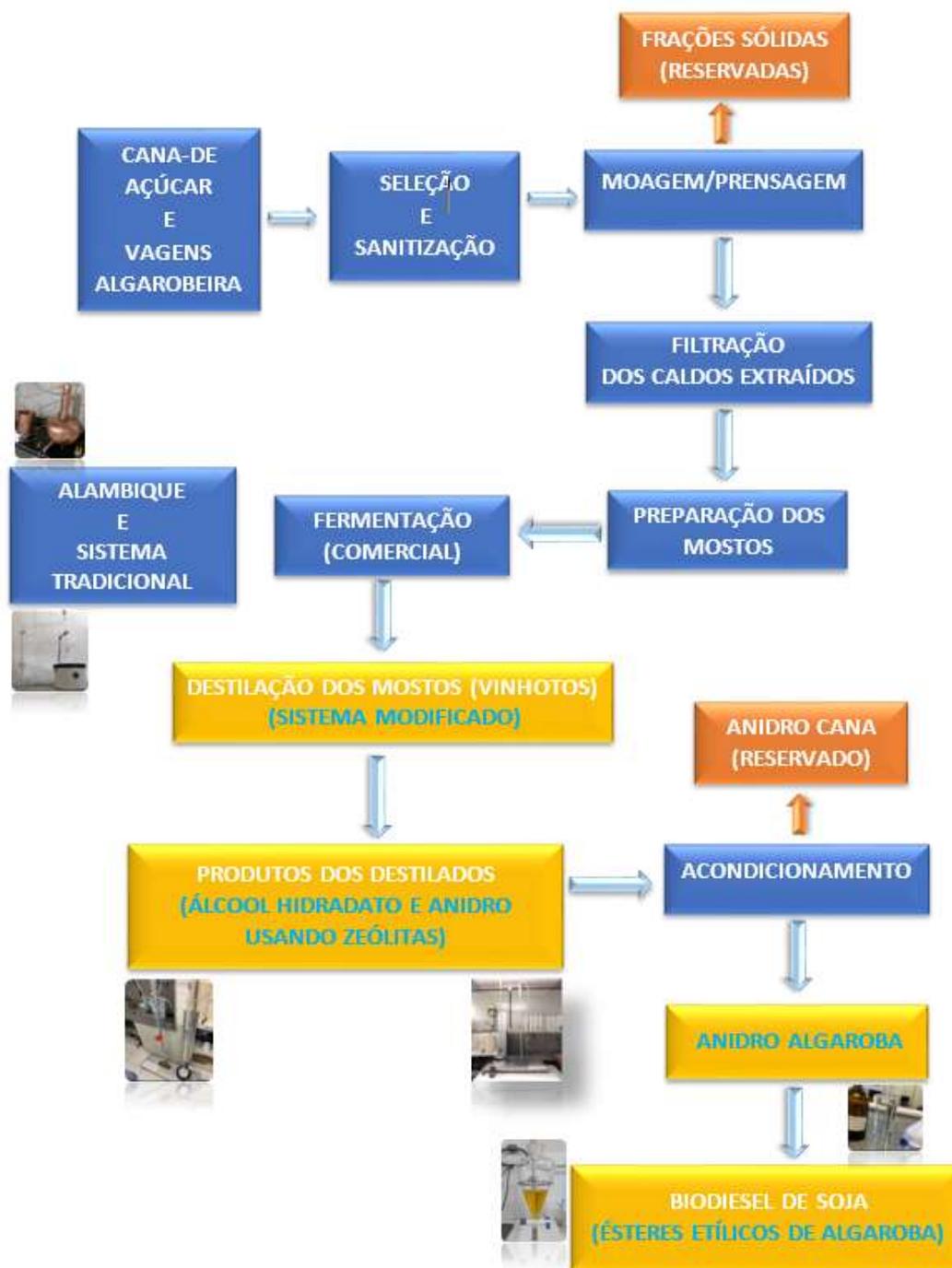


Fonte. Autor, 2021.

A condução operacional deste processo destilatório foi desenvolvida basicamente controlando a temperatura e o nível de solução a ser destilado no sistema, como também os vapores que atravessam as zeólitas, sempre controlando a umidade. Sem que fossem ultrapassadas temperaturas entre 78-90 °C, os vapores alcoólicos ascenderem através da coluna fracionada até o sistema de condensação. A partir daí, numa temperatura ideal em torno de 78 °C, foi possível coletar as primeiras frações de álcool anidro de algaroba a 100° GL (Figura 22c), processo realizado com auxílio de proveta e alcoômetro Gay Lussac Cartier (0 a 100%).

Toda a metodologia praticada para a obtenção dos álcoois orgânicos hidratados de cana-de-açúcar e de vagens de algaroba, bem como para obtenção do álcool orgânico anidro de vagens de algaroba usando zeólitas, foi resumidamente ilustrada por meio do Fluxograma representado na Figura 23.

**Figura 23.** Fluxograma metodológico adotado para a obtenção dos álcoois hidratados de cana-de-açúcar e vagens de algaroba, como ainda do álcool anidro de vagens da algaroba.



Fonte. Autor, 2022.

### 3.1.3. Análises Relacionadas aos Padrões de Qualidade do Etanol Hidratado e Anidro da Cana-de-açúcar e da Algaroba

Sob o ponto de vista químico, os álcoois obtidos das vagens da algaroba e da cana-de-açúcar devem atender todos os requisitos determinados pela legislação vigente,

a saber, acidez total, ésteres, aldeídos, furfural, álcoois superiores, condutividade, pH e metanol, todos dentro de especificações de qualidade regidas por órgãos competentes como a ANP (ANEXO II).

#### *3.1.3.1 Acidez total*

O método utilizado na determinação da acidez baseou-se em titulação com solução padronizada de hidróxido de sódio (NaOH), usando fenolftaleína como indicador do ponto final da titulação, segundo metodologia descrita pelo Instituto Adolf Lutz (1985) e pela metodologia interna da Usina JB localizada em Vitória de Santo Antão/PE.

#### *3.1.3.2 Aldeídos, álcoois superiores, ésteres e metanol*

Os ésteres, aldeídos, álcoois superiores e metanol foram determinados por cromatografia gasosa, utilizando-se um equipamento Thermo Scientific Trace 1310, da Usina JB.

#### *3.1.3.3 Condutividade, pH e densidade*

As medidas de condutividade, pH e densidade foram determinadas por metodologia interna da Usina JB, utilizando os aparelhos condutivímetro DM-31, pHmetro e o densímetro digital da Anton Paar.

### **3.2 ETAPA II: PRODUÇÃO DE BIODIESEL COM ÁLCOOL ANIDRO DA ALGAROBA**

Os testes catalíticos de bancada para produção de biodiesel usando o álcool anidro obtido das vagens da algarobeira usando o sistema modificado, foram realizados no LabSMaC (Laboratório de Síntese de Materiais Cerâmicos) da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais (UAEMa) da UFCG, conforme descrito a seguir.

Para a obtenção do biodiesel foi executada a reação química de transesterificação homogênea do óleo de soja comercial, por serem a rota e a oleaginosa utilizadas a nível industrial na produção desse biocombustível. Para tanto, inicialmente 100 mL do óleo de soja foi colocado em um recipiente e submetido a temperatura de 40 °C por 15 min sobre uma placa aquecedora. Em paralelo, 0,7 g de catalisador homogêneo NaOH foi adicionado em uma solução de 25 mL de álcool anidro de algaroba para sua dissolução.

Após dissolução, estas 2 soluções foram misturadas e mantidas sob aquecimento a 70 °C por um período de 30 min e sob agitação magnética.

Após reações em duplicata, os produtos reacionais (éster etílico, água e glicerol) foram colocados em um funil de decantação para separação das fases e lavagem com água destilada. Finalizada a lavagem, as amostras (biodiesel) foram centrifugadas por 30 minutos a 9000 RPM, com finalidade de promover uma total separação dos componentes via sedimentação, e assim separar resíduos de água e glicerol remanescentes. As amostras foram acondicionadas em tubos âmbar sob refrigeração em temperatura entre 6 e 10 °C para conservação, e posterior caracterização.

O desempenho alcoólico foi avaliado visando verificar a sua eficiência como um inédito insumo na reação de transesterificação do óleo de soja para conversão em biodiesel. Previamente a reação, o óleo foi seco em estufa a temperatura de 75 °C por 30 minutos. A quantidade em gramas do catalisador homogêneo usado foi calculada em relação à massa do óleo. As medidas das variáveis independentes adotadas para os testes alcoólicos foram baseadas na metodologia proposta por Leal (2016), com intuito de maximizar a sinergia catalítica reacional.

Na Tabela 1 constam as condições reacionais e quantidades praticadas. Os produtos resultantes das reações de transesterificação etílica com álcool anidro da algaroba (biodiesel) foram analisados quanto ao percentual de conversão em éster conforme metodologia descrita por Marchetti e Errazu (2008).

**Tabela 1.** Testes catalíticos usando álcool anidro das vagens da algaroba obtido no sistema de destilação modificado: Condições reacionais e quantidades dos insumos.

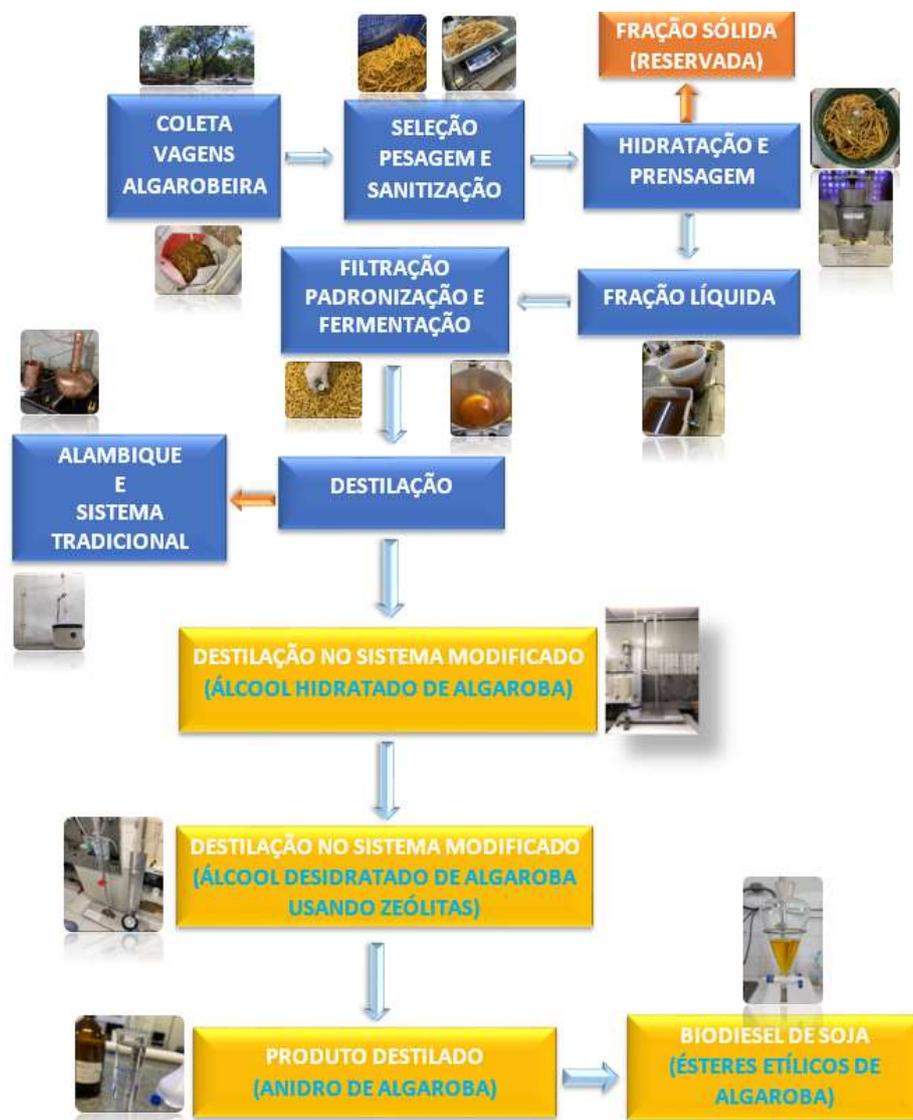
CONDIÇÕES REACIONAIS	
<b>Rota</b>	Homogênea
<b>Reação</b>	Transesterificação com álcool anidro da algaroba
<b>Temperatura</b>	70 °C
<b>Tempo</b>	30 min
<b>Quantidades</b>	Óleo = 100 mL Álcool anidro algaroba = 25 mL Catalisador NaOH = 0,7 g

Estas análises foram conduzidas em cromatógrafo a gás Varian 450c com detector de ionização de chamas FID (*Flame Ionization Detection*), com coluna capilar curta, de fase estacionária Varian Ultimetal “*Select Biodiesel Glycerides + RG*” (15 m x 0,32 mm x 0,45 µm). A temperatura do detector foi de 250 °C e a do injetor de 240 °C. A

temperatura do forno foi programada de 150 até 260 °C a uma taxa de aquecimento (rampa) de 10 °C/min. O gás de arraste empregado foi o gás hidrogênio (H<sub>2</sub>) de alta pureza. Foram diluídos 50 mg das amostras em 5 mL de n-hexano padrão UV/HPLC (Vetec P.A./A.C.S.) e posteriormente foi injetada 1 µL dessa solução no equipamento. O padrão utilizado foi o padrão interno fornecido pela Varian Inc. A análise foi realizada no LabSMaC/UAEMa/UFCG.

