



APLICAÇÃO DA ABORDAGEM MULTICRITÉRIO NA ANÁLISE DE
ALTERNATIVAS PARA O COPROCESSAMENTO DE INSUMOS RENOVÁVEIS
NO REFINO DE PETRÓLEO BRASILEIRO

Vanessa Bandeira Dias

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de pós-graduação em Planejamento Energético, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Planejamento Energético.

Orientadores: Alexandre Salem Szklo

Pedro Rua Rodriguez Rochedo

Rio de Janeiro

Junho de 2023

APLICAÇÃO DA ABORDAGEM MULTICRITÉRIO NA ANÁLISE DE
ALTERNATIVAS PARA O COPROCESSAMENTO DE INSUMOS RENOVÁVEIS
NO REFINO DE PETRÓLEO BRASILEIRO

Vanessa Bandeira Dias

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM PLANEJAMENTO ENERGÉTICO.

Orientadores: Alexandre Salem Szklo

Pedro Rua Rodriguez Rochedo

Aprovada por: Prof. Alexandre Salem Szklo

Prof. Pedro Rua Rodriguez Rochedo

Prof. José Vitor Bomtempo

Prof^a. Carla Kazue Nakao Cavaliero

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JUNHO DE 2023

Dias, Vanessa Bandeira

Aplicação da abordagem multicritério na análise de alternativas para o coprocessamento de insumos renováveis no refino de petróleo brasileiro / Vanessa Bandeira Dias. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2023.

XIV, 142 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Alexandre Salem Szklo

Pedro Rua Rodriguez Rochedo

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético, 2023.

Referências Bibliográficas: p 103-122.

1. Análise multicritério. 2. Coprocessamento de insumos renováveis. 3. Refino. I. Szklo, Alexandre Salem *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético. III. Título.

Agradecimentos

A Deus, minha principal fonte de sabedoria, conhecimento, criatividade, força, ânimo e propósito.

A meu marido Saulo e filhos Manuela e Mateus, por todo incentivo e paciência, por entenderem e apoiarem minhas ausências, tendo como alvo um objetivo comum. Desta forma, crescemos e avançamos juntos.

Aos meus pais, Paulo e Lenilda, por sempre terem renunciado a tanto, em prol da melhor educação que puderam prover, fundamentando pilares nos quais hoje se sustentam este trabalho.

Aos meus orientadores, os professores Alexandre Szklo e Pedro Rochedo, por toda disponibilidade, paciência, valiosa orientação, pela confiança em mim depositada e acima de tudo, pela competência e dedicação com que desempenham o seu trabalho.

A todos os professores do Programa de Planejamento Energético, pelo ensino de excelência, é uma honra ouvi-los.

A todos os demais funcionários do PPE, em especial Sandrinha e Paulo pelo pronto e diligente suporte, sempre que necessário.

A empresa na qual trabalho, por todo apoio que recebi no desenvolvimento deste projeto.

Aos meus colegas de trabalho, por me incentivarem e apoiarem, por compartilharem conhecimento e informação, tornando os dias mais produtivos e mais leves.

A todos que de alguma forma, mesmo que indiretamente, contribuíram ou vibraram comigo pela concretização deste projeto

Sem todo o suporte recebido, o resultado alcançado não teria sido possível. Muito obrigada!

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

APLICAÇÃO DA ABORDAGEM MULTICRITÉRIO NA ANÁLISE DE
ALTERNATIVAS PARA O COPROCESSAMENTO DE INSUMOS RENOVÁVEIS
NO REFINO DE PETRÓLEO BRASILEIRO

Vanessa Bandeira Dias

Junho/2023

Orientadores: Alexandre Salem Szklo

Pedro Rua Rodriguez Rochedo

Programa: Planejamento Energético

Apesar do avanço das tecnologias de baixo carbono nas últimas décadas, cenários de previsão mostram o petróleo como relevante fonte de energia primária no médio prazo. Adicionalmente, a dificuldade de substituírem-se alguns combustíveis em escala econômica pode prolongar a demanda por petróleo. Diante deste panorama, alternativas de processamento de insumos renováveis se apresentam como uma forma de lidar com a permanência de ativos do refino frente à tendência de manutenção do petróleo nos curto e médio prazos. Com método baseado em análise multicritério, este trabalho sugere critérios relevantes para indicação de rotas/refinarias mais apropriadas ao coprocessamento no país. Como resultado, óleo vegetal residual aparece como a opção (de vetor energético) mais indicada em todas as regiões de refino, para todas as rotas avaliadas. Contudo, demanda desenvolvimento de infraestrutura de coleta e distribuição. O bio-óleo ocupa a segunda posição, seguido por óleo de soja, sendo a alternativa cuja oleaginosa apresenta a maior oferta e em consequência, sendo o vetor energético com maior escala de processamento, porém a um custo relativo alto. Dentre os 13 indicadores considerados, o que recebeu maior peso foi a oferta de matéria prima, seguido por vulnerabilidade hídrica, mitigação de emissões e oferta do vetor energético. Foram feitas sensibilidades variando-se o peso dos indicadores (a partir da perspectiva de cada um dos quatro diferentes grupos consultados), o que alterou a posição da soja entre segundo e último colocado no ranking de vetor energético. O trabalho sugere ainda estudos futuros para aprofundar questões não consideradas no escopo desta dissertação, como o avanço de novas cadeias de suprimento. O principal desafio enfrentado no coprocessamento de correntes renováveis em larga escala não é tecnológico, mas de disponibilidade e custo.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

MULTI-CRITERIA ANALYSIS OF ALTERNATIVES FOR CO-PROCESSING
RENEWABLE FEEDSTOCK IN BRAZILIAN OIL REFINING

Vanessa Bandeira Dias

June/2023

Advisors: Alexandre Salem Szklo

Pedro Rua Rodriguez Rochedo

Department: Energy Planning

Despite the progress of low carbon technologies in recent decades, forecast scenarios show oil as a relevant source of primary energy in the short//medium term. Additionally, some factors may prolong the oil demand, such as, the difficulty of substituting some fuels on an economic scale, such as aviation kerosene and maritime bunker. Considering this scenario, processing renewable alternatives is presented as a way of dealing with the permanence of refining assets through oil maintenance tendency in short/medium term. Based on multicriteria analysis method, this work suggests relevant criteria (indicators) for indicating the most appropriate routes/refineries for co-processing in Brazil. As a result, residual vegetable oil was presented as the most indicated option (of energy vector) in all refining regions, for all evaluated routes. However, it demands collection and distribution infrastructure development. Bio-oil stands in second position, followed by soybean oil, the option with the greatest oilseed supply and, consequently, the largest energy vector processing scale (but at a relatively high cost). Among the 13 indicators considered in this work, the most weighted was the supply of raw materials, followed by water vulnerability, emissions mitigation and energy vector supply. Sensitivities analyses were made changing the weight of the indicators (from the perspective of each of the four different groups consulted), which changed the position of soybeans between second and last place in the ranking of energy vector. The work also suggests future studies to deepen issues not considered in the scope of this thesis, such as the development of new supply chains. The main challenge for the co-processing of renewable streams on a large-scale basis is not technological, it relies on availability and cost issues.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Ilustração Unidades de processos de uma refinaria de petróleo	7
Figura 2 - Capacidade de produção de HVO na União Europeia.....	12
Figura 3 - Mapa de matérias primas, vetores energéticos, unidades e rotas.....	21
Figura 4 - Estrutura hierárquica simples para resolução de problemas AHP	28
Figura 5 - Fluxo das Etapas	29
Figura 6 - Fluxo de Alternativas para coprocessamento	30
Figura 7 - Matriz de comparações pareadas	32
Figura 8 - Principais oleaginosas produzidas no Brasil, por região	39
Figura 9 - Período de colheita da soja	41
Figura 10 - Capacidade (e % de cap) de processamento de óleo vegetal bruto por estado...55	
Figura 11 – Mapa ISH (índice de Segurança Hídrica) 2017	77
Figura 12 - Pesos atribuídos aos indicadores	90
Figura 13 - Mapa de desempenho das alternativas.....	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Unidades produtoras de Bio-óleo	16
Tabela 2 - Capacidades das unidades de processo em dezembro de 2017	23
Tabela 3 - Limites de processamento	24
Tabela 4 - Escala de pesos Saaty	31
Tabela 5 - Escala de importância aplicada às comparações pareadas	32
Tabela 6 - Índice de Aleatoriedade	33
Tabela 7 - Descrição de macro critérios e indicadores	37
Tabela 8 - Oferta líquida de biomassa lignocelulósica no Brasil ao ano	47
Tabela 9 - Escala de notas par ao indicador Oferta de matéria prima	48
Tabela 10 - Pontuação para o indicador “Oferta de matéria prima”	48
Tabela 11-Escala de notas e pontuação para o indicador Sazonalidade	50
Tabela 12 - Notas do indicador "Competição com o setor Agropecuário"	51
Tabela 13 - Cálculo da oferta de óleo vegetal	52
Tabela 14 - Escala de pontuação e notas do critério “Oferta do vetor energético”	53
Tabela 15 - Capacidade de processamento de óleo vegetal por unidade	56
Tabela 16 - Escala de notas do indicador "Escala de processamento nas unidades existentes"	56
Tabela 17 - Notas do Indicador "Custo do Vetor energético"	58
Tabela 18 - Escala de pontuação e notas para o Indicador Estabilidade	60
Tabela 19 - Alternativas diferenciadas em Critérios Técnicos da rota	61
Tabela 20 - Escala de pontuação dos níveis de prontidão Tecnológica – TRL	62
Tabela 21 - Notas do indicador "Maturidade tecnológica da rota "	64
Tabela 22 - Notas do indicador "Qualidade do vetor energético"	67
Tabela 23 - Escala de pontuação do indicador “Conformidade Regulatória”	67
Tabela 24 - Notas do Indicador "Conformidade Regulatória"	72
Tabela 25 - Níveis de análise dos indicadores socioambientais	72
Tabela 26 - Pegada hídrica do óleo de soja, óleo de palma e petróleo	75
Tabela 27 - Notas do indicador "Vulnerabilidade Hídrica"	78
Tabela 28- Notas do indicador "Potencial para mitigação de emissões"	81
Tabela 29 - Escala de pontuação para o indicador “Geração de emprego”	83
Tabela 30 - Números de empregos formais gerados no cultivo de soja	84

Tabela 31 - Notas do indicador "Geração de emprego"	87
Tabela 32 - Vetor de prioridade (pesos) dos macro-critérios	88
Tabela 33 - Vetor de prioridade (pesos) dos indicadores	89
Tabela 34 - Consistência nos julgamentos	90
Tabela 35 - Ranking das alternativas por nível de decisão	91
Tabela 36 - Premissas de sensibilidade: Mudanças temporais	98
Tabela 37 - Premissas de sensibilidade: Potencial para mitigação de emissões	98

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACV	Análise de Ciclo de Vida
AHP	Analytic Hierarchy Process
ALK	Alquilação
AMD	Apoio Multicritério a Decisão
ANA	Agência Nacional de Águas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAR	Cadastro Ambiental Rural
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
COK	Coqueamento retardado
CORSIA	Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation
CR	Catalytic Reforming
DAC	Direct air capture
DEA	Dietanoamina
DSP	Desasfaltação a propano
DSSG	Decision Support Systems Glossary
EIA	Energy Information Administration
ELECTRE	Elimination and Choice Expressing Reality
FAME	Fatty acid methyl esters
FAO	Food and Agriculture Organization
FCC	Fluid catalytic cracking
FFA	Free fat acid
GEE	Gases de efeito estufa
GLP	Gás liquefeito de petróleo
GWP	Global Warming Potential
HDA	Hidrodessaromatização
HD CD	Hydrotreated depolymerized cellulosic diesel
HD CJ	Hydrotreated depolymerized cellulosic jet
HDM	Hidrodessmetalização
HDN	Hidrodessnitrogenação
HDO	Hidrodessoxigenação
HDPO	Hydrotreated pyrolysis oil

HDS	Hidrodesulfurização
HDSG	Hidrodesulfurização de gasolina
HDT	Hidrotratamento
HDTD	Hidrotratamento de diesel
HDTI	Hidrotratamento de produtos instáveis
HDTK,	Hidrotratamento de querosene
HDTN	Hidrotratamento de nafta
HEFA	Hydrotreated esters and fatty acids
HRJ	Hydrotreated renewable jet
HVO	Hydrotreated vegetable oil
ILPF	Integração lavoura, pecuária e floresta
IMO	International Maritime Organization
IA	Índice de Aleatoriedade
IC	Índice de Consistência
ICAO	International Civil Aviation Organization
IR	Índice randômico
IRENA	International Renewable Energy Agency
LCO	Light cycle oil
LCFS	Low Carbon Fuel Standard
Lubnor	Refinaria Lubrificantes e Derivados do Nordeste
LUC	Land use change
MCDM	Multiple-Criteria Decision Method
NCI	Nelson Complex Index
ODES	Óleo desasfaltado
OVR	Óleo vegetal residual
O&G	Oil and Gás
PNPB	Programa Nacional de Produção e uso de Biodiesel
PNSH	Plano Nacional de Segurança Hídrica
PtG	Power to Gás
QAV	Querosene de aviação
RASF	Resíduo asfáltico
RC	Razão de Consistência
Recap	Refinaria de Capuava
Reduc	Refinaria Duque de Caxias

RDB	Refined, bleached and deodorized
Refap	Refinaria Alberto Pasqualini
Regap	Refinaria Gabriel Passos
Reman	Refinaria Isaac Sabbá
Repar	Refinaria Presidente Getúlio Vargas
Replan	Refinaria de Paulínia
Revap	Refinaria Henrique Lage
RFCC	Resid fluid catalytic cracking
RFS2	Renewable Fuel Standard
RLAM	antiga Refinaria Landulfo Alves, atual Refinaria de Mataripe
RNEST	Refinaria Abreu Lima
RPBC	Refinaria Presidente Bernardes
RPCC	Refinaria Potiguar Clara Camarão
RV	Resíduo de vácuo
SAF	Sustainable aviation fuel
SCS	Selo Combustível Social
SIX	Unidade de industrialização de xisto
SPD	Sistema de Plantio Direto
SRGO	Straight-run gas oil
UCR	Unidade de coqueamento retardado
UGH	Unidade de geração de hidrogênio
URE	Unidade de recuperação de enxofre
VDU	Vacuum distillation unit
VGO	Vacuum gas oil
WF	Water Footprint
ZSM-5	Zeolite socony mobil-5

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Contextualização.....	1
1.2. Objetivo e estrutura do trabalho.....	3
2. REFINO DE PETRÓLEO E COPROCESSAMENTO DE CORRENTES RENOVÁVEIS.....	7
2.1. Estado da arte do coprocessamento	10
2.1.1. Correntes renováveis destinadas ao coprocessamento	11
2.2. Mapa de rotas e unidades possivelmente utilizadas.....	20
2.2.1. Refinarias e unidades de processo existentes no país	22
3. ANÁLISE MULTICRITÉRIO.....	25
3.1. Procedimento metodológico	26
3.1.1. Escolha do método	26
3.1.2. Fluxo de etapas.....	29
3.2. Definição de macro critérios e indicadores considerados.....	34
4. RESULTADOS DE INDICADORES	38
4.1. Disponibilidade de matéria prima e vetor energético	38
4.1.1. Oleaginosas	38
4.1.2. Gorduras e óleos residuais.....	44
4.1.3. Biomassa lignocelulósica	45
4.1.4. Pontuação nos Indicadores do macro critério Disponibilidade.....	48
4.2. Logística de cada vetor energético.....	53
4.2.1. Indicadores do macro critério Logística do vetor energético.....	53
4.3. Critérios técnicos de cada rota	60
4.3.1. Maturidade tecnológica da rota	61
4.3.2. Qualidade do vetor energético.....	64
4.3.3. Conformidade regulatória	67
4.4. Análise socioambiental	72
4.4.1. Vulnerabilidade hídrica	73
4.4.2. Potencial para mitigação de emissões	78
4.4.3. Geração de emprego.....	83
4.5. Atribuição das notas.....	87
5. APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP	88
5.1 Cálculo dos pesos relativos.....	88
5.2 Consolidação das notas e discussões	91

5.3. Análise de sensibilidade e considerações	96
5.3.1. Sensibilidade relacionada a diferentes perspectivas.....	96
5.3.2. Sensibilidade relacionada a mudanças temporais	97
5.3.3. Sensibilidade relacionada ao potencial para mitigação de emissões.....	98
6. CONCLUSÃO.....	99
7. REFERÊNCIAS	103
Anexo I – Questionário para atribuição de pesos	123
Anexo II – Cálculo da concentração de refinadores de óleo vegetal em cada estado ..	131
Anexo III – Aplicação do método AHP -Tabelas de Pesos Agregados	132
Anexo IV – Aplicação do método AHP -Tabela de Resultados.....	133

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

As mudanças climáticas e seus efeitos sociais/econômicos reforçam a relevância de estudo sobre o uso de energias renováveis (ADAMI; BACCHI, 2016). Contudo, apesar do avanço das tecnologias de baixo carbono das últimas décadas, é possível verificar que cenários de previsão de curto e médio prazo mostram o petróleo como relevante fonte de energia primária, evidenciando dependência do petróleo mesmo com o avanço das fontes renováveis de energia. Essa previsão pode ser constatada no *International Energy Outlook* de 2019, publicado pela EIA - Energy Information Administration- agência de contribuição técnica do departamento de energia Norte Americano (EIA, 2020). Comparando-se 2010 e 2050, as projeções do estudo mostram que o petróleo perde participação no consumo de energia primária, mas em valores absolutos continua crescendo, representando um aumento na ordem de 36%, no período.

A IEA (International Energy Agency), agência de energia da OCDE responsável pela publicação do *World Energy Outlook*, desenvolveu análise evidenciando que, mesmo em cenário de desenvolvimento sustentável, a demanda por petróleo se mostra relevante ao menos até 2040, correspondendo a gasto global na ordem 2,6 trilhões de US\$, apesar de apresentar declínio (IEA, 2020). O estudo considera ainda perspectivas de que, em cenário de manutenção das políticas correntes, o petróleo mantém tendência de demanda crescente, o que se traduz em gastos globais em torno de 4,8 trilhões de US\$ em 2040.

A pandemia da Covid 19 se apresentou como uma grave crise de saúde pública global, refletindo-se ainda em um grande choque pontual de demanda (LE QUÉRÉ et al., 2020). Apesar de a pandemia ter levado a um recorde de queda nas emissões de combustíveis fósseis em 2020 (MCSWEENEY; TANDON, 2021), alguns estudos consideram projeções que mostram desaceleração nos investimentos de baixo carbono, perpetuando tecnologias carbono intensivas. Este fato leva a um cenário de emissões significativamente maiores do que as estimadas pré-covid, para 2030, mesmo diante da desaceleração econômica (LE QUÉRÉ et al., 2020).

A eficiência energética, o uso de renováveis e eletrificação *carbon-free* serão os principais pilares da nova transição energética (IRENA, 2020). Enquanto transições energéticas anteriores foram sustentadas por mudanças tecnológicas e econômicas, com acesso a recursos e fontes de maior densidade energética para os consumidores (CHERIF;

HASANOV; PANDE, 2017), a nova transição possui natureza multidisciplinar, dependendo de aspectos diversos como desenvolvimento tecnológico, segurança energética, regulação e impactos ambientais associados ao uso de energia (ARAÚJO, 2014).

A intensidade de carbono futura da economia está fortemente relacionada ao caminho percorrido para a transição, o que significa que alguns investimentos de baixo carbono realizados hoje podem evitar *carbon lock-in* futuros (CLIMATE ACTION TRACKER, 2020). O termo *carbon lock-in* refere-se a característica que alguns sistemas carbono intensivo possuem de se perpetuar ao longo do tempo, inibindo a penetração ou crescimento de alternativas limpas (UNRUH, 2002). Por outro lado, considerar opções que aumentem flexibilidade no refino de matérias primas alternativas, acompanhado a um crescente corte de emissões, naturalmente limita custos associados a *stranded assets*, ou ativos afundados¹ (ERICKSON et al., 2015). Oliveira (2021) aponta que:

“O setor de óleo e gás possui um grande risco associado aos stranded assets, principalmente, aqueles países em desenvolvimento que são altamente dependentes das rendas petrolíferas”.(OLIVEIRA, 2021)

Desta forma, deduz-se que a possibilidade de processamento de correntes renováveis minimiza o risco de ativos afundados por *carbon lock-in*. Neste contexto, investimentos podem ser feitos a partir de adaptações em processos existentes, viabilizando o coprocessamento em unidades convencionais de refino de petróleo (YÁÑEZ et al., 2021). Tais investimentos, caracterizados por rápida implementação e baixo custo, recebem o nome de *retrofitting* (RUTZ et al., 2020).

Denomina-se como coprocessamento o refino simultâneo de correntes fósseis e renováveis em unidades de processo convencionais, usualmente encontradas no parque de refino de petróleo mundial, tais como craqueamento catalítico (FCC) e hidrotreatamento (HDT) (ECOFYS, 2018). No panorama descrito, o coprocessamento chama atenção devido ao potencial de prover combustíveis renováveis a preços competitivos, utilizando infraestrutura de refino e estoque já existentes (ECOFYS, 2018). Tais combustíveis

¹ No contexto apresentado, referem-se a ativos sujeitos a desvalorização ou restrições não previstas, em função de mudanças associadas ao processo de transição energética em curso, o qual impõe novas condições de mercado decorrentes de políticas públicas mais restritivas, redução de custos de tecnologias limpas, entre outros (CALDECOTT; TILBURY; CAREY, 2014)

apresentam ainda a característica de serem *drop-in*², atingindo maior conteúdo energético e qualidade superior (KARATZOS; MCMILLAN; SADDLER, 2014), se comparados a combustíveis renováveis de primeira geração, produzidos via transesterificação de óleos vegetais também destinados à produção de alimentos (BEZERGIANNI et al., 2018). Estes combustíveis podem ser definidos ainda como biocombustíveis avançados (IRENA, 2016), recebendo esta nomenclatura por poder ser produzidos a partir de matéria prima não utilizada pela indústria de alimentos. De fato, o parâmetro mais importante para qualificar um combustível como segunda geração é ser produzido a partir de correntes que não podem ser usadas na indústria de alimentos (DE PAZ CARMONA et al., 2018). Combustíveis que utilizam matéria prima de uso alimentar são conhecidos como biocombustíveis convencionais (IRENA, 2016). Os denominados de terceira geração têm algas como matéria prima para sua produção (SCOTT et al., 2010; MAITY et al., 2014; CARMONA et al., 2018)

Neste cenário que se apresenta, de necessidades climáticas junto a expectativa de predomínio dos combustíveis fósseis, a indústria de óleo e gás mundial é desafiada a atender a demanda por derivados fósseis (provendo as bases para segurança energética), ao mesmo tempo em que se adapta e contribui no processo de transição energética. Assim, o coprocessamento se apresenta como uma forma de prover suporte à transição energética enquanto existe ainda uma significativa demanda por combustíveis fósseis que precisa ser atendida (IPIECA, 2022).

1.2. Objetivo e estrutura do trabalho

Conforme o texto anterior, é possível concluir que alternativas de processamento de correntes renováveis se apresentam como uma forma de lidar com a permanência de ativos do refino de petróleo frente à tendência de redução gradual do consumo do petróleo no médio prazo (até 2040). Este fato justifica a relevância de estudos que considerem possibilidades de coprocessamento no refino de petróleo do Brasil.

² Trata-se de um combustível renovável que está em conformidade com as especificações existentes de combustíveis derivados de petróleo, ou seja, com propriedades semelhantes aos combustíveis convencionais, como gasolina, diesel, querosene de aviação etc. Essa característica permite que o *drop-in* substitua diretamente o combustível fóssil sem a necessidade de modificações no motor. (Kargbo et al, 2021).

