



Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Escola de Química



# **Simulação e análise econômica de diferentes matérias-primas para produção de Bioquerosene de Aviação pelo processo HEFA no cenário brasileiro**

Giovanna Niemeyer Carneiro Messina de Assis

Luiz Felipe da Costa Andrade

## **Projeto Final de Curso**

### **Orientadores**

Prof. André Ferreira Young, D. Sc.

Profa. Raquel Massad Cavalcante, D. Sc.

Junho de 2022

# **Simulação e análise econômica de diferentes matérias-primas para produção de Bioquerosene de Aviação pelo processo HEFA no cenário brasileiro**

*Giovanna Niemeyer Carneiro Messina de Assis*

*Luiz Felipe da Costa Andrade*

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Aprovado por:

---

Flávio da Silva Francisco, D. Sc.

---

Bettina Susanne Hoffmann, D. Sc.

Orientado por:

---

André Ferreira Young, D. Sc.

---

Raquel Massad Cavalcante, D. Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Junho de 2022

## AGRADECIMENTOS

A faculdade se mostrou a jornada mais desafiadora que já enfrentamos e, se conseguimos concluir, foi por não estarmos sozinhos. Sendo assim, agradecemos primeiramente às nossas famílias que estiveram pacientemente ao nosso lado em todos os momentos. Não podemos deixar de agradecer também aos nossos orientadores – André Young e Raquel Massad – sem os quais este trabalho jamais seria possível.

Agradecemos também aos nossos amigos – especialmente os manés – e grupos de carona que contribuíram para que a experiência universitária fosse mais prazerosa. Por fim, agradecemos aos gatos Minerva, Molly e Alvo Louis pela companhia constante e pelas “palavras” digitadas enquanto dormiam no teclado.

Resumo de Projeto Final de Curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheiro Químico.

**Simulação e análise econômica de diferentes matérias-primas para produção de Bioquerosene de Aviação pelo processo HEFA no cenário brasileiro**

*Giovanna Niemeyer Carneiro Messina de Assis*

*Luiz Felipe da Costa Andrade*

Orientadores: Prof. André Ferreira Young

Profa. Raquel Massad Cavalcante

As mudanças climáticas e as questões ambientais em geral têm impulsionado uma busca cada vez maior por alternativas aos combustíveis fósseis tradicionais. Nesse contexto, a indústria de aviação também tem estipulado metas para redução do uso de derivados de petróleo em sua matriz energética. Assim, o advento de biocombustíveis para esta finalidade surge como principal estratégia no sentido de tornar a aviação mais “verde”. Dentre os processos produtivos, o método HEFA apresenta-se como o mais difundido para produção do Bioquerosene de Aviação, podendo ser aplicado a partir de diferentes óleos vegetais. Desta forma, o objetivo do presente trabalho é realizar a simulação e análise econômica do processo HEFA a partir de três diferentes óleos vegetais que apresentam interessante potencial de aplicação no Brasil: soja, dendê e pinhão-manso. Para isso, foi utilizado o software Aspen HYSYS® v8.8 para realização da simulação, enquanto os dimensionamentos e análise econômica foram baseados na literatura. Com base na simulação e na análise econômica, foi observado que nenhum dos três óleos apresentou potencial de lucratividade, sendo que o processo com óleo de pinhão-manso obteve os melhores resultados econômicos, dadas as premissas adotadas no trabalho. Por outro lado, o processo com óleo de dendê é o que mais favorece, em volume, a produção do bioquerosene de aviação frente ao diesel verde, devido à composição mais rica em ácidos graxos saturados. O processo com soja, por sua vez, embora utilize uma matéria-prima bastante abundante no país, foi o que apresentou menor potencial de lucratividade entre os três, devido ao baixo rendimento nos processos de hidrogenação.

## Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO: PANORAMA E PERSPECTIVAS DOS BIOCOMBUSTÍVEIS NO BRASIL .....</b>	<b>8</b>
1.1	BIOCOMBUSTÍVEIS E MEIO AMBIENTE: BREVES CONSIDERAÇÕES .....	8
1.2	ASPECTOS REGULATÓRIOS E AÇÕES GOVERNAMENTAIS: POLÍTICAS PÚBLICAS VOLTADAS À PROMOÇÃO DOS BIOCOMBUSTÍVEIS NO BRASIL.....	10
1.3	BIOCOMBUSTÍVEIS DE AVIAÇÃO E MATÉRIAS-PRIMAS.....	13
1.4	OBJETIVO DO TRABALHO.....	14
<b>2</b>	<b>BIOQUEROSENE DE AVIAÇÃO: PANORAMA, PERSPECTIVAS E PRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
2.1	COMBUSTÍVEIS DE AVIAÇÃO.....	15
2.1.1	<i>Querosene de aviação – JET A ou JET A-1.....</i>	<i>16</i>
2.1.2	<i>Querosene de aviação C – JET C.....</i>	<i>18</i>
2.1.3	<i>JET alternativo ou bioquerosene.....</i>	<i>18</i>
2.2	COMBUSTÍVEIS DE AVIAÇÃO E A QUESTÃO AMBIENTAL: PERSPECTIVAS DE UMA ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL.....	19
2.3	BIOQUEROSENE DE AVIAÇÃO NA INDÚSTRIA BRASILEIRA: PLATAFORMAS DE PRODUÇÃO .....	22
2.4	AÇÕES REGULATÓRIAS PARA A PROMOÇÃO DO USO E PRODUÇÃO DO BIOQUEROSENE NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA.....	23
2.5	MATÉRIAS-PRIMAS PARA PRODUÇÃO DO BIOQUEROSENE .....	25
2.6	ROTAS TECNOLÓGICAS PARA PRODUÇÃO DO BIOQUEROSENE .....	27
2.6.1	<i>Querosene parafínico hidroprocessado e sintetizado por Fischer-Tropsch (SPK-FT) ....</i>	<i>30</i>
2.6.2	<i>Querosene parafínico sintetizado com aromáticos (SPK/A).....</i>	<i>30</i>
2.6.3	<i>Querosene parafínico sintetizado por álcool (SPK-ATJ).....</i>	<i>31</i>
2.6.4	<i>Isoparafinas sintetizadas de açúcares fermentados e hidroprocessados (SIP) .....</i>	<i>31</i>
2.6.5	<i>Querosene de hidrotérólise catalítica (CHJ).....</i>	<i>31</i>
2.6.6	<i>Querosene parafínico sintetizado por hidrocarbonetos bioderivados, ácidos graxos e ésteres hidroprocessados (SPK-HC-HEFA).....</i>	<i>32</i>
2.6.7	<i>Querosene parafínico sintetizado por ácidos graxos e ésteres hidroprocessados (SPK- HEFA) 32</i>	
2.7	USO E A PRODUÇÃO DE BIOQUEROSENE NO BRASIL: VANTAGENS, DESAFIOS E INCERTEZAS.....	36
<b>3</b>	<b>PREPARAÇÃO DO AMBIENTE DE SIMULAÇÃO .....</b>	<b>39</b>
3.1	DEFINIÇÃO DOS COMPONENTES QUÍMICOS ENVOLVIDOS .....	39
3.1.1	<i>Representação dos Óleos Vegetais.....</i>	<i>40</i>
3.1.2	<i>Hidrogênio.....</i>	<i>44</i>
3.1.3	<i>Escolha dos catalisadores .....</i>	<i>45</i>
3.2	DEFINIÇÃO DOS PACOTES TERMODINÂMICOS.....	46

3.3	DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE ENTRADA DAS CORRENTES DE PROCESSO .....	47
3.4	DEFINIÇÃO DA CAPACIDADE DAS PLANTAS .....	47
3.5	MODELAGEM DAS REAÇÕES .....	48
<b>4</b>	<b>SIMULAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIOQUEROSENE – PROCESSO HEFA .....</b>	<b>50</b>
4.1	DESPROPANAÇÃO E HIDRODESOXIGENAÇÃO .....	50
4.2	RECICLO DO GÁS HIDROGÊNIO .....	54
4.3	RECICLO DO ÓLEO VEGETAL .....	56
4.4	HIDROCRAQUEAMENTO E ISOMERIZAÇÃO .....	57
4.5	SEPARAÇÃO DOS PRODUTOS OBTIDOS.....	58
<b>5</b>	<b>DIMENSIONAMENTO DOS EQUIPAMENTOS .....</b>	<b>60</b>
5.1	VASOS .....	60
5.1.1	REATORES .....	60
5.1.2	SEPARADOR TRIFÁSICO E FLASH .....	61
5.1.3	PSA E COLUNA DE ADSORÇÃO.....	63
5.1.4	DESTILADORES .....	65
5.2	TROCADORES DE CALOR.....	67
<b>6</b>	<b>AVALIAÇÃO ECONÔMICA DO PROCESSO.....</b>	<b>69</b>
6.1	CUSTOS DE CAPITAL.....	69
6.2	CUSTOS DOS EQUIPAMENTOS .....	<b>ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.</b>
6.2.1	<i>Custo das bombas</i> .....	70
6.2.2	<i>Custo dos Vasos</i> .....	71
6.2.2.1	<i>Reatores, separador trifásico, vasos de flash, PSA, coluna de adsorção e destiladores.</i>	72
6.2.3	<i>Custo dos Compressores</i> .....	72
6.2.4	<i>Custo dos trocadores de calor</i> .....	72
6.2	CUSTOS DE PRODUÇÃO .....	73
<b>7</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO – ESTUDOS DE CASO .....</b>	<b>76</b>
7.1	SIMULAÇÕES BASE .....	76
7.1.1	<i>Análise dos custos</i> .....	76
7.1.2	<i>Receitas da Simulação Base</i> .....	80
7.1.3	<i>Otimização do lucro</i> .....	83
7.1.4	<i>Discussão dos resultados</i> .....	87
7.2	SIMULAÇÃO PARA O CASO SEM SISTEMA DE RECICLO DE HIDROGÊNIO .....	89
<b>8</b>	<b>CONCLUSÃO E SUGESTÕES.....</b>	<b>93</b>
<b>9</b>	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>95</b>

<b>ANEXOS .....</b>	<b>104</b>
ANEXO 1 – DADOS DA SIMULAÇÃO PARA O CASO COM ÓLEO DE DENDÊ .....	104
ANEXO 2 – DADOS DA SIMULAÇÃO PARA O CASO COM ÓLEO DE SOJA .....	107
ANEXO 3 – DADOS DA SIMULAÇÃO PARA O CASO COM ÓLEO DE PINHÃO-MANSO .....	110

# **1 INTRODUÇÃO: PANORAMA E PERSPECTIVAS DOS BIOCOMBUSTÍVEIS NO BRASIL**

Neste capítulo será apresentado um panorama introdutório sobre as perspectivas dos biocombustíveis na matriz energética brasileira, como uma alternativa sustentável, principalmente visando a preservação do meio ambiente e os compromissos firmados perante a comunidade internacional, para valorização das energias renováveis e redução dos gases de efeito estufa. Assim, será realizada uma breve abordagem sobre os biocombustíveis, os fatores que influenciam a sua produção, as questões ambientais, as matérias-primas envolvidas, os aspectos regulatórios e as ações governamentais voltadas à promoção dos biocombustíveis no Brasil.

## **1.1 Biocombustíveis e meio ambiente: breves considerações**

Nas últimas décadas, a geração de energia advinda da natureza, em sua forma direta, a partir de fontes renováveis, aumentou cerca de 380% no mundo, demonstrando um avanço na busca por alternativas energéticas sustentáveis, uma vez que este tipo de energia tem baixas emissões de carbono, minimizando os impactos ambientais. Todavia, ainda que o aumento da participação das fontes renováveis seja um grande avanço, as fontes não-renováveis, como petróleo, carvão e gás natural representavam 85,3%, em 2019, das fontes energéticas no mundo (GOMES; SOUZA; ZANLORENSSI, 2021).

Essa preocupação com o meio ambiente tem sido pauta constante na agenda nacional e internacional. Discussões sobre a manutenção do equilíbrio entre a preservação dos ecossistemas e a busca por alternativas energéticas sustentáveis vem influenciando positivamente a cadeia produtiva dos biocombustíveis.

De fato, segundo Cruz, Silva e Menezes (2019), os combustíveis fósseis deverão se tornar obsoletos ao longo dos anos, uma vez que seu uso vem sendo repensado para determinadas aplicações, visando a redução dos impactos ambientais causados pela utilização indiscriminada destes recursos não-renováveis.

Segundo a Resolução nº. 25 da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), de 2 de setembro de 2008, biocombustível é definido como

um “[...] combustível derivado de biomassa renovável para uso em motores a combustão interna ou, conforme regulamento, para outro tipo de geração de energia, que possa substituir parcial ou totalmente combustíveis de origem fóssil” (ANP, 2008). Os biocombustíveis são produzidos a partir de produtos agrícolas, como, por exemplo, a cana-de-açúcar, as plantas oleaginosas, biomassa, dentre outras fontes de matéria orgânica, que podem ser utilizadas de forma isolada ou adicionadas aos combustíveis convencionais (PALACIO *et. al.*, 2012).

Apresentando-se como uma alternativa aos combustíveis fósseis, alguns aspectos dos biocombustíveis merecem destaque, a saber:

[...] os biocombustíveis possuem a característica de serem biodegradáveis, o que lhes permite evitar impactos ambientais nas mesmas proporções que os combustíveis fósseis. Além de não contribuírem com o efeito estufa, os biocombustíveis são usualmente utilizados pelo fato das enormes variedades de matérias-primas para sua fabricação. Como desafio, os combustíveis fósseis enfrentam a falta de reservas para reabastecimento. Com o esgotamento dos reservatórios, possuem tempo de vida útil determinado, enquanto que os derivados da biomassa possuem ciclo renovável, perdurando por centenas de anos (CRUZ; SILVA; MENEZES, 2019).

Alguns fatores influenciaram diretamente no panorama de produção e na participação dos biocombustíveis, como alternativa sustentável, na matriz energética de diversos países. Dentre esses fatores, é importante destacar o estado atual das reservas de petróleo no mundo e as mudanças climáticas (PALACIO *et. al.*, 2012). O volume das reservas mundiais de petróleo está geologicamente distribuído de maneira irregular, permitindo a formação e a concentração do petróleo de forma desproporcional. Em um comparativo entre os anos de 2019 e 2020, temos que:

[...] o volume de reservas de petróleo variou pouco em relação a 2019. Na América do Norte, caiu 0,1%, totalizando 242,9 bilhões de barris (14% do total mundial). As reservas da Comunidade dos Estados Independentes mantiveram-se estáveis, totalizando 146,2 bilhões de barris (8,4% do total mundial). Por sua vez, as reservas da África mantiveram-se no mesmo patamar do ano anterior, atingindo 125,1 bilhões de barris (7,2% do total mundial). Na Europa houve queda de 4% nas reservas, somando 13,6 bilhões de barris (0,8% do total mundial). E as reservas da região Ásia-Pacífico registraram queda de 0,4%, totalizando 45,2 bilhões de barris (2,6% do total). Por fim, as reservas das Américas Central e do Sul tiveram queda de 0,2%, somando 323,4 bilhões de barris (18,7% do total mundial) (ANP, 2021, p. 28).

De acordo com o Anuário Estatístico de 2021, o Brasil ocupa a 16ª posição no *ranking* mundial de reservas de petróleo. São 11,9 bilhões de barris, representando a reserva nacional do óleo, um recuo de 6,2% em relação ao ano anterior (ANP, 2021).

Segundo estudo publicado pela Revista Científica *Nature* (Mercure *et al.*, 2021), o mundo está passando por uma transição energética, o que poderá acarretar um forte declínio da produção mundial de combustíveis fósseis nos próximos anos. Esse prognóstico vai ao encontro dos compromissos dos governos atuais e dos fluxos de investimentos em alternativas energéticas sustentáveis para atingir a neutralidade carbônica até o ano de 2050 (AGÊNCIA BRASIL, 2021).

É fato que os impactos ambientais ocasionados pelo uso indiscriminado dos combustíveis derivados do petróleo, assim como a crescente escassez de sua oferta, “reforçam a busca por alternativas viáveis, ambientalmente adequadas e que consigam suprir a crescente demanda energética da atualidade” (CRUZ; SILVA; MENEZES, 2019).

Nesse sentido, vale ressaltar que o cenário e as perspectivas para a produção dos biocombustíveis são positivos se comparados à participação dos combustíveis fósseis advindos do petróleo. Por isso, essa alternativa sustentável tem ganhado cada vez mais espaço na matriz energética nacional e nos compromissos internacionais firmados entre os países, que estão alinhados às questões ambientais e, evidentemente, aos ganhos econômicos.

## **1.2 Aspectos regulatórios e ações governamentais: políticas públicas voltadas à promoção dos biocombustíveis no Brasil**

O pioneirismo brasileiro na produção e utilização dos biocombustíveis está diretamente associado ao Programa Nacional do Alcool (PROÁLCOOL), criado pelo Decreto nº. 76.593, de 14 de novembro de 1975, com intuito de atender às necessidades do mercado interno e externo, e da política de combustíveis automotivos<sup>1</sup> (BRASIL, 1975).

---

<sup>1</sup> De acordo com o art. 2º, do Decreto nº. 76.593/75: A produção do álcool oriundo da cana-de-açúcar, da mandioca ou de qualquer outro insumo será incentivada através da expansão da oferta de matérias-primas, com especial ênfase no aumento da produção agrícola, da modernização e ampliação das destilarias existentes e da instalação de novas unidades produtoras, anexas a usinas ou autônomas, e de unidades armazenadoras.

A criação do PROÁLCOOL, muito antes de uma preocupação ambiental, surgiu como uma alternativa sustentável diante da crise do petróleo no início da década de 1970, com a intenção de diminuir a dependência do país pelo óleo importado. Ou seja, a introdução dos biocombustíveis, por meio do etanol, na matriz energética, permitiu ao Brasil maior segurança energética e, ainda, colocou o país em vanguarda tecnológica frente à maioria dos países do mundo (DELGADO; SOUZA; ROITMAN, 2017).

Além do PROÁLCOOL, em dezembro de 2004, o Governo Federal lançou o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB), promovendo o biodiesel como alternativa energética no Brasil. O programa foi criado com o objetivo de implementar de forma sustentável, técnica e econômica, as diretrizes necessárias para a produção e uso do biodiesel, sem relegar a inclusão produtiva da agricultura familiar e o desenvolvimento da agricultura sustentável, promovendo a geração de emprego e renda (MAPA, 2019).

Ainda no ano de 2004, a Medida Provisória nº. 214, que alterou a Lei do Petróleo (Lei nº. 9.478, de 6 de agosto de 1997<sup>2</sup>), passou a fixar prazos para adição do biodiesel ao óleo diesel em percentuais mínimos obrigatórios. A medida foi transformada na Lei nº. 11.097, de 13 de janeiro de 2005, que representou um marco regulatório do Biodiesel no Brasil (MAPA, 2019).

Após a promulgação da Lei nº. 11.097/05, tornou-se obrigatória a introdução de um percentual de biodiesel no óleo diesel, tendo iniciado com 2% (B2) em 2008 e evoluído até a percentagem de 13% (B13)<sup>3</sup> no ano de 2021<sup>4</sup>. A Resolução nº. 16, de 2008, prevê o aumento desse percentual para 15%, o que poderá ocorrer até 2023 (ANP, 2021).

No final do ano de 2016, o Ministério de Minas e Energia, a partir dos compromissos assumidos no Acordo de Paris (2015), instituiu a Política Nacional de Biocombustíveis, denominada *RenovaBio*, por meio da Lei nº. 13.576, de 26 de

---

<sup>2</sup> Dispõe sobre a política energética nacional, as atividades relativas ao monopólio do petróleo, institui o Conselho Nacional de Política Energética e a Agência Nacional do Petróleo e dá outras providências.

<sup>3</sup> No cenário mundial, adota-se uma nomenclatura única para identificar a concentração de biodiesel: BXX, onde XX representa a percentagem em volume do Biodiesel na mistura biodiesel/diesel (PALACIO *et. al.*, 2012).

<sup>4</sup> O Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), do Ministério de Minas e Energia (MME), aprovou recentemente (06/09/2021) a redução do teor de mistura obrigatória do biodiesel no óleo diesel de 13% para 10%. Trata-se de uma medida temporária, devida aos efeitos da pandemia de COVID-19 no setor (AGENCIA BRASIL, 2021).

dezembro de 2017. O programa representou um marco significativo para a expansão da produção de biocombustíveis no Brasil. Alinhada às metas da política energética nacional, a Lei nº. 13.576/17, que instituiu a Política Nacional de Biocombustíveis, em seu art. 1º, traz os seguintes objetivos:

Art. 1º. [...]

I - contribuir para o atendimento aos compromissos do País no âmbito do Acordo de Paris sob a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima;

II - contribuir com a adequada relação de eficiência energética e de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa na produção, na comercialização e no uso de biocombustíveis, inclusive com mecanismos de avaliação de ciclo de vida;

III - promover a adequada expansão da produção e do uso de biocombustíveis na matriz energética nacional, com ênfase na regularidade do abastecimento de combustíveis; e

IV - contribuir com previsibilidade para a participação competitiva dos diversos biocombustíveis no mercado nacional de combustíveis. (BRASIL, 2017).

O conteúdo do programa RenovaBio teve importante influência de agentes do setor produtivo e de distribuição de biocombustíveis. Em 2017, o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) consolidou as diretrizes estratégicas do programa, as quais derivam de quatro eixos estratégicos:

- Papel dos biocombustíveis na matriz energética;
- Regras de comercialização;
- Equilíbrio econômico, financeiro e socioambiental;
- Novos biocombustíveis.

Os eixos estratégicos são verdadeiros fundamentos que devem ser perseguidos pela política energética nacional, a qual, por meio do programa, deverá implantar e executar ações e políticas públicas que viabilizem a oferta de energia cada vez mais sustentável, competitiva e segura. A consecução desses objetivos poderá ser alcançada com a implementação dos seguintes instrumentos (BRASIL, 2017):

- Metas de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa na matriz de combustíveis;
- Créditos de Descarbonização;
- Certificação de Biocombustíveis;

- Adições compulsórias de biocombustíveis aos combustíveis fósseis;
- Incentivos fiscais, financeiros e creditícios;
- Ações no âmbito do Acordo de Paris sob a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima.

No intuito de fomentar ainda mais as ações do Governo Federal pela promoção dos biocombustíveis, o CNPE, por meio da Resolução nº. 07, de 20 de abril de 2021, instituiu o Programa Combustível do Futuro. O programa visa ampliar o uso de combustíveis sustentáveis e de baixa intensidade de carbono, atendendo aos acordos firmados em prol do meio ambiente e, assim, reforçando a promoção da sustentabilidade energética brasileira (MME, 2021).

Dessa forma, percebe-se que os programas governamentais, bem como as legislações e resoluções normativas regulatórias dos biocombustíveis, vêm impulsionando a produção e comercialização das alternativas energéticas renováveis no mercado brasileiro. Apesar da necessidade de grandes investimentos no setor, não há dúvidas de que a implementação de ações e políticas públicas nesse sentido podem auxiliar no direcionamento dos recursos necessários à implementação de novas tecnologias de obtenção e produção de biocombustíveis.

### **1.3 Biocombustíveis de aviação e matérias-primas**

Dado o contexto mencionado ao longo das sessões anteriores, a busca por alternativas aos combustíveis fósseis tem se estendido pelos mais diversos setores. Isso não é diferente para o setor de aviação. Nesse setor, entretanto, há a necessidade de um rigoroso padrão de qualidade, devido à criticidade do fator segurança durante os voos.

Por isso, existem alguns desafios para a substituição dos combustíveis tradicionais pelos biocombustíveis de aviação, tanto no que se refere à aplicação direta nos motores já existentes quanto em relação aos processos de produção do chamado bioquerosene de aviação (bioQAV). Tais particularidades serão mais profundamente abordadas ao longo do capítulo 2.

Dada a busca crescente evidenciada, torna-se necessária uma avaliação das diferentes tecnologias de produção existentes e, principalmente, de potenciais

matérias-primas para o bioQAV no cenário nacional, levando em conta a disponibilidade de recursos e a viabilidade técnica. Com isso, é possível obter um leque mais amplo de possibilidades, o que aumenta a flexibilidade e a segurança de abastecimento desse tipo de produto no país.

#### **1.4 Objetivo do trabalho**

O objetivo do trabalho é avaliar e comparar, com base em fluxogramas básicos de processos, a produção de bioquerosene de aviação por meio do processo HEFA a partir do óleo de soja, de dendê e de pinhão-manso.

Além disso, também é objetivo do trabalho avaliar a possibilidade de construção de uma planta multipropósito, que seja capaz de processar ao menos os três óleos vegetais mencionados dadas as mesmas condições de processo.

Com o intuito de verificar a viabilidade econômica e a influência de cada matéria-prima em seu desempenho, as simulações foram utilizadas como base para o dimensionamento dos equipamentos e para as metodologias de análise econômica de todo o processo.

Por fim, o trabalho se dispôs a analisar os cenários econômicos entre os anos de 2016 e 2020 para estimar o preço dos produtos obtidos que tornariam a planta viável economicamente.

## **2 BIOQUEROSENE DE AVIAÇÃO: PANORAMA, PERSPECTIVAS E PRODUÇÃO**

O Brasil tem sido referência mundial na produção de biocombustíveis, o que pode ser evidenciado pela participação expressiva do etanol e do biodiesel no mercado brasileiro. Neste contexto, o bioquerosene surge como uma alternativa sustentável em relação ao querosene de aviação de origem fóssil. Para tanto, este capítulo visa analisar as perspectivas do uso e da produção do bioquerosene, as matérias-primas utilizadas no processo produtivo, as questões ambientais, as plataformas de produção, os atos regulatórios, as rotas tecnológicas e as vantagens, desafios e incertezas envolvendo essa alternativa renovável no mercado brasileiro.

### **2.1 Combustíveis de aviação**

Durante a primeira metade do século XX, os propulsores aeronáuticos eram, basicamente, motores a pistão, movidos a gasolina (automotiva). A partir da segunda metade do século passado, com a evolução das aeronaves, imposta pelas guerras, fez-se necessário a utilização de gasolinas especializadas para os modernos motores de aviação (motores a reação) (CGEE, 2010).

Para tanto, esses combustíveis deveriam apresentar algumas características que favorecessem a utilização em aeronaves, especialmente nos aspectos relacionados à segurança durante o voo, sendo uma das características mais importantes o ponto de congelamento da substância, que precisa ser suficientemente baixo para que o combustível possa suportar as baixas temperaturas encontradas em altitudes elevadas. Outro fator importante para a segurança é que o ponto de fulgor do combustível precisa ser elevado. (MME, 2020).

Além das características de mercado (preço competitivo e disponibilidade), outros atributos são comumente mencionados como importantes características para os combustíveis de aviação, como por exemplo: “apresentar alta densidade energética; permitir potências elevadas; apresentar volatilidade adequada; apresentar baixo ponto de congelamento; não conter água em solução; ser quimicamente estável e apresentar baixa corrosividade” (CGEE, 2010). A busca por combustíveis que atendessem adequadamente a estes pontos levou à introdução de novos

combustíveis para o setor, dentre eles o querosene de aviação. Este se trata de um hidrocarboneto, proveniente de uma fração da destilação atmosférica do petróleo, possuindo cadeias que variam de 8 a 16 átomos de carbono (RANUCCI *et al.*, 2018).

De acordo com o Ministério de Minas e Energia (2020), “o Brasil é o maior consumidor de combustíveis de aviação da América Latina”. Para alcançar a especificação desejada, atendendo às exigências técnicas e de segurança, os combustíveis permitidos para uso em aeronaves, segundo a Resolução ANP nº. 17, de 26 de julho de 2006, e suas recentes alterações<sup>5 6</sup>, são:

Art. 2º Para os fins desta Resolução, ficam estabelecidas as seguintes definições:

[...]

X – combustíveis de aviação: querosene de aviação JET A ou JET A-1, querosene de aviação alternativo (JET alternativo) e querosene de aviação C (JET C), gasolina de aviação (GAV ou AVGAS) e álcool etílico hidratado combustível (AEHC)/etanol hidratado combustível, em conformidade com as especificações estabelecidas pela ANP; (Redação do inciso dada pela Resolução ANP Nº 856 DE 22/10/2021, efeitos a partir de 01/11/2021). (ANP, 2006; 2019; 2021).

O querosene de aviação (QAV ou JET – A e A-1) é usado comumente em aeronaves de grande porte, enquanto a gasolina de aviação (GAV ou AVGAS) e o álcool etílico hidratado combustível (AEHC) são predominantemente utilizados em aviões de pequeno porte, que possuem motores de pistão, de ignição por centelha (MME, 2020).

### 2.1.1 Querosene de aviação – JET A ou JET A-1

O querosene de aviação (JET A ou JET A-1) é o combustível utilizado, predominantemente, em aeronaves dotadas de motores a turbina, como jato-puro, turboélices ou turbo-fans, dada a sua estabilidade térmica, o que garante não apenas o desempenho da aeronave, mas também a estabilidade e o aumento do tempo entre paradas para manutenção (MME, 2019).

---

<sup>5</sup> RESOLUÇÃO Nº 779, DE 5 DE ABRIL DE 2019. Altera a Resolução ANP nº 17, de 26 de julho de 2006; e a Resolução ANP nº 18, de 26 de julho de 2006, para atualizar as definições de querosene de aviação C (QAV-C) e querosene de aviação alternativo e vedar a importação de QAV-C.

<sup>6</sup> RESOLUÇÃO ANP Nº 856, DE 22 DE OUTUBRO DE 2021. Estabelece as especificações do querosene de aviação JET A e JET A-1, dos querosenes de aviação alternativos e do querosene de aviação C (JET C), bem como as obrigações quanto ao controle da qualidade a serem atendidas pelos agentes econômicos que comercializam esses produtos em território nacional.

De acordo com Scaldaferrri (2019), a composição volumétrica típica do querosene de aviação constitui-se de 9 a 16 átomos de carbono, sendo: 57% de hidrocarbonetos parafínicos (variação de 33 a 60%), 26% de compostos naftênicos (variação de 10 a 45%), 16% de compostos aromáticos (variação de 15 a 25%) e 1% de compostos olefínicos (variação de 0,5 a 5%).

A Resolução ANP nº. 778, de 2019<sup>7</sup> estabelecia as especificações dos querosenes de aviação fósseis e alternativos, descrevendo apenas o combustível do tipo JET A-1. Porém, recentemente, a diretoria colegiada da autarquia federal, aprovou, por meio da Resolução ANP nº. 856, de 2021, a introdução do querosene de aviação JET-A no país. Assim, o combustível poderá passar a ser importado ou produzido nas refinarias do Brasil (MME, 2021).

De acordo com a Resolução ANP nº. 856/21, da ANP, art. 2º, incisos X e XI:

Art. 2º. [...]

X- JET A: querosene de aviação de origem fóssil, com ponto de congelamento máximo de 40 °C negativos, destinado exclusivamente ao consumo em turbinas de aeronaves;

XI- JET A-1: querosene de aviação de origem fóssil, com ponto de congelamento máximo de 47 °C negativos, destinado exclusivamente ao consumo em turbinas de aeronaves; (ANP, 2021).

A principal diferença entre os dois combustíveis de aviação está no ponto de congelamento: - 47 °C para o JET A-1 e - 40 °C para o JET A. Como se sabe, “o ponto de congelamento é a menor temperatura em que o combustível está livre de cristais de hidrocarbonetos que, se presentes, podem reduzir o fluxo do combustível no sistema de abastecimento da aeronave” (ABAR, 2021).

Todavia, é importante ressaltar que o JET A, combustível de aviação amplamente comercializado no mercado internacional, é alguns centavos de dólar (cerca de 1%, por galão) mais barato que o JET A-1, entregue pelas refinarias da Petrobras. Com efeito, a ANP espera aumentar a oferta de querosenes de aviação no país, reduzir os custos das companhias de aviação e o preço das passagens aéreas (EPBR, 2021; MNE, 2021).

---

<sup>7</sup> Revogada Pela Resolução ANP nº. 858/21.

### 2.1.2 Querosene de aviação C – JET C

Conforme determina a Resolução ANP nº. 856/21, o JET C é o “combustível destinado exclusivamente ao consumo em turbinas de aeronaves, composto de um único tipo de JET alternativo misturado ao JET A ou ao JET A-1 nas proporções definidas nesta Resolução” (ANP, 2021). Ainda conforme a Resolução ANP nº. 856/21, apenas os distribuidores e os produtores de querosene de aviação JET A e JET A-1, autorizados pela ANP, podem realizar a mistura do JET alternativo ao JET A ou JET A-1 para a composição do JET C. Inclusive, essa composição deve atender às seguintes proporções (ANP, 2021):

- a) até o limite máximo de cinquenta por cento em volume no caso de SPK-FT, SPK-HEFA, SPK/A, SPKATJ e CHJ; e
- b) até o limite máximo de dez por cento em volume no caso de SIP e SPK-HC-HEFA.