Toda a metodologia executada para a obtenção dos álcoois orgânicos, em sua forma hidratada e anidra (com zeólitas), utilizando as vagens da algarobeira, bem como a aplicação do álcool anidro da algaroba na produção de biodiesel de óleo de soja, foi resumidamente ilustrada por meio do Fluxograma representado na Figura 24.

**Figura 24.** Fluxograma metodológico adotado para a obtenção dos álcoois orgânicos hidratado e anidro de vagens de algaroba e a aplicação do anidro para biodiesel de soja.



Fonte. Autor, 2022.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### ETAPA I: ÁLCOOIS

#### 4.1 Brix IDEAL PARA FERMENTAÇÃO

Em relação ao processo de fermentação do mosto de cana-de-açúcar, decidiu-se trabalhar com um teor médio de sólidos solúveis de 16 °Brix e teor alcoólico de 9,1°, estando dentro da faixa média (7 e 10° GL) utilizada nos processos fermentativos industriais que apresentam os melhores resultados. Na produção de aguardente de cana-de-açúcar, o teor alcoólico resultante do processo fermentativo deve situar-se entre 7 e 10° GL, pois valores acima de 10° GL, podem ocasionar uma diminuição da eficiência da levedura nas fermentações subsequentes, enquanto que um teor abaixo de 7° GL, prejudica o rendimento da fermentação ((SILVA, 1998; SILVA, 2002).

#### 4.2 EXTRAÇÃO DO CALDO DA CANA-DE-AÇÚCAR E DAS VAGENS DA ALGAROBEIRA

Da extração por moenda do caldo da cana-de-açúcar foram utilizados 13 L de caldo. Para se chegar ao °Brix 16, foi utilizada a fórmula a seguir para calcular o volume de água a ser adicionado para a correção do °Brix do caldo (QUEIROZ, 2019). O °Brix inicial foi de 26° medido no refratômetro.

$$\begin{aligned} V_a &= V_c \times (B_i - B_f) / B_f \\ V_a &= 13 \times (26 - 16) / 16 \\ \mathbf{V_a} &= \mathbf{8,13 \text{ L de água}} \end{aligned}$$

Logo, chegou-se a 8,13 L de água. Assim, tendo em vista a pequena quantidade de água e considerando este valor de °Brix, pode-se dizer que os resultados foram bastante satisfatórios.

Da extração por prensagem do caldo das vagens da algarobeira foram utilizados 26 L. Na prensagem foi utilizada uma pressão de 15 toneladas e uma diluição de 1:2 (1 Kg de vagem para cada 2 L de água). O caldo apresentou um °Brix 29 (medida do °Brix inicial no refratômetro), sendo que na diluição chegou-se a 18° Brix, utilizando a mesma fórmula.

$$\begin{aligned} V_a &= V_c \times (B_i - B_f) / B_f \\ V_a &= 26 \times (29 - 18) / 18 \\ \mathbf{V_a} &= \mathbf{15,88 \text{ L de água}} \end{aligned}$$

Com isto, tem-se igualmente como satisfatórios os resultados obtidos.

### 4.3 FERMENTAÇÃO

Nesta etapa do processo foi usado o fermento industrial *saccharomyces cerevisiae*, acrescentando-se 15 g de fermento por litro de mosto, observando-se em relação ao pH, temperatura, sólidos solúveis e grau alcoólico, sendo que o mosto apresentou um teor inicial de sólidos solúveis de 16° Brix para a cana-de-açúcar e 18° Brix para as vagens de algaroba. Logo, esperou-se para estes teores de °Brix, obter maiores teores de etanol.

### 4.4 DESTILAÇÃO

Os resultados obtidos da destilação da cana-de-açúcar e das vagens da algarobeira, desde o alambique, até o sistema de destilação fabricado, estão apresentados a seguir.

#### 4.4.1 Cálculo do volume de etanol a partir do volume de vinho da cana-de-açúcar e da algaroba

De acordo com a literatura especializada (Queiroz, 2019) que trata sobre a fabricação de cachaça e aguardente em nível laboratorial e microindustrial, tem-se como segue.

#### Para 13 L de caldo fermentado da cana-de-açúcar

a1) Quantidade de destilado alcoólico do vinho (Qda):

$$13 \text{ L} \times 9,1^\circ \text{GL} (9,1\%) = Q_{da}$$

Onde 9,1° GL foi o teor alcoólico do vinho, medido no ebulliômetro.

1,183 L de etanol a ser destilado no vinho (antes do alambique)

a2) Quantidade de destilado alcoólico do vinho (Qda):

onde:

- Destilado alcoólico (Qda) = volume cabeça + volume coração + volume cauda.

Obs.: Considerando que a cachaça possui o seu grau alcoólico variando de 38 a 54 °GL, assim no presente trabalho adotou-se um teor alcoólico de 40 °GL. Então:

- Grau alcoólico do destilado = 40° GL = 40% = 0,4

$Q_{da} = 1,183 \text{ L} / 0,4 = 2,96 \text{ L}$ , sendo destes utilizados aproximadamente 1 L para outras caracterizações, restando assim 1,96 L para obtenção de etanol hidratado.

$$\text{Volume cabeça} = 10\% \times 1,96 \text{ L} = 0,196 \text{ L}$$

$$\text{Volume coração} = 80\% \times 1,96 \text{ L} = 1,568 \text{ L}$$

$$\text{Volume cauda} = 10\% \times 1,96 \text{ L} = 0,196 \text{ L}$$

c) Quantidade de etanol que deve ser destilado a 100% do volume coração (Qec):

$$Q_{ec} = \text{volume coração} \times 40/100$$

$$Q_{ec} = 1,568 \text{ L} \times 40/100 = 0,6272 \text{ L etanol hidratado destilado}$$

onde:  $1,96 \text{ L} - 0,6272 \text{ L} = 1,3328 \text{ L}$ , volume de descarte de 15° GL.

Então,

$$V_t = 1,96 \times 0,4 = 0,784 \text{ L (volume teórico)}$$

$$V_p = V_{\text{obtido}} = 0,6272 \times 0,95 = 0,596 \text{ L (volume prático)}$$

$R_d = V_p/V_t = 0,596/0,784 = 0,76 = 76\%$  (volume de álcool a ser destilado a 100% do volume coração).

d) Quantidade de etanol real (Qer) destilado, ou seja, a 99° GL (99%) do volume coração:

$$Q_{er} (99\%) = 1,568 \text{ L} \times 100/99 = 1,584 \text{ L de etanol anidro.}$$

Como só foi obtido 0,6272 L de etanol a 95° GL, o anidro conseqüentemente também foi pouco. No entanto, foi usado 250 mL quando da utilização das zeólitas no *erlemayer*, e assim atingindo a graduação 100%, logo, sem necessidade de nova destilação.

Para a obtenção do álcool anidro de cana-de-açúcar foram colocados 250 mL de álcool a 92° GL num *erlemayer* e adicionadas 160 g de zeólitas, logo após 2 horas de descanso, foi então medido em densímetro convencional a marca de 98° GL. Após descanso de 12 h, em nova medição, chegou-se a uma graduação 100° GL ( $V_p$ ), sendo obtidos 130 mL de álcool.

Em relação ao rendimento, foi dado que:  $250 \times 0,92 = 230 \text{ mL}$  (volume teórico). Como foram obtidos 130 mL, logo foi dado que:  $130/230 = 0,565 = 57\%$  (rendimento do etanol anidro da cana-de-açúcar).

#### Para 26 L de caldo fermentado das vagens da algarobeira

a1) Quantidade de destilado alcoólico do vinho (Qda):

$$\text{Grau alcóolico do destilado} = 9,1 \text{ °GL} = 9,1\% = 0,091$$

$$Q_{da} = \text{volume do caldo} \times \text{teor alcóolico do destilado}$$

$$Q_{da} = 26 \text{ L} \times 0,091$$

$Q_{da} = 2,36 \text{ L}$  de etanol a ser destilado no vinho (antes do alambique), ou seja, quantidade de vinho com certo teor de álcool a ser destilado em alambique.

a2) Quantidade de destilado alcoólico do vinho (Qda):

onde:

Destilado alcoólico (Q<sub>da</sub>) = volume cabeça + volume coração + volume cauda

Grau alcoólico do destilado = 40° GL = 40% = 0,4

Q<sub>da</sub> = 2,36 L/0,4 = 5,96 L (volume de solução hidroalcoólica do qual foi destilado o vinho, sendo obtido com teor alcoólico maior).

Volume cabeça = 10% x 5,96 L = 0,596 L = 596 mL

Volume coração = 80% x 5,96 L = 4,77 L

Volume cauda = 10% x 5,96 L = 0,596 L = 596 mL

c) Quantidade de etanol que deve ser destilado a 100% do volume coração (Q<sub>ec</sub>):

Foram realizadas 11 (onze) bateladas, com leituras em triplicatas em frações de 50 mL, num volume final de solução de 5,96 L de 38-40° GL, sendo em cada batelada completado o balão com 500 mL e, posteriormente, foram realizadas as leituras na fração de 50 mL para garantir uma melhor precisão.

Q<sub>ec</sub> = volume coração x 40/100

Q<sub>ec</sub> = 4,77 L x 40/100 = 1,91 L de etanol hidratado de algaroba

Deste total foi utilizado uma parte para as caracterizações e 1 L para redestilar e desidratar.

d) Quantidade de etanol real (Q<sub>er</sub>) destilado, ou seja, a 99° GL (99%) do volume coração:

Q<sub>er</sub> (99%) = 1 L x 100/99 = 1,01 L de etanol anidro de albaroba.

Assim, foi utilizado 1 L de etanol a 95° GL, com acréscimos das zeólitas, com 2 destilações, utilizando-se aproximadamente 60 g na coluna por cada destilação. Daí, foi obtido então 450 mL de etanol anidro na graduação 100° GL.

Em relação ao rendimento, foi dado que:

1000 x 0,99 = 990 mL (volume teórico)

Como foram obtidos 450 mL (volume prático), foi dado que:

V<sub>p</sub>/V<sub>t</sub> = 450/990 = 0,46 = 46% (rendimento do etanol anidro da algaroba).