O coprocessamento pode ser exercido por diferentes rotas (YÁÑEZ et al., 2021). A rota é definida pelo conjunto: matéria prima utilizada, processo de obtenção do vetor energético, vetor energético processado, unidade de processo utilizada e derivado produzido. Diversas cargas renováveis podem ser processadas em unidades de refino de petróleo pré-existentes, como óleos vegetais, óleo residual, gordura animal, bio-óleo (BEZERGIANNI et al., 2018). Neste trabalho definimos tais cargas renováveis como vetores energéticos, termo que usaremos a partir deste ponto. Por matéria prima, definimos o produto original usado para fabricação do vetor energético. Adicionalmente, a partir da tecnologia *Power to Gás* (PtG) é possível produzir hidrogênio verde através da eletrólise³, gerando uma corrente de base renovável que pode ser utilizada nos processos de hidrotreatamento (SILVA, 2017; NASCIMENTO DA SILVA et al, 2022). Existem ainda outras rotas para produção de hidrogênio de baixo carbono, como a produção a partir de pirólise do metano, produzindo “hidrogênio turquesa”, ou de reforma catalítica de biomassa, produzindo “hidrogênio musgo” (MENDES; NASCIMENTO, 2022). A fonte do hidrogênio (consumido no processo de refino) tem impacto significativo na intensidade de carbono dos combustíveis produzidos (VAN DYK, 2019b). Em resolução do CNPE⁴ destaca-se o interesse no desenvolvimento do mercado de hidrogênio no Brasil, dado seu potencial em contribuir para uma matriz energética de baixo carbono.

A escolha de rotas mais adequadas a cada esquema de refino/ou a refinaria como um todo requer uso de informações bastante heterogêneas no processo de tomada de decisão (YÁÑEZ et al., 2021). A heterogeneidade pode ser verificada nas diferentes opções de cargas disponíveis, nos diversos níveis de desenvolvimento da cadeia logística de cada alternativa, na maturidade tecnológica e escala das rotas, entre outros. Tal fato demanda uma estrutura que permita organizar, atribuir relevância e ordenar as diversas variáveis envolvidas no julgamento, sejam estas premissas facilmente quantificáveis, como são as premissas técnicas, ou subjetivas e qualitativas, como o uso de correntes alternativas (o qual afeta a disponibilidade para uso no coprocessamento). A abordagem de análise multicritério oferece uma forma estruturada de decisão (SAATY, 1990), atendendo à natureza deste trabalho, na medida em que: i) permite avaliar quais são os

³ Esta dissertação concede destaque às matérias primas de origem biogênica. No entanto, existe a possibilidade de estudar o uso de hidrogênio derivado de eletrólise da água e mesmo de reações químicas envolvendo CO₂ proveniente da atmosfera, removido via *direct air capture* – DAC (NASCIMENTO DA SILVA et al, 2022)

⁴ RESOLUÇÃO Nº 6, DE 20 DE ABRIL DE 2021

aspectos mais importantes para alcançar determinado objetivo, ranqueando-os em diferentes graus de valor (ISHIZAKA; NEMERY, 2013); ii) auxilia na classificação, ordenação e seleção de alternativas (MORONI; CHIWIACOWSKY, 2019).

“A análise multicritério permite quantificar os princípios do raciocínio focado no valor, auxiliando nos processos decisórios complexos que envolvam múltiplos aspectos e que produzam impactos simultâneos em diversos objetivos. Ela permite uma base formal para o desenvolvimento de modelos focados no valor para avaliar, priorizar e selecionar alternativas. Para a construção de um modelo focado no valor, primeiramente os objetivos devem ser identificados. Em seguida, os critérios e métricas de desempenho devem ser definidos para quantificar o grau no qual os objetivos são atendidos. Por fim, algum processo de ponderação ou de otimização deve ser empregado para negociar os objetivos e conduzir à determinação das melhores alternativas para a tomada de decisão”.(MUSSOI, 2013)

Em resumo, a abordagem multicritério, em apoio à tomada de decisão, permite estruturar problemas complexos de uma forma transparente e flexível, com a introdução de variáveis quantitativas e qualitativas no processo de avaliação (FIGUEIRA; GRECO; EHRGOTT, 2005), atendendo aos requisitos do trabalho proposto nesta dissertação.

Desta forma, foi desenvolvido este estudo com o objetivo de identificar refinarias/rotas mais apropriadas ao coprocessamento no Brasil, através de método baseado em abordagem multicritério. Existe uma lacuna na literatura científica neste sentido, na medida em que os estudos realizados não contemplam o escopo aqui considerado e tampouco fazem uso de avaliação multicritério, o que evidencia o caráter de originalidade e ineditismo desta dissertação de mestrado. Usualmente, os estudos existentes focam mais nos aspectos tecnológicos do processo de conversão, como é o caso de BEZERGIANNI et al., 2018; VAN DYK et al., 2019a; ZHANG; ALVAREZ-MAJMUTOV, 2021; GRIFFITHS et al., 2022;).

A fim de atender aos objetivos estabelecidos, o trabalho foi organizado em 6 capítulos. Este primeiro capítulo contemplou contextualização do trabalho, estrutura e objetivo. O segundo capítulo inicialmente descreve o estado da arte do coprocessamento e possíveis correntes destinadas a unidades de processo convencionais. Em seguida, identifica refinarias e unidades existentes, gerando um mapa de matérias primas, vetores

energéticos, unidades e rotas de coprocessamento. Sequencialmente, o terceiro capítulo abrange a análise multicritério, descrevendo o procedimento metodológico e o fluxo de etapas que o compõem, trazendo a definição de macro critérios e indicadores considerados na abordagem multicritério. O capítulo quatro traz os resultados de cada indicador, justificando a pontuação atribuída. No quinto capítulo é aplicado o método de análise multicritério selecionado, AHP, com avaliação dos resultados e análise de sensibilidade. Por fim, o sexto capítulo apresenta as considerações finais, limitações deste trabalho e propostas de estudos futuros.

2. REFINO DE PETRÓLEO E COPROCESSAMENTO DE CORRENTES RENOVÁVEIS

O refino de petróleo é uma atividade capital intensiva, que corresponde a uma série de beneficiamentos, com etapas físicas e químicas de separação e conversão, cujo objetivo é a produção de derivados finais (BRASIL; SANTOS; SOUZA, 2014). A Figura 1 ilustra processos básicos de uma refinaria.

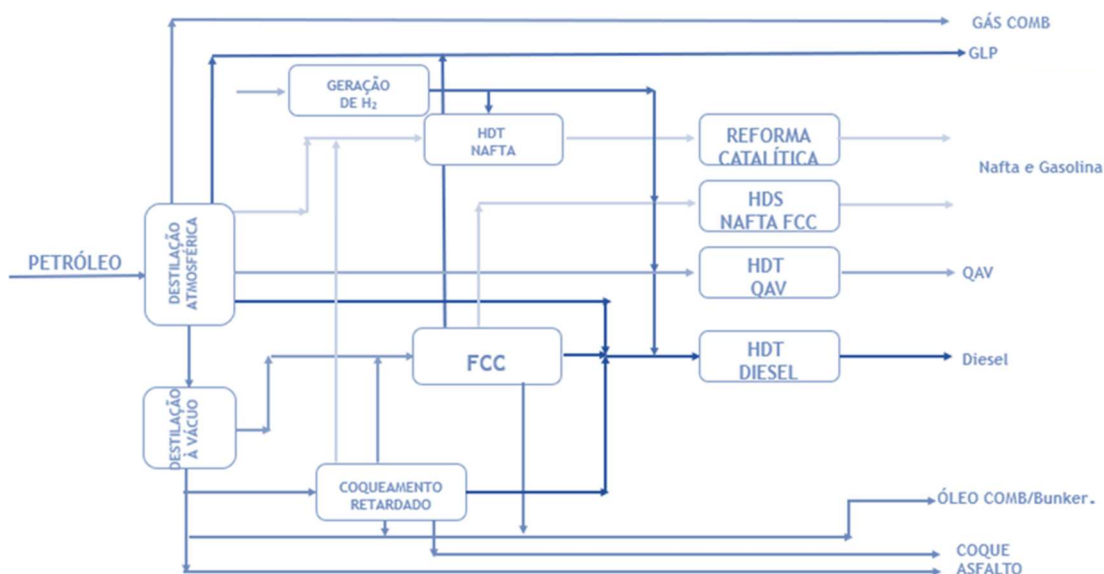


Figura 1- Ilustração Unidades de processos de uma refinaria de petróleo

Fonte: Elaboração própria baseada em (BRASIL; SANTOS; SOUZA, 2014)

A atividade de refino está organizada em um sistema de múltiplas operações, cuja tipologia depende dos produtos desejados, suas qualidades e a propriedade do óleo processado (BRASIL; SANTOS; SOUZA, 2014). O encadeamento de diferentes unidades de processo, combinado a distintas cargas nominais possíveis, dá origem a variados esquemas de refino. Na prática, cada esquema é único, sendo desenhado em função das cargas de petróleo disponíveis e do mercado de derivados a ser atendido. Podemos dizer ainda que o refino é dinâmico, com as cargas processadas variando (no nível e na tipologia) em função do preço do petróleo e derivados e ainda em função da demanda de mercado, dependendo da flexibilidade que o esquema de refino proporciona.

Quanto mais complexo é o esquema, mais flexível é o processamento (KAISER, 2017). Refinarias com esquemas mais complexos estão preparadas para o processamento de cargas mais pesadas. O Índice de Complexidade de Nelson (NCI) é um parâmetro que permite comparar a capacidade de conversão secundária e a capacidade de destilação

primária em uma refinaria de petróleo, fornecendo uma métrica para quantificar a complexidade do esquema de refino (KAISER, 2017). Refinarias mais complexas tendem a gerar mais emissões atmosféricas (VAN STRAELEN et al., 2009), no entanto, conferem maior resiliência à cadeia de óleo e gás, principalmente em cenários de preços mais baixos de petróleo, na medida em que conseguem produzir derivados de maior valor a partir do processamento de correntes menos nobres (DUQUE, 2017).

Por sua vez, alternativas de produção de combustíveis renováveis têm sido avaliadas diante da necessidade de redução nas emissões de gases de efeito estufa (GEE), como o CO₂. O uso de óleos vegetais na produção de combustíveis se apresenta como alternativa, mas algumas questões chamam atenção. São correntes que *in natura* possuem alta viscosidade, cerca de 10 vezes superior à do diesel de origem fóssil. Essa característica está associada principalmente ao tamanho das moléculas de triglicerídeos, de alta massa molecular (KNOTHE, 2005). Ademais, a primeira geração de biocombustíveis suscitou discussões sobre implicações econômicas, ambientais e sociais relacionadas a limitações quanto à qualidade, mas também à competição com alimentos (BEZERGIANNI et al., 2018).

Diante desses desafios, rotas tecnológicas alternativas têm sido estudadas, como o uso de unidades de refino tradicional para o processamento de correntes renováveis. Neste cenário é possível aproveitar parte da complexidade do refino no processo de transição energética. De fato, algumas refinarias podem investir no processamento de correntes renováveis, considerando diversos níveis de ajuste operacional possíveis (RUTZ et al., 2020) principalmente em unidades de FCC e HDT, detalhadas a seguir.

A unidade de craqueamento catalítico fluido (FCC) recebe destaque pela grande flexibilidade operacional (BRASIL; SANTOS; SOUZA, 2014), o que a torna um forte candidato ao processamento de correntes renováveis. É também uma unidade presente em muitas refinarias, apresentando alta margem de refino potencial com o processamento de correntes renováveis (SAYDAH, 2015). De acordo com a literatura, importantes fatores afetam o processo de craqueamento catalítico, tornando-o complexo: i) tipo de reator utilizado; ii) síntese catalítica; iii) condições de reação, como temperatura, tempo de residência etc (KURNIA et al., 2016). Tradicionalmente pode converter gás-óleo pesado em produtos intermediários que vão gerar vários derivados, dentre os quais se destacam gasolina, diesel e derivados escuros como bunker e óleo combustível e ainda correntes mais leves como GLP e propeno. Muitas correntes intermediárias produzidas

pelo FCC têm como destino unidades de hidrotreatamento antes de compor o *blending*⁵ de produto acabado, como é o caso do óleo leve de reciclo (LCO), que pode ter como destino o hidrotreatamento antes de compor o *pool* de diesel. O FCC também produz coque, que é depositado na superfície do catalisador e queimado no regenerador da unidade, provendo calor ao processo de craqueamento catalítico (BRASIL; SANTOS; SOUZA, 2014). Desta forma, o catalisador é continuamente regenerado a partir da queima do coque (NAJI et al, 2021). Existem unidades de craqueamento catalítico capazes de processar correntes residuais mais pesadas como o RV, sendo denominadas RFCC (BRASIL; SANTOS; SOUZA, 2014).

O processo de hidrotreatamento (HDT) é amplamente estudado por ser essencial em qualquer esquema de refino, enquadrando propriedades químicas fundamentais de produtos como diesel, gasolina e querosene de aviação. É um processo usado tanto para remover heteroátomos (enxofre, nitrogênio e oxigênio), como também para saturação de anéis aromáticos (VAN DYK, 2019a).

O consumo de hidrogênio e as condições operacionais de temperatura e pressão empregadas no processo de hidrotreatamento dependem do tipo de compostos presentes e da concentração de heteroátomos na carga da unidade (FURIMSKY, 2000). A reação destes compostos com o hidrogênio ocorre na presença de catalisador, sendo os mais comuns NiMo/Al₂O₃ e CoMo/Al₂O₃ (SENOL et al., 2007).

Neste trabalho, convencionamos chamar de HDT às unidades de hidrotreatamento de forma geral, mas na prática, podem receber nomenclatura equivalente ao produto processado: HDSG, hidrodessulfurização de gasolina; HDTN, hidrotreatamento de nafta; HDTK, hidrotreatamento de querosene; HDTD, hidrotreatamento de diesel; HDTI, hidrotreatamento de produtos instáveis. São várias as reações que podem ocorrer no HDT: hidrodessulfurização (HDS), hidrodessoxigenação (HDO), hidrodessnitrogenação (HDN), hidrodessaromatização (HDA), hidrodessmetalização (HDM).

A operação de unidades de hidrotreatamento e hidrocraqueamento pode se situar em diferentes faixas de temperatura e pressão, as quais apontam se o processo é brando ou mais severo e o conseqüente grau de conversão. O hidrocraqueamento é um processo

⁵ A grande parte dos produtos acabados das refinarias é obtida a partir da mistura (*blending*) de correntes intermediárias originadas de diferentes unidades de processo, de maneira a conseguir-se um produto final com a especificação (qualidade) requerida pelo mercado ao qual se destina (BUENO, 2003)

mais severo e de alto grau de conversão, onde frações pesadas, como gasóleos, são convertidas em frações mais leves como diesel, querosene e nafta, em presença de alta pressão de hidrogênio. Desta forma, catalisadores utilizados neste processo possuem a finalidade de evitar craqueamento térmico da carga, apresentando as seguintes funções (MARAFI; STANISLAUS; FURIMSKY, 2010): 1) favorecer reações de craqueamento e isomerização da cadeia carbônica por meio dos sítios ácidos; 2) promover hidrogenação de estruturas insaturadas precursoras de coque nos sítios metálicos. A escolha do sistema catalítico mais adequado e condições operacionais específicas depende do produto que se deseja maximizar.

Catalisador é uma substância que aumenta a velocidade da reação sem ser consumido no processo. As principais propriedades do catalisador (RUSSEL, 1994) são 1) seletividade, a qual direciona a reação para um bom rendimento do produto desejado; 2) atividade, elevando a velocidade da reação; 3) estabilidade. Esta última se perde em função de motivos diversos. Se uma substância qualquer se combinar com o catalisador a ponto de bloquear seu contato com o substrato, tal substância é considerada um inibidor ou veneno de catalisador, levando à diminuição da estabilidade. A deposição de coque na superfície do catalisador também leva à perda de estabilidade. No FCC, o catalisador é regenerado com a queima do coque no regenerador, retornando ao processo. Nas unidades de hidrotratamento, o catalisador também se desativa pela formação de coque, contudo de forma muito mais lenta devido à hidrogenação de precursores de coque, sendo regenerados fora da unidade (VAN DYK, 2019a).

2.1. Estado da arte do coprocessamento

O coprocessamento de correntes renováveis em unidades de refino convencionais é amplamente abordado na literatura existente, sendo identificados estudos relacionados a diferentes unidades de processo (VAN DYK, 2019a) . Entre essas, destacam-se as unidades de hidrotratamento (HDT) e craqueamento catalítico fluido (FCC). Alguns estudos e patentes também são direcionados a unidades de coqueamento retardado (UCR) e desasfaltação. Diversas unidades comerciais também são observadas, sendo listadas nos capítulos subsequentes, neste trabalho classificadas em função do vetor energético processado.

2.1.1. Correntes renováveis destinadas ao coprocessamento

A seguir são descritas questões operacionais a serem consideradas no processamento de correntes renováveis em unidades de refino tradicionais. Também são descritas variáveis a serem equacionadas, com relação ao limite de processamento e a qualidade e rendimento de produtos. As opções de carga listadas nesta sessão derivam de estudos de literatura. Existem ainda registros de casos práticos de longa data, como por exemplo o processamento de óleo vegetal pela UOP/Eni Ecofining (KALNES; MARKER; SHONNARD, 2007) e a produção de mil barris por dia de diesel renovável pela ConocoPhillips (BIODIESEL MAGAZINE, 2021).

2.1.1.1 Processamento de óleo vegetal

O coprocessamento de óleo vegetal é bastante abordado na literatura existente, sendo identificados estudos e casos práticos em unidades de hidrotratamento, craqueamento catalítico e desasfaltação.

O tratamento de óleos vegetais em HDT é uma rota possível para produção de diesel renovável. O hidrotratamento de óleos vegetais pode ser feito nas refinarias sem grandes necessidades de adaptação na unidade de HDT, produzindo diesel renovável e gerando combustíveis com propriedades similares ao combustível fóssil (KARATZOS; MCMILLAN; SADDLER, 2014). Como exemplo, o diesel renovável possui maior estabilidade térmica e oxidativa se comparado ao biodiesel (BEZERGIANNI et al., 2018; ZEMAN et al., 2019). O hidrotratamento de óleos vegetais é mais flexível que processos usuais de produção de biodiesel⁶ (via rota FAME - *Fatty acid methyl esters*), no que diz respeito ao conteúdo de ácidos graxos livres das diferentes cargas lipídicas (VAN DYK, 2019a).

⁶ Na produção do biodiesel via rota FAME um alto conteúdo de ácidos graxos livres pode levar a reações de saponificação, competindo com reações de transesterificação da rota FAME. (ONOREVOLI, 2012). Na reação de hidrotratamento o alto teor de ácidos graxos não é relevante, pois os ácidos reagem rapidamente em função das condições operacionais (altas temperaturas) (Melero et al, 2010). Contudo é um ponto de atenção importante para o sistema de transferência e estocagem em qualquer rota.

O processamento de óleo vegetal em unidades de hidrotreatamento, com a finalidade de produzir diesel ou bunker como produto principal, são rotas conhecidas por HVO (*hydrotreated vegetable oil*) (WEI, 2021). É uma rota comercial, com diversas empresas exercendo produção: A Figura 2 consolida produção atual e projetos correntes para esta rota, na referida região.

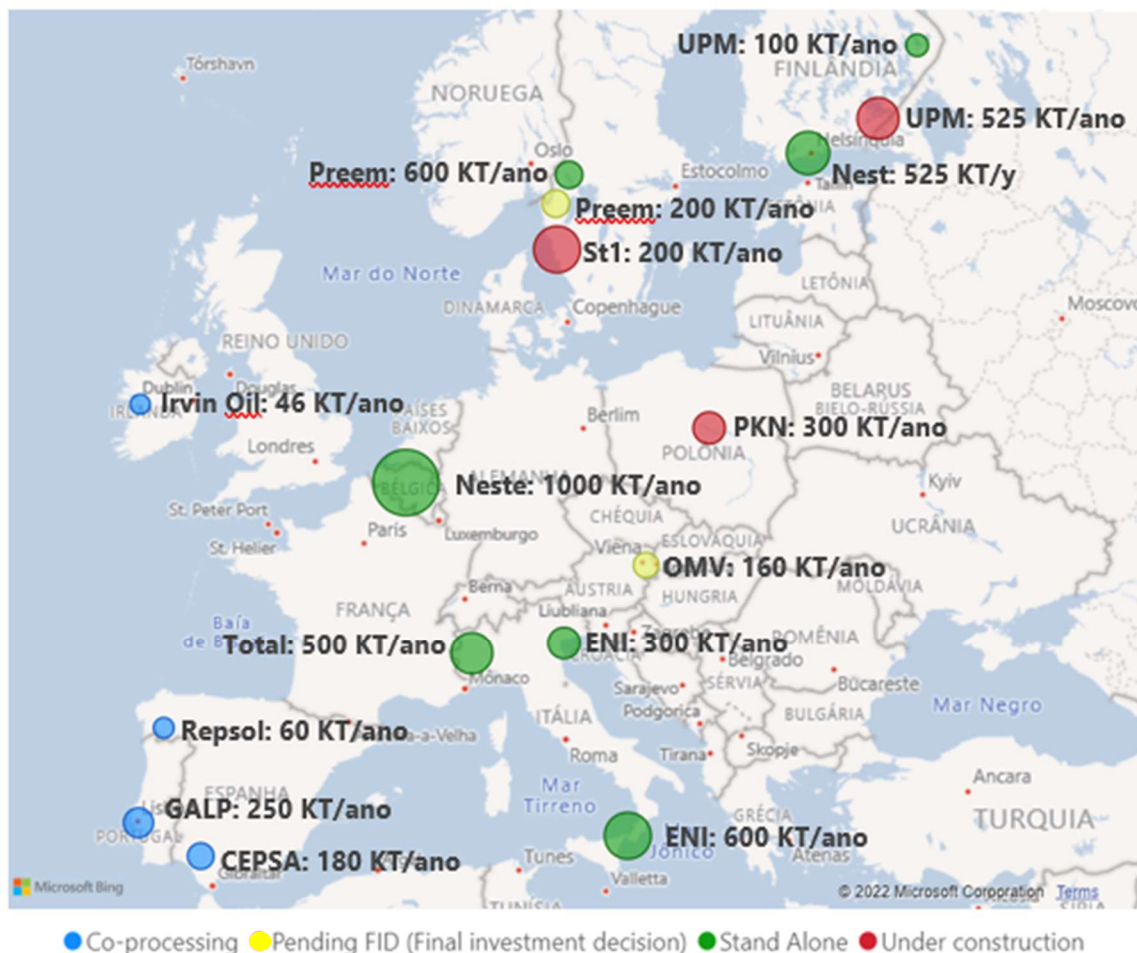


Figura 2 - Capacidade de produção de HVO na União Europeia

Fonte: BIOFUELS INTERNATIONAL (2019).

Estudos de María (2016) sugerem que a participação de correntes renováveis na carga dos HDTs não pode exceder a 20% em base mássica. Van dyk et al. (2019a) sugerem que teor superior a 15% (base volumétrica) de óleo vegetal na carga de hidrotreatamento leve a menor conversão (menor rendimento de líquidos) e menor remoção de enxofre da carga, sendo então recomendado teor ótimo de 10% de óleo vegetal. No Brasil foi reportada produção por coprocessamento na ordem de 5% em base volumétrica (DE SOUZA et al., 2022; PETROBRAS, 2020).

A hidrogenação de óleos vegetais é também denominada HEFA (*hydroprocessed esters and fatty acids*) e pode ser utilizada para produção de diesel ou querosene de aviação (CBSCI, 2019). Neste trabalho convencionou-se utilizar a terminologia HVO para produção de diesel e HEFA quando usada na maximização da produção de querosene de aviação renovável ou SAF (*sustainable aviation fuel*). Quando o foco está na produção de QAV, após a etapa de HDO, a corrente com características de diesel é submetida a mais uma etapa chamada de hidroisomerização, convertendo parafinas lineares em iso-parafinas (RICARDO, 2020). Um fator importante que limita o rendimento reside na etapa de isomerização, que gera combustíveis com boas propriedades de escoamento a frio, mas leva à maior produção de correntes leves do corte de nafta (ponto de ebulição abaixo de 150°C) que não podem ser incorporadas ao QAV. A escolha de sistemas catalíticos mais adequados e condições operacionais específicas podem levar ao rendimento ótimo para produção de QAV (STARCK et al., 2016).