É importante registrar que, assim como para os outros combustíveis de aviação, faz-se necessário o documento de qualidade do combustível. O certificado da qualidade do JET C comercializado deverá ser emitido pela refinaria ou distribuidor de combustíveis, de acordo com as especificidades técnicas exigidas pela Resolução ANP nº. 856/21 (ANP, 2021).

### 2.1.3 JET alternativo ou bioquerosene

Pela definição da Lei nº. 12.490 de 16 de setembro de 2011, o bioquerosene é “substância derivada de biomassa renovável que pode ser usada em turborreatores e turbopropulsores aeronáuticos ou, conforme regulamento, em outro tipo de aplicação que possa substituir parcial ou totalmente o combustível de origem fóssil”, art. 6, inciso XXXI (BRASIL, 2011).

## 2.2 Combustíveis de aviação e a questão ambiental: perspectivas de uma alternativa sustentável

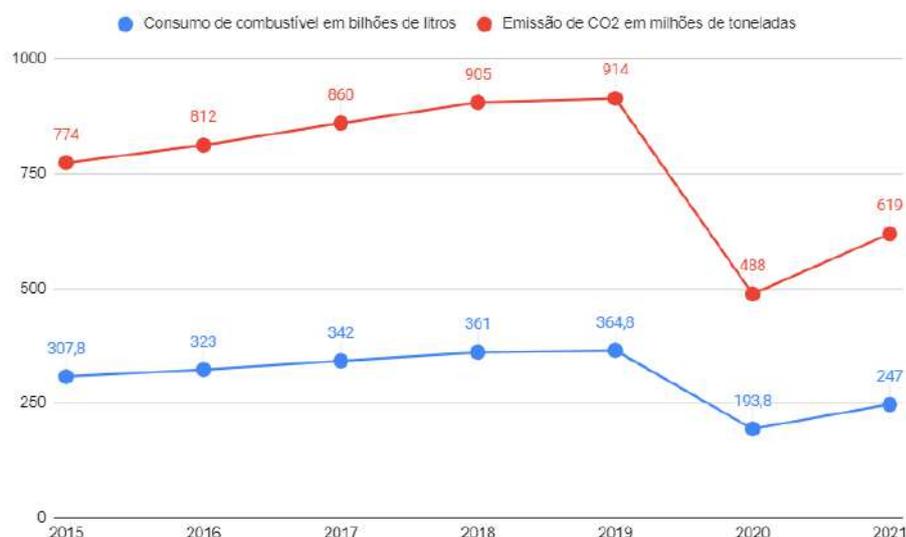
De acordo com estudo feito pela Agência Nacional de aviação Civil (ANAC) sobre o panorama do transporte aéreo brasileiro, constatou-se que, no período de 2009 a 2018, a demanda do transporte de passageiros teve crescimento acumulado de 78%, em termos de RPK (*Revenue Passenger-Kilometers* ou Passageiros-Quilômetros Pagos transportados)<sup>8</sup> (ANAC, 2019). A demanda mundial de passageiros - medida em RPK -, em 2019, teve um crescimento de 4,2% comparado ao ano anterior. Por outro lado, em 2020, devido à crise sanitária instalada pela pandemia de COVID-19, o setor de aviação registrou sua queda mais acentuada. Conforme resultados do tráfego mundial de passageiros obtidos pela Associação Internacional de Transporte Aéreo (IATA – *International Air Transport Association*), a demanda (RPK) caiu 65,9%, comparada ao ano anterior. Com várias medidas de distanciamento social, o que impôs restrições ao tráfego aéreo nacional e internacional, a demanda continuou em declínio, registrando 66,7% de queda no primeiro semestre de 2021, se comparado com o mesmo período do ano anterior (ABEAR, 2019; IATA, 2021).

Em 2019, a indústria aérea mundial consumiu cerca de 360 bilhões de litros de combustíveis fósseis, emitindo, aproximadamente, 914 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>, o que representa cerca de 2% das emissões globais. Na Figura 2.1 é apresentado o panorama de consumo de combustíveis de aviação e emissão de CO<sub>2</sub> dos últimos anos.

---

<sup>8</sup> Demanda – é medida em RPK (*Revenue Passenger-Kilometers* ou Passageiros-Quilômetros Pagos transportados): é calculada por voo, pela multiplicação do número de passageiros pagantes em cada etapa pela distância percorrida em cada etapa. Um RPK é produzido quando um assento ocupado por um passageiro pagante é transportado por um quilômetro. Para uma companhia ou para a indústria, basta somar os RPKs de todos os voos daquela companhia ou de todas as companhias (ABEAR, 2019).

**Figura 2.1:** Dados sobre o consumo de combustível de aviação e emissão de CO<sub>2</sub> pelo setor aéreo. (os valores de 2020 e 2021 são estimativas)



Fonte: Adaptado de IATA (2021); Organização da Aviação Civil Internacional – ICAO (2021); Revista Valor (2021)

É perceptível que o consumo de combustíveis de aviação e as emissões de CO<sub>2</sub> vem crescendo nos últimos anos, sendo 2020 e 2021 prováveis exceções, já que o período ainda está regido pelas restrições da pandemia de COVID-19. É importante destacar que, embora o CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) seja o principal gás de efeito estufa (GEE) emitido diretamente pela queima desses combustíveis, outros gases também contribuem como poluentes atmosféricos, como o CH<sub>4</sub> (metano) e o óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) (ANAC, 2020). Vale ressaltar que, em 2019, o setor de aviação civil transportou cerca de 4,5 bilhões de passageiros, e estima-se que esse número dobrará até o ano de 2050, dobrando também a emissão de CO<sub>2</sub>, conseqüentemente (VALOR, 2021; ISTOÉ, 2021).

Essas previsões, que datam desde o final do século passado, impulsionaram uma mobilização pela redução dos GEE na indústria de aviação. Em 2009, no sentido de minimizar os impactos climáticos causados pelo setor aéreo, os membros da IATA, influenciados pela Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas (COP-15), se comprometeram em aperfeiçoar a utilização dos combustíveis de aviação, visando a redução das emissões de GEE aos níveis de 2005. Para alcançar o objetivo, foram estabelecidas algumas diretrizes de infraestrutura e sustentabilidade para o setor de aviação, destacando-se dentre elas o uso de biocombustíveis (IATA, 2013).

Os membros da Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO - sigla em inglês) também aderiram aos objetivos propostos pelos membros da IATA, especialmente quanto à neutralização das emissões líquidas de CO<sub>2</sub> a partir de 2020. Assim, aprovaram, em 2016, a iniciativa do programa Esquema de Redução e Compensação de Emissões da Aviação (*em inglês – Internacional Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*), o CORSIA. O objetivo principal do programa compreende um mecanismo de mercado para promover a mitigação dos impactos ambientais causados pelas emissões de GEE de aviação e neutralizar as emissões de emissões líquidas de CO<sub>2</sub>, tendo como referência os níveis fixados em 2020 (DELGADO, SOUSA, ROITMAN, 2017; ICAO, 2016; SOARES, CENAMO, 2018). O Brasil faz parte do conjunto dos países que aderiram ao CORSIA, iniciando o monitoramento das emissões de seus operadores aéreos em 2019, conforme as diretrizes estabelecidas pela Resolução da ANAC nº 496, de 28 de novembro de 2018<sup>9</sup>.

Dentre as metas ambiciosas estabelecidas para a aviação civil internacional para mitigação dos impactos ambientais, destacam-se:

- Melhorias na estrutura das aeronaves, sistemas de propulsão e outras inovações aeronáuticas e tecnológicas;
- Otimização dos procedimentos de voo para reduzir o consumo de combustível;
- Aumentar a produção e implantação de combustíveis de aviação sustentáveis e de energia limpa;

Neste contexto, entre 2009 e 2019 o setor aéreo apresentou uma melhora significativa na eficiência energética, de cerca de 21,4% (ISTOÉ, 2021). Isso se deve não apenas ao avanço das tecnologias de aviação, mas também à gradativa participação dos combustíveis de aviação sustentáveis (SAF - sigla em inglês) na matriz energética, que além de contribuir com a redução da emissão dos GEE, auxilia na diminuição da relação de dependência que o setor de aviação apresenta em relação aos combustíveis fósseis.

---

<sup>9</sup> A resolução teve recentes alterações pela Resolução nº 558, de 14 de maio de 2020.

Na busca por benefícios econômicos e com baixo impacto ambiental, os biocombustíveis de aviação podem figurar tanto como combustíveis que substituem (*drop-in*) quanto como combustíveis que complementam (não *drop-in*) o querosene de aviação. Desta forma, para que possam ser utilizados, devem ser compatíveis e miscíveis ao combustível tradicional, de modo que não requeiram adaptações no motor ou infraestrutura das aeronaves, e que também não comprometam a segurança do voo (ROITMAN, 2019).

### **2.3 Bioquerosene de aviação na indústria brasileira: plataformas de produção**

Assim como ocorreu com o etanol e o biodiesel, a produção de bioquerosene tem potencial de ratificar a posição de referência do Brasil na produção de biocombustíveis. Isso porque o país apresenta conhecimento tecnológico, um setor de biocombustível sólido e bem estabelecido, além de uma vasta disponibilidade de matérias-primas. Como relatado, no Brasil, desde a segunda metade do século XX, vem sendo implementadas ações governamentais para fomentar o investimento em biocombustíveis, com destaque para as recentes plataformas de produção do bioquerosene, com a utilização de matérias-primas de espécies regionais e nativas para produção de combustíveis sustentáveis.

Durante a Rio+20, realizada em 2012, a União Brasileira do Biodiesel e Bioquerosene (UBRABIO), em parceria com entidades do setor de aviação civil privada, lançou a Plataforma Brasileira do Bioquerosene (PBB), nos moldes do PNPB, no intuito de afirmar a importância da promoção e produção desses biocombustíveis para o desenvolvimento socioeconômico e sustentável do país. O lançamento da plataforma ocorreu logo após a chegada do primeiro voo com biocombustível em caráter experimental no país (UBRABIO, 2012).

Em 2014, o Governo de Minas Gerais lançou a Plataforma Mineira de Bioquerosene e Renováveis da Zona da Mata (PBioZM), em parceria com entidades públicas e do setor privado, criada para o desenvolvimento de cadeias de produção com múltiplas biomassas e múltiplos processos para diesel verde, com foco em matérias-primas regionais com alto potencial energético, como a macaúba. Integrada à Plataforma Brasileira do Bioquerosene (PBB), a plataforma mineira conta com sete polos de pesquisa e produção, com destaque ao polo de Juiz de Fora, que pretende

iniciar a produção de bioquerosene e diesel verde já em 2023, e espera produzir cerca de 230 milhões de litros de bioquerosene para aviação (BioQAV) até 2031 (EPBR, 2021).

No ano seguinte, em 2015, foram criadas outras duas Plataformas de Bioquerosene: em Pernambuco e no Rio Grande do Sul, ambas com foco em pesquisas de matérias-primas com potencial energético para produção de combustíveis. A plataforma pernambucana tem como base produtiva a cana-de-açúcar, a mamona e a macaúba, enquanto a plataforma gaúcha baseia-se na soja e no farelo de soja como matérias-primas (SOUZA, 2019).

Além disso, em 2017, foi lançada a Rede Brasileira de Bioquerosene e Hidrocarbonetos Sustentáveis para aviação (RBQAV), que tem como objetivo favorecer a realização de pesquisa, desenvolvimento e inovação no setor por meio de parcerias entre instituições de pesquisa e empresas privadas. A rede também tem a intenção de dar suporte à criação de políticas públicas e outras ações que possam auxiliar na viabilização da produção de bioquerosene e hidrocarbonetos renováveis (RBQAV, 2021).

#### **2.4 Ações regulatórias para a promoção do uso e produção do bioquerosene na matriz energética brasileira**

Além das ações apresentadas, o legislativo brasileiro, juntamente com os órgãos regulatórios, como ANP, ANAC e o Ministério de Minas e Energia, que atuam para regular as atividades relativas à indústria do petróleo, gás natural e seus derivados, vem empreendendo esforços para promover a política energética brasileira, especialmente quanto à produção dos biocombustíveis, visando contribuir para o atendimento aos compromissos firmados internacionalmente quanto a descarbonização e sustentabilidade.

O Quadro 2.1 apresenta um resumo de algumas das principais leis, atos normativos e resoluções que foram publicadas nos últimos anos, no sentido de regulamentar e promover a produção e o uso do bioquerosene de aviação (BioQAV).

**Quadro 2.1:** Principais leis, atos normativos e regulatórios relacionados ao mercado brasileiro de bioquerosene de aviação

<b>LEIS, ATOS NORMATIVOS E REGULATÓRIOS</b>	<b>EMENTA</b>	<b>REFERÊNCIA</b>
<b>Lei nº. 9.478, de 6 de agosto de 1997</b>	Dispõe sobre a política energética nacional, as atividades relativas ao monopólio do petróleo, institui o Conselho Nacional de Política Energética e a Agência Nacional do Petróleo e dá outras providências	BRASIL, 1997
<b>Resolução ANP nº. 17, de 26 de julho de 2006</b>	Regula o exercício da atividade de distribuição de combustíveis de aviação	ANP, 2006
<b>Resolução ANP nº 37, de 01 de dezembro de 2009</b>	Fica estabelecida, por meio da presente Resolução, a especificação do querosene de aviação, destinado exclusivamente ao consumo em turbinas de aeronaves, comercializado por produtores, importadores, distribuidores e revendedores, em todo o território nacional	ANP, 2009
<b>Lei nº. 12.490, de 16 de setembro de 2011</b>	Inclui os biocombustíveis na Lei nº. 9.478, de 1997, dispõe sobre a política e a fiscalização das atividades relativas ao abastecimento nacional de combustíveis e dá outras providências em relação à indústria do petróleo	BRASIL, 2011
<b>Projeto de Lei nº. 506, de 2013</b>	Dispõe sobre a criação do Programa Nacional do Bioquerosene como incentivo à sustentabilidade ambiental da aviação brasileira e dá outras providências	BRASIL, 2013
<b>Resolução ANP nº. 63, de 05 de dezembro de 2014</b>	Estabelece as especificações dos Querosenes de Aviação Alternativos e do Querosene de Aviação B-X (QAV B-X) contidas no Regulamento Técnico, parte integrante desta Resolução, bem como as obrigações quanto ao controle da qualidade a serem atendidas pelos diversos agentes econômicos que comercializam esses produtos em todo o território nacional	ANP, 2014
<b>Lei nº. 13.576, de 26 de dezembro de 2017</b>	Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências.	BRASIL, 2017
<b>Resolução ANP nº. 758, de 23 de novembro de 2018</b>	Regulamenta a certificação da produção ou importação eficiente de biocombustíveis de que trata o art. 18 da Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017, e o credenciamento de firmas inspetoras.	ANP, 2018
<b>Resolução ANP nº. 778, de 5 de abril de 2019</b>	Estabelece as especificações do querosene de aviação, querosenes de aviação alternativos e do querosene de aviação C, bem como as obrigações quanto ao controle da qualidade a serem atendidas pelos agentes econômicos que comercializam esses produtos em território nacional	ANP, 2019
<b>Resolução ANP nº. 779, de 5 de abril de 2019</b>	Altera a Resolução ANP nº 17, de 26 de julho de 2006; e a Resolução ANP nº 18, de 26 de julho de 2006, para atualizar as definições de querosene de aviação C (QAV-C) e querosene de aviação alternativo e vedar a importação de QAV-C.	ANP, 2019
<b>Resolução ANP nº. 828, de 1 de setembro de 2020</b>	Dispõe sobre as informações constantes dos documentos da qualidade e o envio dos dados da qualidade dos combustíveis produzidos no território nacional ou importados e dá outras providências	ANP, 2020
<b>Resolução nº 7, de 20 de abril de 2021</b>	Institui o Programa Combustível do Futuro, cria o Comitê Técnico Combustível do Futuro e dá outras providências	CNPE, 2021

Fonte: elaboração própria

**Quadro 2.1 (continuação):** Principais leis, atos normativos e regulatórios relacionados ao mercado brasileiro de bioquerosene de aviação

<b>LEIS, ATOS NORMATIVOS E REGULATÓRIOS</b>	<b>EMENTA</b>	<b>REFERÊNCIA</b>
<b>Lei nº. 14.248, de 25 de novembro de 2021</b>	Estabelece o Programa Nacional do Bioquerosene para o incentivo à pesquisa e o fomento da produção de energia à base de biomassas, visando à sustentabilidade da aviação brasileira	BRASIL, 2021

Fonte: elaboração própria

A Lei nº. 14.248/21, recém-publicada, representa um grande marco para a regulamentação e promoção dos biocombustíveis, especialmente pelo fato de instaurar o Programa Nacional do Bioquerosene. Inserido no contexto do Programa Combustível do Futuro, o projeto incentiva a pesquisa e fomento da produção de bioquerosene a partir de “biomassas”. O intuito da lei não se limita apenas em promover o desenvolvimento de novas tecnologias para miscibilidade do bioquerosene com o querosene de aviação de origem fóssil, mas também o desenvolvimento de tecnologias capazes de garantir a substituição total do querosene de aviação convencional (BRASIL, 2021).

A Lei nº. 14.248/21 ainda estabelece incentivos fiscais e a destinação de recursos financeiros de agências e instituições do governo para fomentar a pesquisa, a produção, a comercialização e o uso energético do bioquerosene. É importante ressaltar que, para merecer os benefícios, é preciso que haja compatibilidade do bioquerosene com as tecnologias atuais de propulsão das aeronaves, de modo que não seja necessário fazer alterações na infraestrutura e, ainda, que este não comprometa a segurança do sistema de aviação civil (BRASIL, 2021).

## **2.5 Matérias-primas para produção do bioquerosene**

Conforme já mencionado, o Brasil tem grande potencial para a produção de biocombustíveis, especialmente pelo fato de ser um dos países com maior potencial agrícola do mundo, dada a sua localização tropical privilegiada, regime pluviométrico e grande extensão de terras agricultáveis, de mais de 90 milhões de hectares. Além disso, o país conta com mais de 200 milhões de hectares de pastagem com mínimo grau de degradação, que podem ser recuperadas por meio da aplicação de

tecnologias adequadas, possibilitando o uso para cultivo de alimentos e produção de bioenergia. (EMBRAPA, 2015).

O bioquerosene pode ser produzido por uma gama de processos e matérias-primas, dentre elas: biomassas lignocelulósicas, fontes sacarinas, amiláceas e óleos vegetais. É importante destacar que a escolha das matérias-primas costuma ser baseada no potencial produtivo dessas espécies, nas adaptações naturais de clima e solo, e na composição em termos de óleos e ácidos graxos, caso se trate de um processo que utiliza óleos vegetais (CGEE, 2010; EMBRAPA, 2015).

No que se refere aos processos que utilizam óleo vegetal como matéria-prima, é importante registrar que a cadeia produtiva deve atender não apenas o potencial produtivo, mas também a disponibilidade de matérias-primas regionais, com processos produtivos específicos, já que cada região possui condições diferentes para o cultivo das oleaginosas. Outro fator importante diz respeito à logística da cadeia produtiva do bioquerosene. É recomendado que os arranjos produtivos de bioquerosene estejam suficientemente próximos aos centros consumidores (aeroportos), a fim de viabilizar os custos de produção e minimizar os impactos ambientais (SOUZA, 2019; EMBRAPA, 2015).

Dentre as oleaginosas cultivadas, a soja tem se mostrado como a opção mais promissora de matéria-prima para produção do bioquerosene, a curto prazo, sobretudo por ser a oleaginosa produzida em maior quantidade no país (CANTARELLA *et al.*, 2015). Por outro lado, dentre as culturas de oleaginosas disponíveis, para diversificar a cadeia produtiva, em médio prazo, pode-se considerar opções como o dendê (palma), algodão, girassol, canola, entre outras. A longo prazo, deve-se considerar as culturas de oleaginosas duradouras e anuais que, por sua vez, ainda não estão domesticadas, como o pinhão-manso, a macaúba, a camelina e outras (EMBRAPA, 2015).

É importante ressaltar que algumas das matérias-primas mencionadas são utilizadas para produção de biodiesel, como a soja e o algodão. Além disso, também há uma concorrência de boa parte delas com o setor de produção de alimentos. Por isso, é importante que haja a diversificação das matérias-primas para produção de BioQAV, a fim de evitar a concorrência com a produção de outros biocombustíveis e não comprometer a segurança alimentar do país, além de prover flexibilidade ao setor (SOUZA, 2019).

## 2.6 Rotas tecnológicas para produção do bioquerosene

Biomassas lignocelulósicas, sacarinas, amiláceas e óleos vegetais são materiais que se apresentam em abundância no país, sem esquecer dos materiais residuais. Todos esses tipos de biomassa podem ser usados para produção de bioquerosene. No entanto, cada matéria-prima necessita de um processo de transformação diferente, que pode ser químico, bioquímico ou termoquímico:

Os processos de obtenção de biocombustíveis com perspectivas de substituir o querosene de aviação podem ser: a) químicos, como a transesterificação e o hidrocrackeamento catalítico, em ambos os casos, utilizando como matéria-prima óleos vegetais ou gorduras animais, b) termoquímicos, utilizando em geral biomassa lignocelulósica, inicialmente gaseificada, com posterior produção de hidrocarbonetos líquidos, e c) bioquímicos, empregando leveduras ou bactérias modificadas, capazes de processar açúcares e produzir hidrocarbonetos. (CGEE, 2010).

Entretanto, toda rota tecnológica deve ser normatizada por entidades especializadas, de modo a garantir a segurança e uniformidade no setor. No Brasil, a normatização técnica dos biocombustíveis é definida pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) e pela ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis), com base em documentos de outras agências internacionais, como o CEN (Comitê Europeu de Normatização), a ASTM (*American Society for Testing and Materials – ASTM International*), dentre outras (CNPEM, 2020).

No que concerne às normas internacionais, as orientações técnicas da ASTM são referência para as especificações do uso do querosene de aviação no âmbito da aviação civil, especialmente quanto às diretrizes que abrangem o querosene de aviação fóssil e o querosene de aviação alternativo. Dentre elas, destacam-se (ASTM, 2011):

- ASTM D4054-21a – *Standard Practice for Evaluation of New Aviation Turbine Fuels and Fuel Additives* (em tradução livre – Prática Padrão para Avaliação de Novos Combustíveis de Turbina de Aviação e Aditivos de Combustível): esta prática padrão fornece procedimentos para desenvolver dados para uso em relatórios de pesquisa para novos combustíveis de

turbina de aviação, mudanças nos combustíveis existentes ou novos aditivos de combustível de turbina de aviação

- ASTM D7566-21 – *Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons* (em tradução livre – Especificação padrão para combustível de turbina de aviação contendo hidrocarbonetos sintetizados): esta especificação cobre a fabricação de combustível para turbinas de aviação que consiste em componentes de mistura convencionais e sintéticos.
- ASTM D1655-21c – *Standard Specification for Aviation Turbine Fuels* (em tradução livre – Especificação padrão para combustíveis de turbina de aviação): esta especificação cobre compras de combustível de turbina de aviação sob contrato e se destina principalmente ao uso por agências de compra.

A especificação padrão mais usual aos combustíveis de aviação é a norma ASTM D1655-21c, complementada pela normatização ASTM D7566-21. Ambas definem os critérios e especificidades das rotas tecnológicas para produção e miscibilidade dos biocombustíveis (querosene alternativo) nos combustíveis convencionais de aviação. Atualmente, existem nove rotas tecnológicas já aprovadas pela ASTM, conforme Quadro 2.2:

**Quadro 2.2:** Rotas tecnológicas aprovadas pela ASTM - até Julho/2021

COMBUSTÍVEIS	MATÉRIA-PRIMA	DATA DE CERTIFICAÇÃO	NÍVEL MÁXIMO DE MISTURA
<b>Querosene parafínico sintetizado por Fischer-Tropsch (SPK-FT)</b>	Biomassas renováveis (material celulósico e resíduos sólidos, por exemplo), carvão ou gás natural	2009	50%
<b>Querosene parafínico sintetizado por Fischer-Tropsch com aromáticos (SPK-FT/A)</b>	Biomassas renováveis (material celulósico e resíduos sólidos, por exemplo), carvão ou gás natural	2015	50%

Fonte: ASTM (2021); Roitman (2019); IBP (2021).

**Quadro 2.2 (continuação):** Rotas tecnológicas aprovadas pela ASTM - até Julho/2021

<b>COMBUSTÍVEIS</b>	<b>MATÉRIA-PRIMA</b>	<b>DATA DE CERTIFICAÇÃO</b>	<b>NÍVEL MÁXIMO DE MISTURA</b>
<b>Querosene parafínico sintetizado via ésteres e ácidos graxos hidroprocessados (SPK-HEFA)</b>	Óleos vegetais e gorduras animais	2011	50%
<b>Iso-parafinas sintetizadas de açúcares fermentados e hidroprocessados (HFS-SIP)</b>	Fermentação de açúcares, microorganismos geneticamente modificados	2014	10%
<b>Querosene parafínico sintetizado por álcool - alcohol to jet (SPK-ATJ)</b>	Biomassas renováveis, material celulósico, amidos, açúcares	2016	50%
<b>Coprocessamento de até 5% em volume de gorduras e óleos em uma refinaria para produzir querosene</b>	Óleos vegetais e gorduras animais	2018	5% (entrada da refinaria)
<b>Querosene de hidrotermólise catalítica (CH-SK)</b>	Gorduras renováveis, óleos e ácidos graxos	2020	50%
<b>Querosene parafínico sintetizado por hidrocarbonetos bioderivados, ácidos graxos e ésteres hidroprocessados (SPK-HC-HEFA)</b>	Óleo de algas ricos em hidrocarbonetos	2020	10%

Fonte: ASTM (2021); Roitman (2019); IBP (2021).

A ASTM aprova o bioquerosene por meio dos testes previstos na norma ASTM D4054-21a. Assim, depois de aprovado, a associação internacional o inclui na padronização ASTM D7566-21, que compreende as especificidades exigidas para os combustíveis de aviação e suas rotas tecnológicas. Aprovada pela ASTM, a ANP avalia a aprovação do querosene de aviação alternativo e a inclusão em sua resolução vigente.

Atualmente, estão inclusas na Resolução ANP nº 856/21 sete rotas tecnológicas para produção do bioquerosene de aviação. As rotas são espelhadas no Quadro 2.2 quanto a certificação, nomenclatura e matérias-primas. Para contextualizar, serão abordadas breves considerações acerca do processo produtivo de cada uma dessas rotas de produção.

### 2.6.1 Querosene parafínico hidroprocessado e sintetizado por Fischer-Tropsch (SPK-FT)

A síntese *Fischer-Tropsch* (FT) é um processo químico catalítico que acontece a partir do gás de síntese, composto por monóxido de carbono (CO) e o hidrogênio (H<sub>2</sub>), os quais são convertidos em hidrocarbonetos de vários pesos moleculares. As condições da síntese *Fischer-Tropsch* são geralmente escolhidas para maximizar a formação de combustíveis líquidos de hidrocarbonetos de peso molecular mais alto (SCHULZ, 1999).

As matérias-primas (biomassa, carvão, gás natural, resíduos etc.) são, inicialmente, gaseificadas (geração de gás de síntese) e, posteriormente, convertidas em parafinas de cadeias longas via processo *Fischer-Tropsch*. Os catalisadores considerados para a síntese *Fischer-Tropsch* são baseados em metais de transição de ferro, cobalto, níquel e rutênio. Porém, a Resolução ANP nº. 856/21 estabelece que os hidrocarbonetos precisam ser “produzidos por gás de síntese via processo *Fischer-Tropsch* com catalisadores a base de ferro ou cobalto” (ANP, 2021; SCHULZ, 1999).

Em seguida, as parafinas são enviadas para uma unidade de aprimoramento para hidrocrackeamento e isomerização, a fim de produzir combustíveis líquidos, com características compatíveis aos combustíveis de aviação de origem fóssil, com a diferença de que, em sua composição, não são encontradas as ciclo-parafinas e compostos aromáticos típicos dos combustíveis de aviação a base de petróleo. (MADSEN, HENKS, 2021; ROITMAN, 2019).

### 2.6.2 Querosene parafínico sintetizado com aromáticos (SPK/A)

Este é um processo termoquímico baseado na gaseificação e síntese *Fischer-Tropsch*, com a alquilação de aromáticos leves (especialmente benzeno) para criar uma mistura de hidrocarbonetos que inclui compostos aromáticos. Este combustível sintetizado, que inclui aromáticos, pode atingir níveis de mistura mais altas do que aquelas sem inclusão de aromáticos. (ICAO, 2017; DIK, SADDLER, 2021).

Cumprido ressaltar que este combustível inclui biocomponentes aromáticos, ao contrário da maioria das outras rotas tecnológicas, onde os hidrocarbonetos

parafínicos são predominantes. Ademais, sua composição contém todos os tipos de moléculas típicas dos combustíveis fosseis, e não apenas parafinas, o que permitiria a substituição de 100% do querosene de aviação (JET A e JET A-1) (ROITMAN, 2019; DIK, SADDLER, 2021).

#### *2.6.3 Querosene parafínico sintetizado por álcool (SPK-ATJ)*

Este combustível é produzido a partir do isobutanol (2016) e/ou etanol (2018), para níveis de mistura de até 50%. Processado por meio de desidratação, oligomerização, hidrogenação e fracionamento da matéria-prima, não depende do uso de microorganismos ou enzimas especiais para sua fermentação, já que o processo se inicia com um álcool previamente obtido por fermentação (ICAO, 2017; DIK, SADDLER, 2021).

#### *2.6.4 Isoparafinas sintetizadas de açúcares fermentados e hidroprocessados (SIP)*

Trata-se de um processo avançado de fermentação de açúcares, podendo ser aplicado em níveis de mistura de até 10% com os combustíveis convencionais. Esta é uma rota bioquímica que utiliza de leveduras modificadas para fermentar açúcares em uma molécula de hidrocarboneto C<sub>15</sub>, o farneseno. Após passar por um processo de hidrotreatamento, para produzir farnesano, esse composto poderá ser misturado aos combustíveis de aviação (ICAO, 2017; ROITMAN, 2019; DIK, SADDLER, 2021).

#### *2.6.5 Querosene de hidrotermólise catalítica (CHJ)*

A obtenção desse combustível envolve um processo de duas etapas de hidrotermólise catalítica e hidroprocessamento. A mistura de até 50% é permitida, vide Quadro 2.2. Neste processo, a matéria-prima selecionada reage com água em uma fase supercrítica para obter um produto semelhante ao petróleo bruto leve. As reações que ocorrem nesses processos hidrotérmicos são craqueamento, hidrólise, descarboxilação, isomerização e ciclização. O composto é então hidroprocessado, obtendo-se uma mistura de diesel, combustível de aviação, nafta, petróleo liquefeito e gases, que são finalmente separados por destilação. Como a matéria-prima é

baseada em triglicerídeos, o coprocessamento é baseado na conversão de óleo vegetal junto com destilados médios em refinarias existentes para reduzir o investimento de capital. (ICAO, 2017; DIK, SADDLER, 2021).

#### 2.6.6 *Querosene parafínico sintetizado por hidrocarbonetos bioderivados, ácidos graxos e ésteres hidroprocessados (SPK-HC-HEFA)*

Processo de produção de parafinas derivadas da hidrogenação e desoxigenação de hidrocarbonetos bioderivados, ésteres de ácidos graxos e ácidos graxos livres (HC-HEFA). Atualmente a fonte aprovada de lipídios derivados de bioprodutos é o *Botryococcus braunii*, uma espécie de microalga. Vale destacar que a matéria-prima extraída desta microalga apresenta um teor relevante de hidrocarbonetos e, por isso, o processo difere-se do processo que será mencionado na seção 2.6.7. Para o biocombustível produzido por esta rota, permite-se até 10% de miscibilidade com combustível de aviação convencional. (DIK, SADDLER, 2021).

#### 2.6.7 *Querosene parafínico sintetizado por ácidos graxos e ésteres hidroprocessados (SPK-HEFA)*

O querosene parafínico sintetizado por ácidos graxos e ésteres hidroprocessados, obtido por um processo de hidrogenação, conhecido como HEFA – *Hydroprocessed Esters and Fatty Acids* (Ésteres Hidroprocessados e Ácidos Graxos, em tradução livre), pode ser produzido a partir de vários tipos de óleos e gorduras vegetais. Isso inclui triglicerídeos e ácidos graxos de óleos vegetais, além do uso de gorduras animais.