#### Cálculo °INPM:

Para o cálculo INPM foi dado que:

$$^{\circ}\text{GL} = V_{\text{álcool}}/V_{\text{total}}$$

$$^{\circ}\text{INPM} = M_{\text{álcool}}/M_{\text{total}}$$

Assim:

95° GL = 95% álcool + 5% água

$$\begin{aligned}
 100 \text{ mL} &= 95 \text{ mL álcool} + 5 \text{ mL água} \\
 &= 95 \text{ mL} \times 0,789 \text{ g/mL} + 5 \text{ g água} \\
 &= 74,955 \text{ g álcool} + 5 \text{ g água} \\
 &= 79,955 \text{ g}
 \end{aligned}$$

$$^{\circ}\text{INPM} = 74,955/79,955 = 0,94 = 94^{\circ} \text{ INPM}$$

onde, 0,789 g/mL é a densidade do álcool.

Em relação ao rendimento do álcool de algaroba, tem-se que segundo a literatura (Arruda, 1994) descrevendo a algarobeira cultivada no norte do Chile, relatou que a polpa da algaroba contém 46,4 Kg de açúcar susceptível de oferecer, teoricamente, 27,2 L de álcool. No Brasil, as pesquisas com a algaroba se resumem a poucos trabalhos. Além do mais, não existe, lamentavelmente, nenhuma estação experimental no Nordeste que se desenvolva pesquisa com esta planta. Quase que a totalidade das pesquisas até agora realizadas foi dirigida no sentido de utilizar vagens da algaroba como ração animal.

#### 4.5 ANÁLISES QUÍMICA E FÍSICA DO ETANOL DE CANA-DE-AÇÚCAR E DE VAGENS DE ALGAROBA

Quanto ao seu aspecto físico, o etanol de cana-de-açúcar e o etanol de vagens de algarobeira se mostraram límpidos e incolores, assim atendendo as especificações normativas exigidas.

Sob o ponto de vista químico, para o etanol de cana-de-açúcar e para o etanol de vagens de algarobeira, quando considerada a sua comercialização, é esperado que atendam todos os requisitos determinados pela legislação vigente, isto é, todos os valores de qualidade devem estar dentro das especificações normativas.

Para o álcool hidratado de cana-de-açúcar, que serviu como referência, mediu-se em laboratório o seu grau alcoólico em  $^{\circ}\text{GL}$ , e para o anidro de cana-de-açúcar foi medido na usina o seu grau alcoólico em  $^{\circ}\text{GL}$  e  $^{\circ}\text{INPM}$  (ANEXO II), como ainda foram realizadas para o álcool anidro as medidas de pH, condutividade, acidez total e densidade a 20  $^{\circ}\text{C}$ .

Para o álcool de vagens de algarobeira mediu-se em laboratório e na usina o seu grau alcoólico em  $^{\circ}\text{GL}$ . Na usina mediu-se em  $^{\circ}\text{GL}$  e  $^{\circ}\text{INPM}$  (ANEXO II), a forma hidratada e anidra. As análises químicas do etanol de vagens de algaroba, o qual foi destilado uma vez a cada 500 mL, foram realizadas de acordo com os padrões de qualidade para as propriedades de acidez volátil, ésteres, aldeídos, furfural, álcool superiores, metanol, densidade a 20  $^{\circ}\text{C}$ , condutividade e pH.

#### 4.5.1 Valores dos padrões de qualidade obtidos nas determinações analíticas do etanol de cana-de-açúcar e de vagens de algaroba, na Usina JB

##### 4.5.1.1 Hidratado de cana-de-açúcar

°GL – 95° (no laboratório)

°INPM – 94°

##### 4.5.1.2 Anidro de cana-de-açúcar

°GL – 100° (no laboratório)

°GL – 97,47° (na usina)

°INPM – 96,01°

pH – 7,67

Condutividade – 431,0  $\mu\text{S}/\text{m}$

Acidez total – 0,90 mL gasto. Cálculo:  $0,90 \text{ mL gasto} \times 2,4 = 2,16 \text{ mg/mL}$

##### 4.5.1.3 Hidratado de algaroba

°GL – 95° (no laboratório)

°GL – 91,24° (na usina)

°INPM – 87,28°

pH – 6,66

Condutividade – 82,9  $\mu\text{S}/\text{m}$

Acidez total – 0,70 mL gasto. Cálculo:  $0,70 \times 2,4 = 1,68 \text{ mg/mL}$

Em relação ao grau alcoólico, dos resultados obtidos na usina para o álcool hidratado de vagens de algarobeira, tem-se que estão abaixo da concentração exigida pela ANP, provavelmente isto se deve, entre outros possíveis fatores, a questões de manuseio e armazenamento. Assim, para que se consiga um maior grau alcoólico, pode-se proceder com redestilações. Também, provavelmente, se deve a pequenas diferenças do método usualmente praticado na usina, como a temperatura, por exemplo.

##### 4.5.1.4 Anidro de algaroba

°GL – 98° após 2h com zeólitas (no laboratório)

°GL – 100° após 12h com zeólitas (no laboratório)

°GL – 100° repetição (no laboratório)

°GL – 96,87° (na usina)

°INPM – 95,10°

pH – 6,05

Condutividade – 42,2 µS/m

Acidez total – 1,15 mL gasto. Cálculo:  $1,15 \times 2,4 = 2,76$  mg/mL

#### 4.6 JUSTIFICATIVA TÉCNICA PARA O ÁLCOOL ANIDRO DE VAGENS DE ALGAROBA

O procedimento operacional realizado em nível laboratorial para se extrair (destilar) o álcool na forma anidra °INPM do vinho de vagens de algaroba com graduação alcoólica de 9,1° GL (9,1% v/v) foi executado como descrito a seguir.

Para extrair o etanol na forma anidra, ou seja, etanol com percentual de água muito baixo, em graduação alcoólica maior do que 99 °GL (99% de etanol + 1% de água) foi necessário realizar 3 (três) processos de destilação, sendo:

- a) Primeira destilação: destilação do vinho de vagens de algaroba em alambique;
- b) Segunda destilação: destilação simples em coluna de vidro dimensionada e fabricada especialmente para este fim;
- c) Terceira destilação: destilação em coluna fracionada de vidro contendo recheio de peneira molecular (zeólitas) dimensionada e fabricada especialmente para este fim.

Mais detalhadamente, procedeu-se como descrito a seguir:

i) A primeira destilação do vinho foi realizada em alambique de cobre por se ter um volume muito grande de vinho (26 L) e não se dispor de uma coluna de destilação em maior escala para processar todo este grande volume.

Nesta primeira destilação utilizando alambique, foi obtido um volume de mistura hidroalcoólica de 5,96 L, ou seja,  $(26 \text{ L} \times 0,091 (9\%) / 0,4 (40\%)) = 5,96$  L de mistura hidroalcoólica a 40 °GL (40% em volume de etanol), sendo assim uma mistura hidroalcoólica com 60% de água e 40% de álcool (etanol).

ii) A segunda destilação foi realizada no sistema fabricado, usando uma coluna de destilação simples de vidro dimensionada para este fim, em que se extraiu o destilado (álcool hidratado a 95 °GL), ou seja, álcool com 95% de etanol e 5% de água, obtendo-se assim, um volume de etanol da ordem de  $5,96 \text{ L} \times 0,4 \times 100/95 = 2,50$  L de etanol a 95° GL, sendo o fator  $100/95 = 1,052$  para corrigir a quantidade de água (5%) contida no álcool hidratado. Ressalta-se que, este valor foi obtido em laboratório a uma temperatura

de 32 °C, superior à que é praticada na usina. Assim, tem-se os seguintes cálculos para °INPM:

$2375 \text{ mL de etanol} \times 0,789 \text{ g/mL} + 125 \text{ mL} = 1998,88 \text{ mL} = 1873,88/1998,88 = 0,94^\circ$   
INPM.

Logo, comparando-se a mesma faixa de temperatura encontrada no valor de alcoolometria (ANEXO III), tem-se:

97,46 °GL ..... 96 °INPM

95 °GL .....X, logo:

$X = (95 \times 96) / 97,46 = 93,57 \cong 94^\circ \text{INPM}$  (álcool hidratado de algaroba).

iii) A terceira destilação foi realizada no sistema fabricado, sendo desta vez utilizado a coluna fracionada acoplada e recheada com peneira molecular comercial (zeólita), para se conseguir obter o álcool com alta concentração alcoólica. O objetivo de se usar a peneira molecular é se obter o álcool com aproximadamente 100 °GL, ou seja, 99,9% de álcool + 0,1% de água.

Ressalta-se que, o etanol de algaroba extraído (destilado) na coluna fracionada com recheio de zeólitas apresentou aproximadamente 100° GL a 32 °C. Desta maneira, foi necessário valer-se da Tabela Alcoolométrica (ANEXO IV), para realização do cálculo descrito a seguir.

Dado que, segundo a Tabela Alcoolométrica tem-se que 97,46 °GL corresponde a 96° INPM, então para 100 °GL obtido em laboratório, tem-se por regra de três: 98,5° INPM.

Esta regra de três justifica-se pelo fato da diferença entre os respectivos valores serem muito próximos. Assim, sendo a temperatura uma variável preponderante para esta análise, então, levando-se em comparação o resultado obtido na Usina JB e o valor convertido por meio da Tabela Alcoolométrica, justifica-se, uma vez que na indústria a temperatura usual praticada é de 20 °C.

Portanto, se a graduação alcoólica em °GL do álcool (etanol) após passagem por peneira molecular foi de 100 °GL, conforme determinação por alcoômetro GAY LUSSAC e 98,5° INPM conforme interpolação com valores encontrados na Tabela de Alcoolometria, concluiu-se que, o planejamento do sistema fabricado foi bem-sucedido para o fim de obter etanol anidro de vagens da algarobeira, e, desta maneira, o produto obtido apresentou característica para produção de biodiesel.

Ademais, pode afirmar que o álcool anidro obtido ineditamente de vagens da algarobeira é um álcool absolutamente orgânico, sendo então este produto ambientalmente limpo e benéfico, pois não foi utilizado nenhum produto adicional para a não formação de espuma e nem para acelerar o seu processo fermentativo.

Outrossim, na finalidade de melhor visualização, os resultados obtidos na primeira etapa do trabalho foram compilados na Tabela 2.

**Tabela 2.** Resultados das caracterizações dos álcoois de cana-de-açúcar e de vagens de algaroba produzidos no sistema de destilação adaptado especialmente para este fim.

Propriedades Químicas	Álcool da Cana-de-açúcar		Álcool da Algaroba	
	Hidratado	Anidro	Hidratado	Anidro
<b>Teor alcóolico</b> °GL (% v\v)	95,00	97,47	95,00	100,00
<b>Teor alcóolico</b> °INPM (% m\m)	94,00	96,01	**94,00	**98,5
<b>pH</b>	-	7,67	6,66	6,05
<b>Condutividade</b> $\mu\text{S/m}$	-	431	82,9	421
<b>Acidez</b> mg/mL	-	2,16	1,68	2,76
<b>Ésteres</b> (acetato de etila) mg/100mL	-	-	19,000	-
<b>Aldeído</b> (acetaldeído) mg/100mL	-	-	31,565	-
<b>Álcoois superiores</b> mg/100mL	-	-	515,073	-
<b>Metanol</b> mg/100mL	-	-	151,555	-
<b>Furfural</b> mg/100mL	-	-	730,115	-
<b>Densidade a 20°C</b> $\text{g/cm}^3$	-	0,8012	0,8250	0,8038

\*Art. 2º da Resolução ANP nº 764, de 20 de dezembro de 2018.

\*\*Valores corrigidos de acordo com a Tabela de Alcoometria.