A produção de querosene de aviação por esta rota é certificada desde 2011 pela norma ASTM D7566 (WANG; TAO, 2016). Quando é feito o *blending* com corrente fóssil, é regido pela norma ASTM D1655, a qual permite uma taxa de mistura de até 50% na composição do QAV final e uso da infraestrutura existente de distribuição (CARVALHO, 2017). Quando a produção ocorre via coprocessamento a composição de carga biogênica máxima é de 5% em volume, sendo este um limite definido via certificação ASTM (RICARDO, 2020). Apesar da disponibilidade tecnológica da rota, a produção tem sido feita em bateladas, para testes (RUTZ et al., 2020). A maior parte das plantas que podem produzir querosene de aviação utilizando rota HEFA é otimizada prioritariamente para a produção de diesel e atualmente, apenas uma planta dedicada está otimizada para a produção de bioqav via HEFA, na biorefinaria World Energy, Califórnia (RICARDO, 2020). Adicionalmente, a finlandesa NESTE anunciou produção de SAF em 1,5 milhões de toneladas/ano até o final de 2023 (NESTE, 2022)

O processamento de óleos vegetais na unidade de craqueamento catalítico também é estudado em diversas proporções na carga e com uso de diferentes catalisadores, o que gera ampla gama de vetores de rendimentos possíveis, bem como distintas qualidades de produtos da unidade de FCC. Bielansky et al (2010) analisaram o craqueamento de gasóleo com óleos vegetais (soja, colza e palma) na proporção de 20% (em base mássica) até 100% de óleo vegetal na carga da unidade. Resultados mostraram que a conversão cai

com maiores proporções de óleo vegetal na carga. Por outro lado, o maior teor de óleo vegetal processado levou ao aumento na produção de propeno, matéria prima da indústria petroquímica de elevado valor comercial. No referido estudo, resultados melhores em termos de rendimento foram alcançados com óleo de palma seguido por óleo de colza.

A variada composição de ácidos graxos presentes nos óleos vegetais influencia no rendimento dos produtos obtidos (MALLESWARA RAO; DUPAIN; MAKKEE, 2012) e também na atividade e seletividade do catalisador utilizado (ZHAO et al., 2015). O sistema catalítico e as condições operacionais da unidade precisam ser adequados ao coprocessamento, a depender do óleo vegetal processado (NAJI et al, 2021). De forma geral, o coprocessamento de óleos vegetais com maior composição de ácidos graxos saturados (como óleo de palma, que contém alto conteúdo de ácido palmítico) levam a maior rendimento de gasolina em detrimento de LCO, se comparados, nas mesmas condições de processamento, a óleos vegetais com maior composição de ácidos graxos insaturados (como óleo de soja, que contém alto conteúdo de ácido oleico). (MALLESWARA RAO; DUPAIN; MAKKEE, 2012; NAJI; TYE; ABD, 2021). Desta forma, para obter maior rendimento de gasolina no coprocessamento de óleos vegetais mais insaturados, o catalisador utilizado terá uma relevância central (MALLESWARA RAO; DUPAIN; MAKKEE, 2012).

Kurnia et al. (2016) também estudaram a produção de biocombustíveis a partir de óleo de palma, incluindo processamento em unidade de FCC. Em relação a catalisadores para o processo, observam que zeólitas como HZSM-5, zeolite-B e USY são amplamente utilizados, proporcionando menor formação de coque e maior conversão. Sugerem ainda que além das zeólitas, catalisadores do tipo *multiporosos* e *mesoporosos*, como modernita (material zeolítico) e material mesoporoso sejam indicados para produção de gasolina, aumentando rendimento desta corrente quando há coprocessamento de óleo de palma no FCC.

A refinaria Parkland Burnaby, localizada em Vancouver, Canadá, possui experiência comercial reportada no coprocessamento de óleo vegetal em FCC desde 2017, com teor de renovável na carga variando de 0% a 10% (SU et al., 2021).

A Albemarle (2021) reportou o resultado de teste para processamento de óleo vegetal refinado, desodorizado, branqueado (RDB- *refined, bleached and deodorized*) em RFCC comercial. No referido teste, variou-se a concentração de óleo vegetal na carga de

5 p.% a 16 p.%, com mínimo impacto na conversão e no rendimento dos principais produtos incluindo, LCO, nafta e propeno. O estudo sugere que, de maneira geral, houve mínimo impacto na performance da unidade e o teste foi considerado satisfatório.

2.1.1.2 Processamento de bio-óleo

De uma forma geral, o bio-óleo é um produto com alto teor de oxigênio (20% a 50%) e água (15% a 30%) (BRIDGWATER, 2012) levando a características indesejáveis como instabilidade, alta corrosividade, alta viscosidade, baixo poder calorífico (GANDARIAS; ARIAS, 2016). Outras características citadas na literatura são alta acidez e tendência à formação de coque (OASMAA; ELLIOTT; KORHONEN, 2010). Possui ainda o alto teor de água, o que também influencia no baixo poder calorífico (WANG; MALE; WANG, 2013). A presença de partículas sólidas também afeta a estabilidade e a performance de combustão do bio-óleo (OASMAA; CZERNIK, 1999). Sua composição e propriedades químicas, no entanto, variam em função da biomassa de origem e do processo de conversão utilizado (TOOR; ROSENDAHL; RUDOLF, 2011). As características inerentes ao bio-óleo cru restringem seu uso diretamente como combustível, impossibilitando utilização em motores automotivos por exemplo.

Neste contexto, tem sido estudado o beneficiamento do bio-óleo em processos de refino adaptados, melhorando propriedades como viscosidade, poder calorífico, estabilidade térmica, entre outras (MENDES, 2018). Seu processamento tem sido testado em diferentes unidades operacionais: destilação, craqueamento catalítico, coqueamento retardado e hidrotratamento (HAN et al., 2021).

A produção de bio-óleo de pirólise tem sido exercida em diversas unidades na Europa e América do Norte. A Tabela 1 traz as principais referências :

Tabela 1 - Unidades produtoras de Bio-óleo

Companhia / localização	Status	Capacidade de Produção (10⁶L/ano)
Envergent / Ensyn / UOP (Canadá)	Produção comercial – Em construção (2017)	40.0
Pyrocell / Setra / Preem (Suécia)	Produção comercial - Operacional (2021)	25
Cool Planet (EUA)	Produção comercial – Em construção (2018?)	3.8 inicialmente, chegando a 38.0
BTG (Holanda)	Produção comercial - Operacional (2015)	15.1
Ensyn (Canadá)	Produção comercial - Operacional (2006), Melhorias (2014)	11.0
SynSel / CRI (Noruega)	Demonstração Planejada	2.1
Shell / CRI (Índia)	Demonstração Planejada	2.1
Bioliq / Karlsruhe Institute of Technology (Alemanha)	Projeto Piloto - Operacional (2007)	1.8
Next BTL / Future Blends (UK)	Projeto Piloto - Operacional	0.03
Research Triangle Institute (EUA)	Projeto Piloto - Operacional	0.03
Gas Technology Institute / CRI (EUA)	Projeto Piloto - Operacional (2012)	0.01

Fonte: Adaptado de E4tech (2017), IEA-BIOENERGY (2021) e SETRAGROUP (2022)

Em abril de 2022 foram reportados testes para processamento do bio-óleo da Pyrocell em unidade de FCC da Preem na Suécia, com previsão de que a operação em teste se estenda até 30 de junho de 2024 (PREEM, 2022).

Analisando a literatura, resultados em escala laboratorial e piloto do processamento de bio-óleo no FCC indicam elevada perda de carbono devido à deposição de coque na superfície de catalisadores comumente utilizados como zeólitas Y e ZSM-5, levando a um baixo rendimento de líquidos (MENDES, 2018). O rendimento, no entanto, pode variar bastante em função da biomassa de origem. Variadas origens do óleo de pirólise resultam em performance distintas na unidade de FCC, levando a diferentes graus de conversão.

E4tech, (2017) indica que a participação de óleo de pirólise na carga do FCC de unidades existentes não deve ultrapassar 20% devido ao risco de formação de coque. Han et al. (2021) consideraram adequado um percentual de substituição da carga do FCC por bio-óleo em teores até 10% em massa, proporção que requer menos ajustes operacionais. Outros autores testaram o processamento de bio-óleo pré-hidrotratado no FCC em percentuais superiores a 10% em massa, indicando hidrodessoxigenação anterior ao craqueamento catalítico, o que permitiria minimizar a produção de CO e CO₂ nesta

unidade (ESCHENBACHER et al., 2020), mas também implicaria em custo adicional ao processo com o pré-tratamento da carga do FCC.

Estudos realizados por PINHO et al., (2017) demonstraram viabilidade técnica de coprocessamento do óleo de pirólise e VGO (gasóleo de vácuo) em unidade de FCC da Petrobras (SIX), a partir da injeção segregada dessas correntes no *riser* da unidade. Isto permitiu que a temperatura de carga do VGO fosse mantida entre 220 °C e 320 °C, e do bio-óleo em 30 °C, já que seu aquecimento acima de 50 °C leva à formação de coque e obstrução de linha. Os estudos foram feitos para processamento de bio-óleo em 5% e 10% da carga, em massa. Destacam ainda que a desativação catalítica causada pelos metais presentes em bio-óleo precisa ser estudada.

O processamento de bio-óleo em HDTs também é estudado e pode levar à produção de correntes com características similares ao diesel fóssil ou ao querosene de aviação. De forma geral, a rota recebe o nome de HDPO (*hydrotreated pyrolysis oil*). Especificamente, também é conhecida como HDCD (*hydrotreated depolymerized cellulosic diesel*) quando tem o diesel como produto principal. Mas se o objetivo é produção de QAV a nomenclatura convencional é HDCJ (*hydrotreated depolymerized cellulosic jet*) (RICARDO, 2020). Ainda é possível encontrar na literatura a expressão HRJ (*hydrotreated renewable jet*) (BUFFI et al., 2017; WANG; TAO, 2016). Contudo, esta última trata-se de uma sigla mais genérica, não diferenciando se a carga é bio-óleo, óleo vegetal.

MIRODATOS et al., (2009) estudaram o coprocessamento de guaiacol e *straight-run gas oil* (SRGO ou gasóleo de destilação direta). O SRGO é um produto intermediário da faixa de destilação do diesel, comumente tratado nos processos de HDT. Já o guaiacol é um composto representativo de bio-óleos derivados de lignina bastante estudado na hidredesoxigenação. Resultados mostraram que a hidredesoxigenação do guaiacol inibiu a hidredesulfurização do SRGO. A literatura já apontava que o coprocessamento pode inibir a reação de HDS devido à presença de compostos oxigenados assim como a presença de compostos de enxofre podem inibir a hidredesoxigenação (VILJAVA; SAARI; KRAUSE, 2001). Uma estratégia bastante estudada e relatada também por Venderbosch et al., (2010) é o uso de duas etapas de hidrogenação para desoxigenação do bio-óleo. Nesta estratégia, a estabilização do bio-óleo se dá através de uma etapa branda de HDO, levando a um maior rendimento mesmo com o uso de catalisadores convencionais como NiMo/Al₂O₃ e CoMo/Al₂O₃.

No processamento de bio-óleo em unidades de hidrotreatamento alguns estudos indicam o uso de catalisadores de metais mais nobres, de custo mais elevado e disponibilidade restrita (HUBER; IBORRA; CORMA, 2006). Furimski (2000) revisou trabalhos utilizando catalisadores convencionais enquanto Wang et al, (2013) revisaram estudos utilizando catalisadores não convencionais. Ainda, outros trabalhos analisaram diversos suportes para o catalisador, chegando a diferentes rendimentos e graus de desoxigenação (WILDSCHUT et al., 2009). MENDES (2018) estudou o hidrotreatamento de bio-óleo comercial bruto, avaliando o desempenho de catalisadores de fosfatos de níquel suportados em ARC (alumina recoberta por carbono), obtendo desempenho muito superiores a catalisadores convencionais NiMo/Al₂O₃. De uma forma geral, os estudos apontam que catalisadores convencionais de hidrorrefino, sulfetos bimetálicos CoMo e NiMo, demonstram baixa eficiência para tratamento desta corrente e que o suporte utilizado (alumina) apresenta instabilidade na presença de água, um importante componente do bio-óleo.

Os trabalhos citados analisaram o hidrotreatamento de bio-óleo (ou composto representativo de bio-óleo) de forma isolada, não havendo ampla literatura considerando o coprocessamento. A referência encontrada estudou o coprocessamento de bio-óleo com gás-óleo de destilação direta (na faixa do diesel) com participação do bio-óleo em 2,4% (mássico), para o qual foram observados efeitos de inibição das reações de HDS, HDN e de hidrogenação aromática em função da presença de CO e CO₂ formados durante o processamento (PINHEIRO et al., 2013). Os autores sugerem ações visando eliminar os ácidos carboxílicos da carga antes de sua introdução na unidade de hidrotreatamento ou utilizar catalisadores menos sensíveis à presença de CO/CO₂. O referido estudo fez uso de catalisador convencional CoMo/Al₂O₃.

Enquanto o sistema catalítico precisa ser adaptado para o devido coprocessamento do bio-óleo, o diversificado número de famílias de oxigenados presentes no bio-óleo impõe condições operacionais (temperaturas de reação) variadas (MENDES, 2018). Outra variável do processo é o elevado consumo de hidrogênio. Spatari et al. (2020) estimaram que o consumo de hidrogênio corresponde a 20% de todos os custos operacionais de uma planta de hidrotreatamento. Van dyk et al. (2019a) concluíram que o coprocessamento de bio-óleo corresponde ao processo que requer a maior quantidade de hidrogênio (para remoção de oxigênio) indicando que, a depender das condições de

produção⁷, requer de 3 a 75 vezes mais hidrogênio que o hidrotreatamento de correntes fósseis. Arvidsson et al. (2011) investigaram como diminuir consumo de hidrogênio no hidrotreatamento de óleo de pirólise, indicando condições operacionais de 340 °C e 80 bar.

Comparativamente, o processamento de bio-óleo no FCC tende a apresentar maior viabilidade econômica que no HDT, em função do elevado consumo de hidrogênio no hidrotreatamento e da maior tolerância dos catalisadores de FCC ao alto teor de oxigênio da carga (AGBLEVOR et al., 2012; VAN DYK et al., 2019a). A literatura também aponta que o uso de bio-óleo em processos combinados, como craqueamento catalítico e hidrotreatamento, pode ser promissor em termos de rendimento, e economicidade (DICKERSON; SORIA, 2013), principalmente quando há folga de capacidade a ser aproveitada.

Outra possibilidade apontada na literatura é o coprocessamento de bio-óleo em unidades de coqueamento retardado (UCR). BEIMS et al. (2017) destacam que o referido coprocessamento tem como vantagem a redução do conteúdo total de enxofre dos produtos da UCR, já que, em contrapartida, a carga fóssil desta unidade tende a possuir alto teor de enxofre.

Sousa-aguiar et al. (2018) citam o processamento do bio-óleo em unidades de desasfaltação. Pontes et al. (2021) descrevem testes destinados ao coprocessamento de bio-óleo e resíduo de vácuo em unidade de desasfaltação a propano (UDASF), investigando a especificação das frações produzidas, sendo estas o óleo desasfaltado (ODES) e o resíduo asfáltico (RASFS)⁸

De forma geral Van Dyk et al. (2019a) observam que bio-óleos são cargas prioritariamente de FCC. Para o desenvolvimento da análise multicritério considerou-se a rota de processamento no FCC, seguido por hidrotreatamento de correntes produzidas no FCC.

⁷ Bio-óleo pode ser produzido via pirólise rápida ou liquefação hidrotérmica em condições operacionais diversas

⁸ No referido estudo, o ODES serviu como carga para a unidade de craqueamento catalítico e o RASF foi misturado a resíduo de vácuo, especificando produção de asfalto na Refinaria de Paulínia, em São Paulo (REPLAN).

2.1.1.3 Processamento de resíduos

O debate combustíveis x alimentos também motivou a busca por alternativas de processamento que utilizassem correntes residuais (BEZERGIANNI et al., 2018), como é o caso de sebos/gordura animal e óleo vegetal residual (OVR), também denominado óleo residual de fritura (*waste cooking oil* – WCO) ou ainda óleo usado de fritura (*used cooking oil* – UCO).

Alguns estudos mostram que o OVR tem um custo de duas a três vezes menor que o óleo vegetal virgem (BHUIYA et al., 2016). É uma corrente com alto teor de impurezas, advindas de produtos utilizados no processo de fritura. Este processo leva também à ocorrência de reações de hidrólise, polimerização e oxidação, provocando aumento de viscosidade e teor de acidez do óleo (FELIZARDO et al., 2006). O OVR contém ainda maior teor de água e ácidos graxos livres (FFA – *free fat acids*), em comparação com óleo vegetal virgem (BEZERGIANNI et al., 2018). Requerem pré-tratamento da carga antes de seu processamento em unidades de refino. Estes processos de pré-tratamento são conhecidos como filtração e neutralização. Sem o pré-tratamento, o leito catalítico de unidades de HDT poderia ser rapidamente contaminado pelas impurezas existentes (DE PAZ CARMONA et al., 2018).

O primeiro teste comercial feito na Espanha, visando a produção de diesel, coprocessou até 6% (base mássica) de OVR na carga de hidrotreatamento, utilizando catalisador convencional do tipo NiMo (MARÍA, 2016).

A literatura indica que o coprocessamento de matérias primas residuais como gordura animal e UCO em hidrotreatamento produz um diesel mais parafínico e mais denso (se comparado ao diesel gerado por coprocessamento de óleo de palma), o que leva a um incremento no índice de cetano em até 6 unidades. (DE PAZ CARMONA et al., 2019)

2.2. Mapa de rotas e unidades possivelmente utilizadas

A Figura 3, construída a partir dos estudos feitos no capítulo 2.1, consolida rotas de coprocessamento possíveis com foco em matéria prima biogênica, considerando: a matéria prima de origem, processos de obtenção de cada vetor energético e os tipos de unidades de refino utilizadas no coprocessamento de correntes fósseis e renováveis. Na sequência, é feito um levantamento das refinarias existentes no país, identificando unidades apropriadas ao coprocessamento à luz do mapa apresentado.

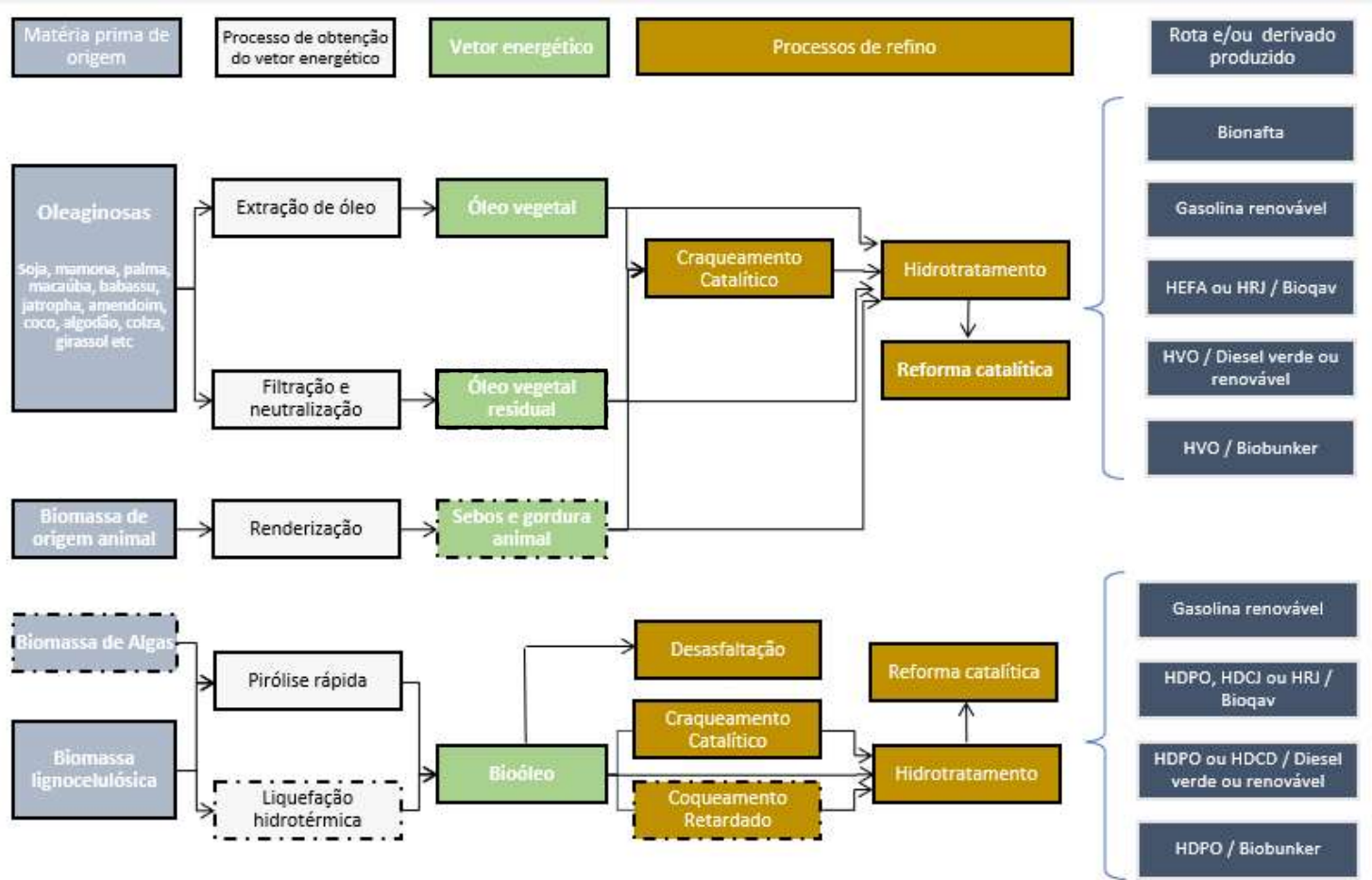


Figura 3 - Mapa de matérias primas, vetores energéticos, unidades e rotas

2.2.1. Refinarias e unidades de processo existentes no país

Atualmente o Brasil possui 16 refinarias. Juntas possuem capacidade instalada de 2,4 milhões de bbl/dia (ANP, 2022), produzindo derivados de qualidade, destinados ao mercado interno e externo. São estas: Refinaria Isaac Sabbá em Manaus, Amazonas (Reman); Refinaria Abreu Lima em Ipojuca, Pernambuco (RNEST); Refinaria Potiguar Clara Camarão em Guamaré, Rio Grande do Norte (RPCC); Refinaria Lubrificantes e Derivados do Nordeste em Mucuripe, Ceará (Lubnor); Refinaria de Mataripe em São Francisco do Conde, Bahia (antiga Rlam); Dax Oil, Bahia; Refinaria de Paulínia em Bonfim, São Paulo (Replan); Refinaria Henrique Lage em São José dos Campos, São Paulo (Revap); Refinaria Presidente Bernardes em Cubatão, São Paulo (RPBC); Refinaria de Capuava em Mauá, São Paulo (Recap); Refinaria Duque de Caxias em Campos Elísios, Rio de Janeiro (Reduc); Refinaria Refit em Manguinhos, Rio de Janeiro (Refit); Refinaria Gabriel Passos em Betim, Minas Gerais (Regap); Refinaria Presidente Getúlio Vargas em Araucária, Paraná (Repar); Refinaria Alberto Pasqualini em Canoas, Rio Grande do Sul (Refap); Riograndense, Rio Grande do Sul.

Guedes (2019) fez um levantamento de capacidades referentes às unidades de processo existentes nas principais refinarias do país, sintetizados na Tabela 2.