Em um mapeamento multicritério para seleção de oleaginosas para o processo HEFA realizado por Souza (2019)<sup>10</sup>, foram identificadas matérias-primas nas diferentes regiões do país. Sobre a potencialidade dessas matérias-primas para produção de bioquerosene, o *ranking* das oleaginosas em potencial para produção de bioquerosene HEFA pode ser visto na Tabela 2.1.

---

<sup>10</sup> O mapeamento foi realizado por meio de critérios específicos, sendo empregadas duas ferramentas multicritérios na avaliação: AHP e TOPSIS. A análise foi realizada em um primeiro momento sem considerar o parâmetro “emissões de GEE”, uma vez que não foram encontrados trabalhos amplamente disponíveis na literatura considerando Análise de Ciclo de Vida (ACV) para HEFA produzido a partir de todas as oleaginosas avaliadas (SOUZA, 2019).

**Tabela 2.1:** Matérias-primas potenciais para produção de bioquerosene HEFA nas diferentes regiões do Brasil, segundo Souza (2019)

Oleaginosa	Ordem de prioridade				
	Norte	Nordeste	Sul	Sudeste	Centro-oeste
Soja	1º	1º	1º	1º	1º
Palma	2º	3º	-	-	3º
Macaúba	3º	5º	-	3º	6º
Babaçu	4º	6º	-	-	-
Pinhão-manso	-	2º	-	2º	2º
Algodão	-	4º	4º	4º	4º
Mamona	-	7º	-	6º	7º
Girassol	-	-	2º	5º	5º
Colza	-	-	3º	-	-
Amendoim	-	-	-	7º	-

Fonte: adaptado de Souza (2019)

Todas as espécies nativas apresentadas na Tabela 2.1 possuem potencialidades e adaptações naturais, de acordo com o solo e o clima da região. Por isso, a partir deste mapeamento multicritério, essas matérias-primas passaram a compor o *ranking* das oleaginosas regionais mais promissoras para produção de bioquerosene de aviação - pelo processamento HEFA - no Brasil.

Com efeito, na primeira etapa do processo HEFA, a matéria-prima, obtida por meio de prensagem ou por extração da biomassa, passa por um pré-tratamento antes de ser direcionada para a hidrogenação, para remoção de impurezas indesejáveis (ROITMAN, 2019).

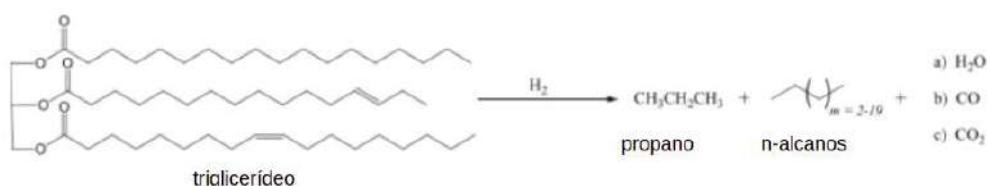
Em seguida, o óleo vegetal é submetido ao processo de hidrogenação, inicialmente visando remoção de oxigênio das moléculas de triglicerídeo. As reações para a remoção de oxigênio durante o processo podem ocorrer de diferentes maneiras de acordo com as condições do processo, o catalisador e a disponibilidade de hidrogênio. Este último fator pode impactar diretamente na forma com que o oxigênio é removido, fazendo com que existam três classificações para isso: hidro-deoxigenação, decarbonilação e decarboxilação (NEULING, KALTSCHMITT, 2015).

A hidro-deoxigenação é favorecida quando há alta disponibilidade de hidrogênio, fazendo com que o oxigênio seja removido na forma de água (H<sub>2</sub>O). A decarbonilação, por sua vez, é favorecida com uma disponibilidade menor de hidrogênio, e culmina na remoção de oxigênio em moléculas de CO. Já a decarboxilação, através da qual o oxigênio é removido na forma de CO<sub>2</sub> é favorecida

com uma concentração ainda menor de hidrogênio. Os dois últimos processos, por consumirem carbono, não são os preferidos em termos de rendimento de hidrocarbonetos. Por outro lado, a hidro-deoxigenação apresenta como desvantagem a alta demanda de hidrogênio (NEULING, KALTSCHMITT, 2015).

A hidro-deoxigenação é um processo exotérmico, que acontece em faixas de temperatura de 280 °C a 340 °C e a pressões de 50 a 100 bar. São produzidos propano e alcanos lineares, nas faixas de C<sub>8</sub> a C<sub>20</sub>, de acordo com o óleo utilizado (Figura 2.2). Dessa forma, o óleo vegetal é transformado em alcanos totalmente saturados. No entanto, um processo seguinte é necessário para que sejam atingidos os requisitos para combustível de aviação, de acordo com a ASTM D7566. Por isso, é realizada em seguida a etapa de isomerização (NEULING, KALTSCHMITT, 2015).

**Figura 2.2.** Representação da etapa de hidrogenação de triglicerídeos via hidro-deoxigenação (a), decarbonilação (b) e decarboxilação (c).



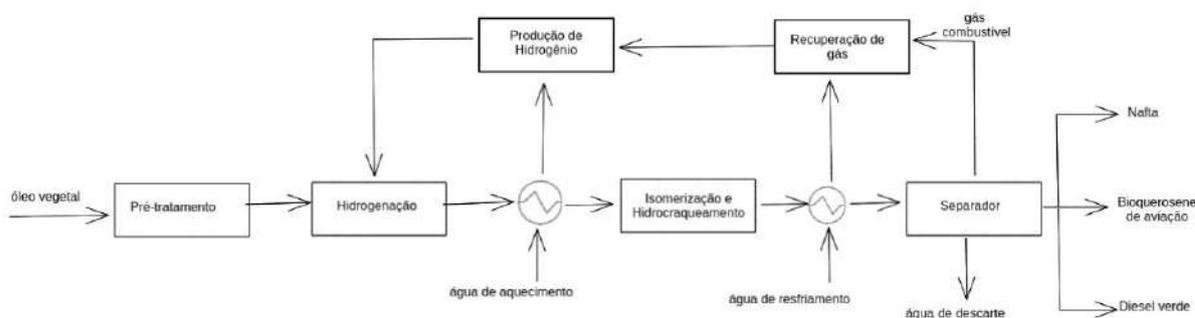
Fonte: Adaptado de NEULING, KALTSCHMITT, 2015

O objetivo da isomerização é a geração de alcanos ramificados, visando a redução no ponto de congelamento do combustível final - fator fundamental para a segurança das aeronaves -, além de adequar o tamanho das cadeias à faixa do querosene. Nessa etapa ocorre um processo de craqueamento catalítico, no qual os hidrocarbonetos de cadeia longa são quebrados em menores fragmentos e, em paralelo, as extremidades abertas são saturadas com hidrogênio e parcialmente recombinadas dentro de uma molécula ramificada complexa (NEULING, KALTSCHMITT, 2015).

Para essa parte do processo, as temperaturas costumam estar na faixa de 280 °C a 400 °C, e as pressões são tipicamente de 30 a 100 bar. Os catalisadores mais comuns para craqueamento e isomerização costumam ser zeólitas, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Pt (platina). Em geral, as reações de craqueamento predominam em temperaturas mais altas e pressões mais baixas, enquanto as reações de isomerização predominam em temperaturas mais baixas e pressões mais altas (NEULING, KALTSCHMITT, 2015).

Após a isomerização, assim como em um refino tradicional, o produto pode ser separado por destilação e retificação. Assim, é obtido como produto final o chamado SPK - *Synthesized Paraffinic Kerosene* (querosene parafínico sintetizado, em tradução livre). Como produtos secundários, podem ser gerados nafta, diesel (o chamado diesel verde) e gases combustíveis. Tais produtos podem ser vendidos ou aproveitados em outras etapas do processo. A Figura 2.3 apresenta um diagrama de blocos simplificado do processo (NEULING, KALTSCHMITT, 2015).

**Figura 2.3:** Fluxograma simplificado do processo HEFA.



Fonte: Adaptado de Neuling e Kaltschmitt (2015).

O processo é também usado para a produção de diesel renovável hidrotratado, também conhecido como diesel verde ou óleo vegetal hidrotratado (HVO - sigla em inglês), apenas com a diferença deste possuir o craqueamento mais severo das moléculas de carbono de cadeia mais longa (TAO *et. al*, 2017; IBP, 2021).

Neuling e Kaltschmitt (2015) avaliaram a complexidade dos processos envolvidos e chegaram à conclusão de que o processo mais difundido para produção de bioquerosene em escala industrial, até aquele momento, era o processo HEFA. Além de ser o processo mais maduro no mercado global, especialmente pelo fato de obter maiores volumes de bioquerosene por volume de matéria-prima utilizada, é “a única via de conversão que faz uso do resultado da biossíntese realizada pela natureza durante o crescimento da planta, isto é, o óleo biossintetizado é transformado em combustível através do hidroprocessamento”, explica Roitman (2019). No caso, das outras rotas tecnológicas, o processo se inicia com a destruição da matéria orgânica, que posteriormente precisará ser sintetizada novamente (ROITMAN, 2019).

## 2.7 Uso e a produção de bioquerosene no Brasil: vantagens, desafios e incertezas

Os inegáveis impactos ambientais causados pela dependência contínua do combustível de aviação de origem fóssil estimularam os esforços internacionais no setor de aviação em direção a soluções alternativas. Devido às opções limitadas de descarbonização, a implementação bem sucedida do combustível de aviação sustentável é alternativa crucial para contribuir com as estratégias de mitigação de emissões de gases de efeito estufa para o setor de aviação (DOLIENTE, *et. al.*, 2020).

Dentre as vantagens para produção do bioquerosene de aviação, destaca-se (BAUMI, BERTOSSE, GUEDES, 2019; DOLIENTE, *et. al.*, 2020):

- Redução dos gases de efeito estufa (GEE), principalmente a redução da emissão de CO<sub>2</sub>. Os biocombustíveis apresentam um balanço favorável de CO<sub>2</sub>, variando de acordo com a biomassa inicial e a rota utilizada;
- Redução da poluição atmosférica, como redução de SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> e CO. A queima de biocombustíveis é geralmente mais eficiente e limpa do que a de derivados de petróleo;
- Maior segurança energética. A variabilidade das fontes de energia gera estabilidade de mercado e reduz o risco de escassez;
- Desenvolvimento da indústria de bioenergia, geração de empregos e novas possibilidades de capital intelectual;
- Desenvolvimento rural em termos de aumento do emprego na agricultura e produção;
- Diminuição da dependência do petróleo, que é um recurso natural limitado.

Além das vantagens da produção de bioquerosene de aviação apresentadas, é importante ressaltar que, para garantir que esta seja uma alternativa realmente sustentável, a economia de emissões deve ser ambicionada em todas as fases da produção: extração, refino e transporte (DOLIENTE, *et. al.*, 2020).

Apesar de seus benefícios econômicos e ambientais, a implantação produtiva em larga escala do bioquerosene não tem recebido a atenção necessária. Investimentos na forma de subsídios, incentivos fiscais e o apoio legislativo são

necessários para que as vias de produção se tornem economicamente competitivas em relação à produção de refinarias de petróleo bruto (HENDRICKS *et al.*, 2011).

Os desafios enfrentados pela produção do bioquerosene de aviação são semelhantes aos dos biocombustíveis em geral: o principal é como garantir que as matérias-primas, que vêm da biomassa ou de outras fontes baseadas em carbono, sejam seguras, sustentáveis, economicamente viáveis e suficientemente disponíveis no tempo e espaço das demandas (HENDRICKS *et al.*, 2011; DOLIENTE, *et. al.*, 2020). Ademais, como a indústria da aviação, os setores de automóveis, produtos químicos, transporte rodoviário e eletricidade, por exemplo, também têm implementado esforços para reduzir a dependência de combustíveis fósseis, o que pode gerar competição no fornecimento de biomassa (DOLIENTE, *et. al.*, 2020).

Todos esses desafios têm gerado incertezas tecnológicas e comerciais sobre o uso e a produção de bioquerosene no Brasil. Essas incertezas estão relacionadas, principalmente, à falta de domínio técnico-científico envolvido na inovação e aos custos empregados na transformação de matérias-primas e rotas de refino do bioquerosene de aviação. Dentre as maiores incertezas comerciais está o custo de produção do bioquerosene de aviação, que ainda não se mostra competitivo quando comparado ao querosene de aviação de origem fóssil. Os custos de matéria-prima, rotas de refino e logística, impactam diretamente no custo final do combustível renovável (SOUZA, 2019).

Muito embora o mercado brasileiro de bioquerosene careça de atenção dos governos estaduais e Federal, a recém-publicada Lei nº. 14.248/21 tende a promover o uso e produção do bioquerosene, por meio de incentivos financeiros e fiscais, a fim de consolidar os objetivos do Programa Nacional do Bioquerosene. Portanto, os desafios e as incertezas do mercado podem ser sanáveis.

Neste sentido, diversos estudos vêm sendo realizados, no intuito de elucidar as melhores alternativas para produção do bioquerosene de aviação. Quanto aos custos envolvidos no refino, reitera-se a utilização da rota tecnológica HEFA, a qual tem se apresentado como a melhor opção para produção em escala do bioquerosene. Quanto aos custos comerciais, é interessante que se faça mais estudos e investimentos na logística de produção e distribuição do bioquerosene, tornando possível obter competitividade com os combustíveis de aviação de origem fóssil. Entre as possibilidades de biomassa disponíveis, é preciso avaliar as peculiaridades

técnicas e econômicas no seu processamento. É sobre este último tópico que este trabalho se dedica.

### 3 PREPARAÇÃO DO AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

Este capítulo aborda todos os passos que foram realizados para elaboração das simulações. São eles: definição dos componentes químicos envolvidos no processo; definição dos pacotes termodinâmicos adotados; definição das condições de entrada das correntes de processo; definição da capacidade da planta; e modelagem das reações. As simulações foram realizadas no *software* Aspen HYSYS® v8.8.

O processo de produção de bioquerosene avaliado neste trabalho corresponde à tecnologia HEFA, conforme descrito no Capítulo 2. Como discutido, esta é a tecnologia mais madura e com maior participação no mercado. As três biomassas escolhidas para análise foram os óleos de soja, dendê (palma) e pinhão-manso (*Jatropha curcas*).

Os critérios para escolha dos óleos permearam os âmbitos econômico, comercial, logístico e técnico. Como a soja é a oleaginosa produzida em maior quantidade no país e, portanto, uma das mais promissoras para a produção de biocombustíveis, a avaliação do desempenho desta matéria-prima torna-se indispensável.

Por apresentar um maior teor de compostos saturados, a palma (dendê) também foi escolhida para este estudo. Do ponto de vista de processamento, é interessante avaliar o efeito de uma biomassa que apresente óleo com composição um pouco diferenciada em termos de estrutura química, permitindo a comparação do rendimento em termos de bioquerosene e de diesel verde.

Por fim, o óleo de pinhão-manso também foi considerado como uma matéria-prima interessante por se tratar de uma cultura oleaginosa com crescimento anual. Isto pode ser importante em termos de disponibilidade, embora ainda não seja cultivada em uma escala tão ampla quanto as duas espécies anteriores.

#### 3.1 Definição dos Componentes Químicos Envolvidos

Aqui serão abordadas as escolhas feitas em relação às matérias-primas e o catalisador. Os óleos vegetais são misturas de ésteres graxos, e muitos deles não estão presentes no banco de dados do simulador. Como o perfil graxo difere entre as

matérias-primas, ainda que não seja necessário introduzir cada um desses compostos no simulador, eles devem ser contabilizados na formulação de compostos “hipotéticos” (pseudocomponentes), representativos de cada óleo vegetal. O catalisador não está presente explicitamente na simulação, mas implicitamente através da metodologia escolhida para modelagem das reações. Os demais compostos envolvidos no processo – a maioria dos hidrocarbonetos <sup>11</sup> e gases leves - já faziam parte do banco de dados do simulador.

### 3.1.1 Representação dos óleos vegetais

Como explicado no item anterior, o processo HEFA foi simulado utilizando três diferentes óleos vegetais como matérias-primas. Esses óleos foram inseridos no simulador como componentes hipotéticos, cujas propriedades foram estimadas com base em uma composição típica. As propriedades e as composições dos óleos vegetais podem variar de acordo com as safras e regiões de plantio (devido ao solo, clima, etc.), o que faz com que seja necessário assumir composições médias para essas matérias-primas, com base no que já foi reportado anteriormente na literatura. Neste trabalho, por simplificação, foi considerado que os óleos são formados exclusivamente por trigliceróis – ou seja, sem ácidos graxos livres e outras impurezas –, implicando a existência prévia de uma etapa de pré-tratamento.

Araújo *et al.* (2007) realizaram a caracterização de óleo de amêndoas de pinhão-manso (*Jatropha curcas L.*) obtidas de diferentes localidades do Brasil - Piauí, Ceará e Minas Gerais. Os óleos foram analisados por meio da técnica de Cromatografia Gasosa acoplada a Espectrometria de Massas (CG-EM). A composição encontrada pelos autores pode ser observada na Tabela 3.1. (Araújo *et al.*, 2007). Para os óleos de soja e de dendê, por sua vez, foram utilizadas composições obtidas no trabalho de Young (2015). O autor se baseou em uma composição geral para os óleos, que foi retirada de *handbook* de Knothe *et al.* (2005), importante referência para processos relacionados à produção de biodiesel, realizando as devidas ponderações e conversões para composições molares (Schumacher, 2005).

---

<sup>11</sup> Alguns hidrocarbonetos isomerizados (a partir do iso-undecano) não estavam presentes no banco de dados do simulador, o que gerou a necessidade de representação destes como pseudo-componentes.

**Tabela 3.1:** Perfil graxo dos óleos vegetais analisados neste trabalho (base molar)

Éster	Composição		
	Óleo de Soja	Óleo de Dendê	Óleo de Pinhão-Manso
Palmitico	8,80%	41,78%	14,69%
Esteárico	4,31%	4,69%	7,04%
Oleico	25,05%	42,85%	42,30%
Linoleico	55,16%	8,73%	35,48%
Linolênico	6,54%	-	-
Erúcico	0,13%	-	-
Láurico	-	0,26%	-
Mirístico	-	1,69%	-
Palmitoleico	-	-	0,39%
Eicosanóico	-	-	0,09%

Fonte: elaboração própria

O passo seguinte é a estimativa das propriedades termodinâmicas das matérias-primas. Isso pode ser feito a partir da composição estabelecida para as matérias-primas e da definição de um composto representativo através do Método de Contribuição de Grupos de Constantinou e Gani (1994), como preconizado pela literatura (YOUNG, 2015). Este método é baseado no modelo termodinâmico UNIFAC e possui duas ordens de contribuição. A segunda ordem do método de contribuição de grupos existe com a finalidade de ultrapassar as limitações inerentes ao modelo, tais como não distinção entre isômeros e os efeitos de proximidade (Santos, 2005). Porém, neste trabalho foram usados apenas os grupos de primeira ordem para o cálculo das propriedades críticas e temperatura de ebulição, uma vez que a utilização dos grupos de segunda ordem não pressupõe melhores resultados (POLING *et al.*, 2004).

As equações gerais do método seguem em 3.1 a 3.4:

$$T_c = 181,128 \ln \left[ \sum_k N_k(t_{c1K}) + w \sum_j M_j(t_{c2J}) \right] \quad (3.1)$$

$$P_c = \left[ \sum_k N_k(p_{c1K}) + w \sum_j M_j(p_{c2J}) + 0,10022 \right]^{-2} + 1,3705 \quad (3.2)$$

$$V_c = -0,00435 + \left[ \sum_k N_k(v_{c1K}) + w \sum_j M_j(v_{c2J}) \right] \quad (3.3)$$

$$T_b = 204,359 \ln \left[ \sum_k N_k(t_{b1K}) + w \sum_j M_j(t_{b2J}) \right] \quad (3.4)$$

sendo:

$N_k(t_{c1k})$ : Contribuição do grupo k de primeira ordem para  $T_c$ ;  
 $M_j(t_{c2j})$ : Contribuição do grupo j de segunda ordem para  $T_c$ ;  
 $N_k(p_{c1k})$ : Contribuição do grupo k de primeira ordem para  $P_c$ ;  
 $M_j(p_{c2j})$ : Contribuição do grupo j de segunda ordem para  $P_c$ ;  
 $N_k(v_{c1k})$ : Contribuição do grupo k de primeira ordem para  $V_c$ ;  
 $M_j(v_{c2j})$ : Contribuição do grupo j de segunda ordem para  $V_c$ ;  
 $N_k(t_{b1k})$ : Contribuição do grupo k de primeira ordem para  $T_b$ ;  
 $N_k(t_{b2j})$ : Contribuição do grupo j de segunda ordem para  $T_b$ .

Porém, como dito anteriormente, os grupos de segunda ordem foram desconsiderados, fazendo com que  $w$  fosse igual a zero. Cada grupo possui um valor associado a cada propriedade (vide Tabela 3.2), e a sua contribuição para o valor final desta propriedade é obtida multiplicando este valor pela sua frequência na molécula ( $N_k$ ).

**Tabela 3.2:** Contribuições dos grupos de primeira ordem de Constantinou e Gani (1994)

Grupo	$t_{b1k}$	$t_{c1k}$	$p_{c1k}$	$v_{c1k}$
CH <sub>3</sub>	0,89	1,6781	0,0199	0,075
CH=CH	1,84	7,3691	0,0179	0,0954
-CH <sub>2</sub> -	0,92	3,492	0,0106	0,0558
CH <sub>3</sub> COOH	3,64	12,5965	0,029	0,1589
>CH-	0,6	4,033	0,0013	0,0315
-OH	3,22	9,7292	0,0051	0,039

Fonte: adaptado de Young (2015)

Outra propriedade necessária a ser estimada para os pseudocomponentes dentro do *software* de simulação é o fator acêntrico ( $\omega$ ), e para isso foi utilizada a regra de mistura de Constantinou-Gani.

$$\omega_i = \frac{\alpha}{\beta} \quad (3.5)$$

$$\alpha = -\ln P_c - 5,97214 + 6,09648 \theta^{-1} + 1,28862 \ln \theta - 0,169347 \theta^6 \quad (3.6)$$

$$\beta = 15,2518 - 15,6875 \theta^{-1} - 13,471 \ln \theta - 0,43577 \theta^6 \quad (3.7)$$

Onde  $\theta$  é a razão entre a temperatura normal de ebulição e a temperatura crítica do composto.

Para o cálculo das propriedades de mistura, foram utilizadas as Regras de Mistura de Lee-Kesler (Young, 2015):

$$T_{cm} = \frac{1}{V_{cm}^{1/4}} \sum_i \sum_j x_i x_j V_{cij}^{1/4} T_{cij} \quad (3.8)$$

$$P_{cm} = (0,29050 - 0,85\omega_m) \frac{RT_{cm}}{V_{cm}} \quad (3.9)$$

$$V_{cm} = \sum_i \sum_j x_i x_j V_{cij} \quad (3.10)$$

onde:

$$T_{cij} = (T_{ci} T_{cj})^{1/2} k_{ij} \quad (3.11)$$

$$\omega_m = \sum_i x_i \omega_i \quad (3.12)$$

$$V_{cij} = \frac{1}{8} (V_{ci}^{1/3} + V_{cj}^{1/3})^3 \quad (3.13)$$

sendo:

$T_{ci}$ : Temperatura crítica do composto i;

$T_{cj}$ : Temperatura crítica do composto j;

$T_{cm}$ : Temperatura crítica da mistura;

$V_{ci}$ : Volume crítico do composto i;

$V_{cj}$ : Volume crítico do composto j;

$V_{cm}$ : Volume crítico da mistura;

$P_{cm}$ : Pressão crítica da mistura;

$\omega_i$ : Fator acêntrico do composto i;

$\omega_m$ : Fator acêntrico da mistura;

$x_i$ : Fração do composto i na mistura;

$x_j$ : Fração do composto j na mistura;

$k_{ij}$ : Parâmetro de interação entre os compostos i e j.

No presente trabalho, o parâmetro de interação foi aproximado para 1 e, como o fator acêntrico é um termo adimensional, as outras unidades utilizadas foram: Kelvin para temperatura, bar para pressão e centímetro cúbico por mol para volume.

A maneira escolhida para representar cada um dos óleos foi adicionar uma corrente de entrada composta pelos triglicerídeos presentes em cada um dos óleos nas proporções anteriormente explicitadas. Dessa forma, as propriedades do óleo não foram definidas de maneira direta, mas sim construídas a partir da ponderação das propriedades dos triglicerídeos – tanto para os que constavam no banco de dados do simulador quanto para os que foram definidos como pseudo-componentes.

### 3.1.2 Hidrogênio

O processo HEFA, como o nome bem diz, tem o hidrogênio como matéria-prima fundamental e, por isso, aqui serão explicitadas suas condições de entrada.

Existem dois pontos de entrada desta matéria-prima no processo e cada um deles respeita uma proporção mássica com a alimentação que o acompanha, vide Tabela 3.3 (Martinez-Hernandez *et al.*, 2019).

**Tabela 3.3:** Proporção de hidrogênio nas correntes de entrada

<b>Entrada</b>	<b>Proporção mássica</b>
<i>Primeiro reator</i>	0,033 kg / kg de óleo
<i>Segundo reator</i>	0,019 kg / kg de alimentação

Fonte: adaptado de Martinez-Hernandez *et al.* (2019)

Como é utilizado hidrogênio em excesso na entrada do primeiro reator, optou-se por reaproveitar o hidrogênio residual na entrada do segundo reator. Com isso, foi possível reduzir a necessidade de hidrogênio externo, uma vez que a quantidade remanescente da primeira reação era suficiente para suprir a demanda da segunda reação. Para isso, realizou-se um processo de purificação na saída do primeiro reator, que será abordado no Capítulo 4.

### 3.1.3 Escolha dos catalisadores

Foi elaborada uma busca na literatura com a finalidade de entender-se as possibilidades de catalisadores. Esta indicou algumas opções sobre as quais se demorará um pouco mais, mas um ponto relevante para a escolha feita - NiW/SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - foi a presença de dados cinéticos que pudessem ser usados no trabalho, mesmo sabendo-se que os catalisadores de níquel não são os que mais favorecem a formação de isoalcanos (Toba *et al.*, 2011), o que pode reduzir o rendimento para bioquerosene frente ao diesel verde. Os dados cinéticos utilizados são apresentados no Tópico 3.5.

Segundo Scaldaferrì (2019), os sulfetos de molibdênio dopados com níquel ou cobalto, suportados em alumina (NiMo/S<sub>2</sub>γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e CoMo/S<sub>2</sub>γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) costumam ser considerados como catalisadores clássicos para a desoxigenação.

Toba *et al.* (2011) avaliaram o uso dos catalisadores de NiMo/Sγ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CoMo/Sγ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e NiW/Sγ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> para a desoxigenação de óleo residual de fritura a 350 °C e 50 bar. Nesta comparação, a conversão do óleo foi similar para os três catalisadores, porém a seletividade para isoalcanos (que é importante para o combustível de aviação) foi melhor para o CoMo/Sγ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> frente aos catalisadores a base de níquel.

Veriansyah *et al.* (2012) também estudaram o efeito de diferentes catalisadores, mas dessa vez aplicados no hidrocessamento do óleo de soja. Foram avaliados distintos metais suportados em alumina, obtendo como produtos, majoritariamente, alcanos lineares C<sub>15</sub> e C<sub>17</sub>. As condições de reação foram 400 °C, ~ 90 bar de H<sub>2</sub>, 1 h em um reator batelada. Maiores conversões a hidrocarbonetos foram alcançadas com os catalisadores a base de NiMo (93%), Pd (92%) e CoMo (79%), quando comparado com o desempenho dos catalisadores a base de Pt (51%) e Ru (40%). Neste caso, os autores relataram melhores seletividades para a formação de isoalcanos com o catalisador a base de CoMo, o que vai ao encontro das referências anteriores (VERIANSYAH *et al.*, 2012).

Estudos também foram realizados por Harnos *et al.* (2012) (Harnos *et al.*, 2012) com paládio e níquel suportados em diferentes superfícies, como em carvão ativado e alumina (Pd/C, Pd/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,) comparando com catalisadores sulfetados de NiMo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Os autores relataram que a performance do Pd/C e Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> foram similares

(conversões acima de 90%). Para os catalisadores não sulfetados, foi proposta a descarbonilação como mecanismo principal de desoxigenação. Os produtos das reações realizadas com NiMo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> apresentaram maior razão iso/n-parafinas que com os catalisadores de Ni e Pd (Scaldeferri, 2019).

Todas estas possibilidades foram então levadas em consideração na decisão sobre qual catalisador seria adotado no processo. No entanto, a decisão se pautou no trabalho de Tirado *et al.* (2020), que disponibilizou os dados cinéticos para atuação do catalisador NiW/SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sobre óleo de pinhão-manso sob condições similares às do processo de Martinez-Hernandez *et al.* (2019), que foi escolhido como referência para condições de entrada das correntes e do processo.

### 3.2 Definição dos Pacotes Termodinâmicos

Ao definir um modelo termodinâmico para um processo é preciso entender qual garantirá uma representação mais fiel do processo real. Ou seja, no caso, o modelo deveria conseguir prever de forma coerente o comportamento de triglicerídeos e ácidos graxos em altas pressões (vide o processo escolhido), o que, de acordo Soemari *et al.* (2020), somente seria conseguido de maneira minimamente razoável com equações de estado cúbicas, como Soave-Redlich-Kwong ou Peng-Robinson. Sendo assim, o modelo para a fase vapor escolhido para o trabalho foi a equação de estado de Peng-Robinson, tal qual no trabalho anteriormente citado.

Contudo, na planta base do processo há a presença de um separador trifásico que deve conseguir separar adequadamente a água dos hidrocarbonetos em fase líquida (Martinez-Hernandez *et al.*, 2019). Para que este comportamento fosse adequadamente representado no *software*, foi utilizado o modelo UNIQUAC para modelagem da fase líquida do sistema. Uma vez que essa consideração não interfere de maneira relevante nas outras etapas do processo, tal modelo foi mantido no trecho seguinte ao separador no fluxograma. Dentro do modelo UNIQUAC, os parâmetros de interação binária foram estimados por metodologia UNIFAC, por meio de ferramenta disponibilizada no próprio Aspen HYSYS® v8.8. Isso foi realizado de modo que, para cada par água-hidrocarboneto, foi utilizado o modelo imiscível disponibilizado no simulador e, para os demais parâmetros de interação binária não previamente fornecidos pelo simulador, o modelo UNIFAC LLE.

### **3.3 Definição das Condições de Entrada das Correntes de Processo**

O processo conta com duas correntes de entrada, sendo elas a de óleo e a de hidrogênio. Foi suposto, então, que a corrente de óleo vegetal inicia o processo nas condições ambientes, de 25 °C e 101,3 kPa.

Para o hidrogênio, foi utilizado como base o trabalho de Cruz (2010), que estudou o processo de produção de hidrogênio em refinaria por meio de reforma a vapor do gás natural, que é o processo mais largamente aplicado nas refinarias. A planta que foi objeto de estudo em tal trabalho seria responsável por produzir 1.200.000 Nm<sup>3</sup>/dia de hidrogênio com 99,9% de pureza. Sendo assim, como o hidrogênio viria pressurizado de uma refinaria, considerou-se que este entra no processo a uma pressão de aproximadamente 3000 kPa e temperatura de 40 °C, que são as condições da corrente de reciclo de hidrogênio descrita no trabalho mencionado.

Como explicado, a corrente de entrada do óleo vegetal foi considerada como exclusivamente composta de triglicerídeos, desconsiderando-se então a presença de umidade, sólidos suspensos, metais e ácidos graxos livres. Analogamente, o gás hidrogênio foi considerado puro.

### **3.4 Definição da Capacidade das Plantas**

Baseada em projeções de inclusão progressiva de bioquerosene ao QAV-1 distribuído em território nacional, a Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE) projeta uma participação de 103 mil m<sup>3</sup> no ano de 2029, correspondendo a 1% da demanda total de combustível de aviação.