**Fonte:** Autor, 2022.

Dos resultados obtidos, especialmente em relação ao álcool hidratado e anidro de vagens da algarobeira, tem-se que estão dentro dos limites estabelecidos e regulamentados. Exceção dada ao álcool hidratado da algaroba, que na cromatografia

gasosa, em relação ao teor de álcoois superiores (515,073 mg/100mL) foi identificado um valor acima do recomendado pela ANP (máx até 500 mg/L).

Em todo caso, dos resultados alcançados, pode-se dizer que os objetivos propostos foram bem-sucedidos, visto que o álcool anidro de vagens de algaroba obtido é um produto absolutamente orgânico, além disto, o sistema de destilação fabricado se mostrou eficiente para se proceder com a escalabilidade na extração de álcoois com estas características desejadas.

Para fins de comparação, na Tabela 3 estão compiladas as especificações normativas que foram procedidas para as análises dos álcoois, segundo o Art. 2º da Resolução ANP nº 764, de 20 de dezembro de 2018.

**Tabela 3.** Especificação de qualidade do etanol anidro e hidratado de referência (EAR e (EHR).

PROPRIEDADES QUÍMICAS	UNIDADE	VALOR NORMATIVO*		NORMA
		Anidro	Hidratado	
Teor alcoólico	°INPM (% m\m)	99,3	92,5 - 94,6	NBR 5992 NBR 15639
Teor de etanol	°GL (% v\v)	98,0	94,5	NBR 16041 ASTM D5501
pH	-	-	6 - 8	NBR 10891
Cor	visual	incolor	incolor	-
Aspecto	visual	límpido	límpido	-
Condutividade	µS/m	300	300	NBR 10547 ISO 17308
Acidez	mg/L	30	30	NBR 9866 ISO 17315
Ésteres	mg/L	100	100	ASTM D1617
Aldeídos (acetaldeído)	mg/L	60	60	ISO 13884
Álcoois superiores	mg/L		500	EN15721
Metanol	% v/v	0,5	0,5	NBR 16041 NBR 16943
Densidade a 20 °C	Kg/m <sup>3</sup>	791,5	805,2 - 811,2	NBR 5992 NBR 15639 ASTM D4052

\*Art. 2º da Resolução ANP nº 764, de 20 de dezembro de 2018.

**Fonte:** Autor, 2022, com dados da ANP.

## ETAPA II: BIODIESEL PRODUZIDO COM ÁLCOOL ANIDRO DE ALGAROBA:

### 4.7 TESTE CATALÍTICO USANDO O ÁLCOOL ANIDRO DA ALGAROBA

O álcool anidro de vagens de algaroba, obtido no sistema fabricado, o qual foi caracterizado conforme alguns dos principais critérios exigidos pela ANP, foi utilizado em teste catalítico de bancada para analisar a sua viabilidade como componente na mistura reacional para produção de biodiesel de óleo de soja.

O produto obtido da reação química de transesterificação, por rota homogênea, foi analisado por cromatografia gasosa, em que foi apresentado a marca de 100% de conversão em relação a ésteres etílicos, como ilustrado por meio do seu cromatograma (ANEXO V), e, com isto, revelando a excelente sinergia do álcool anidro obtido com os demais insumos usados para produzir biodiesel. Portanto, confirma-se e justifica-se a utilização bem-sucedida e inédita de álcool anidro de vagens da algarobeira como componente efetivo potencial na produção de biodiesel.

Levando em consideração o acompanhando das tendências emergentes de consumo, tem-se que os variados setores da indústria buscam continuamente recursos mais baratos e sustentáveis na produção de novos insumos e produtos. Desta maneira, as análises técnicas realizadas durante todo o trabalho revelam a viabilidade da utilização da biomassa estudada como fonte de energia competitiva. As informações fornecidas ajudarão as partes interessadas e aos formuladores de decisão que trabalham nos setores de energia sustentável e renovável a considerar uma possível produção em maior escala.

Quando comparado a estudos encontrados na literatura especializada (KHAN et al., 2022) os resultados obtidos neste presente trabalho sinalizam promissora aplicação industrial, pois, para além de ser uma alternativa inovadora, encontra-se difundido que, quando da inclusão de biodiesel na faixa de 10% a 80% e álcool em torno de 5% a 45% no diesel, estas misturas são alternativas promissoras para atender a demanda de combustível e, simultaneamente, atender às preocupações ambientais presentes e futuras.

E também porque, de acordo com Erdiwansyah et al. (2019), os combustíveis convencionais à base de hidrocarbonetos são considerados como de esgotamento rápido e prejudiciais ao meio ambiente, pois liberam produtos químicos venenosos para a atmosfera. Sendo assim, álcoois e biodiesel são os combustíveis alternativos mais promissores amplamente pesquisados devido à sua disponibilidade, facilidade de produção e benefícios ambientais. O uso desses combustíveis alternativos em motores

visa reduzir a poluição do ar e os custos de energia. Estes autores relataram o bom desempenho de motor e características de combustão usando combustíveis alternativos, como álcool e biodiesel, com efeitos considerados nas propriedades de emissões de NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> e HC.

## 5. CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos pelo desenvolvimento do trabalho proposto, pode-se concluir que:

- O álcool anidro obtido de vagens de algarobeira é um álcool totalmente orgânico, pois, por exemplo, não foi utilizado nenhum produto para diminuir a espuma da fermentação e nenhum produto para acelerar a fermentação, logo, sendo um álcool absolutamente orgânico;
- O sistema projetado de destilação fabricado foi eficiente na obtenção de álcool de vagens da algarobeira em sua forma hidratada ( $95^{\circ}\text{GL} \cong 94^{\circ}\text{INPM}$ ) e sua forma anidra ( $100^{\circ}\text{GL} \cong 98,5^{\circ}\text{INPM}$ ), sendo a temperatura de trabalho de  $32^{\circ}\text{C}$ ;
- O volume de caldo da algaroba foi satisfatório quando de sua extração (1:2, ou seja, 1 Kg de vagem / 2 Kg de água) a uma pressão de 15 toneladas;
- Foi satisfatório também o uso do fermento industrial, com o micro-organismo *Saccharomyces cerevisiae*, quando a fermentação ocorreu sob um teor final de sólidos solúveis de  $18^{\circ}\text{Brix}$ , gerando ao final do processo um teor alcoólico de  $9,1^{\circ}\text{GL}$ ;
- O melhor rendimento da destilação do anidro de algaroba foi de 46%;
- Os teores de acidez volátil, pH, condutividade e densidade a  $20^{\circ}\text{C}$  estão dentro dos limites padrões recomendados pela ANP e o aspecto do etanol anidro de algaroba obtido apresentou-se límpido e incolor;
- O álcool anidro de algaroba foi testado com sucesso como rota alcóolica na transesterificação etílica, em que foi obtido uma produção de 100% de biodiesel de óleo de soja;
- Portanto, conclui-se factualmente que o processo metodológico desenvolvido de forma inédita para o álcool anidro de vagens de algarobeira é técnico-eficiente e é passível de escalabilidade, o que representa possível aplicação industrial quando levado em consideração a eficiência do sistema de destilação projetado e fabricado;
- O etanol anidro obtido é eficiente na aplicação inédita para produção de biodiesel. Logo, acompanhando as tendências emergentes de consumo, espera-se contribuir na busca por recursos mais baratos, ecológicos e sustentáveis que fomentem a descarbonização.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Otimizar as etapas de extração do caldo das vagens da algarobeira e de sua destilação;
- Destinar o bagaço obtido da extração do caldo das vagens como matéria-prima para produção de bioprodutos sustentáveis e/ou energias renováveis e para produzir etanol hidratado e anidro de segunda geração;
- Testar fontes alternativas de peneiras moleculares;
- Caracterizar o biodiesel obtido conforme outros padrões de qualidade regulamentados para a sua comercialização;
- Realizar os testes para produção de biodiesel em reator de maior escala;
- Testar o etanol anidro das vagens da algaroba na conversão de outras fontes de oleaginosas e gorduras na produção de biodiesel;
- Realizar testes catalíticos por rota heterogênea usando o etanol anidro obtido das vagens da algaroba;
- Testar os álcoois obtidos (hidratado e anidro) no sistema fabricado em misturas binárias e ternárias com outros combustíveis, como gasolina e diesel;
- Produzir álcool neutro e álcool gel de vagens de algaroba;
- Testar os álcoois obtidos (hidratado e anidro) no sistema fabricado em outras áreas comumente usadas (saneantes, farmacêuticos, cosméticos, alimentícios, indústria química e combustíveis);
- Testar no sistema fabricado o caldo extraído de outras matérias-primas que apresentam alto teor de açúcares visando produzir etanol;
- Realizar um planejamento experimental para validar as melhores condições das bioconversões em álcoois.

## REFERÊNCIAS

- ABBASI, T.; ABBASI, S. A. Biomass energy and the environmental impacts associated with its production and utilization. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, Issue 3, p. 919-937, 2010.
- ADENUGA, A. A.; IDOWU, O. O.; OYEKUNLE, J. A. O. **Renewable Energy**, v. 145, p. 2530-2537, 2020.
- ALMEIDA, R. R. "Biocombustíveis no Brasil". **Brasil Escola**. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/geografia/biocombustiveis-no-brasil.htm>. Acesso em 06 de fevereiro de 2021.
- ALVES, A. C. M.; SANTOS, J. C. M.; SILVA, J. N. Estudo do Monitoramento das Aplicações Tecnológicas da *prosopis juliflora* (Algaroba). **Cadernos de Prospecção** – Salvador, v. 12, n. 2, p. 374-387, 2019.
- ALVES, A. C. M.; SANTOS, J. C. M.; SILVA, J. N. Estudo do Monitoramento das Aplicações Tecnológicas da *Prosopis Juliflora* (Algaroba). **Cadernos de Prospecção** – Salvador, v. 12, n. 2, p. 374-387, 2019.
- ANDRADE, L. A. Pesquisadores paraibanos desenvolvem biocombustível da algaroba, 2007. Disponível em: [http://www.labjor.unicamp.br/midiaciencia/article.php3?id\\_article=422](http://www.labjor.unicamp.br/midiaciencia/article.php3?id_article=422). Acesso em: jan.2021.
- ARRUDA, D. T. **Viabilidade técnico-econômica da produção de etanol e subproduto (Ração) a partir de algaroba no semiárido da Paraíba**. 98f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 1984.
- ASOKAN, M. A.; SENTHUR, S.; PRABU; BADE, P. K. K.; SRI, V. M. N.; GUTTA, S. G. Performance, combustion and emission characteristics of *juliflora* biodiesel fuelled DI diesel engine. **Energy**, v. 173, p. 883-892, 2019.
- AZEVEDO, C. F. Algarobeira na alimentação animal e humana. In: Simpósio Brasileiro sobre Algaroba. Natal. Anais. Natal: EMPARN, 1986. p. 283-299.
- BAIÃO, V. B. et al. Características químicas das sementes de algaroba (*Prosopis juliflora* (SW) D. C.) e composição aminoácida do concentrado e de um isolado protéico. **Arquivos de biologia e tecnologia**. Mossoró/RN, v. 30, n. 2, p. 275-286, 1987.
- BARBOSA, R. A. **Prospecção fotoquímica e efeito de extratos da folha da algarobeira (*Prosopis juliflora* (Sw)) no controle do *Colletotrichum gloeosporioides* (Penz.) Penz & Sacc do cajueiro (*Anacardium occidentale* L.)**. 72f.: il. Monografia de Química Orgânica/UFRPE, Serra Talhada, 2019.
- BARROS, N. A. T. **Substituição do melão de cana-de-açúcar pelo fruto da algarobeira na alimentação de carneiros**. 81f. Dissertação (Mestrado em Produção Animal) Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Paraíba, Areia, 1981.

BARBOSA, H. P. **Valor nutritivo da algaroba (*Prosopis juliflora* (Sw) DC), através de ensaios de digestibilidade em carneiros**. 48f. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Imprensa Universitária. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1977.