Tabela 2 - Capacidades das unidades de processo em dezembro de 2017

Capacidades (Milhões de toneladas/ano)													
Refinaria	UDA	UDV	DSP	FCC	RFCC	ALK	REF	UCR	HDSG	HDTN	HDTK	HDTD	HDTU
Sul													
REFAP	10,57	1,98		1,12	2,44			0,86	1,65			1,98	3,8
REPAR	10,9	4,96	1,68	3,47			0,33	1,65	1,65	0,99		1,98	1,98
Total	21,47	6,94	1,68	4,59	2,44	0	0,33	2,51	3,3	0,99	0	3,96	5,78
Norte Nordeste													
RLAM	14,7	6,61		1,98	4,63				3,37				0,33
REMAN	2,51	0,36		0,2			0,26		0,5				0,83
RPCC	1,98												
RNEST	6,05							3,93		0,99			4,29
LUBNOR	0,43												
Total	25,67	6,97	0	2,18	4,63	0	0,26	3,93	3,87	0,99	0	0	5,45
Rio + Minas Gerais													
REDUC	12,72	6,01	2,25	2,48			0,63	1,65	1,65	0,66	0,59	0,99	3,96
REGAP	7,93	4,63		2,25				1,26	1,45	1,09	1,19	0,86	2,74
Total	20,65	10,64	2,25	4,73	0	0	0,63	2,91	3,1	1,75	1,78	1,85	6,7
São Paulo													
REPLAN	21,8	10,24		5,29			0,99	4,13	2,91	2,18			7,27
REVAP	13,22	6,61	2,25	4,63			0,5	1,65	2,31	0,99	1,98	2,15	2,25
RPBC	8,92	4,26		3,3		0,33	0,83	1,39	1,98	0,86			5,29
RECAP	2,81				1,02				0,66				1,32
Total	46,75	21,11	2,25	13,22	1,02	0,33	2,32	7,17	7,86	4,03	1,98	2,15	16,13
Total Brasil	114,54	45,66	6,18	24,72	8,09	0,33	3,54	16,52	18,13	7,76	3,76	7,96	34,06

UDA: Unidade de destilação atmosférica; UDV: Unidade de destilação à vácuo; DSP: unidade de desasfaltação; FCC: Craqueamento catalítico; RFCC: Craqueamento catalítico de resíduo; ALK: Alquilação; REF: Reforma catalítica; UCR: Unidade de coqueamento retardado; HDSG: hidrotratamento de gasolina; HDTN: Hidrotratamento de nafta; HDTK: Hidrotratamento de querosene; HDTD: hidrotratamento de diesel; HDTU: Hidrotratamento de instáveis

Fonte: Adaptado de Guedes, 2019

Considerando fatores de processo identificados na seção 2.1, foram consolidados os limites de processamento de correntes renováveis em cada unidade que pode ser utilizada no coprocessamento, conforme listados na Tabela 3. Os limites considerados refletem experiências reportadas ou recomendações baseadas em experimentos disponíveis em literatura consultada e não representam, necessariamente, limites físicos de processo.

Tabela 3 - Limites de processamento

Área	Refinaria	FCC	HDTK	HDTD	HDTU
Sul	REFAP	Bioóleo: 10% massa Óleo vegetal ou OVR:10% em massa	-	5% vol	
Sul	REPAR		-		
Nordeste	RLAM		-		
Nordeste	RNEST	-	-		
RJ	REDUC	Bioóleo: 10% massa Óleo vegetal ou OVR:10% em massa	5% vol		
MG	REGAP				
SP	REPLAN		-		
SP	REVAP		5% vol		
SP	RPBC		-		
SP	RECAP		-		

3. ANÁLISE MULTICRITÉRIO

Segundo Roldan e Miyake (2004), a tomada de decisão envolve quatro dificuldades básicas: objetivos múltiplos interrelacionados, incertezas inerentes, complexidade, diferentes perspectivas possíveis conduzindo a resultados diversos. Frente a tais fatores de dificuldade, os autores observam que se faz necessária a criação de uma estrutura analítica que direcione os decisores, de maneira a considerarem todas as variáveis e influências envolvidas no processo de decisão.

O apoio multicritério na tomada de decisão (*Multiple-Criteria Decision Method - MCDM*) ou ainda Apoio Multicritério a Decisão (AMD), surgiu como ramo da pesquisa operacional e se mostra útil em decisões que integram fatores quantitativos e qualitativos (HANDFIELD et al., 2002). Para Gomes et al (2009) a abordagem multicritério baseia-se em estabelecer uma relação de preferências subjetivas entre as alternativas consideradas no processo decisório, sendo tais alternativas avaliadas sob a influência de diversos aspectos. Para ambos os autores, a principal contribuição da abordagem é incorporar componentes subjetivos ao processo decisório, justificando escolhas de forma confortável com o objetivo de obter os melhores resultados. Sendo assim, essa abordagem permite combinar variáveis e ranquear alternativas, indicando importante aplicação em problemas envolvendo aspectos ambientais inclusive (HUANG; KEISLER; LINKOV, 2011).

A aplicação da abordagem MCDM em problemas reais é vasta e percorre diferentes campos (FIGUEIRA; GRECO; EHRGOTT, 2005; HUANG; KEISLER; LINKOV, 2011). Sendo uma ferramenta de apoio à decisão, tem como principal propósito trazer transparência às escolhas relacionadas à resolução de um determinado problema, bem como às variáveis (muitas vezes subjetivas) envolvidas no processo decisório (SPARREVIK et al., 2011).

3.1. Procedimento metodológico

3.1.1. Escolha do método

Seguindo uma perspectiva clássica, os métodos de análise multicritério podem ser classificados em duas categorias: métodos da escola americana, os quais têm ênfase na tomada de decisão; e métodos da escola francesa, que enfatizam a busca pela compreensão e aprendizado do problema (BAPTISTA, 2000). A literatura descreve diversos métodos de análise multicritério.(GOMES; ARAYA; CARIGNANO, 2009). Pohekar e Ramachandran (2004) apontam os métodos AHP (*Analytic Hierarchy Process*), ELECTRE (*Elimination and Choice Expressing Reality*) e PROMETHEE (*Preference Ranking Method for Enrichment Evaluation*), respectivamente, como os mais populares no processo de tomada de decisão relacionado ao planejamento energético sustentável. O AHP é um método da escola americana enquanto ELECTRE e PROMETHEE representam a escola francesa. Independentemente do método escolhido, é relevante evidenciar possíveis *trade-offs* ou conflitos existentes entre critérios, tratando-os como sugere a literatura (BRUGGEMANN; CARLSEN, 2012; HUANG; KEISLER; LINKOV, 2011).

O ELECTRE é um método de comparações das alternativas par a par, a qual utiliza uma métrica para relações de troca (*swing weights*), produzindo índices de concordância e discordância a fim de determinar relações de dominância entre as possíveis alternativas (MUSSOI, 2013). O método possui diversas versões que se diferenciam nos procedimentos matemáticos finais e permitem atingir resultados para problemas distintos, entre estes: seleção, ordenação e classificação de alternativas (GOVINDAN; JEPSEN, 2014). Segundo Ensslin et al (2001) as principais etapas de utilização deste método são:

- 1) Identificar alternativas;
- 2) Definir os critérios a serem considerados na análise;
- 3) Atribuir peso a cada critério;
- 4) Normalizar os valores dos pesos de cada critério;
- 5) Estabelecer índices de concordâncias e discordância para cada par de alternativas;
- 6) Estabelecer limites de concordância e discordância;
- 7) Determinar o conjunto de dominância;
- 8) Realizar análise(s) de sensibilidade(s).

O PROMETHEE é considerado uma ramificação mais simples do ELÉCTRE (BRANS, JEAN-PIERRE; MARESCHAL, 2005). É um método que calcula o grau de preferência do decisor, fornecendo uma ordenação de alternativas a partir da maximização ou minimização de critérios de forma não compensatória (TZENG; HUANG, 2011). Isto significa que baixas notas em determinados critérios não são compensados por notas elevadas em outros critérios. Apresenta a vantagem de trazer simplificação ao processo, se comparado ao método que o originou, ELECTRE (BRANS, JEAN-PIERRE; MARESCHAL, 2005).

O método AHP, proposto por Saaty em 1981, organiza hierarquicamente questões relevantes para uma determinada decisão. Mussoi (2013) traz a seguinte definição deste método:

“O AHP é baseado na decomposição do problema de decisão em uma estrutura hierárquica multinível de critérios e alternativas para organizar e analisar os aspectos críticos do problema. Reduzindo as decisões complexas a uma série de comparações e ordenamentos simples e sintetizando os seus resultados, o AHP não somente auxilia o decisor a determinar a melhor alternativa, mas também proporciona melhor compreensão do problema e um raciocínio claro para a tomada de decisão.” (MUSSOI, 2013).

O AHP baseia-se na decomposição do problema de decisão partindo de múltiplos níveis de critérios e alternativas (SAATY, 1987). Neste método, as comparações são feitas de forma paritária, considerando todas as combinações possíveis entre as alternativas consideradas. O método *Analytic Hierarchy Process* é composto por etapas que envolvem (SAATY, 1990): i) Estruturação do problema; ii) Cálculo de pesos (ou prioridades) de cada critério; iii) Avaliação de consistência; iv) Resultados e análise de sensibilidade.

Castro (2013) define a etapa “estruturação hierárquica” do problema como uma fase em que o objetivo global é estabelecido e o sistema é decomposto em níveis hierárquicos. A Figura 4 - Estrutura hierárquica simples para resolução de problemas AHP, ilustra esta definição com um caso mais simples, formado por 3 níveis: 1) objetivo geral; 2) critérios; 3) alternativas.

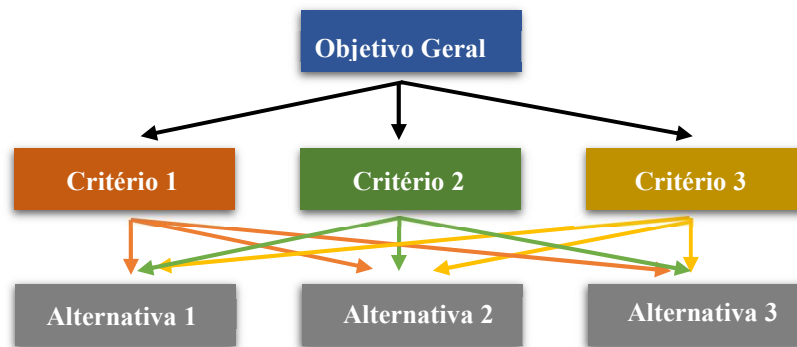


Figura 4 - Estrutura hierárquica simples para resolução de problemas AHP

Fonte: adaptada de Castro (2013)

A formulação em níveis hierárquicos permite calcular uma medida global para cada uma das alternativas, ordenando-as.

O AHP é reconhecido no meio acadêmico e empresarial, sendo o método de MCDM mais utilizado (GAVADE, 2014) e mais popular para priorizar alternativas (WANG et al., 2009). Vem sendo amplamente aplicado em diversos estudos como: análise de projetos na indústria de refino de petróleo (SOUZA, 2012); e mapeamento multicritério para seleção de oleaginosas para o processo HEFA (SOUZA, 2019). Alguns artigos tratam especificamente de estudos relacionados a alternativas renováveis para o setor de aviação, com foco em seleção de matéria prima (DE SOUZA; MENDES; ARANDA, 2020) ou análise de cenários para escolha de iniciativas mais apropriadas (CONNELLY et al., 2015). Outros utilizam a abordagem AHP para comparação de diferentes opções para produção de biocombustíveis, neste caso álcool e biodiesel (ZIOLKOWSKA, 2014) ou para avaliar alternativas de biomassa em uma determinada região, neste caso Kansas, EUA (COBULOGLU; BÜYÜKTAHTAKIN, 2015).

Segundo Almeida et al (2003) a escolha do método depende do contexto considerado, características do problema analisado e facilidade de aplicação. Løken (2007) defende que a ferramenta ideal é a que apresenta facilidade de entendimento e de uso. Desta forma, AHP foi o escolhido para desenvolvimento deste trabalho em função de todas as vantagens constatadas: vasta referência de aplicação em problemas de natureza similar, facilidade de uso e habilidade em verificar consistência de dados.

3.1.2. Fluxo de etapas

Conforme descrito no capítulo 1.2, o trabalho proposto nesta dissertação teve por objetivo identificar as refinarias/rotas mais apropriadas ao coprocessamento no país fazendo uso do método AHP. Em síntese, a Figura 5 descreve o processo percorrido de forma a alcançar o objetivo proposto.

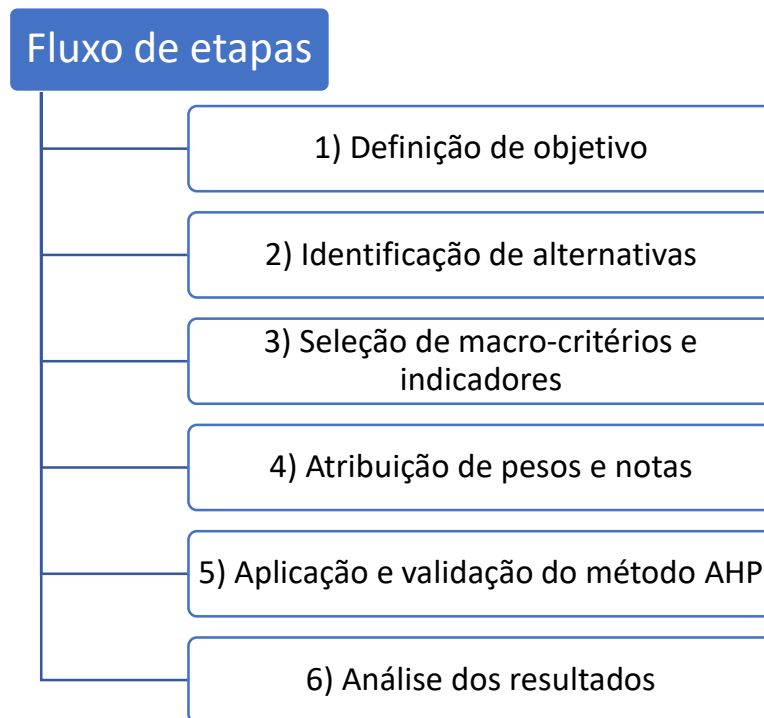


Figura 5 - Fluxo das Etapas

Fonte: Elaboração Própria

O segundo passo corresponde à identificação das alternativas possíveis. Considerando o estado da arte do coprocessamento, para o desenvolvimento deste trabalho foram selecionadas as unidades craqueamento catalítico e hidrotratamento. Adicionalmente, optou-se por agrupar algumas refinarias em regiões de refino, a fim de facilitar a análise, simplificando o número de alternativas. Por fim, à luz do Mapa de matérias primas, vetores energéticos e rotas de coprocessamento, foi possível mapear o fluxo de alternativas conforme mostra a Figura 6:

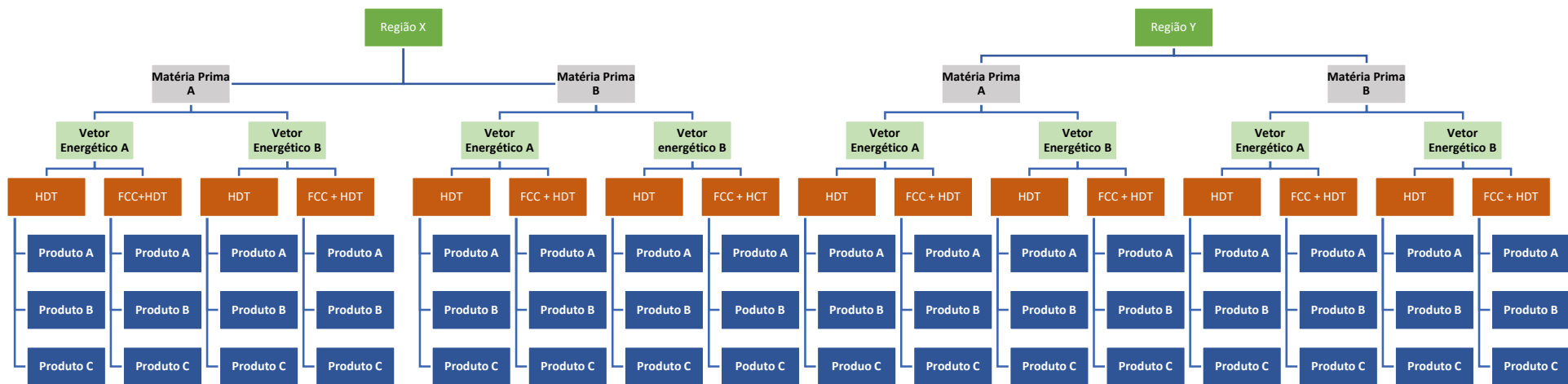


Figura 6 - Fluxo de Alternativas para coprocessamento

Fonte: Elaboração própria

O Fluxo de alternativas é composto por 5 níveis, sendo estes: Região de refino, Matéria prima, Vetor energético, Unidade de processo e Produto. Por definição, os critérios isoladamente não são capazes de diferenciar todos os 5 níveis ao mesmo tempo. A diferenciação entre alternativas acontece na análise de todo o conjunto de critérios. As alternativas consideradas serão detalhadas na sessão Resultados.

Em etapa seguinte, este trabalho selecionou macro-critérios relevantes a serem considerados na análise de quais combinações de rotas/refinarias são as mais indicadas ao coprocessamento no país. A escolha dos indicadores considerou os aspectos mais relevantes a serem mensurados dentro de cada macro critério, com atenção para existência de possível correlação. A definição de cada macro critério/indicador será detalhada em capítulo subsequente.

O próximo passo prevê a atribuição de pesos e notas a cada critério. Para atribuição de notas foram aplicadas escalas, baseando-se no referencial teórico apresentado em literatura. As pontuações atribuídas neste trabalho serão apresentadas e justificadas na seção Resultados. Para o cálculo de pesos relativos e posterior análise de consistência dos resultados, existe um método simples (SILVA, 2007) proposto por Saaty.

Saaty (1990) propõe uma escala fundamental variando de 1 a 9, sendo usada em forma de julgamentos comparativos pareados. É possível adaptar a escala, reduzindo-a para números de 1 a 5 (BIANCO, 2016), sendo esta abordagem utilizada neste trabalho. A Tabela 4 descreve a definição de cada elemento da escala fundamental e seu equivalente adaptado.

Tabela 4 - Escala de pesos Saaty

Importância (Escala original)	Importância (Escala adaptada)	Definição
1	1	Igualmente importante
3	2	Um pouco mais importante
5	3	Muito mais importante
7	4	Muito fortemente mais importante
9	5	Absolutamente mais importante
2,4,6 e8		Valores intermediários

Fonte: Adaptado de Saaty (1990)

As preferências quantificadas por comparações pareadas são representadas por uma matriz ($n \times n$), onde n representa o número de critérios analisados (SAATY, 1987). O preenchimento da matriz segue esta lógica:

- A comparação entre os próprios critérios é sempre igual a 1, sendo qualquer critério igualmente importante em relação a si mesmo
- Se $a_{ij}=\alpha$, sendo α a importância relativa entre os critérios a_i e a_j , então $a_{ji}=1/\alpha$

A Figura 7 ilustra os elementos a_{ij} pertencentes a essa matriz.

$$\begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1/a_{n1} & 1/a_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Figura 7 - Matriz de comparações pareadas

Fonte: (SAATY, 1987)

Neste trabalho, a escala de importancia foi aplicada com o propósito de facilitar o julgamento e minimizar possíveis erros de consistência. Desta forma, as opções que consolidam a matriz de comparações pareadas são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Escala de importância aplicada às comparações pareadas

Escala Aplicada	Definição
0,2	Muito menos importante
0,33	Um pouco menos importante
1	Igualmente Importante
3	Muito mais importante
5	Absolutamente mais importante

Fonte: elaboração própria.

A atribuição de pesos foi resultado do julgamento executado por decisores convidados, por meio de respostas a um formulário eletrônico (Anexo I). O questionário foi disponibilizado em português e inglês, a um total de 74 destinatários, dos quais foram obtidas 26 respostas. O formulário foi aplicado no período de 16 de agosto de 2022 até 14 de outubro do referido ano e recebeu respostas entre 16 de agosto e 6 de outubro. O grupo de especialistas uniu representantes de quatro grupos: Empresa, Governo, Organização não governamental e Instituição de pesquisa.

Em seguida, as diversas matrizes individuais foram agregadas de acordo com seus valores médios. O passo seguinte foi normalizar a matriz de comparações pareadas. Nesta etapa, divide-se cada elemento da matriz pela soma de sua respectiva coluna. Depois, deve-se somar cada linha da matriz normalizada e, por fim, dividir a matriz resultante (de uma coluna) pelo número de critérios. Dessa forma obtém-se o peso relativo de cada critério, também chamado de vetor de prioridade.

O método AHP permite mensurar a consistência dos pesos atribuídos (SAATY, 1987), verificando se o julgamento é válido ou não, aceitando desvios até determinado

parâmetro. A análise verifica se a intensidade da preferência não viola proporcionalidade entre os julgamentos atribuídos (BIANCO, 2016). Exemplificando uma situação ilustrativa em que não é observada violação de proporcionalidade entre os julgamentos: i) A é duas vezes preferido em relação a B e B é preferido três vezes em relação a C; ii) C é seis vezes preferido em relação a A (conforme esperado a partir dos julgamentos anteriores).

A métrica para avaliação da consistência é definida como RC (Razão de Consistência). O método propõe que a RC seja calculada da seguinte forma (SAATY, 1987):

- 1) Calcular o máximo autovalor da matriz de julgamentos (λ_{max}), efetuando-se as seguintes operações: i) multiplicando-se a matriz de julgamentos pelo vetor de prioridades; ii) realizar a divisão entre resultado da multiplicação anterior e o vetor de prioridades (resultando em uma matriz $n \times 1$); iii) calcular a média aritmética das n linhas.
- 2) A partir do Autovalor (λ_{max}) e conhecendo-se a orden n da matriz de julgamentos, é possível calcular o Índice de Consistência (IC), onde:

$$IC = ((\lambda_{max} - n) / (n-1)) \quad \text{(Equação 1)}$$

- 3) Finalmente, RC é determinado pela razão entre IC e IA, sendo este último o Índice de Aleatoriedade, também conhecido como índice randômico (IR) proposto por Saaty de acordo com o número de critérios.

$$RC = IC/IA \quad \text{(Equação 2)}$$

A Tabela 6 traz os valores propostos.

Tabela 6 - Índice de Aleatoriedade

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
IA	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51

Fonte: Saaty (1991)

Quando o resultado do cálculo de RC apresenta inconsistência, com valor maior que 0,1 (Saaty, 1991), significa que o julgamento foi aleatório e deve ser refeito.

Por fim, a influência de possíveis mudanças na atribuição de pesos relativos é analisado na seção de Resultados. Nesta seção, é apresentada análise de sensibilidade consolidando 6 cenários, trazendo alterações em pesos (julgamentos) e notas e análise crítica de resultado.

3.2. Definição de macro critérios e indicadores considerados

Este capítulo traz a definição dos 4 macro critérios selecionados, bem como de cada indicador que os compõem. A literatura aponta diversos estudos que consideram indicadores com dimensões distintas: social, econômica, ambiental e tecnológica (LEBRE et al., 2010; SANTOS et al., 2017). Seguindo esta linha, o levantamento preliminar de critérios relevantes considerou perspectivas técnicas, socioambientais e econômicas. Em seguida, optou-se por uma ordenação que identificasse aspectos importantes relacionados à disponibilidade, à logística e a aspectos técnicos e socioambientais de cada rota selecionada. Desta forma, a discussão à luz do “mapa de matérias primas, vetores energéticos, unidades e rotas” levou à seleção dos seguintes macro critérios: “Disponibilidade de matéria prima e vetor energético”; “Logística do vetor energético”; “Critérios técnicos da rota”; “Critérios Socio Ambientais da Rota”.

O macro critério “Disponibilidade de matéria prima e vetor energético” compreende o conjunto de indicadores relevantes relacionados à quantidade de matéria prima e vetor energético disponíveis no país, para o uso energético, sendo estes: i) oferta de matéria prima; ii) sazonalidade de matéria prima; iii) competição com o setor agropecuário; iv) oferta do vetor energético.

O primeiro e o quarto indicadores consideram parâmetros de produção anual, influenciando positivamente a disponibilidade. O indicador sazonalidade buscou qualificar se a matéria prima produzida na estação de menor produtividade altera a oferta de forma significativa. Caso positivo, a sazonalidade é relevante e gera efeito negativo na disponibilidade. Da mesma forma, a maior competição com setor agropecuário tem efeito negativo na disponibilidade, pois quanto maior é a competição, menor é o provisionamento de matéria prima para o propósito final de coprocessamento no refino (menor é a disponibilidade). O debate energia x alimentos suscita preocupações relacionadas à segurança alimentar, o que é genuinamente um aspecto social. O indicador “competição com o setor agropecuário” foi inserido no macro-critério Disponibilidade, com o objetivo de reconhecer e preservar a quantidade de matéria prima destinada ao uso alimentar.