Após estudos preliminares no simulador, utilizando vazões menores de entrada de óleo vegetal e hidrogênio, definiu-se uma vazão de entrada – fixa e igual para os processos com os três óleos – das matérias-primas, de forma que fosse gerada uma quantidade coerente do produto de interesse em comparação com a projeção de mercado mencionada. Assim, a produção com óleo de dendê atenderia a 17,6% da demanda prevista para 2029, enquanto os processos com óleo de soja e de pinhão-manso atenderiam a 6,9% e 7,2%, respectivamente. Tais valores foram considerados como razoáveis para uma planta industrial no cenário brasileiro. Vale mencionar que

a variação entre as produtividades dos diferentes óleos será discutida com mais detalhes nos resultados e discussões do trabalho.

No entanto, quando se refere a consumo de óleos vegetais, é importante levar em consideração a produção nacional destes. Nesse sentido, a Tabela 3.4 apresenta um resumo com a produção anual brasileira de cada óleo e o consumo previsto pela planta com base nas simulações.

**Tabela 3.4:** Capacidades

Óleo vegetal	Produção nacional (ton/ano)	Consumo da planta (ton/ano)	Fração da produção anual consumida	Referência
Soja	9,39 milhões	39,6 mil	0,42%	BiodieselBR, 2022
Dendê	395 mil	38,3 mil	9,7%	MAPA, 2018
Pinhão Manso <sup>12</sup>	28 mil	39,3 mil	140,3%	Durães et al., 2009

Fonte: elaboração própria

Como pode ser observado na Tabela 3.4, as capacidades de produção de óleo de soja e de dendê no Brasil atenderiam de forma satisfatória a demanda proposta para a planta simulada no presente trabalho. Já o pinhão-manso, por sua vez, apresenta uma capacidade produtiva anual mais baixa, o que pode ser um impeditivo para o seu uso. Entretanto, vale destacar que os dados mais atualizados relativos à disponibilidade deste óleo são mais escassos, podendo existir um cenário mais favorável do que o apresentado na tabela.

### 3.5 Modelagem das Reações

Foi realizada uma busca na literatura por dados cinéticos das reações de hidroxigenação, hidrocraqueamento e isomerização catalítica de óleos vegetais utilizando algum dos catalisadores previamente sinalizados como possibilidades. Como resultado da busca, foram encontrados dados cinéticos para as reações de hidroxigenação e hidrocraqueamento no processamento de óleo de pinhão-manso com catalisador NiW/SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> no trabalho de Tirado *et al.* (2020). Já os

<sup>12</sup> Não foram encontrados na literatura dados mais recentes relativos à produção anual de pinhão-manso, o que torna difícil afirmar se a produção nacional comporta a capacidade estimada para a planta proposta no trabalho.

dados cinéticos da isomerização catalítica foram retirados de Calemma *et al.* (2000), que estudaram hidroisomerização e hidrocraqueamento de n-alcanos de cadeia longa.

Uma vez que a referência mencionada se utilizou de dados experimentais e aplicou o artifício matemático de considerar o óleo de pinhão-manso como um pseudocomponente, adotou-se a hipótese de que os parâmetros cinéticos seriam os mesmos para os três óleos neste trabalho. Os parâmetros podem ser vistos na Tabela 3.5.

**Tabela 3.5:** Parâmetros cinéticos em base kgmol, m<sup>3</sup> e segundos

	<b>A (h<sup>-1</sup>)</b>	<b>E (J/mol)</b>
<b><i>Hidrodesoxigenação</i><sup>1</sup></b>	1,58E+02	1,28E+04
<b><i>Hidrocraqueamento</i><sup>1</sup></b>	1,39E+19	2,61E+05
<b><i>Isomerização</i><sup>2</sup></b>	1,43E-01	5,60E+04

Fonte: elaboração própria, com base em Tirado<sup>1</sup> *et al.* (2020) e Calemma<sup>2</sup> *et al.* (2000)

De posse dos dados cinéticos apresentados na Tabela 3.4, é possível calcular a constante de velocidade das reações (*k*) - o que foi realizado pelo simulador -, por meio da equação 3.14.

$$k = A \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \quad (3.14)$$

Onde: *A* é o fator pré-exponencial ou fator de frequência;

*E* é a energia de ativação

*R* é a constante universal dos gases

*T* é a temperatura

## 4 SIMULAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIOQUEROSENE – PROCESSO HEFA

Este capítulo visa introduzir o fluxograma da planta multipropósito elaborado através do simulador Aspen HYSYS® v8.8. Além disso, serão detalhadas as etapas de processo que ocorrem ao longo da produção do biocombustível de aviação via processo HEFA, conforme hipóteses citadas nas seções anteriores.

Um dos objetivos do trabalho é avaliar a possibilidade de construção de uma planta multipropósito, capaz de processar ao menos os três óleos vegetais selecionados (soja, dendê e pinhão-manso). Por isso, foi adotado o mesmo fluxograma base - do ponto de vista de equipamentos ou operações unitárias - quando foram realizadas as simulações com os diferentes óleos. Assim, o uso de diferentes óleos impactou apenas nos rendimentos de determinados produtos, além de causar impactos na análise econômica do processo. Tais fatores serão discutidos nos próximos capítulos.

De forma geral, a estrutura do fluxograma base foi baseada no trabalho de Martinez-Hernandez *et al.* (2019), havendo também a contribuição de diversos outros trabalhos encontrados na literatura no que se refere a dados de condições de processo e cinética química, conforme visto ao longo do capítulo anterior. Vale ressaltar, no entanto, que existem algumas diferenças significativas entre o presente trabalho e a publicação de Martinez-Hernandez *et al.* (2019), que utilizaram um diferente software de simulação (SuperPro Designer®) e focaram suas análises nos preços de produto acabado, além de não terem abordado nenhum tipo de comparação entre matérias-primas distintas.

Uma visão global do processo pode ser observada na Figura 4.1. Ao longo do capítulo, por motivos didáticos, as etapas mais relevantes do processo foram separadas em módulos, a saber: hidrodessoxigenação, isomerização, hidrocraqueamento, reaproveitamento do gás hidrogênio e reciclo do óleo vegetal, separação dos produtos.

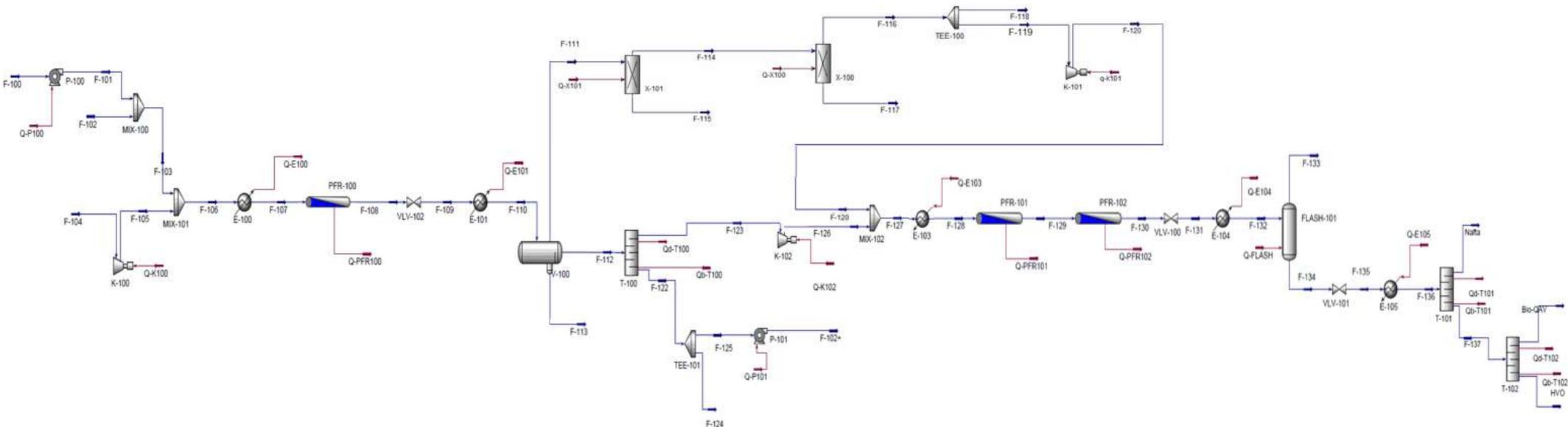
### 4.1 Despropanação e hidrodessoxigenação

No primeiro bloco da simulação acontecem as reações de despropanação e hidrodessoxigenação. A primeira é necessária para a quebra dos triglicerídeos em

ácidos graxos, que serão depois convertidos em hidrocarbonetos de cadeia longa por meio do processo de hidrodessoxigenação. Este módulo pode ser visualizado na Figura 4.2.

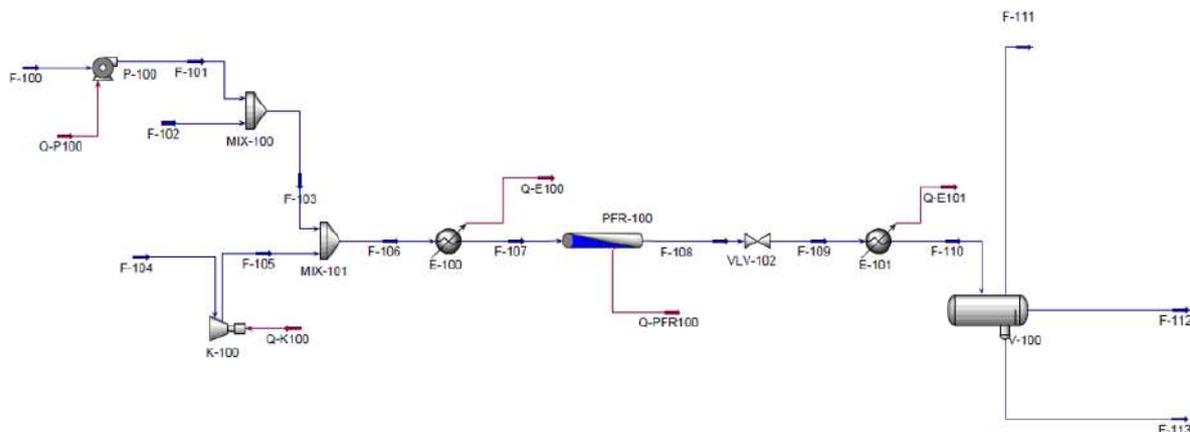
Com base no trabalho de Tirado *et al.* (2020), foi assumido que estes mecanismos de reação acontecem de forma consecutiva no primeiro reator. No entanto, a cinética considerada pelos autores se dá para a reação global, que se inicia com os triglicérides e termina com os hidrocarbonetos de cadeia longa.

Figura 4.1: Fluxograma geral do processo base



Fonte: elaboração própria via simulador Aspen HYSYS® v8.8

**Figura 4.2:** Módulo inicial da simulação, partindo desde a entrada das matérias-primas até a separação dos produtos e reagentes excedentes do primeiro reator.



Fonte: elaboração própria via simulador Aspen HYSYS® v8.8

Primeiramente, a corrente de óleo vegetal (soja, dendê ou pinhão-mansão), identificada pela corrente F-100, é introduzida no processo a uma temperatura de 25 °C e pressão de 101,3 kPa (condições ambiente de temperatura e pressão), passando pela bomba P-100, na qual é pressurizada até atingir a pressão de 4.000 kPa, seguindo pela corrente F-101.

Paralelamente aos processos iniciais, tem-se uma corrente de hidrogênio (F-104), sendo inserida no processo a uma temperatura de 40 °C, sob 30 bar de pressão e vazão molar de 161,2 kmol/h, conforme a proporção demonstrada no capítulo anterior (Tabela 3.3). Esta corrente (F-104), em seguida, passa por um compressor (K-100), que por sua vez pressuriza a corrente até a pressão de 4.000 kPa (F-105).

A fim de realizar a transferência de calor entre os fluidos, as correntes de óleo vegetal e de hidrogênio, em temperaturas diferentes, são direcionadas para um trocador de calor (E-100), aquecendo os fluidos a uma temperatura uniforme de 320 °C (F-107).

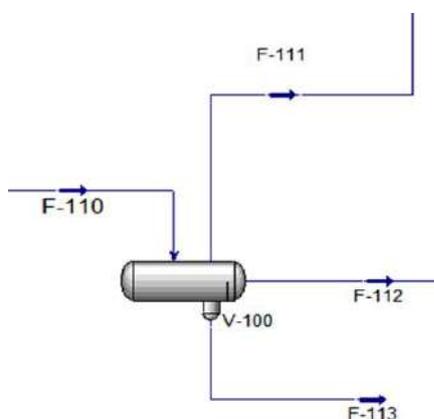
Seguindo o processo, a corrente F-107 passa pelo reator de fluxo em pistão ou reator com escoamento pistonado – PFR, sigla em inglês para *Plug Flow Reactor* – (PFR-100), onde ocorre o primeiro conjunto de reações (despropanação e hidrodessoxigenação). Nesta fase, a saída do reator se encontra a uma pressão de 8.000 kPa.

Após passar pelo reator, o fluido passa por uma válvula redutora de pressão (VLV-100), na qual sua pressão é reduzida até 100 kPa, seguindo pela corrente F-109. Optou-se pelo uso da válvula neste momento pois se trata de uma corrente

bifásica, não sendo possível o uso de um expansor ou bomba. Uma vez despressurizada, a corrente (F-109) segue para um trocador de calor (E-101), que por sua vez a resfria a uma temperatura de 100 °C (F-110).

A água gerada nas reações forma uma segunda fase líquida no sistema. Com isso, faz-se necessária a separação destas fases em correntes distintas. Além disso, há ainda a fase vapor, composta principalmente pelo hidrogênio não-reagido e gases menores como CO, CO<sub>2</sub> e propano. Por conta disso, optou-se pelo uso de um separador trifásico (V-100), detalhado na Figura 4.3.

**Figura 4.3:** Separador trifásico e suas correntes de entrada e saída<sup>13</sup>



Fonte: Elaboração própria via simulador Aspen HYSYS® v8.8

## 4.2 Reciclo do gás hidrogênio

Seguindo a divisão proposta para descrição do fluxograma, o módulo que será destacado nesta seção trata-se da etapa de reciclo do hidrogênio. Este bloco pode ser visualizado na Figura 4.4.

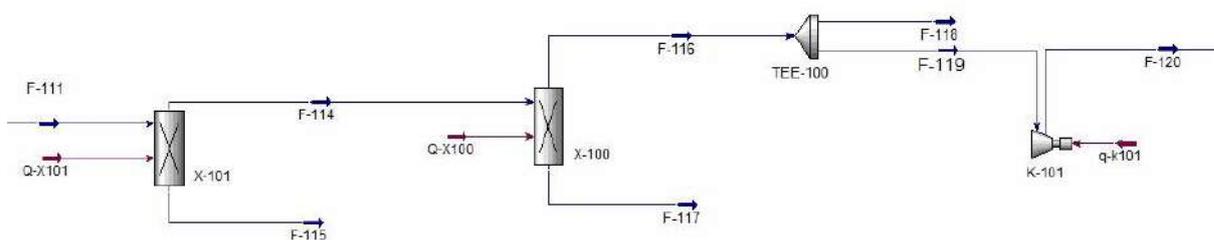
Para a remoção de água da corrente F-111 foi utilizada uma coluna recheada com peneira molecular. Optou-se pelo uso de Zeólita 3A, já que sua utilização para a

<sup>13</sup> Descrição das correntes de saída do separador trifásico:

- **F-111:** corrente gasosa, predominantemente formada por gás hidrogênio;
- **F-112:** corrente de “líquido leve”, formada tanto pelos produtos obtidos nas reações, ou seja, hidrocarbonetos, quanto pelo óleo vegetal residual que será reciclado (se tornando, em parte, F-102);
- **F-113:** corrente de “líquido pesado”, composta predominantemente por água. Esta pode ser reutilizada no processo como uma utilidade.

finalidade de remoção de água é descrita em alguns trabalhos, como o de Lin *et al.* (2015). Para fins de simulação no Aspen HYSYS® v8.8, foi utilizada a ferramenta *component splitter*, que permite a separação da água na corrente F-115, enquanto a corrente F-114 segue com os demais “contaminantes”. Para efeitos de dimensionamento e análise econômica, por sua vez, este equipamento foi tratado como um vaso com recheio, conforme será abordado nos Capítulos 5 e 6.

**Figura 4.4:** Módulo de reciclo do hidrogênio, partindo da saída do separador trifásico até a obtenção do hidrogênio purificado, que será utilizado na entrada do segundo reator.



Fonte: Elaboração própria via simulador Aspen HYSYS® v8.8

A corrente F-114 segue para purificação do hidrogênio por meio da tecnologia de adsorção com modulação de pressão, conhecida como PSA (em inglês, *Pressure Swing Adsorption*). O Aspen HYSYS® v8.8 não apresenta a possibilidade de simulação rigorosa de um sistema de PSA. Por isso, nesta etapa também foi utilizada a ferramenta *component splitter* disponível no simulador. Por meio desta, foi possível obter o hidrogênio purificado em uma corrente separada dos demais gases.

Cabe ressaltar que a corrente F-116 tem uma vazão molar maior do que o necessário para a segunda entrada de gás hidrogênio e, portanto, passa por um equipamento de separação de corrente (TEE-100). Vale destacar que, embora este divisor de corrente seja um bloco da simulação, se trata de parte da própria tubulação e, por isso, não é um bloco avaliado na análise de custos. Assim, a corrente F-119 irá retornar novamente ao processo, enquanto a corrente F-118 será disponibilizada para outros fins. Antes de retornar ao processo, a corrente F-119 passa pelo compressor K-101, que ajusta a pressão da corrente para 8000 kPa, para que possa seguir em direção ao segundo bloco de reações.

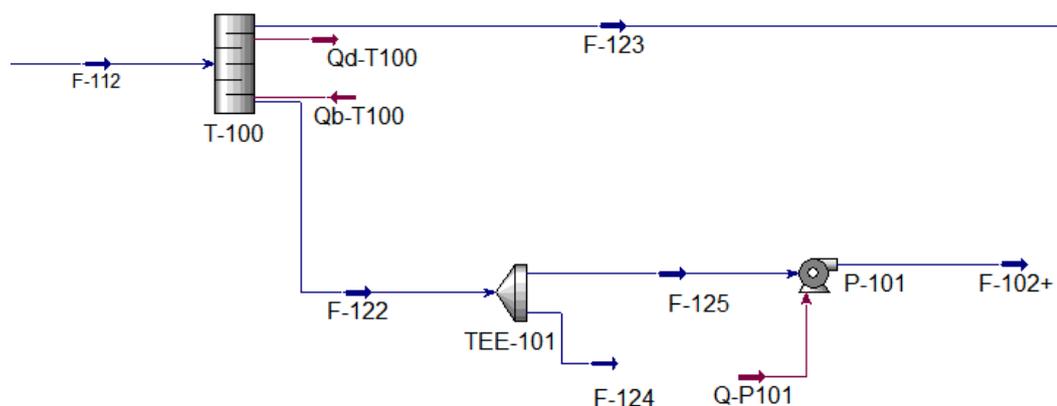
Vale ressaltar que existe um leque de possibilidades a serem exploradas em trabalhos futuros para a corrente F-118. Dentre essas possibilidades, pode-se citar o

retorno desta corrente de gás hidrogênio para a entrada do primeiro reator ou a reutilização desse gás em outros processos da unidade produtiva. Esta última opção, por exemplo, se enquadra no caso relatado por Pearson (2011), em que o processo HEFA é uma sub-unidade de uma refinaria. Neste caso, todo o hidrogênio consumido na planta viria de outros processos, e o custo de hidrogênio seria o custo de sua produção ao invés do de sua aquisição do mercado. Estas alternativas processuais não foram objeto de estudo deste trabalho.

### 4.3 Reciclo do óleo vegetal

O bloco referente à etapa de reciclo do óleo vegetal pode ser observado na Figura 4.5.

**Figura 4.5:** Módulo de reciclo do óleo vegetal, partindo da saída do separador trifásico até a obtenção dos triglicerídeos, que compõem a corrente de reciclo (F-102)



Fonte: Elaboração própria via simulador Aspen HYSYS® v8.8

Neste módulo, a corrente F-112, formada tanto pelos produtos obtidos nas reações que ocorrem no PFR-100, quanto pelo óleo vegetal residual que será reciclado, segue para o destilador T-100. Neste equipamento, os triglicerídeos que compõem os óleos vegetais, por serem menos voláteis, saem pela corrente F-122 e os hidrocarbonetos seguem pela corrente F-123.

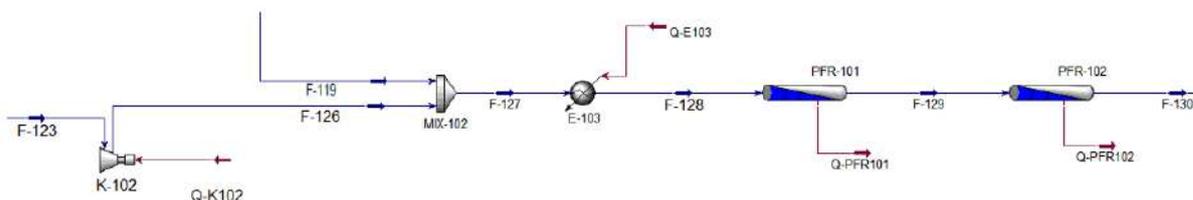
A corrente F-122 passa por um separador de corrente (TEE-101). Esta separação é necessária porque nem todo óleo será reciclado. Como estratégia conservadora, este trabalho adotou um reciclo de 50% da corrente total de óleo

reciclada no processo<sup>14</sup>. Deste modo, a corrente de óleo que seguirá para o reciclo é a F-125. A corrente F-124, por sua vez, é descartada. A F-125 é direcionada para a bomba P-101, a fim de ser pressurizada até atingir a pressão de 4.000 kPa (pressão esperada para entrada na próxima etapa do processo).

#### 4.4 Hidrocraqueamento e Isomerização

A presente seção apresenta o bloco do processo no qual acontecem as reações de quebra dos hidrocarbonetos de cadeia longa em hidrocarbonetos menores, mais adequados à faixa correspondente ao bioquerosene de aviação: hidrocraqueamento. Além disso, também ocorre a isomerização, fundamental para o enquadramento do biocombustível dentro das especificações necessárias, além de ser um fator importante para a redução do ponto de congelamento. Este bloco da simulação pode ser observado na Figura 4.6.

**Figura 4.6:** Módulo de hidrocraqueamento e isomerização, partindo das correntes de hidrocarbonetos (F-123) e de hidrogênio obtido no PSA.



Fonte: Elaboração própria via simulador Aspen HYSYS® v8.8

Como visto no início da etapa de reciclo do óleo vegetal, a corrente F-123, composta por hidrocarbonetos mais leves, segue para um compressor (K-102), onde sua pressão será ajustada para 8.000 kPa. Após a compressão, a corrente de hidrocarbonetos comprimida (F-126) e a corrente de hidrogênio reciclado (F-119) se misturam (MIX-102). A mistura sai pela corrente F-127, que passa por um trocador de calor (E-103), a fim de ter sua temperatura ajustada para a temperatura de operação da reação, de 420 °C.

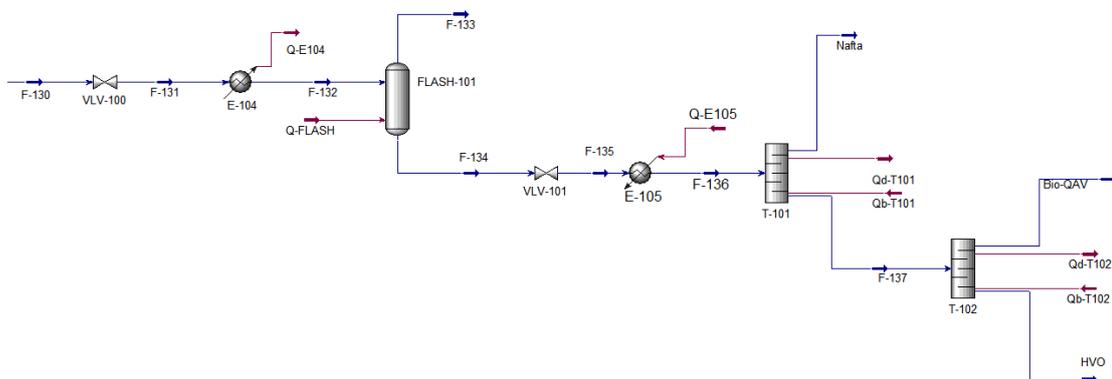
<sup>14</sup> Um estudo interessante para trabalhos futuros seria analisar a quantidade ideal de óleo a ser reciclada, a fim de otimizar a lucratividade da planta.

Após o ajuste de temperatura, a corrente entra no segundo reator, no qual ocorrerão as reações de hidrocraqueamento e isomerização. Em uma planta real, ambas as reações acontecem simultaneamente, e esta etapa do processo poderia acontecer em um único reator, que poderia apresentar as mesmas características do primeiro reator (comprimento, largura e número de tubos). Contudo, devido às limitações do simulador, que não foi capaz de convergir as duas reações simultaneamente no mesmo reator, esta etapa foi representada na simulação por dois reatores (PFR-101 e PFR-102). No PFR-101, estão presentes os parâmetros cinéticos referentes ao hidrocraqueamento, enquanto no PFR-102 é utilizada a cinética de isomerização.

#### 4.5 Separação dos produtos obtidos

A etapa final do processo HEFA consiste na separação dos produtos obtidos, que se dá, de forma resumida, por meio das diferenças de ponto de ebulição de cada uma das espécies. Desta forma, o módulo de separação é composto basicamente por uma sequência que envolve um vaso de *flash* e duas colunas de destilação. Este bloco da simulação pode ser visualizado na Figura 4.7.

**Figura 4.7:** Módulo de separação dos produtos obtidos, partindo desde a saída do reator de hidrocraqueamento/isomerização até a separação das correntes de Nafta, Bio-QAv e Diesel Verde.



Fonte: Elaboração própria via simulador Aspen HYSYS® v8.8

Após os reatores, a corrente F-130 passa por uma válvula redutora de pressão (VLV-100), tendo sua pressão ajustada para 2.500 kPa. Em seguida, a corrente F-131 segue para o trocador de calor E-134, tendo sua temperatura ajustada para 100 °C.

A corrente F-132 segue então para o tanque de expansão (FLASH-101), onde o excesso de gás hidrogênio será separado para a corrente F-133. A corrente F-134 segue por uma válvula redutora de pressão (VLV-101), sendo ajustada para pressão ambiente (101,3 kPa).

A corrente F-135 segue para o trocador de calor (E-104), no qual sua temperatura é ajustada a 100 °C. Na sequência, a corrente F-136 passa pelo primeiro destilador (T-101), no qual obtém-se uma corrente de topo rica em nafta, enquanto a corrente de fundo (F-137) segue para o segundo destilador.

Na segunda coluna de destilação (T-102), o produto de fundo é rico na faixa de hidrocarbonetos correspondente ao que se conhece como diesel verde. Por fim, a corrente de topo corresponde ao produto de maior interesse do presente trabalho, o bioquerosene.

## 5 DIMENSIONAMENTO DOS EQUIPAMENTOS

Este capítulo aborda as estratégias utilizadas para o dimensionamento dos equipamentos da planta multipropósito a partir dos resultados obtidos nas simulações do processo para os três diferentes óleos. Os dados mais detalhados, como dimensões e propriedades de cada equipamento, podem ser vistos nos Anexos 1 a 3.

### 5.1 Vasos

#### 5.1.1 Reatores

Tirado *et al.* (2020) avaliaram a simulação de um reator em escala de bancada para o hidrotreatamento de óleo vegetal sob condições não isotérmicas. O presente trabalho baseou-se nos dados cinéticos e premissas de projeto – como proporção entre diâmetro e altura do reator e massa do catalisador por volume do equipamento – apresentados por eles. Vale ressaltar que, seguindo a premissa do trabalho de Martinez-Hernandez *et al.* (2019), os dois reatores presentes na planta de processo foram igualmente dimensionados.

Dito isto, o comprimento do reator deve ser 15 vezes o valor de seu diâmetro, e as medidas necessárias para atingir uma conversão satisfatória foram de 15 metros de comprimento e 1 metro de diâmetro. A partir destas dimensões, foi possível calcular o volume do reator e, conseqüentemente, a massa de catalisador necessária.

O reator utilizado para o processo, tendo em vista o trabalho de Martinez-Hernandez *et al.* (2019), é do tipo PFR. Para seu dimensionamento, considerou-se que o equipamento é um vaso horizontal pressurizado com recheio. Tendo em vista o material do vaso (aço-carbono) e suas dimensões, a espessura deste pode ser calculada pela Equação 5.1 para colunas que operam em temperaturas atmosféricas ou acima, onde E é a eficiência da solda, S o máximo estresse que o material utilizado resiste e  $P_d$  a pressão de operação da coluna (Seider *et al.*, 2003).

$$t_s = \frac{P_d D}{2SE - 1,2P_d} \quad (5.1)$$

Porém, esta espessura calculada deve ainda atender a um valor mínimo para cada diâmetro para que se mantenha uma a segurança estrutural da planta, de acordo a Tabela 5.1. Além disso, adiciona-se 0,125 in à espessura devido à corrosão esperada do material.

**Tabela 5.1:** Diâmetros mínimos para a parede de vasos

<b>Espessura mínima (in)</b>	<b>Diâmetro do vaso (ft)</b>
0,25	0 - 4
0,3125	4 - 6
0,375	6 - 8
0,4375	8 - 10
0,50	10 - 12

Fonte: Elaboração própria baseado em Seider *et al.* (2003)

Dada a espessura, é possível calcular o peso do equipamento de acordo com a Equação 5.2, com base em Seider *et al.* (2003):

$$W = \pi(D + t_s)(L + 0,8D)t_s \rho_s \quad (5.2)$$

sendo:

$W$ : peso, em libras, do vaso;

$L$ : altura do vaso;

$D$ : diâmetro interno do vaso;

$t_s$ : espessura da parede;

$\rho_s$ : densidade do aço carbono;

### 5.1.2 Separador trifásico e Flash

Estes equipamentos foram dimensionados de acordo com a metodologia proposta por Towler e Sinnott (2008). Vale ressaltar que, no caso do separador trifásico, considerou-se que o vaso para essa operação seria vertical, utilizando hipóteses do trabalho de Andrade (2014). Para estas operações, é importante que o vaso seja suficientemente grande para que a velocidade do gás seja menor do que a velocidade de separação das gotículas de líquido. O diâmetro dos equipamentos pode ser calculado pela Equação 5.3:

$$D_v = \sqrt{\left(\frac{4V_v}{\pi u_s}\right)} \quad (5.3)$$

onde:  $V_v$  é a vazão volumétrica da fase gasosa ( $m^3/s$ );

$u_s$  é a velocidade de separação das gotículas de líquido (m/s)

A velocidade de separação das gotículas de líquido, por sua vez, pode ser calculada pela equação 5.4:

$$u_s = 0,0105 \sqrt{\left(\frac{\rho_L - \rho_G}{\rho_G}\right)} \quad (5.4)$$

onde:  $\rho_L$  é a densidade da fase líquida ( $kg/m^3$ )

$\rho_G$  é a densidade da fase gasosa ( $kg/m^3$ )

A metodologia propõe que a altura acima da entrada do líquido seja igual ao diâmetro, em casos em que este é maior do que 1 metro, que é o menor valor sugerido para essa altura. O tempo de *hold up* sugerido é de 10 minutos, o que interfere diretamente no nível de altura do líquido. Esta pode ser obtida a partir do volume de líquido no vaso. Para isso, utiliza-se a vazão volumétrica da fase líquida (obtida no simulador) e o tempo de *hold up*.

A alimentação de líquido é definida a uma altura igual ao raio do vaso ou 60 cm (o que for maior). Ou seja, a altura total do vaso ( $H_T$ ) é calculada segundo a Equação 5.5:

$$H_T = H_L + H_1 + H_2 \quad (5.5)$$

onde:  $H_L$  é a altura do líquido (em metros)

$H_1$  é a altura do líquido até a alimentação (em metros)

$H_2$  é a altura acima da alimentação.

As etapas seguintes, que levam em conta os cálculos de espessura e peso dos vasos, foram realizadas de forma análoga ao procedimento descrito no Item 5.1.1.

### 5.1.3 PSA e coluna de adsorção

No processo de reciclo do hidrogênio, é necessário purificar a corrente, removendo CO<sub>2</sub>, CO, propano e outros contaminantes. Para isso, optou-se pela operação conhecida como *pressure swing adsorption* (PSA – sigla em inglês).