BARBOSA, H. P.; CANO, J. G.; MOROZ, J. F. G. Composição química e digestibilidade in vitro das vagens e folha de algarobeira (*Prosopis juliflora* (Sw D.C.)). **Agropecuária Técnica**, Universidade Federal da Paraíba. 5 n. 1/2, p. 44-52, 1984.

BARROS, N. A. T. **Substituição do melaço de cana-de-açúcar pelo fruto da algarobeira na alimentação de carneiros**. 81f. Dissertação (Mestrado em Produção Animal) Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Paraíba, Areia, 1981.

BECKER, R.; GROSJEAN, O. K. A compositional study of pods of two varieties of mesquite (*P. glandulosa*; *P. velutina*). **Journal Agriculture Food chemistry**, v. 28, p. 22-25, 1980.

BELMONT, A. R. B.; NEVES, A. M. B.; NOBRE, F. V.; FONSECA, J. R. R.; MEDEIROS, M. C.; FILHO, V. B. (Orgs.). **Algaroba na alimentação animal – Natal: SEBRAE/RN**, 2016.

BENATTI, G. S. D. S.; BUAINAIN, A. M.; CAVALCANTE FILHO, P. G. A cadeia produtiva agroindustrial do biodiesel no Brasil. DRd - **Desenvolvimento Regional em Debate**, v. 9, p. 772-799, 2019.

BORGES, I. F. **Obtenção e caracterização do melado de algaroba (*Prosopis juliflora* (Sw) D.C.) E sua utilização em uma formulação alimentícia**. 83f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2004.

BRAGA, R. **Plantas do Nordeste, especialmente do Ceará**. 2. ed. Fortaleza: [s.n], 1960. 540p.

BURKART, A. A. Monograph of the genus *Prosopis* (Leguminosae Subfam. Mimosideae). **Journal of the Arnold Arboretum**, v. 57, n. 3, p. 219-249, 1976.

BURNETT, A. Desenvolvimento Regional: O Caso da Tecnologia da Algaroba no Semiárido. **Revista Ambivalências**, v. 6, n. 11, p. 268-291, 2018.

BURNNET, A. A ‘saga’ político-ecológica da algaroba no semiárido brasileiro. **Journal of Social Studies**, Erzurum, v. 19, n. 38, p. 148-175, 2017.

CAMPELO, C. R. Algaroba planta mágica. Recife: Edições Edificantes. 84p. LARRALDE, J. Y.; MARTINEZ, J. A. A. Reappraisal of the nutritional utilization of legumes. **Revista Española de Fisiología**, n. 45, 1989.

CASTRO, H. F. Indústria Alcooleira. **Processos Químicos Industriais II**: Apostila 2, Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de Lorena. [Lorena], 2013.

CERQUEIRA, F. W. "Etanol". **Brasil Escola**. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/etanol.htm>. Acesso em 06 de fevereiro de 2021.

CASTAÑEDA-AYARZA, J. A.; GODOI, B. A. Macro-environmental influence on the development of Brazilian fuel ethanol between 1975 and 2019. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 137, 110457, 2021.

CAVALCANTE, G. M.; MOREIRA, A. F. C.; VASCONCELOS, S. D. Potencialidade inseticida de extratos aquosos de essências florestais sobre mosca-branca. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s. l.], v. 41, n. 1, p. 9-14, 2006.

COSTA, A. C. F.; CAVALCANTE, G. M. Atividade antitumoral in vitro de *prosopis juliflora* frente a células de câncer de mama e câncer de ovário. **Acta Biomédica Brasiliensia**, [s.l.], v. 9, n. 1, p.130-136, 2018.

CUNHA, L. H.; SILVA, R. A. G. A trajetória da algaroba no semiárido nordestino: dilemas políticos e científicos. **Raízes**, v. 32, n. 1, p.72-92, 2012.

CUNHA, R. A. **Avaliação da atividade antifúngica dos extratos hidroalcoólicos da folha e casca de *Prosopis juliflora* (Sw) S.C.** sobre espécies de *Cândida* de interesse médico. 25f. TCC (Graduação) - Curso de Farmácia, Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2012.

DAMASCENO, G. A. B.; FERRARI, M.; GIORDANI, R. B. *Prosopis juliflora* (SW) DC, an invasive specie at the Brazilian Caatinga: phytochemical, pharmacological, toxicological and technological overview. **Phytochemistry Reviews**, v. 16, n. 2, p. 309-331, 2017.

DANTAS, J.; LEAL, E.; CORNEJO, D. R.; KIMINAMI, R. H. G. A.; COSTA, A. C. F. M. Biodiesel production evaluating the use and reuse of magnetic nanocatalysts  $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$  synthesized in pilot-scale. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 13, n. 1, p. 3026-3042, 2020.

DANTAS, J.; LEAL, E.; MAPOSSA, A.; CORNEJO, D.; COSTA, A. Magnetic nanocatalysts of  $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$  doped with Cu and performance evaluation in transesterification reaction for biodiesel production. **Fuel**, v. 191, p. 463-471, 2017.

DANTAS, J.; LEAL, E.; MAPOSSA, A. B.; PONTES, J. R. M.; FREITAS, N. L.; FERNANDES, P. C. R.; COSTA, A. C. F. M. Biodiesel production on bench scale from different sources of waste oils by using NiZn magnetic heterogeneous nanocatalyst. **International Journal of Energy Research**, v. 45, ed. 7, p. 10924-10945, 2021. <https://doi.org/10.1002/er.6577>.

DANTAS, J.; SANTOS, J. R. D.; CUNHA, R. B. L.; KIMINAMI, R. H. G. A.; COSTA, A. C. F. M. Use of Ni-Zn ferrites doped with Cu as catalyst in the transesterification of soybean oil to methyl esters. **Materials Research**, v. 16, p. 625-627, 2013.

DELL VALLE, F. R. Preparation of mesquite (*Prosopis ssp.*) pod Enlanced Protein Produced Fiber Fraction. [s.l.: s.n.], 1985.

DENNY, D. M. T. Chapter 13 – Competitive renewables as the key to energy transition—RenovaBio: the Brazilian biofuel regulation. **The Regulation and Policy of Latin American Energy Transitions**, p. 223-242, 2020.

EIA. **Agência Internacional de Energia**, 2019. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/sala-de-imprensa/noticias/Documents/12%20April%20\\_%20EPE%20WEO%20launch\\_Clean%20\(002\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/sala-de-imprensa/noticias/Documents/12%20April%20_%20EPE%20WEO%20launch_Clean%20(002).pdf). Acesso em: fev. 2021.

EPE. Balanço Energético Nacional. **Empresa de Pesquisa Energética**, 2019. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>>. Acesso em: 27 de nov. de 2019.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Plano Decenal de Expansão de Energia 2026. Demanda de Energia. **EPE**, cap. 2, p. 29-49, 2016.

ERDIWANSYAH; MAMAT, R.; SANI, M. S. M.; SUDHAKAR, K.; KADAROHMAN, A.; SARDJONO, R.E. An overview of Higher alcohol and biodiesel as alternative fuels in engines. **Energy Reports**, v. 5, p. 467-479, 2019.

FARRELL, A. E.; PLEVIN, R. J.; TURNER, B. T.; JONES, A. D.; O'HARE, M.; KAMMEN, D. M. Ethanol Can Contribute to Energy and Environmental Goals. **Science**, v. 311, p. 506-508, n. 5760, 2006.

FELKER, P.; BANDURSKI, R. Protein and aminoacid of tice legume seeds. **Journal Science Food Agriculture**. v. 28 p. 791, 1977.

FIGGE, F.; HAHN, T. Business - and environment-related drivers of firms' return on natural resources: A configurational approach. **Long Range Planning**, 102066, 2020.

FIGUEIREDO, A. A. **Formulação, composição e características da bebida preparada com extrato aquoso (polpa) das vagens de algarobeira (*Prosopis juliflora*)**, Ceará: [s.n.], 2000.

FIGUEIREDO, A. A. **Lebensmittelchemische relevante Inhaltstoffe der shoten der Algarobeira (*Prosopis juliflora* D.C.) [Relevante chemical foodstuffs from mesquite (*Prosopis juliflora* D.C.) pods]**. 106f. Thesis. (Philosophy Doctor), University of Wurzburg, Bavária. 1975.

FOGAÇA, J. R. V. "Energia limpa". **Brasil Escola**. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/quimica/energia-limpa.htm>. Acesso em 06 de fevereiro de 2021.

FURTADO, F. Towards road freight decarbonisation: trends, measures and policies. **International Transport Forum Paris**. 91p, 2018. Disponível em: <https://www.itf-oecd.org/towards-road-freight-decarbonisation>. Acesso em: fev. 2021.

GABRIEL, K.; SANTOS, M. M.; ADRIANO, J.; MARQUES, J.; LEMOS, M.; MUACHIA, A; BARROS, A. A. C. Anhydrous bio-ethanol produced from *Elaeis Guineensis* palm wine for use as a biodiesel feedstock. **South African Journal of Chemical Engineering**, v. 29, p. 10-16, 2019.

GALVÃO, A. P. M.; LIMA, P. C. F. Considerações sobre pesquisa com algaroba desenvolvidas pelo programa nacional de pesquisa florestal do Nordeste. **Revista da Associação Brasileira da Algaroba**. Mossoró, v. 1, n. 1, p. 111, 1987.

GIL, I. Algarrobo: El arbol de la vida. **Escuela IPEM**. Córdoba, Argentina. Disponível em: < <http://www.oni.escuelas.edu.ar/olimpi98/Algarrobo/p114ac.htm>>. Acesso em: ag. 2020.

GODBNEY, W T. Chapter 16 - Fermentation, beer, and biofuels. **Biotechnology and its Applications** (Second Edition). Using Cells to Change the World, p. 369-387, 2022.

GOLDEMBERG, J.; COELHO, S. T.; NASTARI, P. M.; LUCON, O. Ethanol learning curve — the Brazilian experience. **Biomass and Bioenergy**, v. 26, n. 3, p. 301-304. 2004.

GOMES, R. P. A. Algarobeira. **Ministério da Agricultura**, Rio de Janeiro: Serviço de Informação Agrícola, 1961. 49p.

GOMES, R. P. **Forragens fartas na seca**. 2ª ed., São Paulo: Editora Nobel, 1973. 236f. GORGATTI NETTO, A. **Considerações sobre a algaroba (*Prosopis juliflora* (Sw) D.C.)**. Campinas: [s.n.], 198. p.1-2. (Coleção ITAL).

GOUVEIA, A. F. G. H.; FIGUEIREDO, A. A. **Obtenção e avaliação sensorial de produtos obtidos a partir da polpa da vagem de algaroba (*Prosopis juliflora* D.C.)**. [s.l.: s.n.], 2000.

GREBNER, D. L.; BETTINGER, P.; SIRY, J. P.; BOSTON, K. Chapter 4 - Forest products. **Introduction to Forestry and Natural Resources** (Second Edition), p. 101-129, 2022.

GROSSI, J. L. S. **Formulation, composition and characteristics of the jelly made of mesquite (*Prosopis juliflora* D.C.)** pods. 111f. M. S. Thesis - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1993.

GULDHE, A.; SINGH, P.; ANSARI, F. A.; SINGH, B.; BUX, F. Biodiesel synthesis from microalgal lipids using tungstated zirconia as a heterogeneous acid catalyst and its comparison with homogeneous acid and enzyme catalysts. **Fuel**, v. 187, p. 180-188, 2017.

GUPTA, R.; SHARMA, K. K.; KUHAD, R. C. Separate hydrolysis and fermentation (SHF) of *Prosopis juliflora*, a woody substrate, for the production of cellulosic ethanol by *Saccharomyces cerevisiae* and *Pichia stipitis*-NCIM 3498. **Bioresource Technology**, v. 100, Issue 3, p. 1214-1220, 2009.