O segundo macro critério refere-se à “Logística do vetor energético”. A cadeia logística da biomassa possui uma série de características específicas que dependem do vetor energético considerado. De forma geral, a biomassa é um produto heterogêneo,

disperso e com escala de produção muito distinta a depender do tipo utilizado no processo. Desta forma, o macro critério “Logística do vetor energético” é composto por indicadores que refletem aspectos logísticos, tais como: escala de processamento nas unidades de processo existentes; custo do vetor energético na refinaria; estabilidade do vetor energético;

O terceiro macro critério engloba os “Critérios Técnicos da Rota”. Neste âmbito, são considerados todos os aspectos tecnológicos, desde a conversão da matéria prima até o processamento do vetor energético, levando à produção do derivado final. Dentro deste macro critério são analisados três indicadores: maturidade tecnológica da rota; qualidade do vetor energético e conformidade regulatória.

A maturidade tecnológica, conhecida pela sigla TRL (*Technology Readiness Level*) é um parâmetro que permite acompanhar o nível de amadurecimento de uma determinada tecnologia, analisando sua progressão em etapas desde a pesquisa básica, passando pela pesquisa aplicada e desenvolvimento até a implementação (EMBRAPA, 2018). Por sua vez, os aspectos de qualidade consideram características que podem demandar ajustes ou traduzir-se em custos adicionais nos processos de refino do vetor energético, refletindo características relacionadas à facilidade de processamento do vetor energético. O terceiro indicador, “Conformidade regulatória” é um critério qualitativo que considera se existe alinhamento da rota à regulação e a demandas certificação ou padrões que comprovem a origem renovável.

A performance socioambiental é mensurada no quarto macro critério, denominado “Critérios Sócio Ambientais da rota”. É composto por três indicadores, sendo estes: Vulnerabilidade hídrica, potencial para mitigação de emissões, geração de emprego.

O indicador “Vulnerabilidade hídrica” relaciona-se aos impactos da rota na disponibilidade de recursos hídricos para a sociedade. Estudos sugerem que se o gerenciamento da alocação de recurso hídrico não for adequado, várias partes do mundo podem sofrer com crises de abastecimento de água, não apenas na agricultura, mas também nos setores industrial e doméstico (GAZZONI, 2011). Adicionalmente, um crescente uso de biomassa no mundo, para fins energéticos, pode aumentar a demanda por água e alterar a alocação deste recurso (BERNDES, 2002). Estas observações justificam o uso do indicador “vulnerabilidade hídrica” no âmbito da performance

socioambiental. Trata-se de um critério com impacto inverso, quanto maior a vulnerabilidade hídrica da rota considerada, menor a nota recebida.

O segundo indicador de performance ambiental, “Potencial para mitigação de emissões”, é avaliado a partir do desempenho de cada rota em relação às emissões de gás de efeito estufa (GEE). Diversos estudos publicados mostram que biocombustíveis avançados podem reduzir de forma significativas tais emissões (GRIFFITHS et al., 2022; LEPITZKI; AXSEN, 2018; KARATZOS; MCMILLAN; SADDLER, 2014).

O terceiro indicador, “Geração de emprego” segue uma escala de notas que privilegia o potencial para desenvolvimento de agricultura familiar de cada alternativa.

A Tabela 7 - Descrição de macro critérios e indicadores considerados, sintetiza as definições apresentadas.

Tabela 7 - Descrição de macro critérios e indicadores

Macro critério	Definição	Notação adotada	Indicador	Definição	Notação adotada
Disponibilidade de matéria prima e vetor energético	Incorpora indicadores que refletem a quantidade de matéria prima e vetor energético disponíveis no país, para o uso energético	M1	Oferta de matéria prima	Produção anual de matéria prima em escala nacional	IND1
			Sazonalidade da matéria prima	Se a quantidade de matéria prima produzida na estação de menor produção compromete a oferta, a sazonalidade é significativa.	IND2
			Competição com setor agropecuário	Se uma determinada cultura pode destinar-se à produção de alimentos, seu uso energético fica comprometido.	IND3
			Oferta do vetor energético	Produção anual do vetor energético em escala nacional	IND4
Logística do vetor energético	Contém indicadores que refletem aspectos logísticos relacionados ao vetor energético	M2	Escala de processamento nas unidades de processo existentes	Considerada a oferta do vetor energético nas proximidades da refinaria, levando em conta a capacidade de processamento	IND5
			Custo do vetor energético	Indicador de base relativa, comparado à carga convencional, que representa uma ordem de preferência	IND6
			Estabilidade do vetor energético	Característica (qualidade) relevante para o aspecto logístico.	IND7
Técnicos da rota	Incorpora indicadores com perspectiva técnica, desde a conversão da matéria prima até o processamento do vetor energético	M3	Maturidade tecnológica da rota	Nível de amadurecimento de cada tecnologia, expressa em escala de TRL (<i>Technology Readines Level</i>)	IND8
			Qualidade do vetor energético	Reflete características relacionadas à facilidade de processamento do vetor energético	IND9
			Conformidade regulatória	Alinhamento à regulação e a demandas de padrões ou certificação que comprovem origem renovável	IND10
Sócio Ambientais da rota	Consiste em indicadores que abordam os efeitos de adoção da rota nas condições socioambientais	M4	Vulnerabilidade hídrica	Impactos da rota na disponibilidade de recursos hídricos para a sociedade.	IND11
			Potencial para mitigação de emissões	Potencial de redução de emissões associado à adoção da rota	IND12
			Geração de emprego	Contribuições da rota na geração de emprego.	IND13

Fonte: elaboração própria

4. RESULTADOS DE INDICADORES

Os resultados referentes às notas de cada alternativa, em cada indicador considerado, são apresentados a seguir. Nesta seção os macro critérios são analisados separadamente, do item 4.1 até o item 4.4. A aplicação do método, considerando o peso dos macro critérios e indicadores, é desenvolvida no capítulo subsequente, consolidando o resultado final.

4.1. Disponibilidade de matéria prima e vetor energético

Neste trabalho são consideradas duas classes de matérias primas: Oleaginosas e biomassa lignocelulósica. A partir destas, são obtidos três tipos de vetor energético: óleo vegetal, óleo vegetal residual e bio-óleo, tal como mostrado anteriormente. A fim de garantir representatividade, na análise multicritério, foi selecionado ao menos um elemento de cada tipo, apresentados a seguir. Na sequência, são apresentados os cálculos das notas de cada indicador que compõe o critério disponibilidade.

4.1.1. Oleaginosas

De forma geral, as oleaginosas são fontes de triglicerídeos destinadas prioritariamente à indústria de alimentos, sendo também importantes para indústria farmacêutica e geração de energia. A partir das oleaginosas podem ser extraídos óleos vegetais, compostos principalmente por mono-, di- e triacilglicerídeos, ácidos graxos livres, em menor proporção por água, fosfolipídios, além de outros componentes menos expressivos (MEHER; VIDYA; NAIK, 2004).

Existem três principais formas de processamento, visando a extração dos óleos de frutos e sementes: extração por prensagem, extração com uso de solvente e extração enzimática (IHA, 2010). O processo indicado depende da oleaginosa e de seu teor de óleo padrão. A extração por prensagem é mais indicada para matéria prima com elevado teor de óleo, contudo, é comum o uso de processos combinados (TIRITAN, 2020). O país tem capacidade instalada para processamento de 202.337 toneladas/dia de grãos (ABIOVE, 2022).

Bezergianni et al. (2018) observam que as oleaginosas mais comumente destinadas ao coprocessamento e examinadas em literatura são palma, soja, colza, girassol e jatropha. O estudo de Bergmann et al. (2013) indica as principais oleaginosas produzidas no Brasil, por região, com potencial para produção de biodiesel, sendo estas: babaçu, jatropha, palma, amendoim, coco, mamona, algodão, colza, girassol e soja. A Figura 8 consolida este mapa.



Figura 8 - Principais oleaginosas produzidas no Brasil, por região

Fonte: Bergmann (2013)

Nogueira (2011) concede destaque a quatro, em função das seguintes razões: i) soja, pois representa a principal cadeia de produção de óleo vegetal no país; ii) mamona, em virtude do grande potencial de adaptação no semiárido nordestino, o qual possui condições adequadas ao seu desenvolvimento; iii) palma, sendo o mais produtivo em toneladas/ha; e iv) macaúba, em função da lei número 19.485/2011 – Pró-Macaúba, a qual instituiu uma política de incentivo ao cultivo, extração, comercialização, consumo e

processamento da macaúba como fonte produtora de energia renovável. A macaúba recebe destaque também pelo alto volume de óleo por hectare gerado.

Este trabalho optou pela escolha da soja, palma e macaúba para o grupo de oleaginosas consideradas. A primeira devido à escala de produção. A segunda, em função da alta produtividade de óleo por hectare apresentada e a terceira em função da política de incentivo, podendo representar uma relevante alternativa futura.

4.1.1.1. Soja

A soja é um grão de alto valor nutricional, destinado ao consumo humano e de animais. É um grão originário da China, chegando ao Brasil por volta de 1882, na Bahia.

O Brasil é responsável por um terço da produção mundial de soja (FAO-ESTATÍSTICS, 2021), sendo de longe a maior cultura agrícola no país (IBGE, 2021). No período de 2010 a 2020, a produção brasileira de soja cresceu de 68,8 para 121,8 milhões de toneladas, com área cultivada se expandindo em 60% no período, alcançando 371.900 km² em 2020 (GUARENGHI et al., 2022). Segundo IBGE (2022), a produção anual de soja, referente a safra de 2021/2022, foi de 125,5 milhões de toneladas.

O cultivo da soja é apropriado para locais onde (OLIVEIRA, 2016):

- a temperatura média varie entre 20 °C e 30 °C,
- os solos sejam bem drenados (porém com boa capacidade de retenção de água),
- o terreno tenha baixa declividade, por ser uma cultura altamente mecanizada,
- as chuvas sejam de 450 a 800 mm durante o ciclo.

Desta forma, a produção nacional se concentra no estado do Mato Grosso, responsável por 30% desta parcela, estendendo-se ainda para o Paraná, Rio Grande do Sul, Goiás e região denominada MATOPIBA, a qual incorpora os estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia (GUARENGHI et al., 2022).

Conab (2019) traz o período de colheita da soja, consolidada na Figura 9 – Período de colheita da soja.

Região	Estado	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Norte	RR								x	x	x		
	RO	x	x	x	x								
	PA					x	x	x	x	x			
	TO		x	x	x	x							
Nordeste	MA			x	x	x	x	x					
	PI		x	x	x	x	x						
	BA		x	x	x								
Centro-Oeste	MT	x	x	x	x								
	MS	x	x	x	x								
	GO		x	x	x								
	DF			x	x								
Sul	PR	x	x	x	x								
	SC		x	x	x	x							
	RS		x	x	x	x							
Média de distribuição		0,4	0,8	0,9	0,9	0,4	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	-	-

Figura 9 - Período de colheita da soja

Fonte: Conab (2019)

Embrapa (2008) e Biodieselbr (2011) trazem informações que nos permitem calcular teor de óleo médio da soja em 18%.

4.1.1.2. Palma

A literatura aponta que, durante o século XIX, o óleo de palma esteve no centro das relações comerciais entre Inglaterra e África Ocidental, inicialmente concentrada no Delta do Niger, em região denominada ‘rios do óleo de palma’ (SILVA, 2022). Ao final da década de 1960, clones de mudas de palma com alto rendimento e resistência foram produzidos e comercializados globalmente, resultando em expansão da indústria do óleo de palma (HENDERSON; OSBORNE, 2000). Hoje os principais produtores mundiais são Indonésia e Malásia, com participação superior a 80% do mercado global de óleo de palma (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, 2022). Em torno de 90% do óleo de palma produzido no mundo é de uso alimentar (FEROLDI; CREMONEZ; ESTEVAM, 2014). O uso do óleo de palma para produção de biocombustíveis enfrenta restrições na Europa (BIODIESELBR, 2019).

No Brasil, o estado do Pará é o maior produtor (82% da produção nacional), seguido por Bahia (16%) e Roraima (2%) (MAPA, 2018). Na safra de 2021/2022, o Brasil destinou uma área de 185 mil hectares ao cultivo da palma (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, 2022). No mesmo período o país produziu cerca

de 550 mil toneladas de óleo de palma e consumiu em torno de 950 mil toneladas (INDEX MUNDI, 2022), com a diferença sendo suprida por importação.

O dendezeiro é uma planta de ciclo perene, pertencente à família das palmeiras (FEROLDI; CREMONEZ; ESTEVAM, 2014). Da palma, também conhecida como dendê, provêm dois tipos de óleo: óleo de palma, proveniente da polpa, e o óleo de palmiste, extraído da amêndoa (BRANCO, 2011). O rendimento do óleo de palma é de aproximadamente 22% do peso do cacho, enquanto o rendimento do óleo de palmiste é de 3% em média (BRANCO, 2011). A produtividade do óleo de palma, por unidade de terra, é uma das maiores entre as oleaginosas do país. A respeito do óleo de palma, Silva (2022) descreve-o como sendo:

“Entre os óleos vegetais no mercado, o mais produtivo, uma vez que para se produzir a mesma quantidade do óleo de soja é necessária uma área de até dez vezes maior, tornando o óleo de palma o mais competitivo”. (SILVA, 2022).

A cadeia produtiva da cultura da palma no Brasil ainda é pouco desenvolvida e seu crescimento enfrenta diversas limitações. Em análise de literatura e estudo sobre o tema, Silva (2022) reporta alguns desafios na expansão do óleo de palma no Pará, dentre eles:

- i) Insegurança jurídica em função de irregularidades e/ou conflitos fundiários em áreas com potencial agrícola para o cultivo da palma
- ii) Carência de infra-estrutura (pavimentação de estradas) e baixa capacidade de esmagamento na região.

4.1.1.3. Macaúba

Macaúba (nome científico *Acrocomia aculeata*) é uma palmeira com ampla distribuição geográfica, estendendo-se do México à Argentina (MATOS, 2018). É uma espécie de ocorrência natural no Brasil, sendo especialmente encontrada no Cerrado, área caracterizada por um longo período de tempo seco; e no Pantanal, que engloba regiões submetidas a um extenso período de inundação (ALMEIDA, 2014). A macaúba é encontrada em ambos os ambientes, o que demonstra sua grande capacidade de adaptação (RODRIGUES, 2018). Pode ser encontrada em todo território nacional, exceto na região sul. Apresenta concentrações mais expressivas em Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso,

Mato Grosso do Sul, São Paulo e Tocantins (CICONINI, 2012). O desenvolvimento do fruto de macaúba é lento, apresentando duração de quase 1 ano, ao final do qual ocorre a abscisão natural dos frutos (EMBRAPA, 2020). Com relação à forma de colheita atual, a Embrapa (2020) apura que:

“Sua exploração ainda ocorre principalmente por meio da coleta dos frutos em grandes populações naturais (extrativismo). No sistema extrativista, a maior parte dos frutos é coletada no solo”. (EMBRAPA, 2020)

Ainda que seja possível observar fruto o ano todo, a safra ocorre principalmente entre os meses de setembro e janeiro, a depender da localização geográfica (FONSECA, 2016; MOTA, 2022). Sua vida útil de exploração é superior a 25 anos (RODRIGUES, 2019).

Os frutos de macaúba são formados aproximadamente por 40% de polpa, 7% de amêndoa, 33% de endocarpo e 20% de casca (CICONINI, 2012). A partir do processamento do fruto é possível obter óleo vegetal, torta, ambos provenientes da polpa e da amêndoa, e endocarpo, biomassa densa que pode ser pirolisada (INOCAS, 2019; MATOS, 2018). No país, é considerada uma das espécies de palmeira com maior potencial de produção de óleo vegetal, sendo este proveniente da polpa e da amêndoa. Rodrigues (2018) observa que:

“Vários estudos indicam que os frutos de macaúba apresentam de 9% a 26%, em massa, de teor de óleo (base úmida) com um valor médio de 19%, em massa, de teor de óleo. Já em base seca, a polpa produz 46% a 78%, em massa, de óleo com um valor médio de 59%, em massa, enquanto da amêndoa consegue-se extrair de 43% a 60%, em massa, de óleo com um valor médio de 53%.”. (RODRIGUES, 2018).

A macaúba apresenta elevada produtividade de óleo, com potencial de produção entre quatro e seis toneladas de óleo por hectare, ao menos 10 vezes mais que a soja (RODRIGUES, 2017). Segundo informações do Portal Embrapa (2014):

“Com uma produtividade média geral de 114,1 kg/planta/ano, a produtividade esperada é de pelo menos 45,6 toneladas/hectare de cachos para uma densidade de cultivo de 400

plantas/hectare. Se for considerada uma eficiência de 70% da extração, o rendimento bruto de óleo por prensagem do fruto fresco poderá atingir 4 toneladas de óleo/hectare/ano da polpa e 0,8 tonelada de óleo/hectare/ano da amêndoa.”(JUNQUEIRA, 2014).

Emprapa (2022) relaciona uma lista de organizações e empresas que trabalham por uma nova cadeia produtiva de macaúba no país, sendo estas: Soleá (que originou a *startup* S.Oleum); Empresa Inocas; Acros (surgiu a partir do Instituto Agrônômico de Campinas); Cooperativa de Agricultores Familiares e Agroextrativista Ambiental do Vale do Riachão Ltda (conhecida por Cooperrriachão); Associação de Pequenos Produtores Rurais de Riacho D’antas e Adjacências.

4.1.2. Gorduras e óleos residuais

Os resíduos aqui considerados são vetores energéticos de duas diferentes classes: i) gordura animal, como bovina, suína, de aves e peixes; e ii) óleo usado de frituras (UCO).

Gorduras animais são compostas por uma grande quantidade de ácidos graxos saturados, fazendo com se solidifiquem a temperaturas mais baixas que os óleos vegetais, os quais apresentam em sua composição grande quantidade de ácidos graxos insaturados (REGATIERI, 2016). São pré-tratados em processos de renderização⁹. Para o desenvolvimento deste trabalho optou-se por considerar apenas os óleos vegetais residuais em função de maior disponibilidade de literatura sobre coprocessamento deste vetor energético.

O óleo vegetal residual é proveniente de atividades comerciais e domésticas que utilizam óleo vegetal comestível. Segundo Disconzi (2014), o Brasil produz em torno de 3 bilhões de litros de UCO por ano. Rocha (2021) calcula ainda que o país descarte cerca de 1 bilhão de litros de UCO ao ano.

Por outro lado, a infraestrutura de coleta de óleo vegetal residual ainda é insipiente no país (JULIO et al., 2022). Disconzi (2014) estima que apenas 6,5 milhões de litros é anualmente coletado/descartado de forma correta, traduzindo-se em uma taxa de coleta

⁹ Empresas de renderização ou graxarias são entidades que coletam e processam ossos, gorduras, sangue e outros subprodutos de açougues, peixarias e matadouros, transformando estes subprodutos em sebo, que usualmente são utilizados para produção de ração animal ou adubo. (REBOUÇAS et al., 2010)

em torno de 0,2% do óleo vegetal consumido¹⁰. Estudo mais atual estima que o volume de óleo saturado usado destinado corretamente esteja no mesmo nível, em torno de 6 milhões e meio de litros (OLIVEIRA; ANDRADE; SANTOS, 2022).

O volume atualmente descartado poderia, em parte, representar oferta destinada à produção de combustíveis renováveis com investimento em infraestrutura para coleta e captação deste produto (UFJF, 2022).

4.1.3. Biomassa lignocelulósica

Mesa et al (2003) definem biomassa como:

“Toda matéria orgânica de origem vegetal ou animal, inclusive os materiais procedentes de sua transformação natural ou artificial.
(MESA et al., 2003).

A biomassa lignocelulósica é uma mistura de polímeros naturais de carboidratos conhecidos como celulose, hemicelulose, lignina e quantidades menores de outras substâncias como cinzas e extrativos (MESA et al., 2003). A biomassa lignocelulósica é uma matéria prima abundante, pois provém de resíduos agrícolas/florestais e da produção de combustíveis de primeira geração.

A biomassa armazena energia solar em forma de energia química ou bioenergia a partir da fotossíntese. A bioenergia contida na biomassa pode ser recuperada por meio de processos termoquímicos. Existem dois métodos termoquímicos para produção de bio-óleo: pirólise rápida (ALMEIDA, 2008) e liquefação hidrotérmica (HTL) (HUANG; YUAN, 2015). A rota via pirólise requer secagem da matéria prima, o que aumenta o consumo de energia do processo (SABER; NAKHSHINIEV; YOSHIKAWA, 2016). Por outro lado, liquefação hidrotérmica ocorre em ambiente aquoso, o que favorece o uso de biomassa úmida. O bio-óleo obtido através da liquefação possui menor teor de oxigênio e maior poder calorífico se comparado ao bio-óleo de pirólise rápida, contudo o uso de

¹⁰ Os dados apresentados levam a conclusão de que aproximadamente apenas 33% do óleo vegetal consumido pode ser recuperado em forma de resíduo, com o restante sendo retido no processo de preparo e no alimento. Esta consideração é confirmada em literatura, a qual contabiliza uma taxa de recuperação de óleos vegetal residual em torno de 30%. (HILLAIRET; ALLEMANDOU; GOLAB, 2017).

catalisadores¹¹ adequados no processo de pirólise da biomassa permite a obtenção de um bio-óleo com menor teor de compostos oxigenados (melhor qualidade) e maior rendimento (MORAES, 2017). A biomassa destinada ao processo de pirólise rápida tem como principais requisitos a umidade menor que 6%-8% e o pequeno tamanho relativo (poucos milímetros) (RUTZ et al., 2020). Ainda, ambas as rotas de produção citadas permitem utilizar resíduos que não competem com produtos alimentares, para produção de combustíveis.

Outra rota possível que leva à produção de bio-óleo utiliza algas como matéria prima, apresentando-se na forma de microalgas e macroalgas (SCOTT et al., 2010). Estes últimos formam estruturas complexas e apresentam-se como organismos multicelulares enquanto as microalgas são unicelulares. Nos últimos anos, a produção de biocombustíveis a partir de algas apresentou crescente interesse em função de avanço nas pesquisas identificando rápida taxa de crescimento de algumas espécies em ambientes inóspitos, não competindo com a produção de alimentos (CAMPBELL; BEER; BATTEN, 2011; SCOTT et al., 2010). Contudo, a alta pressão requerida no processo resulta em alto custo (SABER; NAKHSHINIEV; YOSHIKAWA, 2016). Desta forma, as rotas que utilizam algas como matéria prima não serão consideradas no escopo deste trabalho, podendo ser tratadas em análises posteriores.

Os mais variados tipos de biomassa podem ser aproveitados como matéria prima na produção de bio-óleo via pirólise rápida, tais como tortas resultantes da prensagem de oleaginosas, palha e bagaço da cana de açúcar, serragem de madeira, palha de trigo, sabugo de milho, palha de sorgo, dentre outros (ALMEIDA, 2008; SANTOS, 2011). De forma geral, a oferta de biomassa lignocelulósica é elevada, com destaque para a palha da cana-de-açúcar em função de sua alta disponibilidade, além de sua queima apresentar-se como problema ambiental (ALMEIDA, 2008). Ainda, o bagaço da cana é utilizado para geração de energia elétrica nas usinas, porém a palha é um resíduo menos aproveitado pela indústria sucroalcooleira.

A utilização de biomassa lignocelulósica para produção de bio-óleo recebe destaque como uma das soluções possíveis para o gerenciamento de resíduos (FACCINI, 2012).

¹¹ Segundo Moraes (2017) muitos catalisadores têm sido testados no processo de pirólise catalítica como os zeolíticos (ZSM-5, zeólita beta, zeólita Y, ferrierita) e os mesoporosos (AI-MCM-41, SBA-15, MF1)

Por outro lado, alguns resíduos não podem ser completamente removidos do campo em função do serviço ambiental que oferecem (ROOZEN, 2015):

- Material orgânico é decomposto, devolvendo nutrientes ao solo.
- Protege o solo contra erosão hídrica e eólica.
- A cobertura de resíduos no campo também pode reduzir evaporação na superfície, contribuindo na conservação da humidade do solo.

Roozen (2015) estudou o destino de cada tipo de biomassa lignocelulósica residual produzida no Brasil, estimando que 70% dos resíduos agrícolas permaneciam no local de colheita, enquanto 50% dos resíduos florestais deviam permanecer no campo. Considerando estimativas de geração e uso destes resíduos, o trabalho calculou a oferta de biomassa lignocelulósica sustentável, que neste trabalho convencionou-se chamar de oferta líquida. A oferta sustentável/líquida dimensiona o volume disponível não concorrente com destinos usuais. Conforme o estudo, o maior volume de resíduo agrícola gerado, bagaço de cana, é 90% destinado à geração de eletricidade em usinas. A Tabela 8 sintetiza a oferta líquida por tipo de resíduo e origem de geração.