Este processo acontece em quatro etapas: pressurização do leito de adsorção, alimentação da carga (adsorção de contaminantes), despressurização e purga. Na etapa de despressurização, as impurezas que ficaram retidas no leito são desorvidas. Na purga, são removidos os resíduos de contaminantes que ainda podem estar presos no leito. Devido ao fato de o processo precisar de 4 etapas, costuma-se utilizar 4 vasos operando simultaneamente, de forma que seja possível manter um processo contínuo. Para o dimensionamento dessa unidade, consideraram-se quatro vasos de adsorção, que seguiram a metodologia de dimensionamento análoga à de vasos com recheio.

Para o recheio, foi escolhida uma mistura de dois adsorventes, cujas quantidades são proporcionais, por meio de média ponderada, às concentrações dos dois principais contaminantes. Dessa forma, assumiu-se que a remoção de CO<sub>2</sub> se daria por meio de adsorção em zeólita de aluminossilicato 5A – com base no trabalho de Jimbo (2018) –, enquanto a adsorção de CO aconteceria por meio de carvão ativado, com base no trabalho de You *et al.* (2012). Outro contaminante relevante da corrente de hidrogênio é o propano, embora apareça em concentrações menores do que o CO e o CO<sub>2</sub>. Para fins de dimensionamento e definição de quantidade de recheio, realizou-se uma aproximação matemática de forma a considerar a adsorção do propano por ambos os recheios. Esta hipótese é razoável devido ao tamanho das moléculas de propano ser maior do que o dos outros dois gases, o que faz com que ele tenda a ser retido nos mesmos tipos de adsorventes. Os demais contaminantes da corrente de hidrogênio apresentam-se em concentrações muito baixas (menores que 1%), e foram desconsiderados nesta análise.

A remoção desejada de contaminantes (nesse caso, CO, CO<sub>2</sub> e propano), em kg/h é calculada pela Equação 5.6 (Young *et al.*, 2021):

$$R_{Contaminante} = \rho_{Contaminante} [\text{Contaminante}] Q \quad (5.6)$$

onde:  $\rho_{Contaminante}$  é a densidade do contaminante nas condições de entrada do processo (kg/m<sup>3</sup>);

[Contaminante] é a concentração do contaminante em ppmv;

Q é a vazão de entrada em (m<sup>3</sup>/h).

Com isso, é possível calcular a massa de adsorvente requerida, bem como o volume, por meio das Equações 5.7 e 5.8 (Young *et al.*, 2021):

$$M_A = R_{Contaminante} \left( \frac{t_A}{60} \right) C_A \quad (5.7)$$

$$V_A = \frac{M_A}{\rho_A} \quad (5.8)$$

onde:  $M_A$  é a massa de adsorvente requerida (em kg);

$R_{Contaminante}$  é a remoção desejada de contaminante (em kg/h);

$t_A$  é o tempo do ciclo de adsorção (em minutos);

$\rho_A$  é a densidade do adsorvente em (kg/L);

$V_A$  é o volume de adsorvente (em L).

De posse do volume das colunas e assumindo um excesso de 1 ft<sup>3</sup> de volume por questões de segurança, além de especificar uma altura de três vezes o diâmetro, calcula-se o diâmetro (em metros) do vaso pela Equação 5.9 (Young *et al.*, 2021).

$$D = \sqrt[3]{\left( \frac{4 V_A + 28,31685}{3\pi \cdot 1000} \right)} \quad (5.9)$$

Conforme descrito no capítulo anterior, foi utilizada uma coluna de adsorção para remoção de água da corrente que entra no PSA. Para o dimensionamento desta coluna, foi seguido um procedimento análogo ao do dimensionamento da unidade de PSA. No entanto, nesse caso, foi utilizado como recheio uma peneira molecular do tipo Zeólita 3A – com base no trabalho de Lin *et al.* (2015). Assim, são utilizadas as mesmas equações descritas anteriormente, com o uso de apenas um adsorvedor no recheio e assumindo a água como “contaminante” a ser removido.

As etapas seguintes, que levam em conta os cálculos de espessura e peso dos vasos, também foram realizadas de forma análoga ao procedimento descrito no Item 5.1.1.

#### 5.1.4 Destiladores

O presente trabalho apresenta três colunas de destilação recheadas com anéis de Pall de 1 in. Estas colunas são utilizadas para: reciclo de triglicerídeos não reagidos do primeiro PFR, separação da nafta e separação do bioquerosene de aviação do diesel verde.

Foi utilizado o método de Leva para o cálculo do diâmetro das colunas. Dessa forma, este é calculado por meio da velocidade de *flooding*, conforme a Equação 5.10 (Seider *et al.*, 2003):

$$D = \sqrt{\frac{4G}{(f U_f) \pi \rho_G}} \quad (5.10)$$

onde:  $G$  é a vazão mássica de vapor (kg/s);

$f$  é um fator empírico, normalmente assumido como 0,7;

$U_f$  é a velocidade de inundação ou *flooding* (ft/s);

$\rho_G$  é a densidade da fase vapor (kg/ft<sup>3</sup>).

Ainda de acordo com o mesmo método, para determinação da velocidade de *flooding*, são utilizadas as Equações 5.11 a 5.15:

$$Y = \exp[-3,7121 - 1,0371(\ln FLG) - 0,1501(\ln FLG)^2 - 0,007544(\ln FLG)^3] \quad (5.11)$$

$$F_{LG} = \frac{L}{G} \left( \frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{1/2} \quad (5.12)$$

$$Y = \frac{U_f^2 F_P}{g} \rho_G f\{\rho_L\} f\{\mu_L\} \quad (5.13)$$

$$f\{\rho_L\} = -0,8787 + 2,6776 \left( \frac{1}{\rho_L} \right) - 0,6313 \left( \frac{1}{\rho_L} \right)^2 \quad (5.14)$$

$$f\{\mu_L\} = 0,96\mu_L^{0,19} \quad (5.15)$$

onde:  $L$  é a vazão mássica de fase líquida (kg/s);

$\rho_L$  é a densidade da fase líquida (kg/s);

$\mu_L$  é a viscosidade da fase líquida (cP);

$g$  é a aceleração da gravidade ( $g = 32,2 \text{ ft/s}^2$ );

$F_p$  é o fator de empacotamento, relativo ao tipo de recheio ( $\text{ft}^2/\text{ft}^3$ ).

Como dito anteriormente, utilizaram-se anéis de Pall de 1 in de metal. Para estes, o fator de empacotamento é igual a  $56 \text{ ft}^2/\text{ft}^3$ . Foram utilizados os resultados obtidos no simulador Aspen HYSYS® v8.8 para os valores de viscosidade, densidade e vazões mássicas das fases líquida e vapor. É importante destacar que as correlações apresentadas possuem restrições de valores para serem consideradas válidas, e os valores utilizados estavam dentro dos limites requeridos (Seider *et al.*, 2003).

Para um projeto mais rigoroso de colunas de destilação, deve-se calcular o diâmetro da coluna de destilação em cada estágio. No entanto, uma vez que a análise de custos aqui considerada é apenas preliminar, o diâmetro das colunas foi calculado pela média dos diâmetros de topo e fundo, não havendo a necessidade de informações relativas a uma grande quantidade de estágios teóricos.

A altura das colunas de destilação é calculada a partir da altura equivalente de prato teórico (HETP, na sigla em inglês), que é calculada a partir de fórmulas empíricas presentes em Seider *et al.* (2003). Para este trabalho, foi utilizada a correlação que corresponde a fluidos de baixa viscosidade e colunas com recheios modernos (Equação 5.16):

$$\text{HETP} = 1,5D_p \quad (5.16)$$

onde: HETP é a altura equivalente de prato teórico, em ft;

$D_p$  é o diâmetro nominal do recheio utilizado, em in.

Para determinação da altura total das colunas, é necessário somar a altura do volume recheado a três quartos do diâmetro para o condensador e a um diâmetro

inteiro para o refeedor. A altura do volume recheado, por sua vez, é determinada por meio da multiplicação do número de estágios de equilíbrio (com exceção de condensador e refeedor) pelo HETP (Seider *et al.*, 2003)

## 5.2 Trocadores de calor

Segundo Seider *et al.* (2003), para o dimensionamento de trocadores de calor é preciso categorizá-los em casco-e-tubo ou duplo-tubo. Esta escolha é feita a partir da área de troca térmica, definindo como tipo duplo-tubo quando a área é inferior a 200 ft<sup>2</sup>. Caso contrário, são escolhidos trocadores casco-e-tubo. A área de troca térmica é calculada por meio da Equação 5.17. Vale destacar que os condensadores e refeedores das colunas de destilação também foram dimensionados como trocadores de calor convencionais.

$$Q = U A_T \Delta T_{LM} \quad (5.17)$$

onde: Q é a taxa de transferência de calor;

U é o coeficiente global de transferência de calor;

$A_T$  é a área de troca térmica;

$\Delta T_{LM}$  é a média logarítmica da diferença de temperaturas.

A média logarítmica da diferença de temperaturas é calculada pela Equação 5.18:

$$\Delta T_{LM} = \frac{(T_{Ec} - T_{Sc}) - (T_{St} - T_{Et})}{\ln\left(\frac{T_{Ec} - T_{Sc}}{T_{St} - T_{Et}}\right)} \quad (5.18)$$

onde:  $T_{Ec}$  é a temperatura de entrada do casco ou tubo externo;

$T_{Sc}$  é a temperatura de saída do casco ou tubo externo;

$T_{St}$  é a temperatura de saída dos tubos ou tubo interno;

$T_{Et}$  é a temperatura de entrada dos tubos ou tubo interno.

A obtenção dos coeficientes globais de troca térmica foi baseada no livro de Seider *et al.* (2003), que apresenta dados experimentais publicados por diversos autores. Este coeficiente depende diretamente do equipamento e dos materiais envolvidos na troca térmica. Os valores utilizados nos diferentes trocadores de calor podem ser consultados nos Anexos 1 a 3.

Na Tabela 5.2 é possível observar as utilidades consideradas para cada trocador de calor presente na unidade. As utilidades foram escolhidas a partir das informações de temperatura de entrada e saída presentes no simulador, respeitando-se a premissa de temperatura de aproximação máxima de 10 °C. A única exceção ocorreu no trocador Qb-T101 para óleo de soja. O custo das utilidades também foi retirado do Aspen HYSYS® v8.8.

**Tabela 5.2:** Taxa de troca térmica e utilidades por trocador de calor da planta

Trocador	Dendê		Soja		Pinhão-manso	
	Calor trocado (kJ/h)	Utilidade	Calor trocado (kJ/h)	Utilidade	Calor trocado (kJ/h)	Utilidade
E-100	760300	Água de Resfriamento	613317	Vapor de baixa pressão	890300	Água de Resfriamento
E-101	9939000	Água de Resfriamento	8787000	Água de Resfriamento	10130000	Água de Resfriamento
E-103	1136000	Vapor de baixa pressão	661300	Vapor de baixa pressão	1108000	Vapor de baixa pressão
E-104	4644000	Água de Resfriamento	2980000	Água de Resfriamento	4802000	Água de Resfriamento
Qd-T101	754200	Água de Resfriamento	311000	Água de Resfriamento	843000	Água de Resfriamento
Qb-T101	2626000	Aquecimento direto	1180000	Aquecimento direto	2741000	Aquecimento direto
Qd-T102	972000	Água de Resfriamento	550300	Água de Resfriamento	507000	Água de Resfriamento
Qb-T102	1593000	Aquecimento direto	1139000	Aquecimento direto	1102000	Aquecimento direto
E-105	70780	Vapor de baixa pressão	12511	Vapor de baixa pressão	80410	Vapor de baixa pressão
Qd-T100	4725000	Água de Resfriamento	3828000	Água de Resfriamento	7862000	Água de Resfriamento
Qb-T100 <sup>15</sup>	14440000	Very High Temperature	14300000	Very High Temperature	18530000	Very High Temperature

Fonte: elaboração própria

<sup>15</sup> A utilidade *Very High Temperature* é denominada desta forma pelo simulador e pode ser considerada como uma utilidade de aquecimento com suas temperaturas de entrada e saída iguais a 3000 °C e 2999 °C.

## 6 AVALIAÇÃO ECONÔMICA DO PROCESSO

A aplicabilidade do processo abordado é diretamente dependente da viabilidade econômica da planta industrial simulada, levando-se em consideração as condições de processo previamente informadas e de mercado. Sendo assim, neste capítulo será apresentada a estratégia utilizada no trabalho para avaliação econômica, que serve de alicerce para os cenários propostos ao longo do Capítulo 7.

### 6.1 Custos de capital

Ao longo do trabalho foi apresentada e simulada uma planta multipropósito de produção de bioquerosene de aviação (que pode operar a partir de 3 tipos de óleos vegetais). A partir do fluxograma gerado, os custos necessários para construção e operação da planta, além da previsão de receitas, foram analisados a fim de chegar nesta avaliação que pode ser denominada também como um estudo de oportunidade, cujo nível de incerteza é de aproximadamente 35% (Seider *et al.*, 2003).

O método de Lang foi adotado neste trabalho para os cálculos que definem o investimento total na planta. Este método se baseia no custo estimado para os principais equipamentos do processo na modalidade FOB (*Free of Board* – em tradução livre: livre de custos de transporte), multiplicado pelo fator de Lang e a constante para transporte dos equipamentos à planta em questão.

Em seguida, este valor deve ser atualizado. Este passo pode ser feito ao considerarmos o *Plant Cost Index* (PCI) fornecido pela revista *Chemical Engineering*. Neste trabalho considerou-se PCI de 2019, de valor igual a 607,5. Importante ressaltar que, como os preços de equipamentos tiveram os dados extraídos de Seider *et al.* (2003), consideramos como PCI<sub>b</sub> o valor de 394. A Equação 6.1 apresenta o cálculo para determinação do investimento fixo:

$$I_F = 1,05 f_L C_i \sum_i \left( \frac{PCI}{PCI_b} \right) \quad (6.1)$$

sendo:

$I_F$ : Investimento fixo;

$f_L$ : Fator de Lang, cujo valor é de 5,04 para uma planta que processa apenas fluidos;

$PCI_b$ : *Plant Cost Index* para do ano base;

$C_i$ : Custo FOB do equipamento  $i$ ;

1,05: Constante para transporte dos equipamentos à planta em questão.

Os custos dos equipamentos foram estimados por meio de correlações presentes na literatura, a partir de dados do processo (temperatura, pressão e vazão) e de algumas suposições adicionais (dimensões e materiais de construção). Todos esses custos podem ser vistos no Anexo 1.

### 6.1.1 Custo das Bombas

Neste trabalho adotou-se como hipótese que as bombas utilizadas são do tipo centrífugas. O custo destas, desconsiderando-se seu motor elétrico, pode ser calculado pela Equação 6.2. Esta, por sua vez, utiliza as Equações 6.3 e 6.4 (Seider *et al.* 2003):

$$C_P = F_T F_M C_B \quad (6.2)$$

$$C_B = \exp\{9,2951 - 0,6019[\ln(S)] + 0,0519[\ln(S)^2]\} \quad (6.3)$$

$$S = Q\sqrt{H} \quad (6.4)$$

sendo:

$F_T$ : Fator de tipo de bomba (igual a 1 para bombas centrífugas e horizontais);

$F_M$ : Fator material (no trabalho as bombas são de aço inoxidável, logo o valor é 2);

$C_B$ : Custo base;

$H$ : Carga da bomba em ft

$Q$ : é a vazão que passa pela bomba em gpm.

Para o custo total, deve ser calculado o custo do motor elétrico pela Equação 6.5 (Seider *et al.* 2003):

$$C_B = \exp\left\{\begin{array}{l} 5,8259 - 0,13141[\ln(P_C)] + 0,053255[\ln(P_C)]^2 \\ + 0,028628[\ln(P_C)]^3 - 0,0035549[\ln(P_C)]^4 \end{array}\right\} \quad (6.5)$$

$$P_C = P_B / \eta_M \quad (6.6)$$

$$\eta_M = 0,8 + 0,0319[\ln P_B] - 0,00182[\ln P_B]^2 \quad (6.7)$$

sendo:

$P_C$ : Consumo energético do motor em hp;

$P_B$ : Potência da bomba em hp;

$\eta_M$ : Eficiência do motor.

### 6.1.2 Custo dos vasos

O custo do vaso ( $C_V$ ) é calculado por duas equações diferentes dependendo de sua orientação (6.8 para verticais e 6.9 horizontais), sendo que ambas dependem de seu peso ( $W$ ) em libras (determinado a partir da Equação 5.2) (Seider *et al.* 2003). Já para as colunas de destilação, o custo é calculado pela Equação 6.10.

$$C_V = \exp\{6,775 - 0,18255[\ln(W)] + 0,02297[\ln W]^2\} \quad (6.8)$$

$$C_V = \exp\{8,717 - 0,2330[\ln(W)] + 0,04333[\ln W]^2\} \quad (6.9)$$

$$C_V = \exp\{7,0374 - 0,18255[\ln(W)] + 0,02297[\ln W]^2\} \quad (6.10)$$

Em alguns casos, é necessário também calcular os custos para instalação de plataformas e escadas ( $C_{PL}$ ) pela Equação 6.11:

$$C_{PL} = 237,1D^{0,63316}L^{0,80161} \quad (6.11)$$

sendo:

$L$ : altura do vaso;

$D$ : diâmetro interno do vaso;

### 6.1.2.1 Reatores, separador trifásico, vasos de flash, PSA, coluna de adsorção e destiladores

Como explicado no Capítulo 5, os reatores, separador trifásico, vasos de *flash*, PSA, coluna de adsorção e destiladores foram dimensionados como vasos. O custo total destes é definido pela fórmula mais genérica descrita na Equação 6.12, na qual  $f_M$  é o fator material (igual a 1),  $V_R$  o volume do recheio e  $C_R$  o seu custo. Porém, cada parcela desta equação pode variar de acordo com o tipo de vaso, tal como descrito na Tabela 6.2.

$$C_P = f_M C_V + C_{PL} + V_R C_R \quad (6.12)$$

**Tabela 6.2:** Particularidades dos diferentes vasos considerados no presente trabalho.

Equipamentos	Orientação do vaso	Necessidade de escadas e plataformas ( $C_{PL}$ )	Possui recheio ( $V_R C_R$ )
Reatores PFR	Horizontal (6.9)	Não	Sim
Separador trifásico	Vertical (6.8)	Sim	Não
Vasos de flash	Vertical (6.8)	Sim	Não
PSA	Vertical (6.8)	Sim	Sim
Coluna de adsorção	Vertical (6.8)	Não	Sim
Destiladores	Vertical (6.8)	Sim	Sim

Fonte: Elaboração própria baseado em Young (2015)

### 6.1.3 Custo dos compressores

O custo dos compressores é calculado pela Equação 6.13, onde  $P_C$  é a potência do compressor em hp (Seider *et al.* 2003).

$$C_B = \exp(7,2223 + 0,8 \ln(t_S)) \quad (6.13)$$

### 6.1.4 Custo dos trocadores de calor

Alguns dos trocadores de calor utilizados no trabalho são do tipo casco-e-tubo e a equação que retorna o custo deste equipamento ( $C_P$ ), do tipo passo simples, é a 6.14, na qual  $C_B$  é o custo base que depende diretamente da área de troca térmica

(vide Equação 6.15);  $f_L$  é um fator que depende do comprimento dos tubos;  $f_M$  é calculado a partir da área de troca térmica e o material de construção (Equação 6.16); e  $f_P$  é o fator de pressão de operação do casco, que vai ser sempre igual a 1, uma vez que os trocadores não requerem nenhum tipo de reforço (Seider *et al.*, 2003).

$$C_P = f_P f_M f_L C_B \quad (6.14)$$

$$C_B = \exp\{11,667 - 0,8709[\ln(A)] + 0,09005[\ln A]^2\} \quad (6.15)$$

$$f_M = a + \left(\frac{A}{100}\right)^b \quad (6.16)$$

Ainda sobre as equações supracitadas,  $a$  e  $b$  são iguais a zero, uma vez que o material escolhido para os trocadores da planta é o aço-carbono. O comprimento dos tubos foi considerado como 8 ft e, portanto,  $f_L$  é igual a 1,25 (Seider *et al.* 2003).

Alguns trocadores presentes no processo possuem área inferior a 200 ft<sup>2</sup> e são do tipo duplo-tubo, de modo que o custo destes é calculado pela Equação 6.17.

$$C_B = \exp\{7,1248 + 0,16[\ln(A)]\} \quad (6.17)$$

## 6.2 Custos de Produção

Além dos investimentos em equipamentos é necessário calcular o custo de produção da planta. Para isto, a hipótese adotada foi de que a unidade opera 330 dias por ano (considerando que esta precisa de 30 dias parada para manutenção por ano), 24 horas por dia. A partir daí, foram descritos os custos diretos e indiretos da planta, bem como a receita obtida com a venda dos produtos.

A Tabela 6.3 apresenta os preços dos insumos que foram adotados para a avaliação econômica do processo, com as respectivas referências. Os valores de todas as utilidades aplicadas foram retirados do simulador Aspen HYSYS® v8.8.

**Tabela 6.3:** Preços dos insumos utilizados na planta simulada

<b>Insumos</b>	<b>Preço</b>	<b>Unidade</b>	<b>Referência</b>
<i>Hidrogênio</i>	0,17	USD/kg	Jimbo, 2018 <sup>16</sup>
<i>Óleo de Soja</i>	0,76	USD/kg	Biomercado, 2021; IndexMundi, 2021 <sup>17</sup>
<i>Óleo de Dendê</i>	0,95	USD/kg	Biomercado, 2021; IndexMundi, 2021 <sup>17</sup>
<i>Óleo de Pinhão-Manso</i>	0,65	USD/kg	JBK Manufacturing & Development Company, 2021
<i>Adsorvente Zeólita 3A</i>	1,9	USD/kg	Dalian Haixin Chemical Industrial Co., 2021
<i>Adsorvente Zeólita 5A</i>	3,5	USD/kg	Shanghai Jiuzhou Chemicals Co., 2021
<i>Adsorvente Carvão Ativado</i>	0,185	USD/kg	Alibaba, 2021
<i>Catalisador NiW/SiO2-Al2O3</i> <sup>18</sup>	9,3	USD/kg	Zibo Yinghe Chemical Co., 2021 Jiangxi Xintao Technology Co., 2021 Alibaba, 2021
<i>Aquecimento direto (utilidade)</i>	4,25E-06	USD/h	Aspen HYSYS® v8.8
<i>Água de Resfriamento (utilidade)</i>	2,12E-07	USD/h	Aspen HYSYS® v8.8
<i>Vapor de baixa pressão (utilidade)</i>	1,90E-06	USD/h	Aspen HYSYS® v8.8
<i>Very high temperature (utilidade)</i>	8,90E-06	USD/h	Aspen HYSYS® v8.8
<i>Eletricidade (utilidade)</i>	0,12	USD/kWh	Portal da Indústria, 2021

Fonte: Elaboração própria

<sup>16</sup> O preço do Hidrogênio foi baseado no trabalho de Jimbo (2018), que utilizou valores informados por Negro *et al.* (2003). Para que a análise econômica não fosse comprometida, os valores foram corrigidos para o ano de 2021 no por meio do índice de preços ao consumidor (IPCA), que representa a inflação acumulada no país ao longo do tempo. Outra opção que poderia ser mais recomendada para correção do preço do Hidrogênio seria o uso do preço do gás natural como referência, dado que o IPCA costuma ser utilizado para produtos acabados destinados ao consumidor final.

<sup>17</sup> A referência utilizada foi o portal Biomercado. No entanto, como os preços disponíveis eram referentes a anos anteriores ao ano base considerado para este trabalho, recorreu-se ao portal IndexMundi, que possui um histórico dos valores ao longo dos anos, para determinar a relação entre o preço no ano base e o ano informado na referência.

<sup>18</sup> Para o catalisador, foram retirados os preços por kg de níquel, tungstênio e sílica-alumina (suporte) das referências mencionadas. Para a composição do preço final do catalisador, assumiu-se que o suporte representa 50% da massa do catalisador, enquanto Ni e W são responsáveis, cada um, por 25% da massa total.

Os custos de matéria-prima e catalisador foram retirados da literatura e o custo com funcionários é derivado das Equações 6.18 e 6.19, sendo  $C_{MO}$  o custo com mão-de-obra,  $N_{NP}$  o número de equipamentos,  $P$  é o número de processos que envolvem o controle, remoção, distribuição ou transporte de sólidos (que neste cenário é igual a 0),  $C_S$  o custo com supervisão técnica e  $S_M$  é o salário médio por hora para operadores do setor no Brasil (16 reais) (Glassdoor, 2021). Ainda dentro dos custos diretos, os valores das utilidades foram obtidos a partir do simulador.

$$C_{MO} = \sqrt{(6,29 + 31,7P^2 + 0,23N_{NP})}(S_m) \quad (6.18)$$

$$C_S = 0,15C_{MO} \quad (6.19)$$

Os custos indiretos independem do nível de produção, como pode ser observado nas Equações 6.20, 6.21 e 6.22, sendo  $C_{OPS}$  o custo de empacotamento e estocagem e  $C_{MR}$  o custo com manutenção e reparos;  $C_{IL}$  o investimento local,  $C_{FC}$  o investimento fixo e  $C_S$  o custo com seguro.

$$C_{OPS} = 0,60(C_{MO} + C_S + C_{MR}) \quad (6.20)$$

$$C_{IL} = 0,015C_{FC} \quad (6.21)$$

$$C_S = 0,005C_{FC} \quad (6.22)$$

Por fim, as despesas gerais – custos administrativos, distribuição e venda de produtos, pesquisa e desenvolvimento – tem seus valores definidos a partir dos custos anteriormente calculados. O primeiro equivale a 25% dos custos de empacotamento e estocagem, o segundo e o terceiro a, respectivamente, 10% e 5% do custo total de produção.

## 7 RESULTADOS E DISCUSSÃO – ESTUDOS DE CASO

Este capítulo se propõe a discutir os custos calculados de acordo com as metodologias descritas no capítulo anterior e, com isso, buscar entender quais os pontos que financeiramente são mais críticos para a realização do processo. Além disso, são discutidas as receitas e, com os resultados, foram elaboradas propostas para viabilização da produção.

Vale ressaltar que uma das hipóteses adotadas no trabalho é a de que as vazões de matérias-primas que alimentam o processo são as mesmas, independentemente do tipo de óleo vegetal adotado, gerando quantidades diferentes de produto. Dada esta hipótese, o dimensionamento de uma planta que seja capaz de processar os três óleos vegetais deve ser baseado no cenário mais conservador em termos de tamanho dos equipamentos. Além disso, alguns equipamentos são abastecidos com utilidades diferentes de acordo com o cenário. Sendo assim, a planta deve possuir uma certa flexibilidade em relação às utilidades escolhidas.

### 7.1 Caso Base

#### 7.1.1 Análise dos custos

Inicialmente serão analisados os resultados obtidos das simulações base, entendendo os custos por categoria e a representatividade destes frente ao todo. Este processo é essencial para que as propostas visando aumentar a lucratividade da planta sejam efetivas. A Tabela 7.1 apresenta os custos anuais da planta para o processo com cada óleo vegetal.

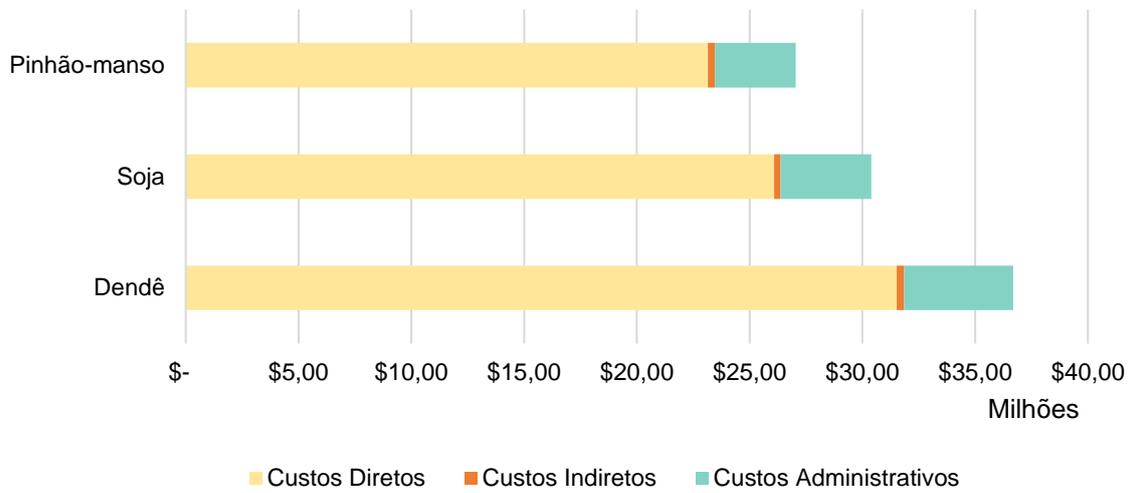
Analisando o gráfico da Figura 7.1, é perceptível que o custo de produção é definido majoritariamente pelos seus custos diretos, independente do óleo vegetal escolhido. Nessa linha, o gráfico da Figura 7.2 é útil para visualização de que as matérias-primas são as maiores contribuintes do custo de produção. Aprofundando ainda mais a análise, nota-se que o principal impacto dentro desta subcategoria é devido aos óleos vegetais (vide Tabela 7.1). Isso está de acordo com o apresentado na literatura, como pode ser visto no trabalho de Barbosa e Scapim (2021), por exemplo.