HABIT, M. A ed. The currint State of Knowdelge on *prosopis tamarugo*. Rome: **FAO**, 1985. 464p.

JAHIRUL, M. I.; RASUL, M.G.; BROWN, R.J.; SENADEERA, W.; HOSEN, M.A.; HAQUE, R.; SAHA, S.C.; MAHLIA, T. M. I. Investigation of correlation between chemical composition and properties of biodiesel using principal component analysis (PCA) and artificial neural network (ANN). **Renewable Energy**, v. 168, p. 632-646, 2021.

JARDINE, J. G.; BARROS, T. D. **EMBRAPA**. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/agroenergia/arvore/CONT000fb123vn102wx5eo0sawqe3c0lp4xz.html>. Acesso em fev. 2021.

KANTIBHAI, P. P. **Fuel grade bioethanol production form *prosopis* sp. and *cassia* sp. Pod.** IN2009MU01913. Acesso em 4 jun. 2021, 2004.

KHAN, M.; SHARMA, R. P.; KADIAN, A. K.; HASNAIN, S. M. M. An assessment of alcohol inclusion in various combinations of biodiesel-diesel on the performance and exhaust emission of modern-day compression ignition engines – A review. **Materials Science for Energy Technologies**, v. 5, p. 81-98, 2022.

KUMAR, S. S.; JAYAMUTHUNAGAI, J.; BASKAR, G.; PRAVEENKUMAR, R.; SELVAKUMARI, I. A. E.; BHARATHIRAJA, B. Bioethanol production from woody stem *Prosopis juliflora* using thermo tolerant yeast *Kluyveromyces marxianus* and its kinetics studies. **Bioresource Technology**, v. 293, 122060, 2019.

KUMAR, S.; SINGH, N.; PRASAD, R. Anhydrous ethanol: A renewable source of energy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, Issue 7, p. 1830-1844, 2010.

LEAL, E.; DANTAS, J.; MARÇAL, V. S.; PONTES, J. R. M.; FERNANDES, P. C. R.; COSTA, A. C. F. M. Esterificação homogênea de óleo de fritura visando a produção de biodiesel e bioquerosene de aviação. Cap. 21: DOI: 10.36229/978-85-7042-235-4.CAP.21. Engenharia no Século XXI, v. 13, **Poisson**, Belo Horizonte, 2019. **ISBN**: 978-85-7042-235-4.

LIMA, D. L. SILVA, S. S.; XAVIER, T. S.; LIMA, V. C.; LYRA, L. H. B. A questão do semiárido e o bioma caatinga. *In*: Sustentabilidade, recursos naturais e apropriação do espaço, Viçosa. *In*: **Simpósio Brasileiro de Geografia Aplicada**, 2009.

LIMA, P. C. F. **Expansão desordenada da algaroba compromete o meio ambiente nordestino**. Disponível em: < <http://www.ufpb.br> >. Acesso em: 23 ago. 2021.

MACHADO, R. L. P. **Obtenção do extrato aquoso de algaroba (*Prosopis juliflora*) (DC), para elaboração de bebidas: composição e características**. 49f. Dissertação Ciência e Tecnologia de Alimentos. Universidade Rural do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1994.

MAFIOLETTI, R.; MARTINS, G.; TURRA, F. Produção de etanol nos Estados Unidos da América. **Revista de Política Agrícola**, v. 20, n. 3, 2011. Disponível em: <<https://seer.sede.embrapa.br/index.php/RPA/article/view/41>>. Acesso em: fev. 2021.

MAMTANI, K.; SHAHBAZ, K.; FARID, M. F. Glycerolysis of free fatty acids: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 137, 110501, 2021.

MATUGI, K. **Produção de etanol anidro por destilação extrativa utilizando soluções salinas e glicerol**. 2013. 186 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia da Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2013.

MME. Ministério de Minas e Energia. Uso de fontes renováveis no Brasil é três vezes maior que o mundial. Resenha Energética Brasileira de 2020. Balanço Energético Nacional do ano base 2019 (ed. 2020). **EPE/MME**, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2020/07/uso-de-fontes-renovaveis-no-brasil-e-tres-vezes-maior-que-o-mundial>. Acesso em: fev. 2021.

MEIRA, M. R.; SANTOS, L. H. T.; ANJOS, Q. Q. A.; SANTOS, B. E. F.; GUIMARÃES, L. S.; SILVA, C. B. M. C. Caracterização molecular de *Prosopis juliflora* (Sw.) DC. por meio de marcadores moleculares e índices de similaridade genética. **Biotemas**, v. 33, n. 1, p. 1-9, 2020.

MENDES, B. V. Discurso proferido na sessão solene de abertura do I Simpósio Brasileiro Sobre Algaroba proferida pelo Prof. Benedito Vasconcelos Mendes. *In: I Simpósio sobre Algaroba*. Anais. Natal: EMPARN. 1982. p. 09-13.

MOHAMMED, M. K.; BALLA, H. B.; AL-DULAIMI, Z. M. H.; KAREEM, Z. S.; AL-ZUHAIRY, M. S. Effect of Ethanol-Gasoline Blends on SI Engine Performance and Emissions. **Case Studies in Thermal Engineering**, 100891, 2021.

MORIARTY, P.; HONNERY, D. Can renewable energy power the future? **Energy Policy**, v. 93, p. 3-7, 2016.

MOURA; I. A. A.; DANTAS, J.; CAVALCANTI, I. L. R.; LIMA, M. M.; SILVA, M. C. D. Biomassa proveniente da casca da banana *Musa sapientum*: pré-tratamento e hidrólise ácida para análise da viabilidade na produção de bioetanol. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 1, p. 1975-1987, 2020. ISSN 2525-8761.

NASEERUDDIN, S.; DESAI, S.; RAO, L.V. Ethanol production from lignocellulosic substrate *Prosopis juliflora*. **Renewable Energy**, v. 103, p. 701-707, 2017.

NEGREIROS, A. N. M. et al. Suplementação aminoacídica da farinha de algaroba (*Prosopis juliflora* (Sw) D.C.). **Revista da Associação Brasileira da Algaroba**, Mossoró - RN, v. 1, n. 3, p. 181-2, 1987.

NETA, M.; DANTAS, M. **Avaliação *in vitro* do extrato salino bruto das folhas de *prosopis juliflora* sobre oviposição em fêmeas de *rhhipicephalus sanguineus* (Latreille, 1806) (Acari: Ixodidae)**. 32f.: il. Monografia (Graduação) - Curso de Biotecnologia - Universidade Federal Rural do Semiárido, 2019.

PAUL SIMONS. Perspectivas energéticas globais a longo prazo. World Energy Outlook 2018. **EPE**, Rio de Janeiro, 12 de abril de 2019.

PEGADO, C. M. A.; ANDRADE, L. A.; FÉLIX, L. P.; PEREIRA, I. M. Efeitos da invasão biológica de algaroba - *Prosopis juliflora* (Sw.) DC. sobre a composição e a estrutura do estrato arbustivo-arbóreo da caatinga no Município de Monteiro, PB, Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, v. 20, n. 4, 2006.

PERKIS, D.; TYNER, W.; DALE, R. Economic analysis of a modified dry grind ethanol process with recycle of pretreated and enzymatically hydrolyzed distillers' grains. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 12, p. 5243-5249. 2008.

PIMENTEL, D.; PATZEK, T. W. Ethanol Production Using Corn, Switchgrass, and Wood; Biodiesel Production Using Soybean and Sunflower. **Natural Resources Research**, v. 14, n. 1, p. 65-76. 2005.

QUEIROZ, V. S. **Fabricação de cachaça e aguardente em nível laboratorial e microindústria**. João Pessoa: MC2 Gráfica e Editora Eireli, 2019.

RAMOS, L. P.; KOTHE, V.; CÉSAR-OLIVEIRA, M.; MUNIZ-WYPYCH, A.; NAKAGAKI, S.; KRIEGER, N.; WYPYCH, F.; CORDEIRO, C. Biodiesel: Matérias-primas, tecnologias de produção e propriedades combustíveis. **Revista Virtual de Química**, v. 9, n. 1, p. 317-369, 2017.

RANGA RAO, N. S.; REDDY, M. R. Utilization of *Prosopis juliflora* pods in the concentrates feeds of cattle and sheep. **Indian Journal of Animal Sciences**, v. 53, n. 4, p. 367-372, 1983.

RANGEL, M. S. A. **Moringa oleifera; uma planta de uso múltiplo**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros. 1999. 41p. (Embrapa-CPATC. Circular Técnica, 9).

RFA. Ethanol Industry Outlook 2010. Climate of Opportunity. (**Renewable Fuels Association**): Disponível em: <http://www.ethanolrfa.org/industry/statistics>. Acesso em: jan. 2021.

RIBASKI, J.; DRUMOND, M. A.; OLIVEIRA, V. R.; NASCIMENTO, C. E. S. Algaroba (*Prosopis juliflora*): Árvore de Uso Múltiplo para a Região Semiárida Brasileira. In: EMBRAPA. **Comunicado Técnico**. 240. ed. Colombo. 2009.

ROSA, A. V.; ORDÓÑEZ, J. C. Chapter 1 - Introduction. **Fundamentals of Renewable Energy Processes** (Fourth edition), p. 1-46, 2022a.

ROSA, A. V.; ORDÓÑEZ, J. C. Chapter 13 - Biomass. **Fundamentals of Renewable Energy Processes** (Fourth edition), p. 577-628, 2022b.

ROZINA; AHMAD, M.; ZAFAR, M.; ALI, N.; LU, H. Biodiesel synthesis from *Saussurea heteromalla* (D. Don) Hand-Mazz integrating ethanol production using biorefinery approach. **Energy**, v. 141, p. 1810-1818, 2017.

SANTOS, F.; EICHLER, P.; QUEIROZ, J. H.; GOMES, F. Chapter 11 - Production of second-generation ethanol from sugarcane. **Sugarcane Biorefinery, Technology and Perspectives**, p. 195-228, 2020.

SIDDIQUE, N.; SUZUE, M.; KATO, M.; HIROMORI, K.; SHIBASAKI-KITAKAWA, N. Process optimization for continuous production of sustainable biodiesel from completely non-edible biomass, lignocellulosic hydrous ethanol and waste fatty acids. **Fuel**, v. 289, 119884, 2021.

SILVA, C. G. **Otimização do processo de produção da aguardente de algaroba e aproveitamento dos resíduos sólidos em produtos alimentares**. 2009. Tese de doutorado em Engenharia de Processos—UFCG, 2009.

SIVARATHNAKUMAR, S.; JAYAMUTHUNAGAI, J.; BASKAR, G.; PRAVEENKUMAR, R.; BHARATHIRAJA, B. Bioethanol production from woody stem *Prosopis juliflora* using thermo tolerant yeast *Kluyveromyces marxianus* and its kinetics studies. **Bioresource Technology**, v. 293, n. 122060, 2019.

SILVA, S.; AZEVEDO, A. R. **Algarobeira perguntas e respostas: BN/UFC**. In: I Congresso Nordestino de Produção de Animal, 1998, Fortaleza. Anais. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 1998. p. 103.

SILVA, A. M. A. **Valor nutritivo da algaroba (*Prosopis juliflora* S. W. D.C.), na alimentação de suínos**. 46f. Dissertação: Centro de Ciências Agrárias Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1986.

SILVA, C. G. **Otimização das etapas de produção da aguardente de algaroba (*Prosopis juliflora* Sw DC) e aproveitamento dos resíduos resultantes em produtos alimentares**. 2009. Tese de Doutorado em Engenharia de Processo. Universidade Federal de Campina Grande – Campina Grande, PB.