Tabela 8 - Oferta líquida de biomassa lignocelulósica no Brasil ao ano

Biomassa	Tipo de resíduo	poder calórico inferior (MJ/Kg)	Bahia	Espírito Santo	Minas Gerais	São Paulo	Paraná	Santa Catarina	Rio Grande do Sul	Total
Cana de açúcar	Bagaço	17,71	1,03	0,7	10,58	60,92	7,19	0,07	0,15	
	Palha	17,38	0,27	0,19	2,81	16,16	1,91	0,02	0,04	
Soja	Palhada	12,38	0,96	0	0,91	0,47	3,25	0,32	1,77	
Milho	Espiga	17,45	0,48	0,02	1,99	1,16	4,3	0,75	0,82	
	Casca	12	0,1	0	0,41	0,24	0,88	0,15	0,17	
Mandioca	Palha	17,5	0,48	0,04	0,18	0,29	0,84	0,11	0,26	
Arroz	Palhada	16,62	0,01	0	0,02	0,04	0,06	0,35	2,48	
	Casca	14,17	0,01	0	0,01	0,03	0,04	0,24	1,65	
café	Casca	17,71	0,03	0,15	0,3	0,05	0,02	0	0	
Laranja	Casca	17,71	0,09	0	0,08	1,2	0,08	0,01	0,03	
		Total MT)	3,46	1,1	17,29	80,56	18,57	2,02	7,37	130,37
		Total (PJ)	55	19	297	1.417	304	32	111	
Total resíduos agrícolas (PJ)										2.237
Resíduos florestais		18,615	0,98	0,37	1,62	2,94	4,15	2,48	1,05	
		Total MT)	0,98	0,37	1,62	2,94	4,15	2,48	1,05	13,59
		Total (PJ)	18	7	30	55	77	46	20	
Total resíduos florestais (PJ)										253

Fonte: Adaptado de Roozen (2015)

4.1.4. Pontuação nos Indicadores do macro critério Disponibilidade

4.1.4.1. Oferta de matéria prima

O IBGE (2022) consolida dados da Produção Agrícola Municipal (PAM) anual de oleaginosas com produção comercial¹². A produção anual de soja é de 129.926.633 toneladas por ano em média, considerando-se os últimos três anos. A produção de palma foi de 2.887.696 toneladas em 2021 (recorde histórico), com estado do Pará concentrando quase toda produção nacional. Com relação à macaúba, não existe produção comercial no país (SOUZA, 2019).

Com relação à biomassa lignocelulósica, Roozen (2015) estimou uma oferta líquida da ordem de 143.960.000 toneladas, no país.

A partir destas informações, a oferta de matéria prima foi calculada em base anual, utilizando-se a escala de pontuação adotada na Tabela 9.

Tabela 9 - Escala de notas par ao indicador Oferta de matéria prima

Oferta de matéria prima	Toneladas comercialmente disponíveis ao ano	Nota
Muito baixa	Sem produção comercial	1
Baixa	até 10 milhões	2
Média	de 10 a 50 milhões	3
Alta	de 50 a 100 milhões	4
Muito alta	acima de 100 milhões	5

Fonte: elaboração própria

Considerando-se os dados de produção para cada matéria prima é possível atribuir as notas exibidas na Tabela 10.

Tabela 10 - Pontuação para o indicador “Oferta de matéria prima”

Matéria Prima	Pontuação
Soja	5
Palma	2
Macaúba	1
Biomassa lignocelulósica	5

Fonte: elaboração própria

¹² A produção das oleaginosas foi apurada em termos de grãos para a soja, cachos para a palma

4.1.4.2 Sazonalidade de matéria prima

Este indicador tem por objetivo qualificar se a matéria prima produzida na estação de menor produtividade altera de forma significativa a oferta. Desta forma, foi criada uma escala de classificação onde a menor nota reflete sazonalidade muito alta, com impacto negativo na disponibilidade. Em sentido oposto, a maior nota reflete sazonalidade muito baixa ou inexistente. Para isto, foi aplicada escala de notas de 1 a 5, obedecendo-se aos seguintes critérios:

- i) sazonalidade muito baixa ou inexistente: com oferta ao longo de todos os meses do ano, recebendo nota 5.
- ii) sazonalidade baixa com oferta ao longo de todos os meses do ano, porém com intervalos de colheita, recebendo nota 4.
- iii) sazonalidade intermediária: ao menos 6 meses consolidando o mínimo de 50% da produção anual, ao longo de 1 ano, recebendo nota 3.
- iv) sazonalidade alta: ao menos 6 meses consolidando o mínimo de 10% da produção anual, ao longo de 1 ano, recebendo nota 2.
- v) sazonalidade muito alta: ao menos 6 meses consolidando nenhuma produção, ao longo de 1 ano, recebendo nota 1.

Com relação às oleaginosas, é possível observar o seguinte:

- O período de colheita da palma se dá ao longo dos 12 meses do ano (CÉSAR et al., 2015), enquanto a colheita da macaúba ocorre principalmente entre os meses de setembro e janeiro (FONSECA, 2016).
- A colheita da soja ocorre em torno de quatro meses, variando por região (CONAB, 2019). Porém, 90% da produção se concentra entre os meses de janeiro a maio, no país (IBGE, 2022).

Em tratando-se especificamente da Palma, Filho (2020) observa que:

“Estudos mostram diferenças significativas em variáveis de crescimento e produção de biomassa ligados a frequências de corte da palma forrageira, tanto em cultivo de sequeiro, quanto irrigado. Em levantamento realizado por Ramos et al. (2014), 52,9% dos produtores realizavam a colheita com frequência entre

2 e 3 anos, enquanto 35,3% faziam com menos de um ano e 11,8% colhiam com mais de três anos.” (FILHO, 2020).

A biomassa lignocelulósica pode ser colhida em diferentes épocas e armazenada por um longo tempo sem a necessidade de processamento imediato. Resíduos lignocelulósicos podem ser comprimidos ou densificados em pellets (CORTEZ, 2014), o que facilita transporte e armazenagem, garantindo disponibilidade ao longo de todo ano.

A partir das matérias primas consideradas na análise multicritério, foi aplicada a escala de notas conforme Tabela 11, atribuindo-se pontuação para cada alternativa:

Tabela 11 - Escala de notas e pontuação para o indicador Sazonalidade

Matéria Prima	Oferta em todos os meses do ano	Estação de menor produtividade		Nota	Classificação de
		Duração	Produção		
Macaúba	Não	7 meses	0	1	Muito Alta
Soja	Não	6 meses	10% do total anual	2	Alta
-	-	6 meses	50% do total anual	3	Mediana
Palma	Sim, contudo requer intervalos de corte, que podem variar de forma significativa, levando a diferentes			4	Baixa
Biomassa lignocelulósica	Sim			5	Muito baixa ou inesistente

4.1.4.3. Competição com setor agropecuário

Neste indicador é avaliada a existência de competição já estabelecida da matéria prima com o setor agropecuário, de maneira que possa reduzir a disponibilidade do vetor energético para uso no coprocessamento. Desta forma, potencial competição agropecuária com coprodutos gerados na produção do vetor energético naturalmente não recebe penalização na nota. A penalidade é atribuída (nota baixa) apenas no caso em que competição possa diminuir a disponibilidade do vetor energético. Sendo assim, este é um indicador apto a diferenciar matérias primas e vetores energéticos.

Trata-se de um critério intrinsecamente qualitativo. Para torná-lo quantitativo partindo de um ponto de vista conservador (assumindo que a existência de competição privilegia o uso agropecuário), foi atribuído valor 1 quando existe competição com o setor agropecuário, valor 5 quando essa competição é inexistente ou valor 3 quando a competição é possível, porém não é tão significativa pois o destino agropecuário não representa atualmente o uso principal.

A soja apresenta competição com setor agropecuário, onde se destacam duas características (HIRAKURI; LAZZAROTTO, 2014): 1) O grão de soja contém teor de

proteínas elevado, em torno de 40%, o que aumenta o seu valor tanto para alimentação humana como animal. 2) A alimentação é o destino de 82% do óleo de soja produzido no mundo.

Com relação ao óleo de palma, Feroldi et al (2014) reportam que quase 90% da produção mundial é destinada ao uso alimentar. De forma análoga, Silva (2022) observa que:

“Usinas produtoras de óleo de palma destinam a sua produção de preferência à indústria alimentícia, farmacêutica e química, opção mais rentável em virtude do alta preço do óleo de palma no mercado internacional”. (Silva, 2022).

Desta forma, tanto a soja como a palma receberam nota 1 neste indicador.

A macaúba, apesar de apresentar alto potencial para fornecimento de óleo, tem uma cadeia produtiva pouco explorada no país (CICONINI, 2012). No que diz respeito a fração oleosa da macaúba, Fonseca (2016) estudou a extração do óleo residual da torta da amêndoa e da polpa; e Callegari (2015) pesquisou a utilização do óleo da amêndoa para fabricação de cosméticos. O óleo de macaúba não tem presença significativa como opção alimentar humana, contudo, a torta residual proveniente da extração do óleo tem como principal uso a produção de farinha (PORTAL MACAÚBA - CERRATINGA). Desta forma, atribuiu-se nota 3 à macaúba.

O volume de biomassa lignocelulósica considerada disponível, definida como oferta sustentável ou líquida, não sofre competição com outros usos, recebendo por isso a nota 5. Óleo vegetal residual também não apresenta competição agroindustrial, sendo um resíduo da indústria de alimentos. Desta forma, recebeu nota 5.

A Tabela 12 sintetiza a pontuação para as alternativas diferenciadas por este indicador:

Tabela 12 - Notas do indicador "Competição com o setor Agropecuário"

Matéria Prima	Vetor energético	Nota
Soja	Óleo Vegetal	1
	Óleo Vegetal Residual	5
Palma	Óleo vegetal	1
	Óleo Vegetal Residual	5
Macaúba	Óleo vegetal	3
Biomassa Lignocelulósica	Bio--oleo	5

4.1.4.4. Oferta do vetor energético

A oferta do vetor energético foi mensurada em termos de produção em escala nacional.

Para o cálculo da oferta de óleos vegetais, demonstrado na Tabela 13, foram considerados parâmetros referentes à produtividade em óleo, ou seja, quantidade de óleo produzido por hectare cultivado, área da cultura plantada, fator de disponibilidade de óleo e eficiência de extração, representados pela Equação 1.

$$OOV = P \cdot A \cdot DO \cdot EE \quad (\text{Equação 3}) \quad \text{Onde:}$$

OOV: Oferta de óleo vegetal (10^3 toneladas)

P¹³: Produtividade (toneladas/hectare)

A¹⁴: Área cultivada (10^3 hectare)

DO¹⁵: Fator de disponibilidade de óleo (%)

EE¹⁵: Eficiência de extração (%)

Tabela 13 - Cálculo da oferta de óleo vegetal

Cultura	P	A	DO (%)	EE (%)	OOVano	OOVdia
Soja	0,56	39324	15%	95%	3138	8,6
Palma	4	192,6	15%	95%	110	0,30
Macaúba	4	0	15%	95%	0	0

Como não existem unidades produtoras de bioóleo no país, a oferta desta corrente foi considerada extremamente baixa. O volume de UCO coletado anualmente corresponde a estimativa na ordem de apenas 6,5 milhões de litros (conforme descrito no capítulo 4.1.2), portanto não é capaz de gerar oferta em escala comercial, recebendo nota 1.

Desta forma, a escala de pontuação e notas deste critério, para cada alternativa considerada, são demonstradas na Tabela 14.

¹³ (CÉSAR, 2015; SOUZA, 2019)

¹⁴ IBGE/SIDRA. Macaúba foi considerado nulo por não apresentar produção comercial no país (SOUZA, 2019).

¹⁵ Carvalho et al. (2021).

Tabela 14 - Escala de pontuação e notas do critério “Oferta do vetor energético”

Oferta do Vetor	Desempenho volumétrico atual	Nota	Vetor
Sem oferta comercial	Considerado nulo	1	Óleo de Macaúba Bioóleo OVR
Oferta comercial incipiente	Pode atender no mínimo 5% da capacidade de unidade de processo com carga nominal de 5 mil toneladas/dia	3	Óleo de Palma
Oferta comercialmente desenvolvida	Capaz de atender a mais de 5% da capacidade ao menos uma unidade de processo com carga nominal de 5 mil toneladas/dia	5	Óleo de Soja

4.2. Logística de cada vetor energético

4.2.1. Indicadores do macro critério Logística do vetor energético

O macro critério “Logística do vetor energético” é composto por três indicadores, cujos cálculos são detalhados a seguir.

4.2.1.1 Escala de processamento nas unidades existentes

Este indicador foi mensurado a partir de dois componentes: 1) capacidade de empresas processadoras de óleo bruto¹⁶ em cada estado, onde a maior capacidade próxima ao refino proporciona notas superiores ao indicador; 2) capacidade de processamento em cada unidade de refino, para a qual uma superior capacidade, em termos volumétricos absolutos, viabiliza a formação de maiores lotes.

A capacidade de empresas processadoras de óleo bruto reflete características típicas deste seguimento, que busca localização próxima a regiões produtoras, economia de escala, redução de capacidade ociosa e liderança em custos, gerando produtos homogêneos como farelo e óleo vegetal. (SEDIYAMA, 2013). Por sua vez, a capacidade

¹⁶ Empresas processadoras são popularmente conhecidas como refinadores de óleo vegetal bruto, executando atividades de esmagamento e refino desta corrente (SEDIYAMA, 2013). Contudo, para fins didáticos, este trabalho reserva a expressão refino ao processamento executado dentro de refinarias de petróleo.

de processamento no refino é função da capacidade das unidades de processo (Tabela 2) e do limite percentual de processamento (Tabela 3)

Para cálculo da pontuação do indicador, foram feitas as seguintes considerações.

- Vetores com oferta comercial nula receberam nota 1. Para os demais casos, foi feita ponderação (média aritmética) entre os dois componentes: concentração de empresas processadoras e capacidade de processamento no refino.
- O componente “capacidade de empresas processadoras” foi classificado em 3 estágios, enquadrando as informações levantadas (para cada estado) a esta segmentação: baixa – recebendo nota 1, média – recebendo nota 3 e alta – recebendo nota 5.
- O componente “capacidade de processamento no refino” foi classificado em 3 estágios, enquadrando as informações levantadas (para cada unidade de processo) a esta segmentação: baixa – recebendo nota 1, média – recebendo nota 3 e alta – recebendo nota 5.

A capacidade de empresas processadoras de óleo de soja em cada estado foi calculada a partir de percentuais obtidos de ABIOVE (2022), multiplicados à oferta do vetor energético resultante da Equação 3, com detalhamento apresentado no Anexo II.

A proximidade (de empresas processadoras de óleo vegetal bruto) ao refino considerou o volume disponível dentro do mesmo estado, conforme ilustrado na Figura 10.

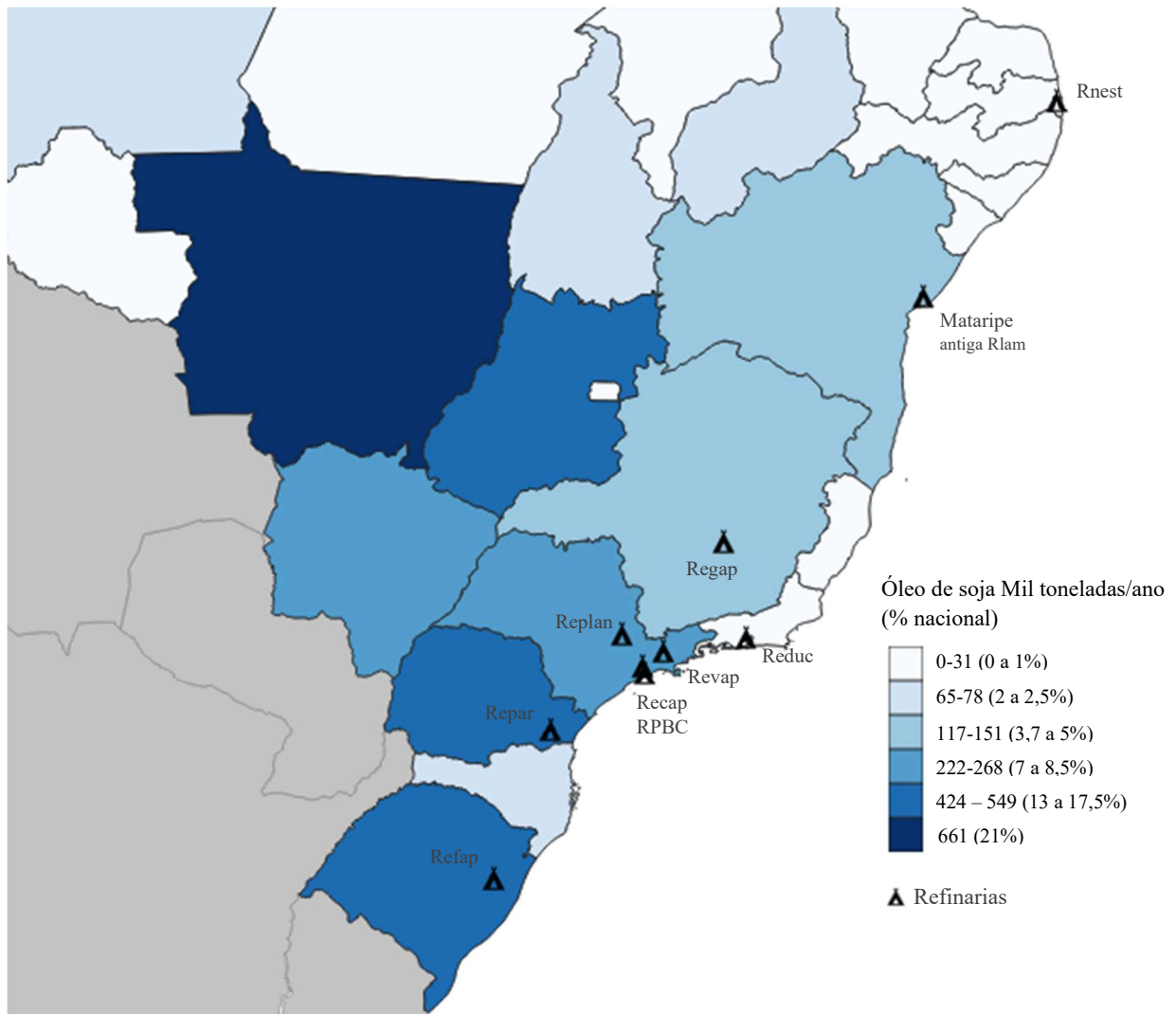


Figura 10 - Capacidade (e % de cap) de processamento de óleo vegetal bruto por estado

Fonte: Adaptado de ABIOVE (2022).

Para a macaúba, o processamento do óleo vegetal bruto se encontra próximo ao local de cultivo, logo, distantes de todos as regiões de refino.

A capacidade de processamento de óleo vegetal, apresentada na Tabela 15, foi calculada por unidade de processo, levando em consideração a capacidade das unidades de processo (Tabela 2), multiplicada pelos limites de processamento (Tabela 3).

Tabela 15 - Capacidade de processamento de óleo vegetal por unidade

Refinaria	Mil toneladas/ano		
	FCC	HDTK	HDTD + HDTU
REFAP	112		289
REPAR	347		198
RLAM	198		16,5
RNEST	0		214,5
REDUC	248	29,5	247,5
REGAP	225	59,5	180
REPLAN	529		363,5
REVAP	463	99	220
RPBC	330		264,5
RECAP	102		66

As alternativas para as quais não exista oferta comercial do vetor energético receberam nota 1 no indicador, como é o caso das alternativas contendo óleo de macaúba, bio-óleo e OVR (conforme demonstrada no capítulo 4.1).

Feitas estas considerações, a escala de notas traduziu-se em uma classificação final com notas variando de 1 a 5, conforme Tabela 16.

Tabela 16 - Escala de notas do indicador "Escala de processamento nas unidades existentes"

Vetor	Oferta comercial	Nota - Capacidade de empresas processadoras	Região de Refino	Unidade de processo	Nota - Capacidade de processamento no refino	Nota no indicador
Bio-óleo	Nula	-	-	-	-	1
OVR						
Óleo de macaúba						
Óleo de soja	Nã	3	SP	FCC + HDT	5	4
		3	SP	HDT	5	4
		5	SUL	FCC + HDT	3	4
		5	SUL	HDT	3	4
		1	MG	FCC + HDT	1	1
		1	MG	HDT	1	1
		1	RJ	FCC + HDT	1	1
		1	RJ	HDT	1	1
		1	Nordeste	FCC + HDT	1	1
		1	Nordeste	HDT	1	1
Óleo de Palma	Nã	1	SP	FCC + HDT	5	3
		1	SP	HDT	5	3
		1	SUL	FCC + HDT	3	2
		1	SUL	HDT	3	2
		1	MG	FCC + HDT	1	1
		1	MG	HDT	1	1
		1	RJ	FCC + HDT	1	1
		1	RJ	HDT	1	1
		1	Nordeste	FCC + HDT	1	1
		1	Nordeste	HDT	1	1

4.2.1.2 Custo do vetor energético

Kargbo et al (2021) observam que o alto custo de produção de combustíveis *drop-in* está associado ao alto custo do vetor energético, especialmente vetores relacionados às matérias primas de primeira geração.

O mercado de óleos vegetais é balizado principalmente por preços dos óleos de soja e palma no mercado internacional, onde o óleo de soja é usualmente mais elevado¹⁷(STONEX, 2020). A literatura descreve que:

‘O óleo de soja e o óleo de palma são considerados produtos substitutos, isto é, as indústrias processadoras são capazes de alterar a demanda entre os dois de acordo com o que apresentar o preço mais competitivo. Esta premissa faz com que os preços das duas commodities tenham uma alta correlação ao longo do tempo (cerca de 95% entre os preços futuros desde 1999), devendo, assim, limitar grandes variações no spread entre estes dois óleos’. (STONEX, 2020).

No caso da macaúba, observam-se que há escassez de dados econômicos disponíveis em literatura, uma vez que se trata de uma cultura comercialmente não desenvolvida no país. Contudo, existem referências de que a cotação do óleo de macaúba assemelha-se à cotação do óleo de palma (DÍAZ, 2016).

Analisando-se os óleos vegetais acompanhados pela FAO (Food and Agriculture Organization), é possível observar que esta cesta de óleos apresentou o maior patamar de preços da história, resultando em uma valorização acumulada em torno de 140% no início de 2022, considerando-se os 20 meses anteriores (BIODIESELBR, 2022a). Contudo, de abril a agosto do referido ano, a mesma cesta se desvalorizou em 35%, alcançando o menor valor desde julho de 2021(BIODIESELBR, 2022b). Este cenário de preços elevados dos óleos vegetais desfavorece seu uso para produção de combustíveis, o que nos leva a atribuir nota mais baixa a vetores desta natureza.

Avaliando uso de WCO na produção de biodiesel, Sharma et al. (2021) estimaram que o custo deste vetor energético fique em torno de 2 a 3 vezes inferior, se comparado ao óleo vegetal que o originou. De forma similar, comparando custos de produção de

¹⁷ Contudo, inversões podem ser observadas a depender de fundamentos de mercado. Em 2020, o farelo de soja mais valorizado incentivou maior esmagamento, o que por sua vez aumentou a oferta do óleo de soja, reduzindo o preço desta commodity. (STONEX, 2020)

biocombustíveis avançados por diferentes rotas, Witcover e Williams (2020) estimaram custos de bio-óleo na ordem de metade dos custos de vetores energéticos utilizados na rota HEFA (óleos vegetais).

Segundo o contexto apresentado é possível considerar:

- Cenário de preços elevados dos óleos vegetais não residuais, com pouca diferenciação entre eles.
- Custo de óleo vegetal residual de 2 a 3 vezes menor que o custo do óleo vegetal de origem (SHARMA et al., 2021).
- Custos de bio-óleo na ordem da metade dos custos de vetores energéticos utilizados na rota HEFA (WITCOVER E WILLIAMS, 2020).

Desta forma foram atribuídas as notas ao indicador custo do vetor energético, conforme demonstrado na Tabela 17.