**Tabela 7.1: Custos anuais da planta para cada óleo vegetal**

<i>Custos Diretos</i>	Óleo de Dendê	Óleo de Pinhão-manso	Óleo de Soja
<b>Matéria-Prima (CMP)</b>	<b>\$ 29.649.916,56</b>	<b>\$ 20.979.804,32</b>	<b>\$ 24.387.181,47</b>
Hidrogênio	\$ 344.639,33	\$ 353.663,56	\$ 354.523,01
Óleo Vegetal	\$ 29.305.277,23	\$ 20.626.140,76	\$ 24.032.658,96
<b>Outros</b>	<b>\$ 137.793,87</b>	<b>\$ 137.792,89</b>	<b>\$ 137.793,37</b>
Catalisador	\$ 137.777,64	\$ 137.777,64	\$ 137.777,64
Adsorvedor (PSA + Remoção água)	\$ 16,23	\$ 15,25	\$ 15,73
<b>Mão-de-Obra (CMO)</b>	<b>\$ 94.596,18</b>	<b>\$ 94.596,18</b>	<b>\$ 94.596,18</b>
Custo com Operadores	\$ 82.257,54	\$ 82.257,54	\$ 82.257,54
Supervisão Técnica (CST)	\$ 12.338,63	\$ 12.338,63	\$ 12.338,63
<b>Utilidades (CUTIL)</b>	<b>\$ 1.315.211,49</b>	<b>\$ 1.611.603,93</b>	<b>\$ 1.171.505,55</b>
Fired Heat	\$ 242.408,94	\$ 316.883,31	\$ 167.107,09
Água de Resfriamento	\$ 22.977,62	\$ 23.116,00	\$ 16.580,58
LP Steam	\$ 852,08	\$ 968,01	\$ 11.277,91
Very high temperature	\$ 878.435,55	\$ 1.107.493,36	\$ 870.540,90
Refrigerant 1	\$ -	\$ -	\$ -
Eletricidade	\$ 170.537,30	\$ 163.143,25	\$ 105.999,06
<b>Manutenção e Reparos (CMR)</b>	<b>\$ 278.209,78</b>	<b>\$ 272.613,32</b>	<b>\$ 248.149,65</b>
<b>Suprimentos Operacionais (CSO)</b>	<b>\$ 41.731,47</b>	<b>\$ 40.892,00</b>	<b>\$ 37.222,45</b>
<b>Encargos de Laboratório (CLAB)</b>	<b>\$ 12.338,63</b>	<b>\$ 12.338,63</b>	<b>\$ 12.338,63</b>
<b>Subtotal</b>	<b>\$ 31.529.797,97</b>	<b>\$ 23.149.641,26</b>	<b>\$ 26.088.787,79</b>
<b>Custos Indiretos</b>			
Empacotamento e Estocagem (CEE)	\$ 223.683,57	\$ 220.325,70	\$ 205.647,50
Impostos Locais (CIL)	\$ 69.552,45	\$ 68.153,33	\$ 62.037,41
Seguro (CS)	\$ 23.184,15	\$ 22.717,78	\$ 20.679,14
<b>Subtotal</b>	<b>\$ 316.420,17</b>	<b>\$ 311.196,80</b>	<b>\$ 288.364,05</b>
<b>Despesas-Gerais</b>			
Custos Administrativos (CADM)	\$ 55.920,89	\$ 55.081,42	\$ 51.411,87
Pesquisa e Desenvolvimento (CP&D)	\$ 1.595.106,95	\$ 1.175.795,97	\$ 1.321.428,19
Distribuição e Venda dos Produtos (CDIST)	\$ 3.190.213,90	\$ 2.351.591,95	\$ 2.642.856,37
<b>Subtotal</b>	<b>\$ 4.841.241,75</b>	<b>\$ 3.582.469,35</b>	<b>\$ 4.015.696,43</b>
<b>Custo Total de Produção</b>	<b>\$ 36.687.459,89</b>	<b>\$ 27.043.307,41</b>	<b>\$ 30.392.848,27</b>
<b>Receita</b>			
Nafta	\$ 511.850,99	\$ 672.320,56	\$ 494.686,73
Bioquerosene	\$ 3.316.827,26	\$ 1.336.989,13	\$ 1.229.847,63
Diesel verde	\$ 4.110.962,83	\$ 6.135.697,43	\$ 3.238.664,35
<b>Subtotal</b>	<b>\$ 7.939.641,08</b>	<b>\$ 8.145.007,13</b>	<b>\$ 4.963.198,71</b>
<b>Lucro Líquido Anual</b>	<b>\$ -28.747.818,81</b>	<b>\$ -18.898.300,28</b>	<b>\$ -25.429.649,55</b>

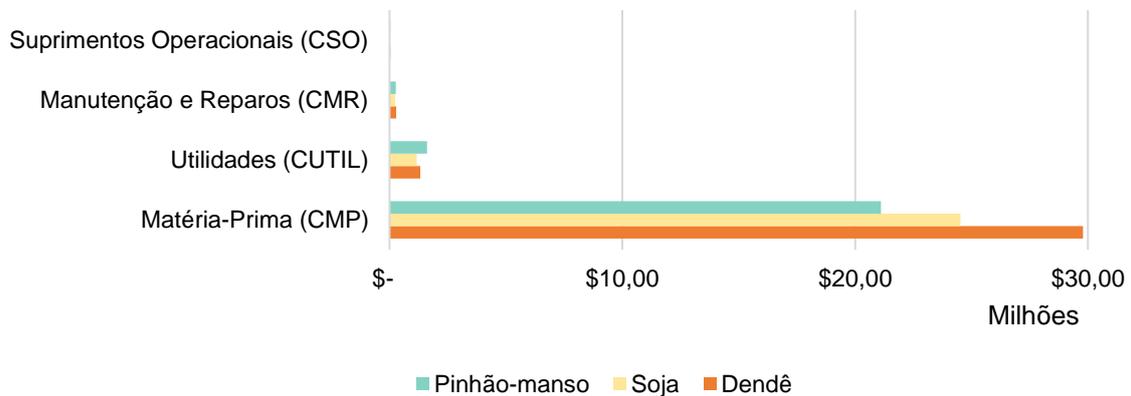
Fonte: Elaboração própria

**Figura 7.1:** Custos diretos, indiretos e despesas gerais das simulações base



Fonte: Elaboração própria

**Figura 7.2:** Custos diretos das simulações base<sup>19</sup>

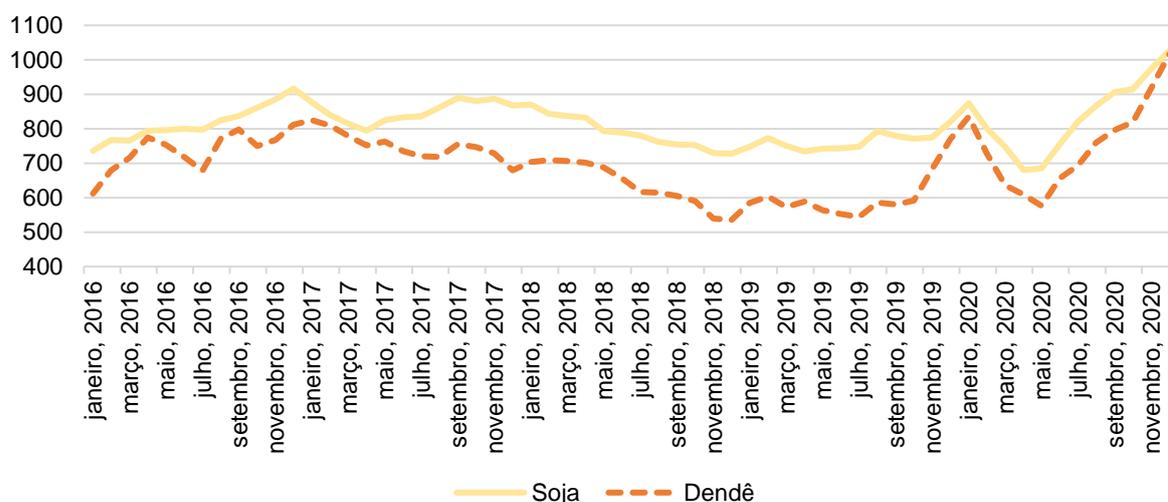


Fonte: Elaboração própria

Uma consideração relevante é que os preços utilizados para as matérias-primas datam de 2020, e as *commodities* citadas sofreram um aumento de preço considerável nos últimos anos, como é possível analisar no gráfico da Figura 7.3.

<sup>19</sup> Não foram considerados no gráfico os custos com mão-de-obra e encargos de laboratório, uma vez que estes apresentavam um valor irrisório frente aos demais.

**Figura 7.3:** Custos dos óleos de soja e dendê entre dezembro de 2016 e novembro de 2021, em dólar por tonelada métrica<sup>20</sup>



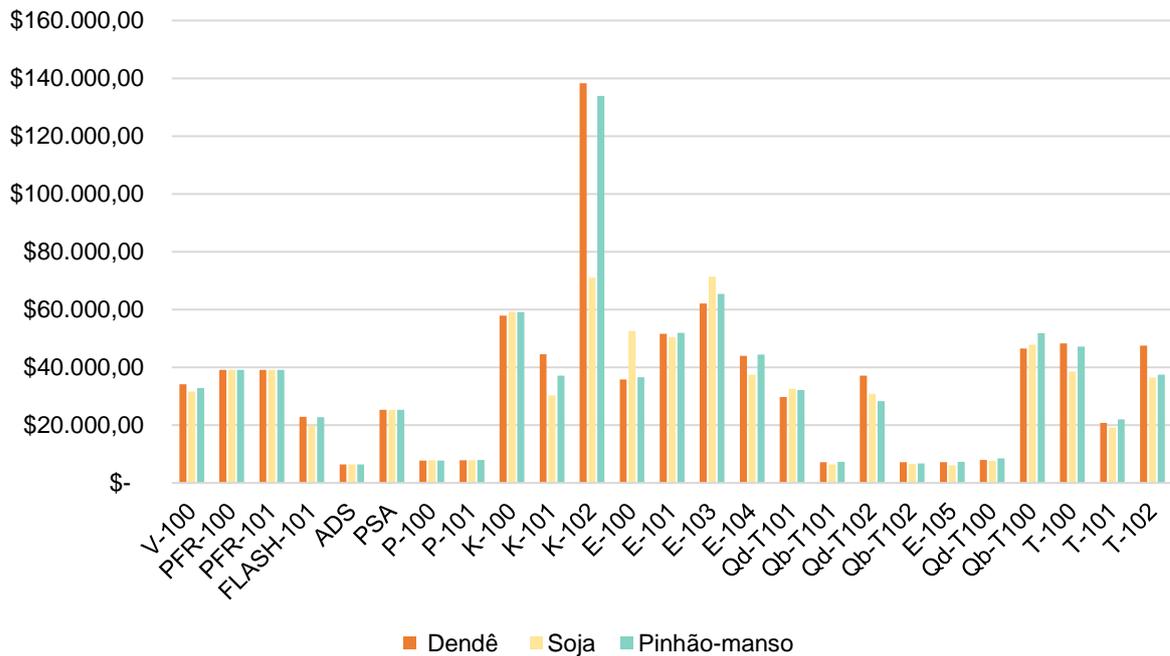
Fonte: Adaptado de IndexMundi (2022)

Outro custo que é importante de ser analisado é o dos equipamentos presentes na unidade – investimento fixo. Isto porque, devido às diferentes composições dos óleos vegetais, cada um vai apresentar rendimentos diferentes nas reações e, conseqüentemente, vazões e composições diferentes para correntes equivalentes. Essa diferença faz com que o dimensionamento dos equipamentos seja distinto, o que se reflete no custo de cada processo. Contudo, como é possível ver na Figura 7.4, essa variação não é grande para a maioria dos equipamentos, o que é uma consequência das dimensões semelhantes encontradas para os equipamentos, como pode ser constatado nos Anexos, salvo algumas exceções.

É possível observar que o compressor K-102 apresenta diferença significativa na simulação para o processo com óleo de soja. Este equipamento está presente na entrada do módulo de hidrocraqueamento e isomerização, recebendo os hidrocarbonetos gerados no PFR-100. Uma justificativa para esta disparidade é que a conversão do primeiro reator para este óleo é menor, o que faz com que o equipamento receba uma vazão consideravelmente inferior, refletindo em seu tamanho e custo.

<sup>20</sup> Não foram encontrados estes mesmos dados para o óleo de pinhão-manso.

**Figura 7.4:** Custo dos equipamentos da planta nas simulações base, em dólares



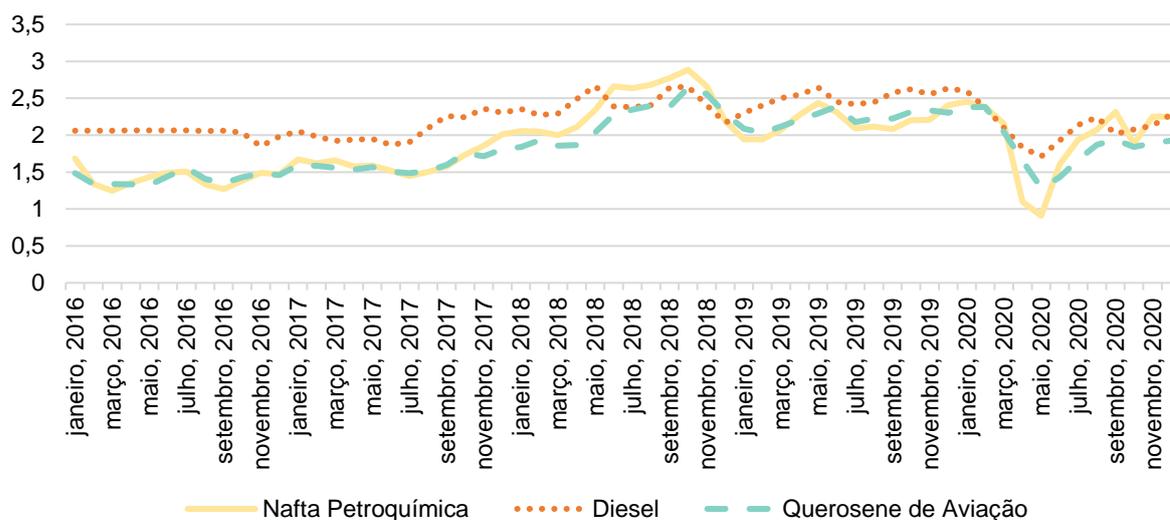
Fonte: Elaboração própria

### 7.1.2 Receitas da Simulação Base

Assim como no caso das matérias-primas, os valores dos produtos gerados no processo foram baseados no ano de 2020. Contudo, por falta de dados na literatura, os valores do bioquerosene de aviação e do diesel verde foram associados aos seus respectivos correspondentes fósseis (querosene de aviação e diesel)<sup>21</sup>. Estes valores podem ser observados na Figura 7.5.

<sup>21</sup> O valor utilizado da Nafta também é proveniente do combustível fóssil, mas é assumido aqui que não há diferença entre este e a obtida no processo HEFA.

**Figura 7.5:** Valores em real por litro dos combustíveis fósseis entre 2016 e 2020



Fonte: Adaptado de ANP (2022)

Como se almeja que os combustíveis de origem renovável sejam competitivos em relação aos seus correspondentes fósseis, esta hipótese é válida e importante para uma base de comparação. No entanto, dado que o processo de geração de combustíveis fósseis é mais antigo e consolidado, é natural e esperado que este seja capaz de gerar produtos com um custo inferior aos combustíveis “verdes”. Ou seja, pode-se dizer que os valores utilizados estão um pouco descolados da realidade do processo HEFA, e este ponto será discutido mais adiante no trabalho.

Uma das razões para o comportamento observado em termos de rendimento de biocombustíveis gerados para cada matéria-prima avaliada está diretamente relacionada com o teor de ácidos graxos saturados presentes nos óleos vegetais. A produção de bioquerosene frente aos outros hidrocarbonetos é favorecida quando há maior quantidade de ácidos graxos sem duplas ligações.

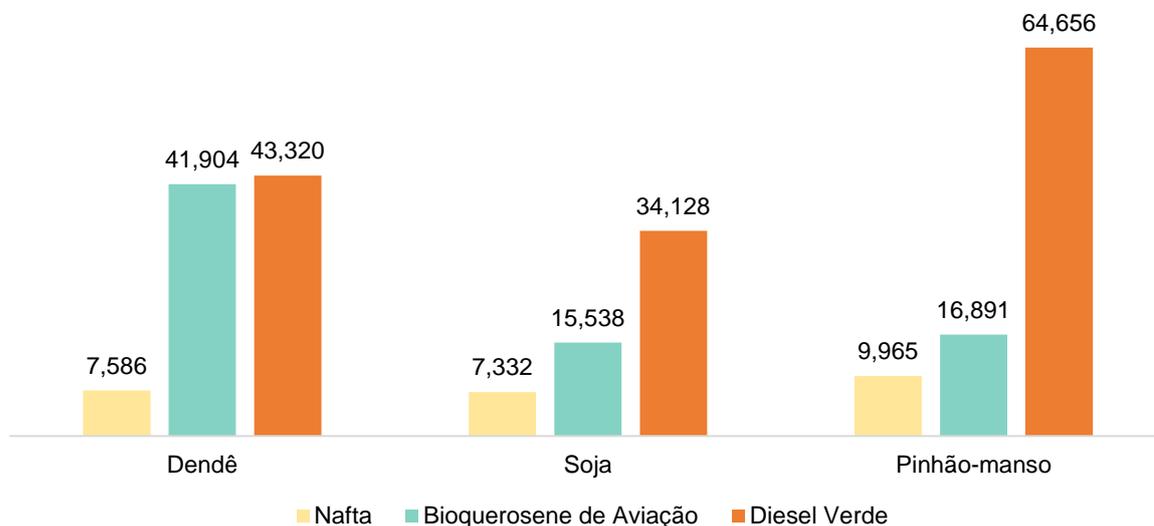
Como visto na Tabela 3.1, o óleo de dendê apresenta concentrações mais elevadas de ácido palmítico, esteárico e mirístico – ácidos graxos saturados. Por outro lado, o óleo de soja apresenta maiores teores dos ácidos oleico, linoleico e linolênico – ácidos graxos insaturados. O óleo de pinhão-mansão, por sua vez, apresenta um comportamento intermediário, com um teor de ácidos graxos saturados levemente superior ao do óleo de soja. Esta observação converge com os cenários observados nos gráficos das Figuras 7.6 e 7.7, em que o processo com o óleo de dendê apresenta

uma produção bastante elevada de bioquerosene quando comparado com os outros dois óleos vegetais.

Um ponto importante a ser considerado é que as simulações apresentaram maiores vazões de produção para diesel verde do que para o bioquerosene de aviação, como pode ser visto na Figura 7.6. Isto, porém, era um comportamento esperado, uma vez que o catalisador escolhido – NiW/SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – possui uma maior seletividade para produção do diesel verde, como discutido no tópico 3.1.3.

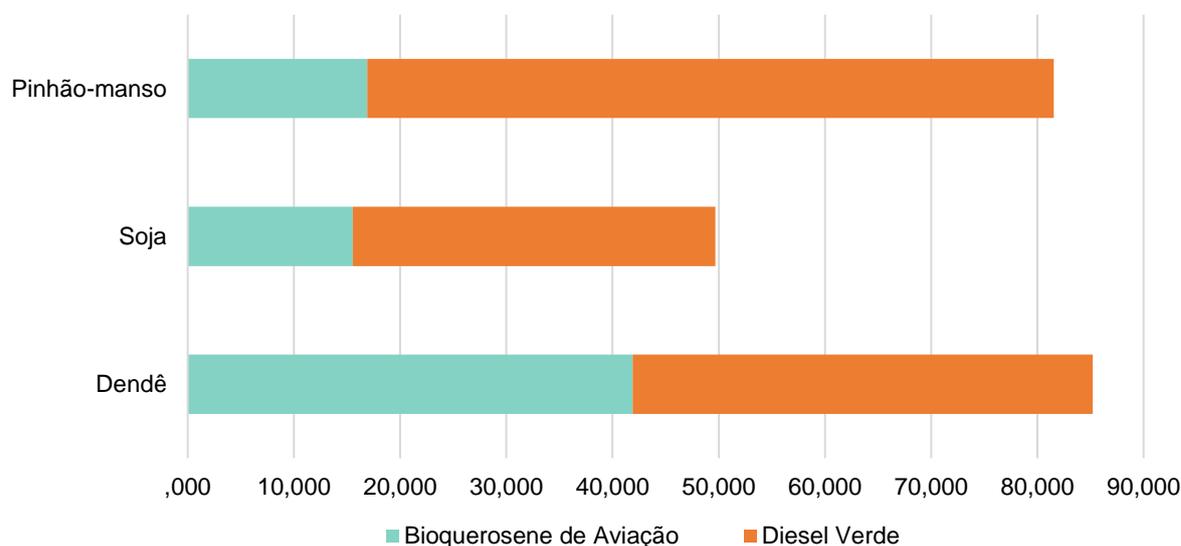
Além disso, apesar das particularidades das composições dos óleos vegetais, a hipótese adotada no trabalho foi de que as condições de processo para os três cenários seriam as mesmas. Nestas condições, o óleo de dendê e de pinhão-manso apresentam um melhor resultado na geração de combustíveis verdes, vide Figura 7.6. No entanto, em uma unidade real, as condições de processo poderiam ser variadas de acordo com a alimentação, visando a otimização da produção do produto de interesse ou o lucro. Portanto, uma sugestão de trabalho futuro é a investigação de quais condições devem ser alteradas para cada matéria-prima.

**Figura 7.6:** Quantidade de produtos gerada, em toneladas por dia, nas simulações base



Fonte: Elaboração própria

**Figura 7.7:** Proporção gerada entre os combustíveis verdes, em toneladas por dia, nas simulações base



Fonte: Elaboração própria

### 7.1.3 Análise de lucratividade

Nos tópicos anteriores, foram descritas hipóteses que, como discutido, acabam por afetar o lucro gerado na planta, tais como:

- Todos os valores monetários utilizados foram embasados no ano de 2020, que foi um ano no qual o custo dos óleos vegetais foi, em média, mais alto do que os anteriores.

Os preços assumidos para os produtos gerados na planta foram de seus equivalentes fósseis. Esta relação de razão igual a 1 apresenta um desvio considerável da realidade, tendo em vista que o HVO estava custando em torno de 3,21 vezes o valor do diesel vendido pela Petrobras, em julho de 2021 (*BiodieselBR*, 2021).

Para endereçar os possíveis desvios, este trabalho se propôs a analisar o lucro obtido para nove cenários diferentes, em uma matriz 3 por 3 com suas colunas e linhas representando, respectivamente, cenários de matéria-prima e cenários de preços de produtos.

Os cenários para as colunas seriam:

- Valor das matérias-primas no ano de 2020;
- Média dos valores anuais das matérias-primas entre 2016 e 2020;
- Média anual mínima das matérias-primas no mesmo período.

Já os cenários para as linhas seriam:

- Valor dos combustíveis fósseis no ano de 2020;
- Média dos valores anuais dos combustíveis fósseis entre 2016 e 2020;
- Média anual máxima dos combustíveis fósseis no mesmo período.

Estes valores podem ser observados nas Tabelas 7.2, 7.3 e 7.4.

**Tabela 7.2:** Lucros obtidos em diferentes cenários para o óleo de dendê

<b>Produtos / Matérias-Primas</b>	<b>2020</b>	<b>média 2020-2016</b>	<b>menor preço 2020-2016</b>
<i>2020</i>	\$ -28.747.818,81	\$ -29.415.950,81	\$ -21.461.246,80
<i>média 2020-2016</i>	\$ -28.542.388,76	\$ -29.210.520,77	\$ -21.255.816,76
<i>maior preço 2020-2016</i>	\$ -27.208.388,59	\$ -27.876.520,60	\$ -19.921.816,59

Fonte: Elaboração própria

**Tabela 7.3:** Lucros obtidos em diferentes cenários para o óleo de soja

<b>Produtos / Matérias-Primas</b>	<b>2020</b>	<b>média 2020-2016</b>	<b>menor preço 2020-2016</b>
<i>2020</i>	\$ -25.429.649,55	\$ -24.564.894,89	\$ -20.229.022,90
<i>média 2020-2016</i>	\$ -25.269.216,21	\$ -24.404.461,55	\$ -20.068.589,56
<i>maior preço 2020-2016</i>	\$ -24.469.978,23	\$ -23.605.223,57	\$ -19.269.351,57

Fonte: Elaboração própria

**Tabela 7.4:** Lucros obtidos em diferentes cenários para o óleo de pinhão-mansão

<b>Produtos / Matérias-Primas</b>	<b>2020</b>	<b>média 2020-2016</b>	<b>menor preço 2020-2016</b>
<i>2020</i>	\$ -18.898.300,28	\$ -18.761.787,84	\$ -14.102.591,61
<i>média 2020-2016</i>	\$ -18.590.282,01	\$ -18.453.769,57	\$ -13.794.573,34
<i>maior preço 2020-2016</i>	\$ -17.341.556,79	\$ -17.205.044,35	\$ -12.545.848,12

Fonte: Elaboração própria

Pode-se observar que em nenhum destes vinte e sete cenários o resultado foi neutro ou satisfatório. Em todos os casos observa-se que não há lucro. Desta forma, analisou-se qual deveria ser a relação entre os preços dos produtos considerados renováveis frente aos fósseis para que o lucro líquido anual seja igual a zero. Para isto, foi considerado que tanto o preço do diesel quanto do querosene de aviação seria multiplicado por um fator comum que representaria a conversão do fóssil ao renovável. Estes valores podem ser observados nas Tabelas 7.5, 7.6 e 7.7.

**Tabela 7.5:** Razão entre os preços dos combustíveis renováveis e fósseis para o óleo de dendê

<b>Produtos / Matérias-Primas</b>	<b>2020</b>	<b>média 2020-2016</b>	<b>menor preço 2020-2016</b>
<i>2020</i>	4,88	4,97	3,89
<i>média 2020-2016</i>	4,74	4,83	3,79
<i>maior preço 2020-2016</i>	4,08	4,16	3,26

Fonte: Elaboração própria

**Tabela 7.6:** Razão entre os preços dos combustíveis renováveis e fósseis para o óleo de soja

<b>Produtos / Matérias-Primas</b>	<b>2020</b>	<b>média 2020-2016</b>	<b>menor preço 2020-2016</b>
<i>2020</i>	6,7	6,5	5,53
<i>média 2020-2016</i>	6,45	6,27	5,33
<i>maior preço 2020-2016</i>	5,61	5,45	4,63

Fonte: Elaboração própria

**Tabela 7.7:** Razão entre os preços dos combustíveis renováveis e fósseis para o óleo de pinhão-mansão

<b>Produtos / Matérias-Primas</b>	<b>2020</b>	<b>média 2020-2016</b>	<b>menor preço 2020-2016</b>
<i>2020</i>	3,53	3,52	2,89
<i>média 2020-2016</i>	3,39	3,37	2,78
<i>maior preço 2020-2016</i>	2,96	2,95	2,42

Fonte: Elaboração própria

Para o prosseguimento da análise, deve-se levar em consideração que, de acordo com o site BiodieselBR (2021), o preço do HVO em 2021 era 3,21 vezes o preço do combustível fóssil, e o do biodiesel puro L80 estava em torno de 1,96 vezes o preço deste. Isso reforça que, mesmo com a tecnologia já mais consolidada e investimentos de políticas públicas, os biocombustíveis continuam sendo mais caros do que os combustíveis fósseis. Ou seja, é razoável assumir que os combustíveis

verdes possuam um preço maior, já que o mercado estaria disposto a pagar por este atributo. Além disso, os últimos anos tem sido marcados por um forte movimento do mercado em prol de alternativas mais sustentáveis, o que vem impulsionando empresas a aceitarem um aumento de seus custos em nome do *marketing* verde.

Assim, considerando o valor de 3,21 como um limite para a razão do renovável sobre o fóssil, tem-se que o óleo de pinhão-manso é o único com possibilidade de atender a este limite – em alguns dos cenários analisados. Considerando o valor de 3,21, o lucro anual da planta é mostrado para os diversos cenários nas Tabelas 7.8, 7.9 e 7.10.

**Tabela 7.8:** Lucro líquido anual considerando-se razão do preço de combustível renovável sobre o fóssil de 3,21 para o óleo de dendê

Produtos / Matérias-Primas	2020	média 2020-2016	menor preço 2020-2016
<b>2020</b>	\$ -12.332.402,70	\$ -13.000.534,70	\$ -5.045.830,70
<b>média 2020-2016</b>	\$ -11.655.569,33	\$ -12.323.701,33	\$ -4.368.997,32
<b>maior preço 2020-2016</b>	\$ -7.663.477,67	\$ -8.331.609,67	\$ -376.905,67

Fonte: Elaboração própria

**Tabela 7.9:** Lucro líquido anual considerando-se razão do preço de combustível renovável sobre o fóssil de 3,21 para o óleo de soja

Produtos / Matérias-Primas	2020	média 2020-2016	menor preço 2020-2016
<b>2020</b>	\$ -15.554.238,07	\$ -14.689.483,41	\$ -10.353.611,42
<b>média 2020-2016</b>	\$ -15.022.427,70	\$ -14.157.673,05	\$ -9.821.801,05
<b>maior preço 2020-2016</b>	\$ -12.737.196,26	\$ -11.872.441,60	\$ -7.536.569,60

Fonte: Elaboração própria

**Tabela 7.10:** Lucro líquido anual considerando-se razão do preço de combustível renovável sobre o fóssil de 3,21 para o óleo de pinhão-manso

Produtos / Matérias-Primas	2020	média 2020-2016	menor preço 2020-2016
<b>2020</b>	\$ -2.383.662,97	\$ -2.247.150,53	\$ 2.412.045,70
<b>média 2020-2016</b>	\$ -1.372.065,44	\$ -1.235.553,00	\$ 3.423.643,24
<b>maior preço 2020-2016</b>	\$ 2.255.360,88	\$ 2.391.873,32	\$ 7.051.069,55

Fonte: Elaboração própria

É importante ressaltar que o objetivo da análise dos nove cenários para cada óleo é definir os limites de pior e melhor cenário para o lucro líquido. Nos casos vistos,

o óleo de pinhão-manso apresentou um maior potencial para lucro. Já os óleos de dendê e de soja, porém, dada as hipóteses do trabalho, não alcançaram o *break-even*<sup>22</sup>, ou ponto de equilíbrio.

#### 7.1.4 Discussão dos resultados

Como apresentado no Capítulo 2, Souza (2019) realizou uma análise multicritério para classificação das matérias-primas para o processo HEFA, por região (Tabela 2.3). Neste trabalho a autora definiu que a soja era a matéria-prima mais promissora para todas as regiões do país, seguida pelo dendê na região norte e pelo pinhão-manso nas regiões nordeste, centro-oeste e sudeste.

De fato, como exposto por Souza (2019), a soja é uma matéria-prima abundante, podendo gerar um custo de produção menor do que, por exemplo, o do processo com o óleo de dendê. Contudo, dadas as condições estipuladas neste trabalho, o rendimento de processo da simulação se mostrou mais baixo para a produção com óleo de soja em relação aos demais óleos avaliados. Desta forma, uma sugestão de trabalho futuro seria avaliar a variação dos parâmetros de processo de forma a otimizar a produção dos produtos de interesse e, conseqüentemente, do lucro a partir do óleo de soja. No entanto, mesmo com essa otimização, a produção a partir desta matéria-prima tende a apresentar uma menor proporção de bioquerosene frente ao diesel verde. Isto se deve principalmente às características dos triglicerídeos que compõem este óleo – como discutido no item 7.1.2.

Por outro lado, o processo com o óleo de dendê apresenta um custo de produção alto, devido principalmente ao alto custo deste insumo. Contudo, a simulação a partir desta matéria-prima apresentou bons resultados em termos de quantidade gerada de produtos. Assim, apesar do alto custo, como pode ser visto na Tabela 7.5, o fator para que a planta atinja o *break-even* é próximo a 3,21 para os casos em que o óleo vegetal possa ser adquirido por um preço equivalente ao menor valor praticado entre 2016 e 2020.

Já o óleo de pinhão-manso, dadas as condições de processo assumidas neste trabalho, se mostrou como a única matéria-prima que apresentou lucratividade

---

<sup>22</sup> Termo em inglês que se refere à condição (preços) em que a receita anual se iguala aos custos anuais.

positiva nos cenários considerados neste trabalho. Isto porque, como pôde ser visto nos itens anteriores, este insumo apresenta menor custo, enquanto possui uma produtividade de combustíveis verdes comparável à do óleo de dendê, que é a maior dentre os três óleos vegetais.

Contudo, cabe ressaltar que o estudo econômico de uma unidade produtiva não é suficiente para ranquear os óleos vegetais a serem utilizados em um cenário nacional. Para isto é necessário analisar outros fatores, como: disponibilidade da terra voltada ao cultivo, competição com outras indústrias e, pensando em sustentabilidade, a quantidade de gases de efeito estufa gerados em toda a cadeia produtiva. Levando tal aspecto em consideração, como o pinhão-manso não é tão bem distribuído nacionalmente, uma planta de processo que utilize apenas este óleo como matéria-prima pode apresentar restrições em termos de localização e abastecimento.

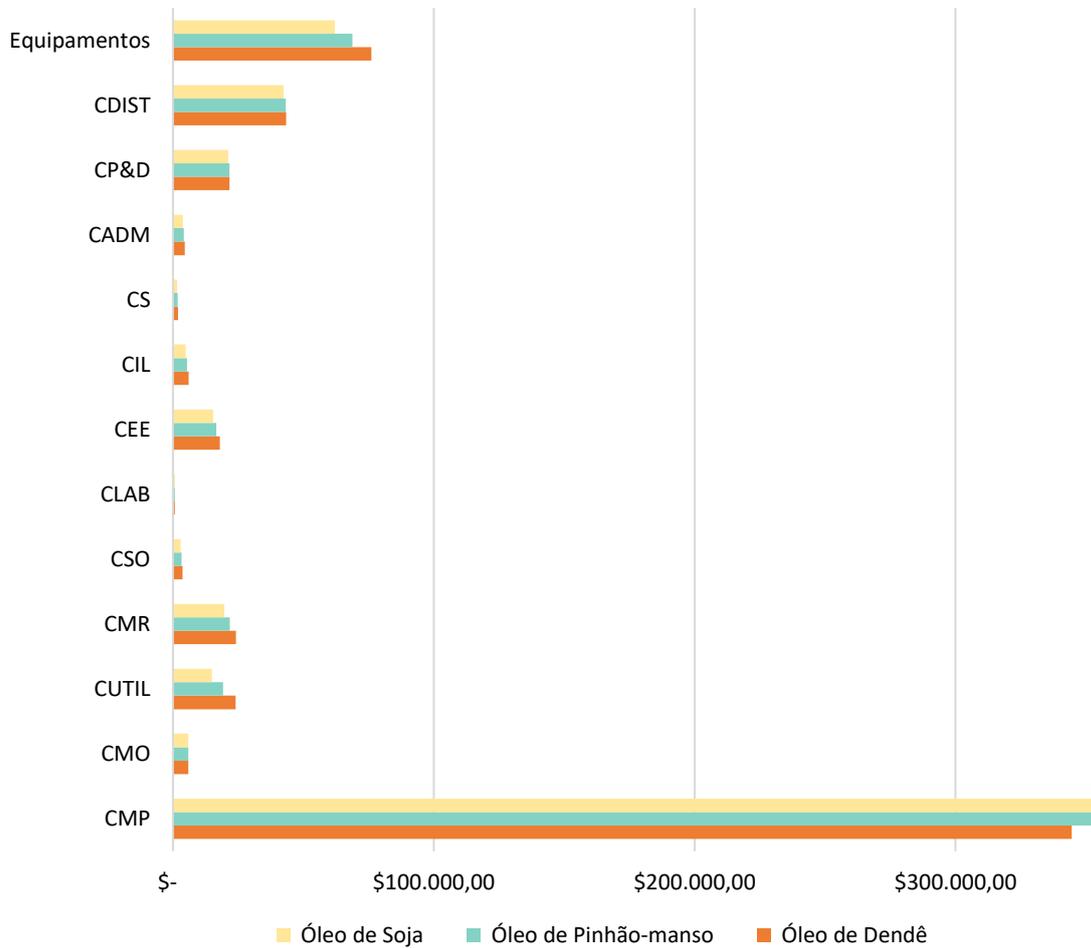
Apesar da análise econômica não poder ser utilizada como única forma de avaliação, é inegável que os óleos de pinhão-manso e dendê apresentaram os melhores resultados em termos de produção, com base nas premissas adotadas no trabalho.