SILVA, J. I. ***Prosopis juliflora* as an Alternative Source of Food in the Worlds Semiarid Areas**. In: FELKER, P.; MOSS, J. *Prosopis*: semiarid fuelwood and forage tree building consensus for the disenfranchised. Washington: D.C, 1996.

SILVA, S. **Receituário com vagens de algarobeira**. Brasília/DF: [s.n.], 1999, 28p.

SILVA, C. G. **Algarobeira: A maravilhosa planta de rápido crescimento, elevada resistência a seca**. Laboratório de Análises e Pesquisas de Bebidas Alcoólicas (LBA). Universidade Federal da Paraíba (UFPB), 2019. Disponível em: <http://www.ct.ufpb.br/lba/contents/menu/pesquisas/a-algaroba>. Acesso em: fev. 2021.

SILVA, C. G. **Sistema micro industrial para obtenção de aguardente bidestilada envelhecida em barris de carvalho a partir da vagem de algaroba**. BR0206189A. Acesso 10 ago., 2021, 2004.

SILVA, D. P. D.; SOUSA, J. P.; CAVALCANTI, R. M. F.; CLEMENTINO, L. C.; SOUSA, B. R. S.; BRITO, A. F. S.; QUEIROZ, J. C. F. Produção artesanal de aguardente a partir de algaroba (*Prosopis juliflora*) e sua aceitação por consumidores. **Revista Saúde & Ciência Online**, [S.l.], v. 3, n. 3, p. 329-339, 2014.

SOTO, F.; MARQUES, G.; SOTO-IZQUIERDO, L.; TORRES-JIMÉNEZ, E.; QUAGLIA, S.; GUERRERO-VILLAR, F.; DORADO-VICENTE, R.; ABDALLA, J. Performance and regulated emissions of a medium-duty diesel engine fueled with biofuels from sugarcane over the European steady cycle (ESC). **Fuel**, v. 292, 120326, 2021.

SOUZA, L. A. "Produção de Etanol ". **Brasil Escola**. Disponível em: <https://brasilestela.uol.com.br/quimica/producao-etanol.htm>. Acesso em 06 de fevereiro de 2021.

SRIVASTAVA, R. K.; SHETTI, N. P.; REDDY, K. R.; KWON, E. E.; NADAGOUDA, M. N.; AMINABHAVI, T. M. Biomass utilization and production of biofuels from carbon neutral materials. **Environmental Pollution**, v. 276, 116731, 2021.

STANČIN, H.; MIKULČIĆ, H.; WANG, X.; DUIĆ, N. A review on alternative fuels in future energy system. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 128 p. 109927, 2020.

SUASSUNA, J. Algarobeira – produção e produtividade. Recife, 2007, 6p. Boletim da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – **Embrapa**, 2007.

TABOSA I. M.; QUINTANS-JÚNIOR, L. J.; PAMPLONA, F. V.; ALMEIDA, R. N.; CUNHA E.V.L.; SILVA, M. S.; SOUZA, J. C. A.; BARBOSA FILHO, J. M. Isolamento biomonitorado de alcalóides tóxicos de *Prosopis juliflora* (algaroba). **Revista Brasileira de Farmacognosia**, v. 9, n. 10, p. 11-22, 2000.

TAYLOR, M. P.; ELEY, K. L.; MARTIN, S.; TUFFIN, M. I.; BURTON, S. G.; COWAN, D. A. Thermophilic ethanologeneses: future prospects for second-generation bioethanol production. **Trends in biotechnology**, v. 27, n. 7, p. 398-405, 2009.

VALLE, F. R.; ESCOBEDO, M.; MUÑOZ, M.; ORTEGA, R.; BOURGES, H. Chemical and nutritional studies on mesquite beans (*Prosopis juliflora*). **Journal of Food Science**, v. 48, p. 914-919, 1983.

ZABOT, G. L.; ABAIDE, E. R.; TRES, M. V.; MAZUTTI, M. A. Chapter 3 - Subcritical Hydrolysis Contribution in the Holistic Biorefinery Concept: Obtaining Bioproducts and Biofuels From Renewable Natural Resources for a Novel Bioeconomy. *Advanced Bioprocessing for Alternative Fuels, Biobased Chemicals and Bioproducts. Technologies and Approaches for Scale-Up and Commercialization. Woodhead Publishing Series in Energy*, p. 35-57, 2019.

ZHANG, L.; BAI, W. Sustainability of crop-based biodiesel for transportation in China: Barrier analysis and life cycle ecological footprint calculations. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 164, 120526, 2021.

ZHOU, B.; HE, L.; ZHANG, S.; WANG, R.; ZHANG, L.; LI, M.; LIU, Y.; ZHANG, S.; WU, Y.; HAO, J. Variability of fuel consumption and CO<sub>2</sub> emissions of a gasoline passenger car under multiple in-laboratory and on-road testing conditions. **Journal of Environmental Sciences**, v. 125, p. 266-276, 2023.

## APÊNDICE A

Para a obtenção de uma solução hidroalcoólica composta por cabeça + coração + cauda (em que se é dividida a cachaça), tira-se do cálculo da soma deste volume de cachaça, o volume de vinho delevurado (vinho sem levedura) o qual, por sua vez, é obtido da fermentação do mosto do caldo de cana-de-açúcar e de vagens de algaroba, por exemplo.

$$\text{Fórmula: } V_c = [(V_{vd} \times \text{°GL}_{vd} \times F_d \times F_{cd}) - (V_{cb} + V_{cd}) \times F_r]$$

Em que:

$V_c$  = volume da cachaça em litro

$V_{vd}$  = volume do vinho delevurado

$\text{°GL}_{vd}$  = grau alcoólico do vinho delevurado

$F_d$  = fator que converte o volume de etanol do vinho delevurado em volume da própria cachaça:  $F_d = (100/\text{°GL da cachaça})$

$F_{cd}$  = fator que converte volume de cachaça em volume de destilado (cabeça + cachaça + cauda):  $F_{cd} = 1,25$

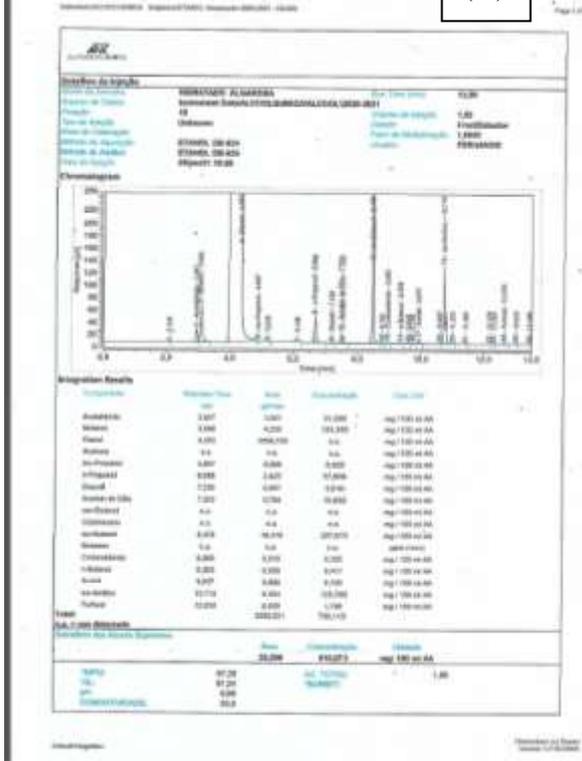
$(V_{cb} + V_{cd})$  = volume cabeça + volume cauda.

Conclusão: produz-se com um certo volume de vinho delevurado, um volume de cabeça, coração e cauda, a certo  $\text{°GL}$ .

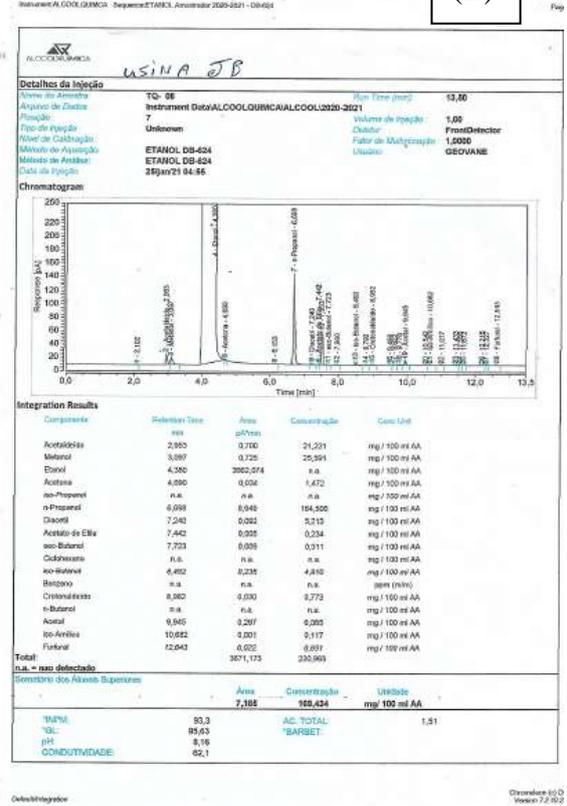
ANEXO I

Relatório do resultado da análise de cromatografia do álcool de algaroba (A – hidratado) e cana-de-açúcar (B – hidratado da usina) realizadas na indústria Usina JB.

(A)



(B)



**Detalhes da Injeção**

Nome da amostra: USINA JB

Run Time (min): 13.00

Instrumento: DatalALCOOLURMCAJALCOOL2020-2021

Projeção: 7

Volume de Injeção: 1.00

Método de Injeção: Splitless

Detector: FID

Fluxo de Gás de Arrastamento: 1.0000

Método de Análise: ETANOL DB-424

Fator de Multiplicação: 1,0000

Data da Injeção: 25/Jan/21 04:55

Operador: GEOVANE

**Chromatogram**

**Integration Results**

Componente	Retenção Time	Area	Concentração	Conc. Unit
Acetato de Etila	2,955	0,700	21,231	mg / 100 ml AA
Metanol	3,887	0,725	25,591	mg / 100 ml AA
Etilol	4,350	3882,074	n.a.	mg / 100 ml AA
Acetona	4,850	0,652	1,472	mg / 100 ml AA
n-Propanol	n.a.	n.a.	n.a.	mg / 100 ml AA
n-Propanol	6,098	8,948	184,500	mg / 100 ml AA
Diacetil	7,340	0,022	5,215	mg / 100 ml AA
Acetato de Etila	7,442	0,025	0,234	mg / 100 ml AA
iso-Butanol	7,723	0,025	0,311	mg / 100 ml AA
Cidreira	n.a.	n.a.	n.a.	mg / 100 ml AA
iso-Valinol	8,452	8,235	4,810	mg / 100 ml AA
Benzona	n.a.	n.a.	n.a.	mg / 100 ml AA
Citronelal	8,382	0,030	8,773	mg / 100 ml AA
n-Butanol	n.a.	n.a.	n.a.	mg / 100 ml AA
Acetil	9,945	0,207	0,205	mg / 100 ml AA
iso-Amilol	10,682	0,001	0,117	mg / 100 ml AA
Formol	12,043	8,602	8,891	mg / 100 ml AA
Total	n.a.	n.a.	3871,173	200,969

**Resumo dos Alcoois Superiores**

	Area	Concentração	Unidade
INPM	93,3	AC TOTAL	1,21
BL	85,63	BARBET	
pH	8,16		
CONDUTIVIDADE	62,1		

## ANEXO II

Anidro de cana-de-açúcar



Anidro de vagens de algarobeira



Hidratado de vagens de algarobeira



**ANEXO III - Resolução N° 764, de 20 de dezembro de 2018.**

**Tabela A. Especificação do etanol hidratado de referência (EHR).**

Característica	Unidade	Limites		Métodos
		Minimo	Máximo	
Aspecto	-	LIMP (1)	Visual	
Cor	-	Incolor	Visual	
Potencial hidrogeniônico (pH) a 20 °C	-	6,0	8,0	NBR 10891
Massa específica a 20 °C	kg/m <sup>3</sup>	805,2	811,2	NBR 5992 NBR 15639 ASTM D4052
Teor alcoólico	% m/m	92,5	94,6	NBR 5992 NBR 15639
Condutividade elétrica	µS/m	-	300	NBR 10547 ISO 17308
Índice de acidez (em miligramas de ácido acético)	mg/L	-	30	NBR 9866 ISO 17315
Teor de aldeídos (calculado como acetaldeído)	mg/L	-	60	ISO 1388-4 (2)
Teor de álcoois superiores	mg/L	-	500	EN 15721 (2)
Teor de ésteres (calculado como acetato de etila)	mg/L	-	100	ASTM D1617 (2)
Resíduo por evaporação	mg/100 mL	-	5	NBR 8644
Teor de sulfato	mg/kg	-	4	NBR 10894
Teor de sódio	mg/kg	-	2	NBR 10422
Teor de hidrocarbonetos	% v/v	não detectado	NBR 13993	
Teor de metanol	% v/v	-	0,5	NBR 16041
Teor de etanol (3)	% v/v	94,5	-	NBR 16041 ASTM D5501
Teor de água (3)	% m/m	-	7,5	NBR 15531 NBR 15888 ASTM E203

(1) Límpido e isento de material particulado, conforme condições determinadas nos métodos especificados para avaliação do Aspecto.