Tabela 17 - Notas do Indicador "Custo do Vetor energético"

Matéria Prima	Vetor energético	Nota
Soja	Óleo de soja	2
Palma	Óleo de palma	2
Macaúba	Óleo de Macaúba	2
Oleaginosas	OVR	5
biomassa lignocelulósica	bio-óleo	4

4.2.1.3 Estabilidade térmica-oxidativa do vetor energético

A estabilidade de correntes renováveis destinadas ao coprocessamento podem acarretar problemas na estocagem em função de mudanças em parâmetros como: viscosidade, densidade, acidez, formação de polímeros (BEZERGIANNI et al., 2018). As propriedades de compostos graxos são determinadas pela composição dos ácidos graxos presentes. Por exemplo, um alto teor de ácido linoléico diminui a estabilidade térmica/oxidativa, ao mesmo tempo em que altas temperaturas podem acelerar a taxa de oxidação, a depender do número e posição das ligações duplas. (MELERO et al., 2010).

Na exposição ao ar, compostos graxos insaturados podem ainda formar espécies oxigenadas e produtos degradados, que possuem tendência de elevar acidez. A acidez é uma qualidade que impacta tanto aspectos logísticos (requer atenção especial em linhas e tanques utilizados) como o processamento (BEZERGIANNI et al., 2018). Demanda

atenção, mas pode ser mitigada a partir dos mesmos métodos utilizados para frações fósseis, tais como, adaptação metalúrgica de materiais e o uso de inibidores de corrosão (BEZERGIANNI et al., 2018)

Segundo Bezergianni (2013), o bio-óleo é instável em estocagens de longo prazo. Analogamente, a literatura conclui que o bio-óleo “envelhece” com o passar do tempo, durante a estocagem. A taxa de envelhecimento do bio-óleo depende da matéria-prima que o originou, das condições operacionais do processo de pirólise e da eficiência de remoção de sólidos/cinzas¹⁸ e principalmente da temperatura, sendo este o fator mais importante (OASMAA; CZERNIK, 1999). A literatura cita o exemplo do óleo de pirólise proveniente de madeira de lei, cuja viscosidade dobra: i) após um ano de estocagem em temperatura ambiente ou 2) após uma semana estocado a 60 °C ou 3) após um dia ao ser estocado a 80 °C. (OASMAA; CZERNIK, 1999).

A literatura explica o processo de envelhecimento e formação de polímeros:

“As principais reações químicas observadas no processo de envelhecimento são a polimerização e esterificação, em que a água é formada como subproduto, resultando em mudanças nas propriedades físicas, como aumento da viscosidade e do teor de água. Normalmente, a viscosidade do bio-óleo diminui com o teor de água, contudo a liberação de água observada durante o processo de envelhecimento é pequena e seu efeito é compensado pelo aumento do peso molecular médio do óleo.”. Livre tradução de OASMAA; CZERNIK (1999).

Melero et al., (2010) investigaram a estabilidade térmica/oxidativa de misturas de óleo vegetal, gordura animal e UCO com cargas fósseis. O procedimento utilizado no referido estudo permitiu reproduzir um período de seis meses de estocagem. Com relação à viscosidade, o estudo demonstrou que a mistura com óleo de soja apresentou maior variação (se comparado às demais correntes), provavelmente em função de maior presença de triglicerídeos poli-insaturados no óleo de soja, indicando uma maior instabilidade. Contudo, os valores de viscosidade resultantes em todas as amostras (óleo vegetal, UCO e gordura animal) se mostraram dentro da faixa típica de cargas destinadas

¹⁸ VAN DYK et al., (2019b) também reportaram a importância do teor de cinzas em bio-óleos, pois podem contribuir para a polimerização, sendo importante removê-las de forma a favorecer a estabilidade de estocagem.

a unidades de processo. Com relação à acidez, o estudo conclui que a acidez naftênica de correntes fósseis tem um potencial corrosivo maior que ácidos graxos livres presentes nas correntes renováveis. Desta forma, como resultado geral, o estudo concluiu que essas misturas se mantêm estáveis em estoque a 77 °C por 180 dias, sugerindo que condições de temperaturas superiores sejam exploradas em estudos futuros.

Não há dados amplamente disponíveis na literatura comparando os vetores considerados nesta análise, em termos de estabilidade térmica/oxidativa. Desta forma, este trabalho diferencia apenas o bio-óleo dos demais, de forma a que óleos vegetais e OVR recebam classificação mediana, enquanto bio-óleo recebeu nota baixa, seguindo a escala de notas e pontuação conforme Tabela 18.

Tabela 18 - Escala de pontuação e notas para o Indicador Estabilidade

Estabilidade	Nota	Vetores
Baixa	1	Bio-óleo
Mediana	3	Óleos Vegetais e OVR
Alta	5	-

4.3. Critérios técnicos de cada rota

As rotas consideradas são as seguintes: 1) HVO para produção de diesel; 2) HEFA para produção de QAV; 3) HVO para produção de Bunker (combustível marítimo); 4) HDCD para produção de diesel; 5) HDCJ para produção de QAV; 6) HDPO para produção de bunker.

De forma geral, os critérios técnicos da rota são diferenciados nos seguintes níveis: vetor energético, unidade de processo e produto. Este macro critério não é capaz de diferenciar ao nível de matéria prima ou refinarias. A Tabela 19 consolida as alternativas referentes aos níveis diferenciados:

Tabela 19 - Alternativas diferenciadas em Critérios Técnicos da rota

Matéria prima	Vetor Energético	Rota/derivado principal
Soja	Óleo vegetal	HVO/Diesel
Soja	Óleo vegetal	HEFA/QAV
Soja	Óleo vegetal	HVO/Bunker
Macaúba	Óleo vegetal	HVO/Diesel
Macaúba	Óleo vegetal	HEFA/QAV
Macaúba	Óleo vegetal	HVO/Bunker
Soja	OVR	HVO/Diesel
Soja	OVR	HEFA/QAV
Soja	OVR	HVO/Bunker
Biomassa lignocelulósica	Bio-óleo	HDCD/Diesel
Biomassa lignocelulósica	Bio-óleo	HDCJ/QAV
Biomassa lignocelulósica	Bio-óleo	HDPO/Bunker

4.3.1. Maturidade tecnológica da rota

O US Department of Energy (2011) traz as seguintes definições para a maturidade tecnológica, conhecida pela sigla TRL (*Technology Readiness Level*):

- TRL 1: Fase em que se encontra a pesquisa básica, sendo o nível mais inferior de prontidão tecnológica
- TRL 2: Nesta etapa o conceito tecnológico foi estabelecido, a partir da observação de princípios básicos. Aplicações práticas, ainda que especulativas, podem ser formuladas. Nesta etapa ainda não foi feita a prova de conceito
- TRL 3: Fase que contempla estudos analíticos ou de escala laboratorial, para fins de fundamentação de conceitos críticos e validação de componentes tecnológicos
- TRL 4: É a primeira de três etapas (TRL 4 a TRL6), na qual se verifica se os componentes podem formar um sistema tecnológico funcional.
- TRL 5: Continuação direta da etapa anterior, com testes em ambiente de escala reduzida, porém muito semelhante à aplicação final, simulando condições reais.

- TRL 6: Etapa que caracteriza a existência de um protótipo funcional. O avanço de TRL 5 para TRL 6 representa passagem de escala laboratorial para escala de engenharia.
- TRL 7: Nesta fase ocorre a demonstração do protótipo em um ambiente operacional, com escala e condições reais.
- TRL 8: Nível em que a tecnologia foi testada e qualificada como pronta para implementação.
- TRL 9: Último nível de desenvolvimento tecnológico. Este nível de maturidade tecnológica apresenta um sistema funcionando em todas as reais condições para o qual foi desenvolvido.

Aos níveis de prontidão tecnológica foi aplicada escala a de pontuação consolidada na Tabela 20.

Tabela 20 - Escala de pontuação dos níveis de prontidão Tecnológica – TRL

Nível TRL	Marco	Desempenho	Pontuação
1	Pesquisa básica, princípios postulados, mas sem prova experimental	Pesquisa básica	1
2	Formulação Tecnológica, conceito e aplicação formulados		
3	Pesquisa aplicada, prova de conceitos a partir de resultados laboratoriais	Pesquisa aplicada/Bancada	2
4	Protótipo em pequena escala laboratorial		
5	Protótipo em larga escala laboratorial	Protótipo/Piloto	3
6	Protótipo funcional em sistema		
7	Sistema demonstração em escala de engenharia	Demonstração/Comercial	4
8	Escala de engenharia/Tecnologia qualificada		
9	Funcional em todas as condições reais	Plena operação	5

Fonte: Adaptada de US Department of Energy (2011)

À luz das definições apresentadas é possível identificar o nível de prontidão tecnológica de cada rota considerada deste trabalho.

A produção de diesel via HVO já é praticada comercialmente, tendo sido listadas na Figura 2 refinarias da União Europeia que operam esta rota. Desta forma, produção de diesel via HVO deve ser considerada em TRL 9. A produção de querosene de aviação via HVO ou rota HEFA, é testada, certificada internacionalmente pela ASTM D7566, e praticada comercialmente por isso pode ser considerada em TRL 9. Combustível marítimo também pode ser produzido por meio da rota HVO, contudo, como ainda se encontra em fase de estudos e testes é classificado em TRL 4 (WEI, 2021).

O processo de pirólise rápida, utilizado para produção de bio-óleo, demanda desenvolvimento tecnológico relacionado à maximização no rendimento de líquidos (comprometida pela presença de cinzas na matéria prima) e redução de instabilidade do bio-óleo (IRENA, 2016). Estas necessidades tecnológicas fazem com que a integração do processo de pirólise à produção de combustíveis renováveis ainda não esteja totalmente consolidada para aplicações em grande escala. E4tech, (2017) destaca dois principais desafios tecnológicos relacionados ao processamento do óleo de pirólise, 1) Desativação dos catalisadores em função do alto conteúdo de água e oxigênio do bio-óleo 2) baixa conversão de biocombustíveis. Diante destes desafios, sugere desenvolvimentos relacionadas à 1) melhorias no processo de pirólise rápida buscando diminuir conteúdo de água/oxigênio do vetor energético 2) melhorias na seletividade do catalisador. Adicionalmente, a integração da pirólise rápida com o refino requer diminuição do consumo energético (JULIO et al., 2022). Este contexto nos leva a atribuir TRL 4 à prontidão tecnológica das rotas HDCD e HDCJ para produção de diesel e QAV respectivamente (SOLANTAUSTA, 2001).

A produção de combustível marítimo via rota HDPO encontra-se em estágio ainda menos avançado carecendo de testes em motores para o desenvolvimento da tecnologia, sendo, desta forma, considerado em TRL 2 (WEI, 2021).

Com relação às rotas que utilizam unidade de FCC (seguidas por hidrotratamento) é possível observar o seguinte:

- Existe apenas uma experiência comercial reportada para coprocessamento de óleo vegetal em FCC, o que nos leva a atribuir TRL 8 para produção de diesel ou QAV. Para produção de bunker permanece a classificação de TRL 4, em função de combustíveis marítimos renováveis hidrotratados não ter ultrapassado fase de estudos e testes (WEI, 2021)

- Processamento de bio-óleo em FCC pode ser classificado em TRL 5, posto que a integração do processo de pirólise ao coprocessamento não está totalmente consolidada.

Feitas estas considerações, a Tabela 21 consolida a prontidão tecnológica para cada combinação de matéria prima/vetor energético/rota/produto considerado:

Tabela 21 - Notas do indicador "Maturidade tecnológica da rota "

Vetor Energético	Unidade de processo	Produto Principal	TRL	Nota
Óleo vegetal OVR	FCC/HDT	Diesel	8	4
	HDT	Diesel	9	5
	FCC/HDT	QAV	8	4
	HDT	QAV	9	5
	FCC/HDT	Bunker	4	2
	HDT	Bunker	4	2
Bio-óleo	FCC/HDT	Diesel	5	3
	HDT	Diesel	4	2
	FCC/HDT	QAV	5	3
	HDT	QAV	4	2
	FCC/HDT	Bunker	2	1
	HDT	Bunker	2	1

4.3.2. Qualidade do vetor energético

Os aspectos de qualidade considerados neste trabalho refletem características relacionadas à facilidade de coprocessamento do vetor energético, que podem se traduzir em custos adicionais. Neste aspecto, foram avaliados os seguintes atributos: i) necessidade pré-tratamento da carga; ii) demanda por adequações no sistema catalítico; e iii) baixa solubilidade do vetor energético em misturas com cargas fósseis (podendo requerer processo de alimentação não trivial da carga). A análise destes aspectos foi enquadrada na seguinte classificação e escala de notas:

- qualidade moderada, quando um atributo é observado => nota 3
- qualidade baixa, quando dois atributos são observados => nota 2
- qualidade muito baixa, quando os três atributos são observados => nota 1

Pré tratamento do óleo vegetal produz óleo vegetal refinado, ou seja, o que o mercado convencionou chamar de óleo vegetal refinado é a corrente produzida a partir de

processos de pré-tratamento (TIRITAN, 2020). A atual capacidade de refino (pré-tratamento) do óleo vegetal bruto no país é da ordem de 24 mil toneladas por dia (ABIOVE, 2022). Todas as cargas destinadas ao coprocessamento demandam algum tipo de pré-tratamento a fim de não contaminar catalisadores de processo (BIOFUELS INTERNATIONAL, 2021). O processo de pré-tratamento do HVO é semelhante ao utilizado no pré-tratamento do biodiesel FAME, com duas exceções (CROWN, 2022):

- i) o requisito de teor de metal é tipicamente mais rigoroso para diesel renovável, de modo que a etapa de degomagem/filtragem é modificada para remover ainda mais metais.
- ii) a especificação do diesel renovável normalmente não restringe a quantidade de ácidos graxos livres (FFA), desta forma, a etapa de remoção de FFA não é necessária¹⁹.

De forma geral, a primeira etapa de pré-tratamento de óleos vegetais é a remoção de fosfolipídios por métodos como degomagem, contudo, processos convencionais não são adequados para o tratamento de óleos vegetais residuais (BIODIESEL MAGAZINE, 2021). Existem variações evolutivas no processo de degomagem como *water degumming* e *acid degumming* (ZUFAROV; SCHMIDT; SEKRETÁR, 2008). O processo de *water degumming* faz a remoção de fosfolipídios solúveis em água, reduzindo conteúdos originalmente superiores a 1000ppm para 200ppm. A degomagem ácida promove a remoção dos fosfolipídios insolúveis em água, reduzindo o teor de fósforo para cerca de 30 ppm. Existem processos que reduzem o conteúdo de metais a teores inferiores a 1 ppm, como citado na patente da Nest (MALM, 2021). BDI- Bioenergy International, empresa especializada no tratamento de resíduos destinados à produção de diesel renovável, utiliza processos avançados de adsorção no tratamento de óleos vegetais residuais (BIOFUELS INTERNATIONAL, 2021).

Com relação ao esquema catalítico utilizado, a literatura estuda o coprocessamento de diferentes tipos de óleo vegetal em HDT sugerindo uso de catalisadores convencionais CoMo/NiMo em alumina para muitos deles, indicando, contudo, que seja preferível

¹⁹ Contudo, adaptações metalúrgicas podem ser necessárias em algumas unidades, a depender do grau de FFA existente na carga, em função do ambiente corrosivo potencialmente criado (CHAN,2021). A ausência de informações detalhadas sobre as unidades de processo atualmente existentes nas refinarias nos fez desconsiderar requisitos de adaptações metalúrgicas

operar em temperaturas mais elevadas²⁰. (BEZERGIANNI et al., 2018). Em unidades de FCC, adequação do sistema catalítico ao tipo de óleo vegetal coprocessado tem papel fundamental no rendimento dos produtos obtidos. (MALLESWARA RAO; DUPAIN; MAKKEE, 2012).

Por sua vez, o bio-óleo proveniente de pirólise rápida é tipicamente instável, possuindo alta densidade, alta viscosidade, alto conteúdo de água e tendência a formação de polímeros (IRENA, 2016). A complexa composição do bio-óleo e sua instabilidade de estocagem dificultam o *blending* direto com frações fósseis (VAN DYK, 2019). Sendo assim, a alta polaridade e o alto conteúdo de água do bio-óleo devem ser reduzidos (BEZERGIANNI et al., 2018). Além disso, bio-óleos são constituídos majoritariamente por compostos polares, insolúveis em frações fósseis não polares, o que demanda o uso de cossolventes como etanol²¹ em processos de hidrotreamento (PINHEIRO et al., 2013). A imiscibilidade do bio-óleo com hidrocarbonetos é uma característica que impede a injeção direta em unidade de FCC, demandando método de alimentação não trivial da carga (PINHO et al., 2015). Nos estudos realizados por PINHO et al. (2015), o coprocessamento em FCC de escala piloto foi viabilizado a partir da injeção segregada do óleo de pirólise no *riser* da unidade.

Adicionalmente, a literatura observa que catalisadores convencionais de hidrotreamento demonstram baixa eficiência para tratamento de bio-óleo. (MENDES, 2018). Com relação ao coprocessamento desta corrente em unidades de FCC a literatura destaca a desativação catalítica causada pelos metais presentes em bio-óleo como um desafio que requer estudos adicionais (PINHO et al., 2017).

Desta forma, pontuação foi atribuída ao critério qualidade do vetor energético conforme descrito na Tabela 22.

²⁰ De forma geral, entre 360-390 °C, favorecendo maior conversão e maior rendimento de líquidos orgânicos.

²¹ Nos estudos de Pinheiro et al (2013) etanol foi utilizado em proporção igual ao bio-óleo na carga, em 2,4% em massa, sendo a composição que maximizou estabilidade da emulsão.

Tabela 22 - Notas do indicador "Qualidade do vetor energético"

Vetor Energético	Unidade de processo	Atributos de qualidade	Nota
Óleo vegetal Óleo vegetal residual	FCC	Necessidade de pre-tratamento da carga Demanda por adequações em sistema catalítico, ajustando perfil de rendimentos	2
	HDT	Necessidade de pre-tratamento da carga	3
Bioóleo	FCC	Necessidade de pre-tratamento da carga Demanda por adequações em sistema catalítico Baixa solubilidade de mistura com caga fóssil	1
	HDT	Necessidade de pre-tratamento da carga Demanda por adequações em sistema catalítico Baixa solubilidade de mistura com caga fóssil (requer processo de alimentação não trivial da carga)	1

4.3.3. Conformidade regulatória

A pontuação aplicada ao indicador conformidade regulatória tem o objetivo de atribuir notas ao grau de alinhamento da rota a mecanismos que comprovem a origem renovável, incentivando o uso de combustíveis alternativos. Desta forma adotou-se a escala de pontuação do indicador conforme descrito na Tabela 23.

Tabela 23 - Escala de pontuação do indicador “Conformidade Regulatória”

Existência de mecanismos (regulação/padrões) que reconheçam/aproovem/incentivem origem renovável			
Nível de conformidade regulatória	Regulação Internacional	Regulação Nacional	Pontuação
Muito Baixo	Ausente	Ausente	1
Baixo	Em desenvolvimento	Ausente	2
Médio	Desenvolvida	Ausente	3
Médio	Em desenvolvimento	Em desenvolvimento	3
Alto	Desenvolvida	Em desenvolvimento	4
Muito Alto	Desenvolvida	Desenvolvida	5

Relevante considerar que o status “Desenvolvido” não pressupõe necessariamente uma regulação madura e estática. Metas de avanços nos mecanismos regulatórios são naturalmente estabelecidas e aguardadas, mesmo nestes casos. O que nos leva a considerar o status “Desenvolvido” é a abordagem do tema em regulação vigente.

Ao redor do mundo, políticas públicas têm desenvolvido regulações que impulsionam a produção de combustíveis renováveis. Nos Estados Unidos, há um

programa em âmbito nacional, intitulado *Renewable Fuel Standard* (RFS2), o qual concede créditos a produtos com baixa pegada de carbono (EPA, 2022). Este programa requer que produtores de biocombustíveis avançados reduzam emissões de GEE em ao menos 50%, enquanto biocombustíveis convencionais devem atingir meta de redução de ao menos 20%. A Califórnia possui legislação específica sobre o tema, a partir de um programa de incentivo denominado *Low Carbon Fuel Standard* (LCFS), o qual usa o conceito de intensidade de carbono baseando-se no ciclo de vida total do combustível (CARB, 2015). Na Europa o programa RED II incentiva a produção e uso de combustíveis que oferecem menor intensidade de carbono, com destaque a biocombustíveis avançados que utilizam resíduo como matéria prima (EC, 2018). Com relação às emissões de GEE, estipula que combustíveis renováveis devem emitir no mínimo: 1) 50% a menos que as alternativas fósseis, para plantas operacionalmente anteriores a outubro de 2015; 2) 60% a menos, para instalações que iniciaram operação após esta data; 3) 65% a menos para plantas que iniciaram operação após jan/2021

No Brasil, a inserção de biocombustíveis na matriz energética deu-se através de políticas públicas que estabeleceram teores de misturas obrigatórios de correntes renováveis em combustíveis fósseis (EPE, 2021). Analisando o histórico do Brasil, a primeira política pública implementada para incentivar o uso de combustíveis renováveis teve início na década de 1970, a partir do programa Próálcool. Mais tarde, instituído pela Lei n 11.097 de 13 de Janeiro de 2005, teve início o Programa Nacional de Produção e uso de Biodiesel (PNPB), promovendo o uso de ésteres de cadeia graxa como componente do diesel (BRASIL, 2005). Em 2017, foi instituído o programa RenovaBio a partir da Lei nº 13.576, visando a construção de diretrizes de curto, médio e longo prazos, com o objetivo de promover o uso dos combustíveis renováveis no país (BRASIL, 2017). Um instrumento estabelecido pelo programa, para atingir os objetivos propostos, foi a certificação da produção, a partir da qual atribui-se notas a cada produtor, inversamente proporcionais à intensidade de carbono do biocombustível produzido.

Em relação aos combustíveis de forma geral, é papel da ANP definir regras quanto a sua comercialização, especificações físico/químicas e fiscalização (SOARES; QUEIROZ PINTO JR; BOMTEMPO MARTINS, 2021). Por meio de consulta pública a ANP apresentou proposta estabelecendo obrigações e especificação de qualidade relacionadas ao diesel verde, levando à Resolução ANP no 842 de 2021 (ANP, 2021). A proposta era que a regulamentação passasse a incorporar a rota HVO na permissão de uso

dos biocombustíveis de ciclo diesel, indo além do biodiesel FAME (EPE, 2021). Em 2022 houve veto ao 2º artigo da Resolução CNPE No 12 de 21 de novembro de 2022, o qual previa o uso de diesel renovável para cumprimento do mandato de adição de biodiesel ao diesel fóssil (BRASIL, 2022a; DOU, 2022). No entanto, o ambiente regulatório tem se desenvolvido por meio do mercado voluntário de carbono, no qual a Petrobras recebeu certificação internacional (ISCC) para produção de diesel renovável na Repar (Infomoney, 2023). McKinsey (2022) descreve que:

“ A demanda nos mercados voluntários de carbono não surge a partir de um teto regulatório, mas de empresas e indivíduos que desejam voluntariamente compensar ou neutralizar sua pegada de carbono, e de investidores que incitam as empresas de seu portfólio a se tornarem neutras ou zero carbono. Há, no entanto, uma pequena conexão entre os mercados regulado e voluntário, pois alguns mercados regulados permitem que uma pequena parte das metas seja cumprida por meio de créditos de carbono voluntários ”. (MCKINSEY, 2022)

No âmbito da aviação, a Organização da Aviação Civil Internacional das Nações Unidas (*International Civil Aviation Organization – ICAO*) estabeleceu alvo de crescimento neutro de carbono na aviação a partir de 2021, meta definida por meio de um acordo com as empresas aéreas, denominado CORSIA- *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation* (ICAO, 2018). Desta forma, para alcançar os objetivos estabelecidos, o CORSIA traça metas de emissões para as empresas aéreas em voos internacionais. O programa prevê a implementação em fases, sendo voluntária a participação dos países até o ano de 2026. (SOARES; QUEIROZ PINTO JR; BOMTEMPO MARTINS, 2021). Adicionalmente, a EPE (2021) observa o seguinte:

“Além de instrumentos de compensação de emissões e de promoção de eficiência energética, o CORSIA prevê a utilização de combustíveis alternativos de aviação que sejam drop-in, em particular aqueles com processos certificados na ASTM Internacional (American Society for Testing and Materials International) ”. (EPE, 2021).