Contudo, para uma planta focada no mercado de aviação, seria necessário um estudo mais aprofundado da cinética de outros catalisadores e uma avaliação das condições de processo que pudessem favorecer um aumento na proporção de bioquerosene frente ao diesel verde. Além disso, ainda com o foco no mercado de aviação, o óleo de dendê tenderia a ser mais interessante do que os demais nas condições estudadas, visto que o seu processo apresenta a maior quantidade de bioquerosene produzida. Vale destacar que as premissas adotadas no trabalho foram baseadas em dados obtidos por Martinez-Hernandez *et al.* (2019), enquanto os parâmetros cinéticos – que não são otimizados para produção de bioquerosene – foram obtidos de Tirado *et al.* (2020) e Calemma *et al.* (2000), devido à limitação de dados cinéticos encontrados na literatura para este processo.

## 7.2 Caso sem sistema de reciclo de hidrogênio

Como mencionado no item 7.1.1, uma segunda análise do presente trabalho é a avaliação da construção da unidade dentro de um local que já possua um módulo de purificação de gás hidrogênio, como uma refinaria. Neste caso, a unidade não precisaria comprar H<sub>2</sub> como insumo. Além disso, os custos dos equipamentos desta etapa não seriam considerados como pertencentes ao processo HEFA estudado. O valor economizado neste cenário pode ser observado na Figura 7.8.

**Figura 7.8:** Economia do processo sem módulo de reciclo de gás hidrogênio frente ao processo com módulo de reciclo, em milhares de dólares



Fonte: Elaboração própria

Assim como discutido no item 7.1.3, no qual foi avaliado um fator de 3,21 para a relação entre o preço do combustível renovável e o preço do combustível fóssil, foi

realizada uma análise análoga para o sistema sem o módulo de reciclo de hidrogênio. As Tabelas 7.11 a 7.13 apresentam os valores de lucro líquido obtidos nos processos utilizando os três óleos vegetais, considerando os mesmos cenários de preço que foram analisados para o processo sem reciclo de hidrogênio.

**Tabela 7.11:** Lucro líquido anual considerando-se razão do preço de combustível renovável sobre o fóssil de 3,21 para o óleo de dendê

<b>Produtos / Matérias-Primas</b>	<b>2020</b>	<b>média 2020-2016</b>	<b>menor preço 2020-2016</b>
<i>2020</i>	\$ -11.833.516,19	\$ -12.501.648,19	\$ -4.546.944,19
<i>média 2020-2016</i>	\$ -11.156.682,81	\$ -11.824.814,82	\$ -3.870.110,81
<i>maior preço 2020-2016</i>	\$ -7.164.591,16	\$ -7.832.723,16	\$ 121.980,84

Fonte: Elaboração própria

**Tabela 7.12:** Lucro líquido anual considerando-se razão do preço de combustível renovável sobre o fóssil de 3,21 para o óleo de soja

<b>Produtos / Matérias-Primas</b>	<b>2020</b>	<b>média 2020-2016</b>	<b>menor preço 2020-2016</b>
<i>2020</i>	\$ -15.065.981,52	\$ -14.201.226,87	\$ -9.865.354,87
<i>média 2020-2016</i>	\$ -14.534.171,16	\$ -13.669.416,50	\$ -9.333.544,50
<i>maior preço 2020-2016</i>	\$ -12.248.939,71	\$ -11.384.185,05	\$ -7.048.313,05

Fonte: Elaboração própria

**Tabela 7.13:** Lucro líquido anual considerando-se razão do preço de combustível renovável sobre o fóssil de 3,21 para o óleo de pinhão-mansão

<b>Produtos / Matérias-Primas</b>	<b>2020</b>	<b>média 2020-2016</b>	<b>menor preço 2020-2016</b>
<i>2020</i>	\$ -1.885.885,05	\$ -1.749.372,61	\$ 2.909.823,62
<i>média 2020-2016</i>	\$ -874.287,51	\$ -737.775,08	\$ 3.921.421,16
<i>maior preço 2020-2016</i>	\$ 2.753.138,80	\$ 2.889.651,24	\$ 7.548.847,48

Fonte: Elaboração própria

Como pode ser observado, os valores de lucro líquido, em geral, se tornaram maiores no cenário sem reciclo de hidrogênio. Isto se deve à redução dos custos com utilidades, energia elétrica, mão-de-obra, manutenção, dentre outros. No entanto, algumas perspectivas continuam semelhantes, indicando ausência de lucro líquido anual para o processo com óleo de soja em qualquer um dos cenários avaliados. Para o caso com óleo de dendê, tem-se agora um cenário (o mais otimista) com lucro líquido positivo. Já no processo com pinhão-mansão como matéria-prima, surgiram dois

novos cenários em que o lucro líquido seria positivo (ambos nos casos com o maior preço de produto acabado).

Além disso, como dito anteriormente, o cenário sem módulo de reciclo de hidrogênio apresenta uma redução no CAPEX. Sendo assim, uma outra análise que precisa ser realizada é a comparação dos investimentos nos dois cenários. Assim, a Tabela 7.14 apresenta o valor de investimento total calculado pelas correlações apresentadas no Capítulo 6 para o processo utilizando as três diferentes matérias-primas estudadas.

**Tabela 7.14:** Comparação dos investimentos entre o cenário base e o sem módulo de recuperação de hidrogênio

<i>Matéria prima</i>	<b>Investimento total</b>		<b>Redução de investimento</b>
	<i>Com módulo de reciclo de H2</i>	<i>Sem módulo de reciclo de H2</i>	
<b>Dendê</b>	\$ 5.455.093,78	\$ 4.981.770,92	8,7%
<b>Soja</b>	\$ 4.865.679,42	\$ 4.479.878,66	7,9%
<b>Pinhão-manso</b>	\$ 5.345.359,17	\$ 4.917.117,03	8,0%

Fonte: Elaboração própria

Os resultados anteriores demonstram que há uma redução nos custos anuais quando comparamos o caso sem módulo de reciclo de hidrogênio com o caso em que a planta apresenta esta seção. Além disso, há uma redução no investimento total necessário. No entanto, tais efeitos podem não ser considerados significativos o suficiente para justificar a decisão da localização da planta e a definição da configuração da unidade em relação ao módulo de hidrogênio. A redução de custos anuais é menor do que 2% em relação à planta com sistema de recuperação de hidrogênio. O investimento total, por sua vez, apresenta uma redução que não ultrapassa os 9%. Desta forma, seria importante que não houvesse grande complexidade adicional na implementação de uma planta nestas condições, pois não apresenta benefícios financeiros de grande impacto. Esta linha de pensamento, de considerar uma planta dentro de uma refinaria existente, já foi abordada, inclusive, em outros trabalhos da literatura, como o de Pearlson (2011).

Por outro lado, o trabalho de Barbosa e Scapim (2021) propõe uma discussão sobre a possibilidade de uso dos vasos da própria refinaria para a realização das reações de hidrogenação e separação dos produtos. Dessa forma, seria possível

considerar uma significativa redução de investimento para a implementação do processo HEFA.

## 8 CONCLUSÃO E SUGESTÕES

No presente trabalho foi realizada a simulação da produção de bioquerosene de aviação (e diesel verde) no *software* Aspen HYSYS® v8.8 por meio do processo HEFA. Foram avaliadas as possibilidades de uso dos óleos de soja, palma (dendê) e de pinhão-manso como matérias-primas. O objetivo desta análise foi entender o comportamento dos diferentes óleos no processo, tanto sob o ponto de vista de produtividade quanto sob o ponto de vista econômico.

A capacidade produtiva da planta foi estimada de acordo com a projeção de demanda de bioquerosene de aviação para o ano de 2029, assumindo-se uma planta com capacidade de absorver uma fração desta demanda. Porém, como dito anteriormente, uma vez que foi fixada a vazão de entrada do processo e não a de saída, o volume de biocombustíveis obtidos não é igual para os três cenários.

Vale ressaltar que, apesar de a planta simulada para o óleo de soja apresentar um investimento fixo menor, esta também apresenta o menor rendimento em termos de produto acabado, gerando um menor lucro líquido. Como visto no Capítulo 7, para que a planta passe a apresentar um lucro líquido positivo, o valor cobrado pelos biocombustíveis produzidos deve ser bastante elevado, o que pode ser inviável dependendo das condições de mercado.

Como pode ser visto nos Capítulos 6 e 7, os melhores resultados em termos de produção de bioquerosene de aviação são observados para o processo com óleo de dendê, o que pode ser explicado pelo maior teor de ácidos graxos saturados na composição da matéria-prima.

Para a comercialização dos biocombustíveis formados, é necessário que seus preços de venda sejam competitivos no mercado. Como observado nas Figuras 7.3 e 7.5, os preços das *commodities* e dos combustíveis fósseis sofreram grande flutuação ao longo dos últimos anos. Os resultados da análise realizada no item 7.1.3, assumindo um fator pré-definido para a relação entre os preços dos combustíveis renováveis e fósseis, indicaram que os melhores cenários em termos de lucro líquido podem ser obtidos utilizando-se o óleo de pinhão-manso como matéria-prima (salvaguardada a disponibilidade desta matéria-prima).

Por outro lado, nenhum dos cenários-base gera lucro quando é avaliado o uso dos óleos de soja e de dendê como matéria-prima. Ou seja, seria necessária uma

razão de preços renovável/fóssil maior do que 3,21, o que pode tornar menos viável a produção a partir destes óleos.

Conforme mencionado no Capítulo 7, algumas alternativas poderiam ser implementadas visando um melhor cenário de lucro e de custos. Por exemplo, a aplicação de incentivos fiscais para a produção e comercialização do bioquerosene de aviação, seguindo as hipóteses descritas, poderia gerar um contexto mais favorável, fazendo com que o retorno do investimento seja mais rápido. Além disso, políticas públicas de inclusão gradual do biocombustível em mistura com o querosene de origem fóssil também poderiam ser vantajosas, no sentido de aumentar a demanda pelo bioquerosene de aviação e, conseqüentemente, o seu preço. Além disso, a possibilidade de uso da infraestrutura de refinarias de petróleo, por não ser um processo que necessita de tecnologia tão diferenciada, também é um cenário que deve ser levado em consideração visando a redução do investimento necessário.

Por fim, como foi observado ao longo do presente trabalho, podem ser realizadas algumas sugestões de investigações futuras, como, por exemplo, o aproveitamento da corrente de gás hidrogênio na entrada do primeiro reator ou em outros processos da unidade produtiva, além da alteração da proporção dos combustíveis gerados no processo. Nesse sentido, poderiam ser estudadas variações em algumas condições de processo ou mesmo na proporção de entrada das matérias-primas, com o objetivo de otimizar a produção do bioquerosene frente aos outros combustíveis.

Os autores esperam que este trabalho possa contribuir para futuras comparações relacionadas tanto a tecnologias de produção quanto a diferentes matérias-primas, visto que há uma vasta gama de possibilidades em território brasileiro que podem vir a tornar a produção do bioquerosene cada vez mais rentável e sustentável.

## 9 Bibliografia

ABEAR – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS AÉREAS. **Glossário**. Disponível em: <<https://www.abear.com.br/imprensa/dados-e-fatos/glossario/>>. Acesso em: 10 dez. 2021.

AGÊNCIA BRASIL. **Metade dos combustíveis fósseis poderá ser inútil em 2036, diz estudo**. Notícias. Publicado em 05 nov. 2021 – Brasília. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/internacional/noticia/2021-11/metade-dos-combustiveis-fosseis-podera-ser-inutil-em-2036-diz-estudo>>. Acesso em: 24 nov. 2021.

ALIBABA.COM. **Spherical tungsten metal powder**. 2021 Disponível em: <[https://portuguese.alibaba.com/product-detail/high-purity-3n-4n-5n-spherical-tungsten-metal-powder-0-25um-15-53um-45-105um-75-150um-as-3d-printing-powder-1600132772852.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal\\_offer.d\\_title.2e4888d8vtako](https://portuguese.alibaba.com/product-detail/high-purity-3n-4n-5n-spherical-tungsten-metal-powder-0-25um-15-53um-45-105um-75-150um-as-3d-printing-powder-1600132772852.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.2e4888d8vtako)>. Acesso em: 31 nov. 2021.

ALIBABA.COM. **Activated high efficiency adsorption decoloring powder**. 2021. Disponível em: <[https://www.alibaba.com/product-detail/Activated-High-efficiency-Adsorption-Decoloring-Powder\\_1600061335227.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal\\_offer.d\\_title.66ce7782m4jj4M&s=p](https://www.alibaba.com/product-detail/Activated-High-efficiency-Adsorption-Decoloring-Powder_1600061335227.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.66ce7782m4jj4M&s=p)>. Acesso em: 30 nov. 2021

ANAC – AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **Inventário nacional de emissões atmosféricas da aviação civil – 2019**. Ano base 2018. 44f. Disponível em: <[https://www.anac.gov.br/assuntos/paginas-tematicas/meio-ambiente/arquivos/inventario-nacional-de-emissoes\\_v6.pdf](https://www.anac.gov.br/assuntos/paginas-tematicas/meio-ambiente/arquivos/inventario-nacional-de-emissoes_v6.pdf)>. Acesso em: 05 dez. 2021.

ANAC – AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **Plano de ação para a redução das emissões de CO<sub>2</sub> da aviação civil brasileira**. 3ª ed. ano base: 2018. Brasília, dezembro/2019. Disponível em: <<https://www.anac.gov.br/assuntos/paginas-tematicas/meio-ambiente/arquivos/PlanodeAo2019ptbr.pdf>>. Acesso em: 19 dez. 2021.

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Resolução nº. 734, de 28 de junho de 2018**. Sistema de Legislação. Disponível em: <<https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-734-2018-regulamenta-a-autorizacao-para-o-exercicio-da-atividade-de-producao-de-biocombustiveis-e-a-autorizacao-de-operacao-da-instalacao-produtora-de-biocombustiveis?origin=instituicao>>. Acesso em: 24 nov. 2021.

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis**: 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/arquivos-anuario-estatistico-2021/anuario-2021.pdf>>. Acesso em: 24 nov. 2021.

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Biocombustíveis**. Publicado em 11 de dezembro de 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/qualidade-de-produtos/biocombustiveis>>. Acesso em: 24 nov. 2021.

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Resolução nº. 19, de 15 de abril de 2015**. Sistema de Legislação. Disponível em: <<https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-734-2018-regulamenta-a-autorizacao-para-o-exercicio-da-atividade-de-producao-de-biocombustiveis-e-a-autorizacao-de-operacao-da-instalacao-produtora-de-biocombustiveis?origin=instituicao>>. Acesso em: 24 nov. 2021.

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Resolução nº. 45, de 25 de agosto de 2014**. Sistema de Legislação. Disponível em: <<https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-734-2018-regulamenta-a-autorizacao-para-o-exercicio-da-atividade-de-producao-de-biocombustiveis-e-a-autorizacao-de-operacao-da-instalacao-produtora-de-biocombustiveis?origin=instituicao>>. Acesso em: 24 nov. 2021.

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Mistura de biodiesel ao diesel passa a ser de 13% a partir de hoje (1/3)**. Publicado em 01 de março de 2021. Disponível em: <[https://www.gov.br/anp/pt-br/canais\\_atendimento/imprensa/noticias-comunicados/mistura-de-biodiesel-ao-diesel-passa-a-ser-de-13-a-partir-de-hoje-1-3](https://www.gov.br/anp/pt-br/canais_atendimento/imprensa/noticias-comunicados/mistura-de-biodiesel-ao-diesel-passa-a-ser-de-13-a-partir-de-hoje-1-3)>. Acesso em: 23 out. 2021.

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Combustíveis de aviação**. Publicado em 09 de novembro de 2020. Disponível em: <[https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/combustiveis-de-aviacao#:~:text=O%20Brasil%20%C3%A9%20o%20maior,avia%C3%A7%C3%A3o%20alternativo%20\(QAV%20alternativo\).>](https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/combustiveis-de-aviacao#:~:text=O%20Brasil%20%C3%A9%20o%20maior,avia%C3%A7%C3%A3o%20alternativo%20(QAV%20alternativo).>)>. Acesso em: 24 nov. 2021.

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Resolução nº. 779, de 5 de abril de 2019**. Altera a Resolução ANP nº 17, de 26 de julho de 2006; e a Resolução ANP nº 18, de 26 de julho de 2006, para atualizar as definições de querosene de aviação C (QAV-C) e querosene de aviação alternativo e vedar a importação de QAV-C. Sistema de Legislação. Disponível em: <<https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-779-2019-altera-a-resolucao-anp-no-17-de-26-de-julho-de-2006-e-a-resolucao-anp-no-18-de-26-de-julho-de-2006-para-atualizar-as-definicoes-de-querosene-de-aviacao-c-qav-c-e-querosene-de-aviacao-alternativo-e-vedar-a-importacao-de-qav-c?origin=instituicao&q=779/2019>>. Acesso em: 24 nov. 2021.

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Resolução nº. 856, de 22 de outubro de 2021**. Estabelece as especificações do querosene de aviação JET A e JET A-1, dos querosenes de aviação alternativos e do querosene de aviação C (JET C), bem como as obrigações quanto

ao controle da qualidade a serem atendidas pelos agentes econômicos que comercializam esses produtos em território nacional. Sistema de Legislação. Disponível em: <<https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-856-2021-estabelece-as-especificacoes-do-querosene-de-aviacao-jet-a-e-jet-a-1-dos-querosenes-de-aviacao-alternativos-e-do-querosene-de-aviacao-c-jet-c-bem-como-as-obrigacoes-quanto-ao-controle-da-qualidade-a-serem-atendidas-pelos-agentes-economicos-que-comercializam-esses-produtos-em-territorio-nacional?origin=instituicao&q=856/2021>>. Acesso em: 28 nov. 2021.

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **ANP amplia oferta de querosenes de aviação autorizados no país.** Publicado em 21 de outubro de 2021. Disponível em: <[https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/combustiveis-de-aviacao#:~:text=O%20Brasil%20%C3%A9%20o%20maior,avia%C3%A7%C3%A3o%20alternativo%20\(QAV%20alternativo\).>](https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/combustiveis-de-aviacao#:~:text=O%20Brasil%20%C3%A9%20o%20maior,avia%C3%A7%C3%A3o%20alternativo%20(QAV%20alternativo).>)>. Acesso em: 29 nov. 2021.

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **ANP fará consulta e audiência públicas sobre novo querosene de aviação que poderá diminuir custos de companhias aéreas.** Publicado em 28 de janeiro de 2021. Disponível em: <[https://www.gov.br/anp/pt-br/canais\\_atendimento/imprensa/noticias-comunicados/anp-fara-consulta-e-audiencia-publicas-sobre-novo-querosene-de-aviacao-que-podera-diminuir-custos-de-companhias-aereas-1](https://www.gov.br/anp/pt-br/canais_atendimento/imprensa/noticias-comunicados/anp-fara-consulta-e-audiencia-publicas-sobre-novo-querosene-de-aviacao-que-podera-diminuir-custos-de-companhias-aereas-1)>. Acesso em: 29 nov. 2021.

ARAÚJO, F. D. S.; CHAVES, M. H.; ARAÚJO, E. C. E. **Caracterização do óleo de pinhão-manso.** 2007.

BARBOSA, IAN VIEIRA; SCAPIM, LETÍCIA ARAUJO. **SIMULAÇÃO E ANÁLISE ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE HVO E SUA COPRODUÇÃO COM ÓLEO DIESEL.** 2021. Projeto Final (Graduação em Engenharia Química) - UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE, Niterói, Rio de Janeiro, 2021.

BARROS, T. D.. **Etanol.** Agência Embrapa de Informação Tecnológica – Ageitec. *Árvore Do Conhecimento – Agroenergia.* Disponível em: <<https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/agroenergia/arvore/CONT000fj1fm1e u02wyiv802hvm3jw2v4wj9.html>>. Acesso em: 25 nov. 2021.

BIODIESELBR.COM. **Exportação brasileira de óleo de soja tem maior volume em 6 anos. BiodieselBR.com,** 25 jan. 2022. Disponível em: <<https://www.biodieselbr.com/noticias/materia-prima/soja1/exportacao-brasileira-de-oleo-de-soja-tem-maior-volume-em-6-anos-250122#:~:text=Pelos%20estimativas%20da%20Associa%C3%A7%C3%A3o%20Brasileira,ao%20longo%20do%20ano%20passado>>. Acesso em: 03 ago. 2022.

BIODIESELBR. **HVO custa mais de R\$ 9 por litro.** [S. /], 2021. Disponível em: <https://www.biodieselbr.com/noticias/biocombustivel/cana/hvo-custa-mais-de-r-9-por-litro-280721>. Acesso em: 29 out. 2021.

BIOMERCADO. **Centro de Referência da Cadeia de Produção de Biocombustíveis Para Agricultura Familiar**. [S. l.], 2021. Disponível em: <http://www.biomercado.com.br/>. Acesso em: 25 nov. 2021.

BRASIL. **Decreto nº 76.593, de 14 de novembro de 1975**. Institui o Programa Nacional do Alcool e dá outras Providências. Brasília. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1970-1979/decreto-76593-14-novembro-1975-425253-publicacaooriginal-1-pe.html>. Acesso em: 28 nov. 2021.

BRASIL. **Lei nº. 12.490 de 16 de setembro de 2011**. Altera as Leis nºs 9.478, de 6 de agosto de 1997, e 9.847, de 26 de outubro de 1999, que dispõem sobre a política e a fiscalização das atividades relativas ao abastecimento nacional de combustíveis; o § 1º do art. 9º da Lei nº 8.723, de 28 de outubro de 1993, que dispõe sobre a redução de emissão de poluentes por veículos automotores; as Leis nºs 10.336, de 19 de dezembro de 2001, e 12.249, de 11 de junho de 2010; o Decreto-Lei nº 509, de 20 de março de 1969, que dispõe sobre a transformação do Departamento dos Correios e Telégrafos em empresa pública; a Lei nº 10.683, de 28 de maio de 2003, que dispõe sobre a organização da Presidência da República e dos Ministérios; revoga a Lei nº 7.029, de 13 de setembro de 1982; e dá outras providências. Brasília/DF. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2011/lei/112490.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2011/lei/112490.htm). Acesso em: 25 nov. 2021.

BRASIL. **Lei nº. 13.576, de 26 de dezembro de 2017**. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências. Brasília/DF. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2015-2018/2017/lei/113576.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/113576.htm). Acesso em: 24 out. 2021.

CALEMMA, V., PERATELLO, S., & PEREGO, C. (2000). **Hydroisomerization and hydrocracking of long chain n-alkanes on Pt/amorphous SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst**. *Applied Catalysis A: General*, 190(1–2), 207–218. [https://doi.org/10.1016/S0926-860X\(99\)00292-6](https://doi.org/10.1016/S0926-860X(99)00292-6)

CGEE – Centro de Gestão e estudos estratégicos. **Biocombustíveis aeronáuticos: progressos e desafios**. (Série Documentos Técnicos, 8). Brasília: CGEE, 2010.

CNPE – CONSELHO NACIONAL DE POLÍTICA ENERGÉTICA. **Resolução nº 7, de 20 de abril de 2021**. Institui o programa combustível do futuro, cria o comitê técnico combustível do futuro e dá outras providências. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/despacho-do-presidente-da-republica-320067170>. Acesso em: 24 out. 2021.

CRUZ, D. M. de B. da; SILVA, C. M. C. B. da; MENEZES, J. D. de S. Mercado brasileiro dos combustíveis e biocombustíveis. Capítulo 1 (p. 11-40). In: MENEZES, Jeane Denise de Souza; MAGALHÃES, Adeildo Moacir Costa; CRUZ, Diogens Marco de Brito da; SILVA, Camila Manuelle Cardoso Braz da. **Biocombustíveis: perspectivas do desenvolvimento sustentável**. Organizadores: 1ª ed. Aracaju: Criação Editora, 2019.

CRUZ, F. E. Da. (2010). **Produção De Hidrogênio Em Refinarias De Petróleo : Avaliação Exergética E Custo De Produção** Produção De Hidrogênio Em Refinarias

De Petróleo : Avaliação Exergética E Custo De Produção. *Dissertação de Mestrado*, 164.

DELGADO, F.; SOUSA, M. E. de; ROITMAN, Tamar. **Biocombustíveis**. Cadernos FGV Energia. Agosto/2017, nº. 8, ano 4. Disponível em: <[https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/arquivos/5\\_-\\_tamar\\_roitman\\_fgv\\_energia\\_evento\\_renovabio\\_v6.pdf](https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/arquivos/5_-_tamar_roitman_fgv_energia_evento_renovabio_v6.pdf)>. Acesso em: 28 nov. 2021.

DURÃES, Frederico O. M.; LAVIOLA, Bruno Galvêas; SUNDFELD, Esdras; MENDONÇA, Simone; BHERING, Leonardo Lopes. Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação em Pinhão-manso para Produção de Biocombustíveis. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**, [s. l.], 2009.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA  
MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Matérias-primas oleaginosas para a produção de bioquerosene – oportunidades e desafios**. Artigo Agronomia. Publicado em 12 de junho de 2015. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/3344909/artigo-materias-primas-oleaginosas-para-a-producao-de-bioquerosene--oportunidades-e-desafios>>. Acesso em: 25 nov. 2021.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia**. 148, 148–162. 2019.

EPBR. **Ganhos com entrada de novo combustível de aviação esbarram em gargalos do mercado brasileiro**. Publicado em 17 de agosto de 2021. Disponível em: <<https://epbr.com.br/ganhos-com-entrada-de-novo-combustivel-de-aviacao-esbarram-em-gargalos-do-mercado-brasileiro/>>. Acesso em: 05 dez. 2021.

FAVARO, C. **Queda da poluição no setor aéreo é ponto fora da curva**. Revista Valor. Publicado em 14 de abril de 2021. Disponível em: <<https://valor.globo.com/empresas/noticia/2021/04/14/queda-da-poluicao-no-setor-aereo-e-ponto-fora-da-curva.ghtml>>. Acesso em: 05 dez. 2021.

G1. COP26: **Na contramão do mundo, Brasil teve aumento de emissões de CO2 em ano de pandemia**. Meio ambiente. Publicado em 28 de outubro de 2021. Disponível em: <<https://g1.globo.com/meio-ambiente/cop-26/noticia/2021/10/28/cop26-na-contramao-do-mundo-brasil-teve-aumento-de-emissoes-de-co2-em-ano-de-pandemia.ghtml>>. Acesso em: 15 dez. 2021.

GOMES, L.; SOUZA, C.; ZANLORENSSI, G. 85,3% da energia no mundo ainda vem de fontes poluentes. Data publicação: 01 de nov de 2021. Revista NEXO (*on-line*). Disponível em: <<https://www.nexojournal.com.br/grafico/2021/11/01/853-da-energia-no-mundo-ainda-vem-de-fontes-poluentes#:~:text=Ainda%20que%20o%20crescimento%20da,%2C3%25%20das%20fontes%20energ%C3%A9ticas.>>. Acesso em: 23 nov. 2021.

HARNOS, S., ONYESTYÁK, G., & KALLÓ, D. (2012). **Hydrocarbons from sunflower oil over partly reduced catalysts**. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*, 106(1), 99–111. <https://doi.org/10.1007/s11144-012-0424-6>

INDEXMUNDI. **Jet Fuel - Daily Price - Commodity Prices - Price Charts, Data, and News**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=jet-fuel>. Acesso em: 21 nov. 2021.

INDEXMUNDI. **Soybean Oil - Monthly Price - Commodity Prices - Price Charts, Data, and News**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=soybean-oil>. Acesso em: 21 nov. 2021.

INDEXMUNDI. **Palm oil - Monthly Price - Commodity Prices - Price Charts, Data, and News**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=palm-oil&months=60>. Acesso em: 21 nov. 2021.

ITTHIBENCHAPONG, V., SRIFA, A., KAEWMEEESRI, R., KIDKHUNTHOD, P., & FAUNGNAWAKIJ, K. (2017). **Deoxygenation of palm kernel oil to jet fuel-like hydrocarbons using Ni-MoS<sub>2</sub>/γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts**. *Energy Conversion and Management*, 134, 188–196. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.12.034>

IATA – *International Air Transport Association*. **2020: o pior ano da história da aviação para a demanda de viagens aéreas**. Press Release – nº. 6, 2021. Disponível em: <<https://www.iata.org/contentassets/9acb79cb3f2a4243af09f822c72f4355/2021-02-03-02-pt.pdf>>. Acesso em: 10 dez. 2021.

ICAO – INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. **Internacional Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation – CORSIA**. CHAPTER SIX Climate Change Mitigation: CORSIA (2019). Disponível em: <<https://www.icao.int/about-icao/Pages/default.aspx>>. Acesso em: 19 dez. 2021.  
ISTOÉ. **Como voar mais e ainda diminuir a poluição?** Revista Istoé. edição nº 1255 07.01 (*on-line*). 2021. Disponível em: <<https://www.istoedinheiro.com.br/como-voar-mais-e-ainda-diminuir-a-poluicao/>>. Acesso em: 19 dez. 2021.

JBK MANUFACTURING & DEVELOPMENT COMPANY. **Crude Jatropha Oil Price**. [S. l.], 2021. Disponível em: [https://www.alibaba.com/product-detail/Crude-Jatropha-Oil-Price-Top-Quality\\_1600393350610.html?spm=a2700.7724857.normal\\_offer.d\\_title.182bf05bvSI D2M](https://www.alibaba.com/product-detail/Crude-Jatropha-Oil-Price-Top-Quality_1600393350610.html?spm=a2700.7724857.normal_offer.d_title.182bf05bvSI D2M). Acesso em: 31 ago. 2021.

JIANGXI XINTAO TECHNOLOGY CO., LTD. **Catalisador À Base de alumina ativada**. [S. l.], 2021. Disponível em: [https://portuguese.alibaba.com/product-detail/high-purity-silica-activated-alumina-based-catalyst-activated-alumina-desiccant-1350560249.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal\\_offer.d\\_title.5faa621euLOoJj&s=p](https://portuguese.alibaba.com/product-detail/high-purity-silica-activated-alumina-based-catalyst-activated-alumina-desiccant-1350560249.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.5faa621euLOoJj&s=p). Acesso em: 31 ago. 2021.

JIMBO, R. X. J. **Avaliação Técnico-Econômica da Produção de 1,2 Propanodiol a Partir do Glicerol**. Escola de Química – UFRJ. Rio de Janeiro, RJ. 2018.

LIN, Ronghong; LADSHAW, Austin; NAN, Yue; LIU, Jiuxu; YIACOUMI, Sotira; TSOURIS, Costas; DEPAOLI, David W.; TAVLARIDES, Lawrence L. ***Isotherms for Water Adsorption on Molecular Sieve 3A: Influence of Cation Composition***. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2015.

MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **DIAGNÓSTICO DA PRODUÇÃO SUSTENTÁVEL DA PALMA DE ÓLEO**. Brasília - DF, Brasil, 2018. Disponível em: <[http://www.abrapalma.org/pt/wp-content/uploads/2014/12/DIAGNOSTICO\\_PALMA.pdf](http://www.abrapalma.org/pt/wp-content/uploads/2014/12/DIAGNOSTICO_PALMA.pdf)>

MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Programa nacional de produção e uso do biodiesel (PNPB)**. Publicado em 06 de setembro de 2019. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/agricultura-familiar/biodiesel/programa-nacional-de-producao-e-uso-do-biodiesel-pnpb>>. Acesso em: 28 nov. 2021.

MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Selo Biocombustível Social**. Publicado em 06 de setembro de 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/agricultura-familiar/biodiesel/selo-biocombustivel-social>>. Acesso em: 28 nov. 2021.