(2) Alternativamente, é permitida a determinação dos teores de aldeídos (calculado como acetaldeído), de álcoois superiores e de ésteres (calculado como acetato de etila) por cromatografia gasosa. Em caso de desacordo entre resultados, prevalecerão os valores determinados pelos ensaios realizados conforme as normas da tabela acima.

(3) Requerido quando o etanol anidro combustível de referência for originado de importação, em caso de dúvida ou de não concordância entre as partes, bem como quando houver possibilidade de contaminação por álcoois superiores.

**Fonte:** Art. 2º da Resolução ANP nº 764, de 20 de dezembro de 2018.

**Tabela B:** Especificação do etanol anidro de referência (EAR).

Característica	Unidade	Limites		Métodos
		Mínimo	Máximo	
Aspecto	-	LIMP (1)	Visual	
Cor	-	Incolor	Visual	
Massa específica a 20 °C	kg/m <sup>3</sup>	-	791,5	NBR 5992 NBR 15639 ASTM D4052
Teor alcoólico	% m/m	99,3	-	NBR 5992 NBR 15639
Condutividade elétrica	µS/m	-	300	NBR 10547 ISO 17308
Índice de acidez (em miligramas de ácido acético)	mg/L	-	30	NBR 9866 ISO 17315
Teor de aldeídos (calculado como acetaldeído)	mg/L	-	60	ISO 1388-4 (2)
Teor de álcoois superiores	mg/L	-	500	EN 15721 (2)
Teor de ésteres (calculado como acetato de etila)	mg/L	-	100	ASTM D1617 (2)
Resíduo por evaporação	mg/100 mL	-	5	NBR 8644
Teor de sulfato	mg/kg	-	4	NBR 10894
Teor de sódio	mg/kg	-	2	NBR 10422
Teor de hidrocarbonetos	% v/v	não detectado	NBR 13993	
Teor de metanol	% v/v	-	0,5	NBR 16041
Teor de etanol (3)	% v/v	98,0	-	NBR 16041 ASTM D5501
Teor de água (3)	% m/m	-	0,7	NBR 15531 NBR 15888 ASTM E203 ASTM E1064

(1) Límpido e isento de material particulado, conforme condições determinadas nos métodos especificados para avaliação do Aspecto.

(2) Alternativamente, é permitida a determinação dos teores de aldeídos (calculado como acetaldeído), de álcoois superiores e de ésteres (calculado como acetato de etila) por cromatografia gasosa. Em caso de desacordo entre resultados, prevalecerão os valores determinados pelos ensaios realizados conforme as normas da tabela acima.

(3) Requerido quando o etanol anidro combustível de referência for originado de importação, em caso de dúvida ou de não concordância entre as partes, bem como quando houver possibilidade de contaminação por álcoois superiores.

**Fonte:** Art. 2º da Resolução ANP nº 764, de 20 de dezembro de 2018.

ANEXO IV

Tabela C: Tabela alcoolométrica compreendendo a faixa de 31,5 a 32,5 °C.

ETANOL HIDRATADO Tabela Alcoolométrica											
			Resultado a 20 °C						Resultado a 20 °C		
Temperatura °C	Massa específica lida kg/m³	Grau alcoólico %v/v	Massa específica kg/m³	Grau alcoólico %v/v	Fator correção volume 20 °C	Temperatura °C	Massa específica lida kg/m³	Grau alcoólico %v/v	Massa específica kg/m³	Grau alcoólico %v/v	Fator correção volume 20 °C
31,5	795,28	94,60	805,27	96,52	0,9880	32,5	801,29	92,10	812,22	94,78	0,9870
31,5	795,00	94,70	804,99	96,59	0,9880	32,5	801,02	92,20	811,94	94,85	0,9870
31,5	794,72	94,80	804,71	96,66	0,9880	32,5	800,75	92,30	811,67	94,92	0,9870
31,5	794,43	94,90	804,42	96,73	0,9880	32,5	800,48	92,40	811,40	94,99	0,9870
31,5	794,15	95,00	804,14	96,79	0,9880	32,5	800,21	92,50	811,12	95,06	0,9870
31,5	793,87	95,10	803,85	96,86	0,9880	32,5	799,93	92,60	810,85	95,14	0,9870
31,5	793,58	95,20	803,57	96,93	0,9880	32,5	799,66	92,70	810,57	95,21	0,9870
31,5	793,30	95,30	803,28	97,00	0,9880	32,5	799,39	92,80	810,30	95,28	0,9870
31,5	793,02	95,40	803,00	97,06	0,9880	32,5	799,11	92,90	810,02	95,35	0,9870
31,5	792,73	95,50	802,71	97,13	0,9880	32,5	798,84	93,00	809,75	95,42	0,9870
31,5	792,45	95,60	802,42	97,20	0,9880	32,5	798,57	93,10	809,47	95,49	0,9870
31,5	792,16	95,70	802,14	97,26	0,9880	32,5	798,29	93,20	809,19	95,56	0,9870
31,5	791,88	95,80	801,85	97,33	0,9880	32,5	798,02	93,30	808,91	95,63	0,9870
31,5	791,59	95,90	801,56	97,40	0,9880	32,5	797,74	93,40	808,64	95,70	0,9870
31,5	791,30	96,00	801,27	97,46	0,9880	32,5	797,46	93,50	808,36	95,77	0,9870
32,0	802,00	92,00	812,49	94,71	0,9875	32,0	797,19	93,60	808,08	95,83	0,9870
32,0	801,73	92,10	812,22	94,78	0,9875	32,0	796,91	93,70	807,80	95,90	0,9870
32,0	801,46	92,20	811,94	94,85	0,9875	32,0	796,63	93,80	807,52	95,97	0,9870
32,0	801,19	92,30	811,67	94,92	0,9875	32,0	796,36	93,90	807,24	96,04	0,9870
32,0	800,92	92,40	811,40	94,99	0,9875	32,0	796,08	94,00	806,96	96,11	0,9870
32,0	800,65	92,50	811,12	95,06	0,9875	32,0	795,80	94,10	806,68	96,18	0,9870
32,0	800,37	92,60	810,85	95,14	0,9875	32,0	795,52	94,20	806,40	96,25	0,9870
32,0	800,10	92,70	810,57	95,21	0,9875	32,0	795,24	94,30	806,12	96,32	0,9869
32,0	799,83	92,80	810,30	95,28	0,9875	32,0	794,96	94,40	805,84	96,39	0,9869
32,0	799,55	92,90	810,02	95,35	0,9875	32,0	794,68	94,50	805,56	96,45	0,9869
32,0	799,28	93,00	809,75	95,42	0,9875	32,0	794,40	94,60	805,27	96,52	0,9869
32,0	799,00	93,10	809,47	95,49	0,9875	32,0	794,12	94,70	804,99	96,59	0,9869
32,0	798,73	93,20	809,19	95,56	0,9875	32,0	793,84	94,80	804,71	96,66	0,9869
32,0	798,45	93,30	808,91	95,63	0,9875	32,0	793,56	94,90	804,42	96,73	0,9869
32,0	798,18	93,40	808,64	95,70	0,9875	32,0	793,28	95,00	804,14	96,79	0,9869
32,0	797,90	93,50	808,36	95,77	0,9875	32,0	793,00	95,10	803,85	96,86	0,9869
32,0	797,63	93,60	808,08	95,83	0,9875	32,0	792,71	95,20	803,57	96,93	0,9869
32,0	797,35	93,70	807,80	95,90	0,9875	32,0	792,43	95,30	803,28	97,00	0,9869
32,0	797,07	93,80	807,52	95,97	0,9875	32,0	792,15	95,40	803,00	97,06	0,9869
32,0	796,80	93,90	807,24	96,04	0,9875	32,0	791,86	95,50	802,71	97,13	0,9869
32,0	796,52	94,00	806,96	96,11	0,9875	32,0	791,58	95,60	802,42	97,20	0,9869
32,0	796,24	94,10	806,68	96,18	0,9875	32,0	791,29	95,70	802,14	97,26	0,9869
32,0	795,96	94,20	806,40	96,25	0,9875	32,0	791,01	95,80	801,85	97,33	0,9869
32,0	795,68	94,30	806,12	96,32	0,9875	32,0	790,72	95,90	801,56	97,40	0,9869
32,0	795,40	94,40	805,84	96,39	0,9875	32,0	790,43	96,00	801,27	97,46	0,9869
32,0	795,12	94,50	805,56	96,45	0,9875	33,0	801,12	92,00	812,49	94,71	0,9865
32,0	794,84	94,60	805,27	96,52	0,9875	33,0	800,85	92,10	812,22	94,78	0,9865
32,0	794,56	94,70	804,99	96,59	0,9875	33,0	800,58	92,20	811,94	94,85	0,9865
32,0	794,28	94,80	804,71	96,66	0,9875	33,0	800,31	92,30	811,67	94,92	0,9865
32,0	794,00	94,90	804,42	96,73	0,9875	33,0	800,04	92,40	811,40	94,99	0,9865
32,0	793,72	95,00	804,14	96,79	0,9875	33,0	799,77	92,50	811,12	95,06	0,9865
32,0	793,43	95,10	803,85	96,86	0,9875	33,0	799,49	92,60	810,85	95,14	0,9865
32,0	793,15	95,20	803,57	96,93	0,9875	33,0	799,22	92,70	810,57	95,21	0,9865
32,0	792,87	95,30	803,28	97,00	0,9875	33,0	798,95	92,80	810,30	95,28	0,9865
32,0	792,58	95,40	803,00	97,06	0,9875	33,0	798,67	92,90	810,02	95,35	0,9864
32,0	792,30	95,50	802,71	97,13	0,9875	33,0	798,40	93,00	809,75	95,42	0,9864
32,0	792,01	95,60	802,42	97,20	0,9875	33,0	798,13	93,10	809,47	95,49	0,9865
32,0	791,73	95,70	802,14	97,26	0,9874	33,0	797,85	93,20	809,19	95,56	0,9864
32,0	791,44	95,80	801,85	97,33	0,9874	33,0	797,58	93,30	808,91	95,63	0,9865
32,0	791,16	95,90	801,56	97,40	0,9875	33,0	797,30	93,40	808,64	95,70	0,9864
32,0	790,87	96,00	801,27	97,46	0,9874	33,0	797,03	93,50	808,36	95,77	0,9864
32,5	801,56	92,00	812,49	94,71	0,9870	33,0	796,75	93,60	808,08	95,83	0,9864

Fonte: Setta combustíveis.