MARTINEZ-HERNANDEZ, E., RAMÍREZ-VERDUZCO, L. F., AMEZCUA-ALLIERI, M. A., & ABURTO, J. (2019). **Process simulation and techno-economic analysis of bio-jet fuel and green diesel production — Minimum selling prices**. *Chemical Engineering Research and Design*, 146, 60–70. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.03.042>

MERCURE *et al.* **Reframing incentives for climate policy action**. Nature Energy. Article – Published: 04 November 2021. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/s41560-021-00934-2>>. Acesso em: 25 nov. 2021.

NEULING, U.; KALTSCHMITT, M. **Conversion routes for production of biokerosene – Status and assessment**. *Biomass Conv. Bioref*, 2014.

NOGUEIRA, C. **Conferências ambientais: a história por trás das tendências da sustentabilidade**. *Blog Eurecilo*. Publicado em 22 nov. 2021. Disponível em: <<https://blog.eureciclo.com.br/conferencias-ambientais/>>. Acesso em: 24 nov. 2021.

PALÁCIO, J. C. E.; LORA, E. E. S.; VENTURINI, O. J.; ALMAZÁN, O. **Biocombustíveis, meio ambiente, tecnologia e segurança alimentar**. Capítulo 1 (p. 1-46). In: LORA, Electo Eduardo Silva; VENTURINI, Osvaldo José. **Biocombustíveis**: vol 1. 1ª ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2012.

PEARLSON, M. N. **A techno-economic and environmental assessment of hydroprocessed renewable distillate fuels**. Master of Science in Technology Thesis. Massachusetts Institute of Technology, 2011.

PETROBRAS. **Querosene de aviação**. Nossas atividades/Produtos/Aviação. 2019. Disponível em: <<https://petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/produtos/aviacao/querosene-de-aviacao/>>. Acesso em: 01 dez. 2021.

POLING, B. E.; PRAUSNITZ, M. e O'CONNELL, J. P. **The Properties of Gases and Liquids**. 5ª ed. Nova Iorque, Estados Unidos. McGraw-Hill, 2004.

PORTAL DA INDÚSTRIA. **Custo da energia elétrica para indústria**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://noticias.portaldaindustria.com.br/noticias/inovacao-e-tecnologia/custo-da-energia-eletrica-para-industria/>. Acesso em: 2 dez. 2021.

RANUCCI, C. R.; ALVES, H. J.; MONTEIRO, M. R.; KUGELMEIER, C. L.; BARICCATTI, R. A.; OLIVEIRA, C. R.; SILVA, E. A. **Potencial alternative aviation fuel from jatropa (Jatropha curcas L.), babassu (Orbignya phalerata) and palm kernel (Elaeis guineensis) as blends with Jet-A1 kerosene**. *Journal of Cleaner Production*. V. 185, jun. 2018, p. 860-869. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.084>>. Acesso em: 30 abr. 2021.

RBQAV - REDE BRASILEIRA DE BIOQUEROSENE E HIDROCARBONETOS SUSTENTÁVEIS PARA AVIAÇÃO. Quem somos. **Rede Brasileira de Bioquerosene e Hidrocarbonetos Sustentáveis para aviação**, [S. l.], p. 1, 15 nov. 2021. Disponível em: <<https://rbqav.com.br/quem-somos>>

REIS, V. dos. **Combustíveis e sistema de combustível**. AeroTD – Escola de Aviação Civil. 2015. Disponível em: <<https://aerotd.com.br/decoleseufuturo/wp-content/uploads/2015/05/COMBUST%C3%8DVEIS-E-SISTEMAS-DE-COMBUST%C3%8DVEL.pdf>>. Acesso em: 25 nov. 2021.

ROITMAN, Tamar. **Perspectivas e propostas de inserção de bioquerosene de aviação no transporte aéreo de passageiros no Brasil**. *Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Planejamento Energético*, 2019.

RUEDA, E. D. M., & ESTUDO. (2020). **ESTUDO DA PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS PARA O SETOR DA AVIAÇÃO OBTIDOS PELA DESOXIGENAÇÃO DE ÁCIDOS GRAXOS DO ÓLEO DE BABAÇU**. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 2(1), 5–7. <http://jurnal.globalhealthsciencegroup.com/index.php/JPPP/article/download/83/65%0Ahttp://www.embase.com/search/results?subaction=viewrecord&from=export&id=L603546864%5Cnhttp://dx.doi.org/10.1155/2015/420723%0Ahttp://link.springer.com/10.1007/978-3-319-76>

SANTOS, G. R. dos. **UNIFAC - UM NOVO MODELO UNIFAC PARA A PREDIÇÃO DO EQUILÍBRIO LÍQUIDO-LÍQUIDO**. CAMPINAS, SP. 2005.

SCALDAFERRI, C. A. **Síntese de bio-hidrocarbonetos via catálise heterogênea para a produção de bioquerosene de aviação e diesel verde**. 2019. 170f. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Minas Gerais, 2019.

SCHUMACHER, L. (2005). **Biodiesel Lubricity**. In *The Biodiesel Handbook*. <https://doi.org/10.1201/9781439822357.ch6.5>

SOARES, P.; CENAMO, M. C. **Esquema de redução de emissões da aviação civil internacional (corsia/ico):** desafios e oportunidades. 22<sup>a</sup> ed. São Paulo: IDESAM, 2018.

TAO, L.; MILBRANDT, A.; ZHANG, Y.; WANG, W. **Techno-economic and resource analysis of hydroprocessed renewable jet fuel.** *Biotechnology for Biofuels*, 2017.

TIRADO, A., TREJO, F., & ANCHEYTA, J. (2020). **Simulation of bench-scale hydrotreating of vegetable oil reactor under non-isothermal conditions.** *Fuel*, 275(May), 117960. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117960>

TOBA, M., ABE, Y., KURAMOCHI, H., OSAKO, M., MOCHIZUKI, T., & YOSHIMURA, Y. (2011). **Hydrodeoxygenation of waste vegetable oil over sulfide catalysts.** *Catalysis Today*, 164(1), 533–537. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2010.11.049>

UBRABIO – União Brasileira do Biodiesel e Bioquerosene. **Biodiesel.** 2021. Disponível em: <<https://ubrablo.com.br/2021/03/15/donizete-tokarski-obiodiesel-ja-contribui-para-a-recuperacao-economica/>>. Acesso em: 02 dez. 2021.

VERIANSYAH, B., HAN, J. Y., KIM, S. K., HONG, S. A., KIM, Y. J., LIM, J. S., SHU, Y. W., OH, S. G., & KIM, J. (2012). **Production of renewable diesel by hydroprocessing of soybean oil: Effect of catalysts.** *Fuel*, 94, 578–585. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.10.057>

VIDAL, F. **Produção e mercado de etanol.** Banco do Nordeste. Caderno Setorial ETENE – Ano 5, nº 121, Julho/2020. Disponível em: <[https://www.bnb.gov.br/documents/80223/6888601/2020\\_CDS\\_121.pdf/9ab6ae84-a1f1-2fa5-0c0f-837553f9879f](https://www.bnb.gov.br/documents/80223/6888601/2020_CDS_121.pdf/9ab6ae84-a1f1-2fa5-0c0f-837553f9879f)>. Acesso em: 28 nov. 2021.

YOU, Y.-W.; LEE, D.; YOON, K.; MOON, D.; KIM, S. M. K.; LEE, C. **H2 PSA purifier for CO removal from hydrogen mixtures.** *International Journal of Hydrogen Energy* 37, 2012.

YOUNG, A. F., PESSOA, F. L. P., & QUEIROZ, E. M. (2015). **Comparação De Rotas Consolidadas Para a Produção De Biodiesel a Partir Dos Óleos De Soja E De Dendê Via Catálise Homogênea Alcalina.** 13093–13100. <https://doi.org/10.5151/chemeng-cobeq2014-2037-16238-175760>

ZIBO YINGHE CHEMICAL CO., LTD. **Catalisador de níquel para a indústria petroquímica.** [S. l.], 2021. Disponível em: [https://portuguese.alibaba.com/product-detail/nickel-catalyst-for-petrochemical-industry-1814078380.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal\\_offer.d\\_title.308839c1KTTazZ](https://portuguese.alibaba.com/product-detail/nickel-catalyst-for-petrochemical-industry-1814078380.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.308839c1KTTazZ). Acesso em: 31 ago. 2021.

## ANEXOS

### Anexo 1 – Dados da simulação para o caso com óleo de dendê

**Tabela A1.1:** Dados gerais dos equipamentos da simulação para o caso com óleo de dendê

Trocadores de Calor			
<b>E-100</b>		<b>E-101</b>	
Calor Trocado (KJ/h)	760300	Calor Trocado (KJ/h)	9939000
Área de Troca Térmica (m <sup>2</sup> )	39,82	Área de Troca Térmica (m <sup>2</sup> )	123,79
Coef. Global de Transf. de Calor (KJ/°C-m <sup>2</sup> -h)	35,00	Coef. Global de Transf. de Calor (KJ/°C-m <sup>2</sup> -h)	35,00
Custo (US\$)	35786,63	Custo (US\$)	51604,04
<b>Qd-T100</b>		<b>Qb-T100</b>	
Calor Trocado (KJ/h)	4725000	Calor Trocado (KJ/h)	14440000
Área de Troca Térmica (m <sup>2</sup> )	8,92	Área de Troca Térmica (m <sup>2</sup> )	132,40
Coef. Global de Transf. de Calor (KJ/°C-m <sup>2</sup> -h)	75,00	Coef. Global de Transf. de Calor (KJ/°C-m <sup>2</sup> -h)	70,00
Custo (US\$)	7952,41	Custo (US\$)	46519,50
<b>E-104</b>		<b>Qd-T101</b>	
Calor Trocado (KJ/h)	4644000	Calor Trocado (KJ/h)	754200
Área de Troca Térmica (m <sup>2</sup> )	98,26	Área de Troca Térmica (m <sup>2</sup> )	30,35
Coef. Global de Transf. de Calor (KJ/°C-m <sup>2</sup> -h)	20,00	Coef. Global de Transf. de Calor (KJ/°C-m <sup>2</sup> -h)	60,00
Custo (US\$)	43959,62	Custo (US\$)	29711,33
<b>Qb-T101</b>		<b>Qd-T102</b>	
Calor Trocado (KJ/h)	2626000	Calor Trocado (KJ/h)	972000
Área de Troca Térmica (m <sup>2</sup> )	4,97	Área de Troca Térmica (m <sup>2</sup> )	73,72
Coef. Global de Transf. de Calor (KJ/°C-m <sup>2</sup> -h)	75,00	Coef. Global de Transf. de Calor (KJ/°C-m <sup>2</sup> -h)	37,50
Custo (US\$)	7241,97	Custo (US\$)	37146,29
<b>Qb-T102</b>		<b>E-103</b>	
Calor Trocado (KJ/h)	1593000	Calor Trocado (KJ/h)	-1136000
Área de Troca Térmica (m <sup>2</sup> )	4,73	Área de Troca Térmica (m <sup>2</sup> )	114,88
Coef. Global de Transf. de Calor (KJ/°C-m <sup>2</sup> -h)	75,00	Coef. Global de Transf. de Calor (KJ/°C-m <sup>2</sup> -h)	32,50
Custo (US\$)	7185,71	Custo (US\$)	62111,36
<b>E-105</b>			
Calor Trocado (KJ/h)	70780		
Área de Troca Térmica (m <sup>2</sup> )	4,94		
Coef. Global de Transf. de Calor (KJ/°C-m <sup>2</sup> -h)	250,00		
Custo (US\$)	7234,83		

Fonte: Elaboração própria

**Tabela A1.1 (continuação):** Dados gerais dos equipamentos da simulação para o caso com óleo de dendê

<b>Bomba e Compressores</b>			
<b>P-100</b>		<b>P-101</b>	
Vazão Volumétrica (m³/h)	5,25	Vazão Volumétrica (m³/h)	4,96
Acréscimo de Pressão (kPa)	3899,00	Acréscimo de Pressão (kPa)	3839,00
Potência (HP)	11,05	Potência (HP)	10,30
Eletricidade (KJ/h)	21932,00	Eletricidade (KJ/h)	45890,00
Custo (US\$)	7740,08	Custo (US\$)	7886,50
<b>K-100</b>		<b>K-101</b>	
Vazão Volumétrica (m³/h)	4,59	Vazão Volumétrica (m³/h)	1,07
Acréscimo de Pressão (kPa)	1000,00	Acréscimo de Pressão (kPa)	4000,00
Potência (HP)	62,79	Potência (HP)	45,11
Eletricidade (KJ/h)	168566,45	Eletricidade (KJ/h)	121100,00
Custo (US\$)	57940,03	Custo (US\$)	44471,02
<b>K-102</b>			
Vazão Volumétrica (m³/h)	5,22		
Acréscimo de Pressão (kPa)	7899,00		
Potência (HP)	186,25		
Eletricidade (KJ/h)	500000,00		
Custo (US\$)	138273,14		
<b>Vasos</b>			
<b>PFR-100</b>		<b>PFR-101</b>	
Número de Vasos	1,00	Número de Vasos	1,00
Comprimento / Diâmetro dos Vasos (m)	15 / 1	Comprimento / Diâmetro dos Vasos (m)	15 / 1
Tempo de Vida do Recheio (meses)	6,00	Tempo de Vida do Recheio (meses)	6,00
Custo Total (US\$)	39109,00	Custo Total (US\$)	39109,00
<b>FLASH-101</b>		<b>V-100</b>	
Número de Vasos	1,00	Número de Vasos	1,00
Comprimento / Diâmetro dos Vasos (m)	4,17 / 0,64	Comprimento / Diâmetro dos Vasos (m)	3,35 / 1,75
Tempo de Vida do Recheio (meses)	-	Tempo de Vida do Recheio (meses)	-
Custo Total (US\$)	22864,34	Custo Total (US\$)	34117,16
<b>PSA</b>			
Número de Vasos	4,00		
Comprimento / Diâmetro dos Vasos (m)	0,87 / 0,29		
Tempo de Vida do Recheio (meses)	6,00		
Custo Total (US\$)	25261,65		

Fonte: Elaboração própria

**Tabela A1.1 (continuação):** Dados gerais dos equipamentos da simulação para o caso com óleo de dendê

Colunas			
<b>T-100</b>		<b>T-101</b>	
Vazão de alimentação (kg/h)	8908,00	Vazão de alimentação (kg/h)	3867,10
Vazão saída Topo (kg/h)	4000,00	Vazão saída Topo (kg/h)	316,10
Vazão saída Fundo (kg/h)	4908,00	Vazão saída Fundo (kg/h)	3551,00
Temperatura - Topo/Fundo (°C)	275,5 / 569,5	Temperatura - Topo/Fundo (°C)	83,86 / 274,4
Pressão - Topo/Fundo (kPa)	101,3 / 161,3	Pressão - Topo/Fundo (kPa)	101,3 / 161,3
Altura/Diâmetro (m)	3,67 / 0,79	Altura/Diâmetro (m)	2,68 / 0,22
Número de Estágios Teóricos	5,00	Número de Estágios Teóricos	5,00
Razão de Refluxo (molar)	2,00	Razão de Refluxo (molar)	2,00
Custo (US\$)	48301,68	Custo (US\$)	20804,23
<b>T-102</b>			
Vazão de alimentação (kg/h)	3551,00		
Vazão saída Topo (kg/h)	1746,00		
Vazão saída Fundo (kg/h)	1805,00		
Temperatura - Topo/Fundo (°C)	263,2 / 323		
Pressão - Topo/Fundo (kPa)	101,3 / 161,3		
Altura/Diâmetro (m)	7,56 / 0,4		
Número de Estágios Teóricos	15,00		
Razão de Refluxo (molar)	2,00		
Custo (US\$)	47482,27		

Fonte: Elaboração própria

## Anexo 2 – Dados da simulação para o caso com óleo de soja

**Tabela A2.1:** Dados gerais dos equipamentos da simulação para o caso com óleo de soja

Trocadores de Calor			
<b>E-100</b>		<b>E-101</b>	
Calor Trocado (KJ/h)	-613317	Calor Trocado (KJ/h)	8787000
Área de Troca Térmica (m <sup>2</sup> )	129,50	Área de Troca Térmica (m <sup>2</sup> )	116,61
Coef. Global de Transf. de Calor (KJ/°C-m <sup>2</sup> -h)	35,00	Coef. Global de Transf. de Calor (KJ/°C-m <sup>2</sup> -h)	35,00
Custo (US\$)	52613,45	Custo (US\$)	50327,51
<b>Qd-T100</b>		<b>Qb-T100</b>	
Calor Trocado (KJ/h)	3828000	Calor Trocado (KJ/h)	14300000
Área de Troca Térmica (m <sup>2</sup> )	6,65	Área de Troca Térmica (m <sup>2</sup> )	141,06
Coef. Global de Transf. de Calor (KJ/°C-m <sup>2</sup> -h)	75,00	Coef. Global de Transf. de Calor (KJ/°C-m <sup>2</sup> -h)	70,00
Custo (US\$)	7587,09	Custo (US\$)	47842,90
<b>E-104</b>		<b>Qd-T101</b>	
Calor Trocado (KJ/h)	2980000	Calor Trocado (KJ/h)	-311000
Área de Troca Térmica (m <sup>2</sup> )	61,23	Área de Troca Térmica (m <sup>2</sup> )	47,04
Coef. Global de Transf. de Calor (KJ/°C-m <sup>2</sup> -h)	20,00	Coef. Global de Transf. de Calor (KJ/°C-m <sup>2</sup> -h)	60,00
Custo (US\$)	37416,81	Custo (US\$)	32592,55
<b>Qb-T101</b>		<b>Qd-T102</b>	
Calor Trocado (KJ/h)	1180000	Calor Trocado (KJ/h)	550300
Área de Troca Térmica (m <sup>2</sup> )	2,44	Área de Troca Térmica (m <sup>2</sup> )	37,10
Coef. Global de Transf. de Calor (KJ/°C-m <sup>2</sup> -h)	75,00	Coef. Global de Transf. de Calor (KJ/°C-m <sup>2</sup> -h)	37,50
Custo (US\$)	6461,56	Custo (US\$)	30865,84
<b>Qb-T102</b>		<b>E-103</b>	
Calor Trocado (KJ/h)	1139000	Calor Trocado (KJ/h)	-1136000
Área de Troca Térmica (m <sup>2</sup> )	2,63	Área de Troca Térmica (m <sup>2</sup> )	157,75
Coef. Global de Transf. de Calor (KJ/°C-m <sup>2</sup> -h)	75,00	Coef. Global de Transf. de Calor (KJ/°C-m <sup>2</sup> -h)	32,50
Custo (US\$)	6540,83	Custo (US\$)	71411,27
<b>E-105</b>			
Calor Trocado (KJ/h)	12511		
Área de Troca Térmica (m <sup>2</sup> )	1,65		
Coef. Global de Transf. de Calor (KJ/°C-m <sup>2</sup> -h)	250,00		
Custo (US\$)	6073,49		

Fonte: Elaboração própria

**Tabela A2.1 (continuação):** Dados gerais dos equipamentos da simulação para o caso com óleo de soja

<b>Bomba e Compressores</b>			
<b>P-100</b>		<b>P-101</b>	
Vazão Volumétrica (m³/h)	5,38	Vazão Volumétrica (m³/h)	4,99
Acréscimo de Pressão (kPa)	3899,00	Acréscimo de Pressão (kPa)	3839,00
Potência (HP)	11,31	Potência (HP)	10,36
Eletricidade (KJ/h)	24280,00	Eletricidade (KJ/h)	42850,00
Custo (US\$)	7801,92	Custo (US\$)	7868,89
<b>K-100</b>		<b>K-101</b>	
Vazão Volumétrica (m³/h)	4,72	Vazão Volumétrica (m³/h)	0,67
Acréscimo de Pressão (kPa)	1000,00	Acréscimo de Pressão (kPa)	4000,00
Potência (HP)	64,59	Potência (HP)	27,96
Eletricidade (KJ/h)	173400,00	Eletricidade (KJ/h)	75050,00
Custo (US\$)	59265,38	Custo (US\$)	0,00
<b>K-102</b>			
Vazão Volumétrica (m³/h)	3,15		
Acréscimo de Pressão (kPa)	7899,00		
Potência (HP)	80,98		
Eletricidade (KJ/h)	217400,00		
Custo (US\$)	71018,16		
<b>Vasos</b>			
<b>PFR-100</b>		<b>PFR-101</b>	
Número de Vasos	1,00	Número de Vasos	1,00
Comprimento / Diâmetro dos Vasos (m)	15 / 1	Comprimento / Diâmetro dos Vasos (m)	15 / 1
Tempo de Vida do Recheio (meses)	6,00	Tempo de Vida do Recheio (meses)	6,00
Custo Total (US\$)	39109,00	Custo Total (US\$)	39109,00
<b>FLASH-101</b>		<b>V-100</b>	
Número de Vasos	1,00	Número de Vasos	1,00
Comprimento / Diâmetro dos Vasos (m)	4 / 1	Comprimento / Diâmetro dos Vasos (m)	3 / 1,6
Tempo de Vida do Recheio (meses)	-	cap	-
Custo Total (US\$)	19858,68	Custo Total (US\$)	31642,06
<b>PSA</b>			
Número de Vasos	4,00		
Comprimento / Diâmetro dos Vasos (m)	1 / 0,29		
Tempo de Vida do Recheio (meses)	6,00		
Custo Total (US\$)	25256,67		

Fonte: Elaboração própria

**Tabela A2.1 (continuação):** Dados gerais dos equipamentos da simulação para o caso com óleo de soja

<b>Colunas</b>			
<b>T-100</b>		<b>T-101</b>	
T-100	9338,00	Vazão de alimentação (kg/h)	2374,50
Vazão saída Topo (kg/h)	2445,00	Vazão saída Topo (kg/h)	305,50
Vazão saída Fundo (kg/h)	6893,00	Vazão saída Fundo (kg/h)	2069,00
Temperatura - Topo/Fundo (°C)	315,3 / 530,3	Temperatura - Topo/Fundo (°C)	115,9 / 239,5
Pressão - Topo/Fundo (kPa)	101,3 / 161,3	Pressão - Topo/Fundo (kPa)	101,3 / 161,3
Altura/Diâmetro (m)	3,32 / 0,59	Altura/Diâmetro (m)	2,62 / 0,2
Número de Estágios Teóricos	5,00	Número de Estágios Teóricos	5,00
Razão de Refluxo (molar)	2,00	Razão de Refluxo (molar)	2,00
Custo (US\$)	38571,79	Custo (US\$)	19099,48
<b>T-102</b>			
Vazão de alimentação (kg/h)	2069,40		
Vazão saída Topo (kg/h)	647,40		
Vazão saída Fundo (kg/h)	1422,00		
Temperatura - Topo/Fundo (°C)	224,9 / 342,8		
Pressão - Topo/Fundo (kPa)	101,3 / 161,3		
Altura/Diâmetro (m)	7,31 / 0,26		
Número de Estágios Teóricos	15,00		
Razão de Refluxo (molar)	2,00		
Custo (US\$)	36479,57		

Fonte: Elaboração própria

## Anexo 3 – Dados da simulação para o caso com óleo de pinhão-manso

**Tabela A3.1:** Dados gerais dos equipamentos da simulação para o caso com óleo de pinhão-manso

Trocadores de Calor			
<b>E-100</b>		<b>E-101</b>	
Calor Trocado (KJ/h)	-890300	Calor Trocado (KJ/h)	10130000
Área de Troca Térmica (m <sup>2</sup> )	43,99	Área de Troca Térmica (m <sup>2</sup> )	125,85
Coef. Global de Transf. de Calor (KJ/°C-m <sup>2</sup> -h)	35,00	Coef. Global de Transf. de Calor (KJ/°C-m <sup>2</sup> -h)	35,00
Custo (US\$)	36614,18	Custo (US\$)	51969,65
<b>Qd-T100</b>		<b>Qb-T100</b>	
Calor Trocado (KJ/h)	7862000	Calor Trocado (KJ/h)	18530000
Área de Troca Térmica (m <sup>2</sup> )	14,14	Área de Troca Térmica (m <sup>2</sup> )	167,31
Coef. Global de Transf. de Calor (KJ/°C-m <sup>2</sup> -h)	75,00	Coef. Global de Transf. de Calor (KJ/°C-m <sup>2</sup> -h)	70,00
Custo (US\$)	8560,83	Custo (US\$)	51782,12
<b>E-104</b>		<b>Qd-T101</b>	
Calor Trocado (KJ/h)	4802000	Calor Trocado (KJ/h)	843000
Área de Troca Térmica (m <sup>2</sup> )	100,97	Área de Troca Térmica (m <sup>2</sup> )	44,39
Coef. Global de Transf. de Calor (KJ/°C-m <sup>2</sup> -h)	20,00	Coef. Global de Transf. de Calor (KJ/°C-m <sup>2</sup> -h)	60,00
Custo (US\$)	44423,14	Custo (US\$)	32132,09
<b>Qb-T101</b>		<b>Qd-T102</b>	
Calor Trocado (KJ/h)	2741000	Calor Trocado (KJ/h)	507000
Área de Troca Térmica (m <sup>2</sup> )	5,11	Área de Troca Térmica (m <sup>2</sup> )	21,53
Coef. Global de Transf. de Calor (KJ/°C-m <sup>2</sup> -h)	75,00	Coef. Global de Transf. de Calor (KJ/°C-m <sup>2</sup> -h)	37,50
Custo (US\$)	7274,70	Custo (US\$)	28309,87
<b>Qb-T102</b>		<b>E-103</b>	
Calor Trocado (KJ/h)	1102000	Calor Trocado (KJ/h)	-1108000
Área de Troca Térmica (m <sup>2</sup> )	3,08	Área de Troca Térmica (m <sup>2</sup> )	129,88
Coef. Global de Transf. de Calor (KJ/°C-m <sup>2</sup> -h)	75,00	Coef. Global de Transf. de Calor (KJ/°C-m <sup>2</sup> -h)	32,50
Custo (US\$)	6707,64	Custo (US\$)	65415,35
<b>E-105</b>			
Calor Trocado (KJ/h)	80410		
Área de Troca Térmica (m <sup>2</sup> )	5,33		
Coef. Global de Transf. de Calor (KJ/°C-m <sup>2</sup> -h)	250,00		
Custo (US\$)	7323,64		

Fonte: Elaboração própria

**Tabela A3.1 (continuação):** Dados gerais dos equipamentos da simulação para o caso com óleo de pinhão-manso

<b>Bomba e Compressores</b>			
<b>P-100</b>		<b>P-101</b>	
Vazão Volumétrica (m³/h)	5,38	Vazão Volumétrica (m³/h)	5,14
Acréscimo de Pressão (kPa)	3899,00	Acréscimo de Pressão (kPa)	3839,00
Potência (HP)	11,32	Potência (HP)	10,65
Eletricidade (KJ/h)	22700,00	Eletricidade (KJ/h)	47710,00
Custo (US\$)	7783,89	Custo (US\$)	7951,23
<b>K-100</b>		<b>K-101</b>	
Vazão Volumétrica (m³/h)	4,71	Vazão Volumétrica (m³/h)	1,07
Acréscimo de Pressão (kPa)	1000,00	Acréscimo de Pressão (kPa)	4000,00
Potência (HP)	64,44	Potência (HP)	36,02
Eletricidade (KJ/h)	173000,00	Eletricidade (KJ/h)	96700,00
Custo (US\$)	59155,99	Custo (US\$)	0,00
<b>K-102</b>			
Vazão Volumétrica (m³/h)	5,04		
Acréscimo de Pressão (kPa)	7899,00		
Potência (HP)	178,88		
Eletricidade (KJ/h)	480200,00		
Custo (US\$)	133875,02		
<b>Vasos</b>			
<b>PFR-100</b>		<b>PFR-101</b>	
Número de Vasos	1,00	Número de Vasos	1,00
Comprimento / Diâmetro dos Vasos (m)	15 / 1	Comprimento / Diâmetro dos Vasos (m)	15 / 1
Tempo de Vida do Recheio (meses)	6,00	Tempo de Vida do Recheio (meses)	6,00
Custo Total (US\$)	39109,00	Custo Total (US\$)	39109,00
<b>FLASH-101</b>		<b>V-100</b>	
Número de Vasos	1,00	Número de Vasos	1,00
Comprimento / Diâmetro dos Vasos (m)	4 / 1	Comprimento / Diâmetro dos Vasos (m)	3 / 1,67
Tempo de Vida do Recheio (meses)	-	Tempo de Vida do Recheio (meses)	-
Custo Total (US\$)	22793,56	Custo Total (US\$)	32833,88
<b>PSA</b>			
Número de Vasos	4,00		
Comprimento / Diâmetro dos Vasos (m)	1 / 0,29		
Tempo de Vida do Recheio (meses)	6,00		
Custo Total (US\$)	25260,56		

Fonte: Elaboração própria

**Tabela A3.1 (continuação):** Dados gerais dos equipamentos da simulação para o caso com óleo de pinhão-mansô

<b>Colunas</b>			
<b>T-100</b>		<b>T-101</b>	
Vazão de alimentação (kg/h)	9270,00	Vazão de alimentação (kg/h)	3813,20
Vazão saída Topo (kg/h)	3929,00	Vazão saída Topo (kg/h)	415,20
Vazão saída Fundo (kg/h)	5341,00	Vazão saída Fundo (kg/h)	3398,00
Temperatura - Topo/Fundo (°C)	297,8 / 578,2	Temperatura - Topo/Fundo (°C)	91,26 / 280,9
Pressão - Topo/Fundo (kPa)	101,3 / 161,3	Pressão - Topo/Fundo (kPa)	101,3 / 161,3
Altura/Diâmetro (m)	3,63 / 0,77	Altura/Diâmetro (m)	2,72 / 0,25
Número de Estágios Teóricos	5,00	Número de Estágios Teóricos	5,00
Razão de Refluxo (molar)	2,00	Razão de Refluxo (molar)	2,00
Custo (US\$)	47141,71	Custo (US\$)	22042,35
<b>T-102</b>			
Vazão de alimentação (kg/h)	3397,80		
Vazão saída Topo (kg/h)	703,80		
Vazão saída Fundo (kg/h)	2694,00		
Temperatura - Topo/Fundo (°C)	243,7 / 340		
Pressão - Topo/Fundo (kPa)	101,3 / 161,3		
Altura/Diâmetro (m)	7,33 / 0,27		
Número de Estágios Teóricos	15,00		
Razão de Refluxo (molar)	2,00		
Custo (US\$)	37477,57		

Fonte: Elaboração própria

## Anexo 4 – Custos dos equipamentos

**Tabela A4.1:** Custos dos equipamentos dimensionados para os processos com diferentes óleos vegetais

<b>Equipamento</b>	<b>Custo Dendê</b>	<b>Custo Soja</b>	<b>Custo Pinhão-manso</b>
V-100	\$34.117,16	\$31.642,06	\$32.833,88
PFR-100	\$39.109,00	\$39.109,00	\$39.109,00
PFR-101	\$39.109,00	\$39.109,00	\$39.109,00
FLASH-101	\$22.864,34	\$19.858,68	\$22.793,56
ADS	\$6.382,33	\$6.382,67	\$6.378,39
PSA	\$25.261,65	\$25.256,67	\$25.260,56
P-100	\$7.740,08	\$7.801,92	\$7.783,89
P-101	\$7.886,50	\$7.868,89	\$7.951,23
K-100	\$57.940,03	\$59.265,38	\$59.155,99
K-101	\$44.471,02	\$30.327,90	\$37.145,22
K-102	\$138.273,14	\$71.018,16	\$133.875,02
E-100	\$35.786,63	\$52.613,45	\$36.614,18
E-101	\$51.604,04	\$50.327,51	\$51.969,65
E-103	\$62.111,36	\$71.411,27	\$65.415,35
E-104	\$43.959,62	\$37.416,81	\$44.423,14
Qd-T101	\$29.711,33	\$32.592,55	\$32.132,09
Qb-T101	\$7.241,97	\$6.461,56	\$7.274,70
Qd-T102	\$37.146,29	\$30.865,84	\$28.309,87
Qb-T102	\$7.185,71	\$6.540,83	\$6.707,64
E-105	\$7.234,83	\$6.073,49	\$7.323,64
Qd-T100	\$7.952,41	\$7.587,09	\$8.560,83
Qb-T100	\$46.519,50	\$47.842,90	\$51.782,12
T-100	\$48.301,68	\$38.571,79	\$47.141,71
T-101	\$20.804,23	\$19.099,48	\$22.042,35
T-102	\$47.482,27	\$36.479,57	\$37.477,57

Fonte: Elaboração própria