Requisitos de certificação para uso de combustíveis alternativos em aviação comercial são internacionalmente estabelecidos pela norma ASTM D7566²². Conforme mencionado anteriormente, a produção de querosene de aviação por rota HEFA é certificada por esta norma desde 2011. (WANG; TAO, 2016). Outras rotas como a HDCJ, ainda estão sob análise do Comitê de Combustíveis Emergentes da ASTM. Conseqüentemente no Brasil, atualmente apenas o querosene de aviação produzido pela rota HEFA é aprovado, dentre as rotas de coprocessamento que geram combustíveis de aviação com conteúdo renovável (SOUZA, 2019). De forma geral, normas técnicas e de controle de qualidade para combustíveis de aviação produzidos no país são determinados na Resolução ANP no 778 de 2019, a qual reúne regras relacionadas tanto aos combustíveis de aviação renováveis quanto ao QAV-1, produzido a partir do petróleo. (ANP, 2019)

O uso de combustíveis marítimos também é regido por normas internacionais. A IMO - *International Maritime Organization*, órgão das Nações Unidas responsável pela regulamentação de transporte marítimo, estabeleceu uma meta de redução de 50% das emissões totais de GEE relacionadas ao transporte marítimo até 2050, tendo por base o ano de 2008 (IMO, 2018). A meta IMO2050 trouxe o tema mitigações climáticas ao setor de transporte marítimo global. Contudo, um futuro aumento nas atividades marítimas, em linha com a tendência apresentada em histórico recente, tornará mais difícil o alcance destas metas (Müller-Casseres et al., 2021), o que demanda mecanismos, incentivos e regulações complementares. Müller-Casseres et al. (2021) observam que, apesar da possível contribuição de iniciativas mitigadoras como uso de embarcações mais eficientes, otimização de rotas/velocidades, entre outros, a principal medida rumo à descarbonização reside na adoção de combustíveis alternativos.

A regulação brasileira, regida pela ANP, estabelece normas para uso de combustíveis tradicionais do setor, como *heavy fuel oil* (HFO), *marine gas oil* (MGO); *marine diesel oil* (MDO), mas em termos de combustíveis alternativos, cita apenas o biodiesel, não existindo normas regulamentando os demais combustíveis renováveis no país ou internacionalmente (WEI, 2021)

²² O produtor desenvolvedor de combustíveis alternativos de aviação deve atender, adicionalmente, à norma ASTM D4054, a qual define um conjunto de procedimentos e testes de forma a atender propriedades básicas de especificação, certificando não apenas o produto, mas todo o processo de produção. (SOARES; QUEIROZ PINTO JR; BOMTEMPO MARTINS, 2021)

Com relação às rotas que utilizam FCC, não existem muitas experiências comerciais reportadas, com exceção do exemplo citado da Parkland, no Canadá, que processa óleo vegetal e da Preem, na Suécia, que executa operação de testes para processamento de bio-óleo.

Ademais, a literatura aponta importantes desafios para determinar o conteúdo renovável dos produtos finais, particularmente quando o coprocessamento utiliza unidades de craqueamento catalítico, sugerindo o uso de métodos baseados em balanço de massa com regressão múltipla combinado à análise de C14 (SU et al., 2021). Apesar de o conceito de balanço de massa parecer simples, a diferença em massa entre a carga e o produto da unidade, comparando-se diferentes cargas possíveis, traz complexidade à aplicação do conceito. De forma geral, ao redor do mundo são propostos 4 métodos para contabilizar e atribuir conteúdo energético a produtos advindos de coprocessamento; i) balanço de massa baseado em rendimento ii) balanço de massa baseado em carbono iii) conteúdo energético iv) análise C14²³ (ECOFYS, 2018). Contudo, tais métodos ainda não são considerados em regulação nacional, o que dificulta o reconhecimento do conteúdo renovável em combustíveis produzidos a partir de unidades de FCC.

Em 20 de abril de 2021, através da Resolução No 7, o CNPE²⁴ - Conselho Nacional de Política Energética (BRASIL, 2022b), aprovou a criação do programa Combustível do Futuro, com o objetivo de promover a redução na intensidade de carbono da matriz de combustíveis, incentivando a proposição de medidas (para uso de combustíveis sustentáveis) e reconhecendo a importância/necessidade de integrar políticas públicas afetas ao programa (CNPE, 2021). Este fato evidencia o grau de desenvolvimento ainda incipiente do arcabouço regulatório referente a combustíveis renováveis no país.

Considerando o contexto apresentado, é adotada a pontuação para o indicador “Conformidade Regulatória”, conforme Tabela 24.

²³ Análise de carbono-14 (um isótopo radioativo natural do elemento carbono) é uma abordagem utilizada para estimar a datação de fósseis e artefatos de diversos tipos, baseando-se na taxa de decaimento do isótopo ¹⁴C, em comparação com ¹²C. O método também pode ser usado para determinar a fração de materiais biogênicos em misturas bio/fósseis, sendo o material biogênico muito mais jovem que correntes de origem fóssil. Desta forma, a fração biogênica é proporcional ao seu teor de C14 (ECOFYS, 2018).

²⁴ Presidido pelo Ministro de Minas e Energia, o CNPE é o órgão responsável por assessorar o presidente da república na formulação de políticas e diretrizes de energia (BRASIL, 2022b).

Tabela 24 - Notas do Indicador "Conformidade Regulatória"

Vetor Energético	Unidade de processo	Produto	Regulação Internacional	Regulação Nacional	Nota
Óleo vegetal OVR	FCC/HDT	Diesel	Desenvolvida	Em desenvolvimento	4
	HDT	Diesel	Desenvolvida	Desenvolvida	5
	FCC/HDT	QAV	Em desenvolvimento	Ausente	2
	HDT	QAV	Desenvolvida	Desenvolvida	5
	FCC/HDT	Bunker	ausente	ausente	1
	HDT	Bunker	Em desenvolvimento	Ausente	2
Bio-óleo	FCC/HDT	Diesel	Ausente	Ausente	1
	HDT	Diesel	Desenvolvida	Ausente	3
	FCC/HDT	QAV	Ausente	Ausente	1
	HDT	QAV	Em desenvolvimento	Ausente	2
	FCC/HDT	Bunker	Ausente	Ausente	1
	HDT	Bunker	Ausente	Ausente	1

4.4. Análise socioambiental

A análise do macro critério socioambiental foi feita em diferentes níveis, a depender do indicador considerado, conforme indicado na Tabela 25.

Tabela 25 - Níveis de análise dos indicadores socioambientais

Indicador	Níveis
Vulnerabilidade Hídrica	Região de refino, Matéria prima, Vetor energético, Unidade de processo
Potencial para mitigação de emissões	Matéria prima, Unidade de processo, Produto
Geração de emprego	Matéria prima, vetor energético

As notas de cada indicador são descritas em detalhes a seguir.

4.4.1. Vulnerabilidade hídrica

A vulnerabilidade ocorre em situação na qual a segurança hídrica fica comprometida. Não existe uma definição única sobre segurança hídrica, contudo, uma característica comum às definições reconhecidas relaciona o termo à garantia de quantidade suficiente para atendimento à sobrevivência humana, representado por um padrão mínimo de vida, o qual inclui demandas provenientes do exercício de atividades econômicas (CASTRO, 2021).

O Plano Nacional de Segurança Hídrica (PNSH), fundamentado pela Agência Nacional de águas (ANA), é um instrumento que orienta na tomada de decisão sobre segurança hídrica no país (BRASIL, 2019). Abrange quatro dimensões, que combinadas, formam o índice de segurança hídrica, sendo estas: humana, a econômica, ecossistêmica e a de resiliência. De acordo com o PNSH, Figueiredo (2020) observa:

“As dimensões humana e econômica permitem quantificar os déficits de atendimento às demandas efetivas (abastecimento humano e setor produtivo) e riscos associados, enquanto as dimensões ecossistêmica e de resiliência possibilitam identificar as áreas mais críticas.” (FIGUEIREDO, 2020).

A literatura observa ainda que:

"De acordo com o conceito da Organização das Nações Unidas (ONU), a Segurança Hídrica existe quando há disponibilidade de água em quantidade e qualidade suficientes para o atendimento às necessidades humanas, à prática das atividades econômicas e à conservação dos ecossistemas aquáticos, acompanhada de um nível aceitável de risco relacionado a secas e cheias, devendo ser consideradas as suas quatro dimensões como balizadoras do planejamento da oferta e do uso da água em um país". (ANA, 2017)

Cada dimensão é composta por um ou mais indicadores (ponderados por pesos), os quais são formados por uma combinação de variáveis²⁵ ou atributos mensuráveis (ANA,

²⁵ O balanço hídrico superficial é a principal variável do ISH e refere-se à relação entre demandas e disponibilidades hídricas, a partir do qual é informando o percentual de comprometimento da oferta de água. (ANA, 2019)

2017). Essas dimensões podem ser afetadas por diversos fatores, tais como o aumento populacional, ocupação desordenada do solo, alterações no uso da terra, poluição hídrica, condições climáticas, entre outros (CASTRO, 2021).

Muitos estudos investigam a relação entre suprimento de energia e consumo de água. A IEA (*International Energy Agency*), em seu *World Energy Outlook 2016* (IEA, 2016), indicou a importância da água doce para o suprimento energético. O estudo estimou aumento no consumo de água para fins energéticos na ordem de 48 Gm³ a 75 Gm³ entre os anos de 2014 e 2040, principalmente devido ao maior uso de biocombustíveis.

No caso do Brasil, especificamente, a segurança hídrica possui estreita relação com a segurança energética, uma vez que parte considerável da energia elétrica produzida é gerada por usinas hidrelétricas (IPEA, 2021). O país possui uma situação satisfatória em termos de disponibilidade hídrica per capita, se comparado a outros países (INSTITUTO ESCOLHAS, 2019). No entanto, apesar desse aparente conforto, os recursos hídricos do Brasil não estão igualmente distribuídos entre as regiões. Cerca de 70% dos recursos hídricos disponíveis estão concentrados na Região Hidrográfica Amazônica, onde populações menores e poucas indústrias estão localizadas (ANA, 2019).

Bioenergia derivada de biomassa requer grandes volumes de água para o desenvolvimento da fase agrícola (GERBENS-LEENES; HOEKSTRA; VAN DER MEER, 2009). A irrigação de colheitas agrícolas é um uso relevante de recurso hídrico, praticado com a finalidade de suplementar a precipitação natural para atendimento às necessidades de cada cultura (FARIA et al., 2000). No entanto, apesar de representar parcela relevante, existem ainda outros componentes que devem ser considerados quando se estuda o consumo de água doce (GERBENS-LEENES et al, 2009).

Um conceito que permite calcular a demanda de água doce para diferentes produtos, processos ou grupos de pessoas, considerando as diversas fontes de consumo, é a pegada hídrica, ou *Water Footprint* (WF) (HOEKSTRA et al., 2011). WF é um índice definido pelo volume de água doce consumido (tanto de forma direta como indireta) no local onde a produção efetivamente ocorre, englobando três parcelas especificadas geográfica e temporalmente (GERBENS-LEENES; HOEKSTRA; VAN DER MEER, 2009):

- Green WF (verde): a água da chuva que evaporou durante a produção, principalmente durante o crescimento das culturas.

- Blue WF (azul): refere-se a ao volume de água (de superfície ou subterrâneas) utilizadas para irrigação.
- Gray WF (cinza): a quantidade de água necessária para diluir poluentes gerados e descarregados em sistemas de água natural.

Diante do contexto apresentado, a vulnerabilidade hídrica da rota foi calculada a partir de dois componentes, ponderados para apuração da nota final: 1) Pegada hídrica da matéria prima para rota analisada; 2) Segurança hídrica regional referente à localização (próxima) do potencial supridor para a região de refino. Tal enfoque buscou considerar tanto o consumo de água doce de cada opção, como a condição de segurança hídrica de cada local em que as opções são exercidas. A maior nota foi atribuída à alternativa que expõe a menor vulnerabilidade hídrica, assim como a menor nota corresponde à característica de maior vulnerabilidade hídrica.

Para aplicação do método de cálculo do WF existem duas referências: i) manual de pegada hídrica de Hoekstra et al. (2011); e ii) *Environmental Management – Water Footprint – Principles, requirements and Guidelines* (ISO_14046, 2014). Contudo, para o desenvolvimento deste trabalho, foram considerados cálculos de literatura já realizados em análises similares.

A literatura sugere que o WF de bioenergéticos varie em função de 3 fatores: i) matéria prima utilizada, ii) clima e local de produção, e iii) a prática de agricultura adotada (Gerbens-leenes et al, 2009). Estudos de Gerbens-leenes; hoekstra, (2013) calcularam a pegada hídrica da bioenergia, considerando países com a maior contribuição global na produção. Observaram que a pegada hídrica da bioenergia é maior se comparada a outras formas de energia. A Tabela 26 consolida informações para óleo de soja, óleo de palma e o petróleo.

Tabela 26 - Pegada hídrica do óleo de soja, óleo de palma e petróleo

Média global ponderada	M3/GJ de óleo		
	Green WF	Blue WF	Grey WF
Óleo de soja	326	11	6
Óleo de Palma	150	0	6
Petroleo		0,06 a 0,14	

Fonte: Gerbens-leenes; hoekstra, (2013)

No caso da macaúba observa-se escassa disponibilidade de dados, tanto sobre a implantação da cultura, quanto sobre o cultivo comercial. Contudo, estudos concluem que

a macaúba apresenta menor demanda hídrica se comparada ao dendê, em ocorrências espontâneas (FERREIRA DA MOTTA et al., 2002). Outros estudos comparam os valores mínimos de precipitação anual entre os dois cultivos, mostrando diferença de 800 mm (resultado de precipitação pluviométrica de 1200 mm para o dendê e 400 mm para a macaúba) (BENEZOLI; IMBUZEIRO; ABRAHÃO, 2017).

As premissas relacionadas à biomassa lignocelulósica também se baseiam na literatura. Mathioudakis et al., (2017) estima que resíduos lignocelulósicos tenham uma pegada hídrica em torno de 10% (em média) das oleaginosas de origem, considerando soja, algodão, girassol, colza.

Com relação ao óleo vegetal residual, a literatura estima que 1 litro de UCO possa contaminar até um milhão de litros de água (HILLAIRET; ALLEMANDOU; GOLAB, 2017). Desta forma, a vulnerabilidade hídrica de rotas que utilizem UCO como vetor energético foram consideradas com a maior nota da escala em relação à pegada hídrica da matéria prima, pois expõem a uma menor vulnerabilidade hídrica ao mitigar impactos de descarte inadequado.

Sob a ótica da análise de segurança hídrica regional, estudo do IPEA, (2021) revela que uma parcela expressiva do nordeste apresenta níveis baixos ou mínimos de segurança hídrica, enquanto boa parte da região norte e do centro-oeste (à exceção de regiões metropolitanas como Brasília e Goiânia) apresenta segurança hídrica entre grau alto e máximo. Sobre outras áreas, observa:

“Outras regiões do Brasil que concentram áreas com grau baixo e médio de segurança hídrica estão localizadas em algumas médias e grandes regiões metropolitanas (Belo Horizonte, São Luís, São Paulo, Rio de Janeiro e Porto Alegre), no sul do Rio Grande do Sul (principalmente devido à grande demanda da agricultura irrigada), no norte e oeste de Minas Gerais, no centro e no norte do Pará e em partes do território do Amapá e de Roraima”. IPEA, (2021).

A Figura 11 traz o mapa que ilustra o grau de segurança hídrica nacional.

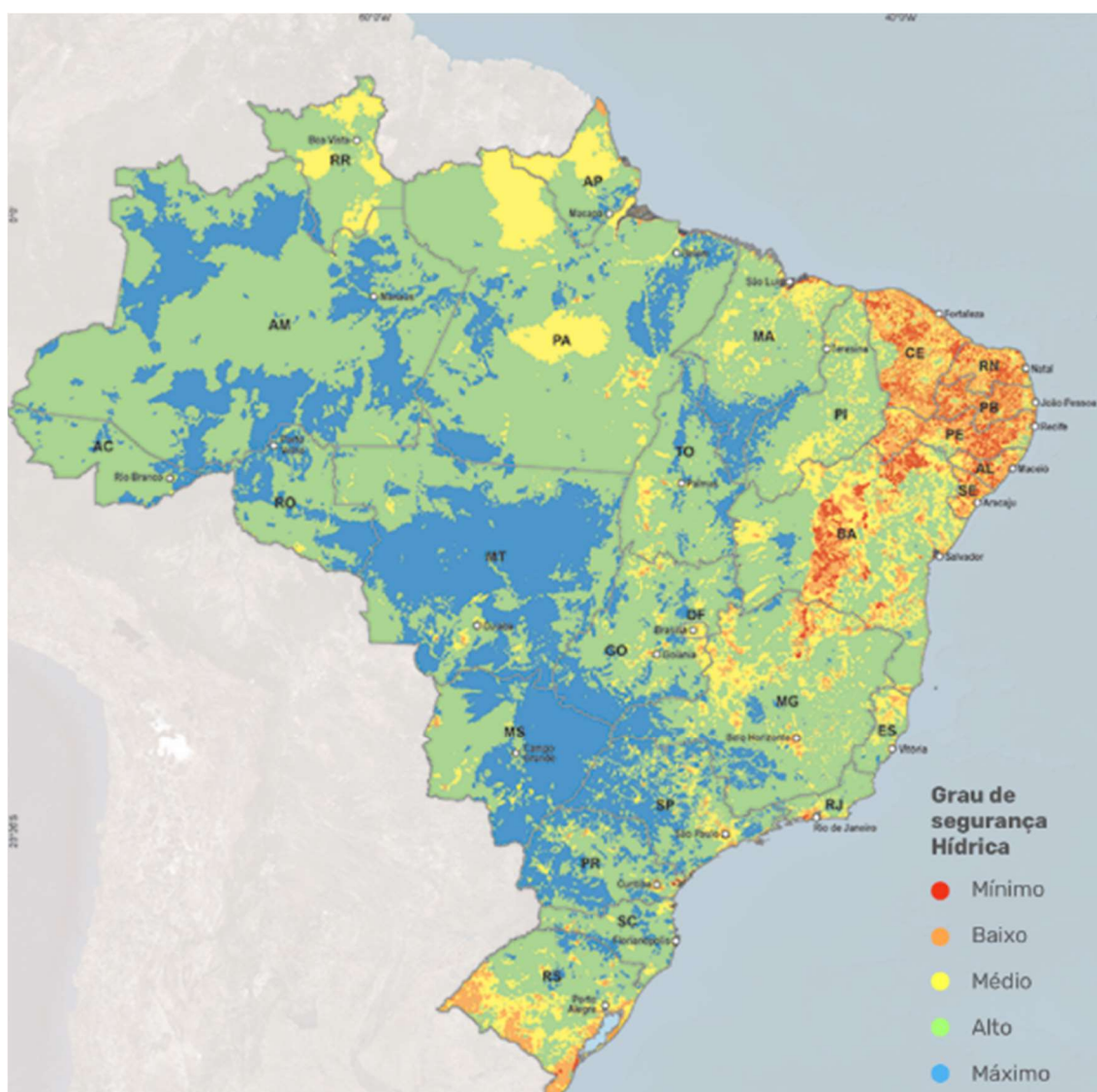


Figura 11 – Mapa ISH (índice de Segurança Hídrica) 2017

Fonte: IPEA (2021)

Desta forma, a escala de classificação e notas do indicador vulnerabilidade hídrica é expressa na Tabela 27.

Tabela 27 - Notas do indicador "Vulnerabilidade Hídrica"

Vetor energético	Características de Pegada hídrica do vetor	Nota	Região	Nota	Nota Final
		Componente 1		Componente 2	
Óleo de soja	326 m3/GJ de óleo	1	SP	5	3
			SUL	4	2,5
			MG	3	2
			RJ	3	2
			Nordeste	1	1
Óleo de palma	150 m3/GJ de óleo	2	SP	5	3,5
			SUL	4	3
			MG	3	2,5
			RJ	3	2,5
			Nordeste	1	1,5
Óleo de Macaúba	1/3 da precipitação pluviométrica do dendê	3	SP	5	4
			SUL	4	3,5
			MG	3	3
			RJ	3	3
			Nordeste	1	2
Bio-óleo	10% da oleaginosa de origem	4	SP	5	4,5
			SUL	4	4
			MG	3	3,5
			RJ	3	3,5
			Nordeste	1	2,5
OVR	1 litro de UCO evita contaminação de até 1 milhão de litros de água	5	SP	5	5
			SUL	4	4,5
			MG	3	4
			RJ	3	4
			Nordeste	1	3

4.4.2. Potencial para mitigação de emissões

O potencial de emissões pode ser mensurado pelo índice GWP (*Global Warming Potential*). É um índice que permite comparar quantitativamente o impacto das emissões de GEE de diferentes produtos, incluindo combustíveis (HARVEY, 1993). Colocando todos na mesma base, pode ser expresso em gramas de CO₂ equivalente por MJ de biocombustível e considera um horizonte de 100 anos, GWP100 (GHG PROTOCOL, 2016). Segundo Braz (2018), a métrica GWP é a mais utilizada em avaliações de impacto ambiental, com mais dados de literatura disponíveis. Um valor de referência para combustíveis fósseis é de 83,8 gCO₂/MJ combustível (IRENA, 2016).

O GWP das rotas consideradas neste trabalho foi estimado a partir de dados de literatura, buscando, sempre que possível, compatibilidade de informações ou recorrendo à análise de sensibilidade (desenvolvidas no capítulo 5.3) na ausência de informações com mesma base metodológica. O potencial de emissões estimado baseou-se em trabalhos cujo escopo considerou etapas de cultivo da oleaginosa, conversão da biomassa e processamento do vetor energético. São etapas de difícil mensuração que naturalmente envolvem incertezas (JULIO et al., 2022; VIENESCU et al., 2018).

Bonomi et al. (2018) compararam a carga ambiental de diferentes matérias primas utilizadas para produção de diesel renovável, considerando rotas via HVO/HEFA e transesterificação, sob uma abordagem de análise de ciclo de vida (ACV). As matérias primas utilizadas no referido estudo foram óleo de soja, óleo de palma e WCO, com emissões de WCO menores entre 16% e 22% das observadas para as oleaginosas, em rota HEFA.

Souza (2019) realizou uma pesquisa bibliográfica para o levantamento das emissões de GEE com base em ACV do bioquerosene produzido por rota HEFA, para soja, palma e outras oleaginosas. Seguem os dados relacionados às matérias primas de interesse neste trabalho:

- Soja: variações entre 35,2 a 43,4 g CO₂/MJ
- Palma: variações entre 24,7 a 32,4 g CO₂/MJ

De forma análoga Vásquez et al., (2019) também contabilizam²⁶ uma emissão maior para a soja, em análise de querosene renovável produzido via hidrotreatamento. O estudo reporta uma diferença de emissões na fase agrícola da ordem de 25 g CO₂eq/MJ entre soja e palma, atribuindo a diferença à maior demanda por fertilizantes e agroquímicos no cultivo de soja, se comparado à palma. Fernández-coppel et al., (2018) desenvolveram uma análise de ciclo de vida (ACV) do cultivo de macaúba voltado à produção de biodiesel²⁷, apurando diferença em relação ao cultivo da palma na ordem de 1,66 g CO₂eq/MJ²⁸.

²⁶ Estes números não consideram emissões provenientes de mudança de uso do solo.

²⁷ No referido estudo, o biodiesel foi produzido por rota de transesterificação, mas a falta de informação amplamente disponível envolvendo rotas de coprocessamento (do óleo de macaúba no refino tradicional) levou a adoção da mesma diferença (entre emissões do cultivo da palma e macaúba) para esse trabalho.

²⁸ Emissões do cultivo do óleo de palma africano foram em média na ordem de 25 g CO₂eq/MJ e do óleo de macaúba foi de 23.34 g CO₂e/MJ

Yáñez et al. (2021) estudaram o coprocessamento de correntes renováveis em refinarias convencionais como uma estratégia de mitigação de emissões. O trabalho apurou²⁹ emissões evitadas na ordem de 922 kt CO₂/ano quando a corrente era óleo vegetal em FCC e emissões evitadas de 237 a 381 kt CO₂/ano ao processar em HDT. Em termos de CO₂ emitido, o trabalho apurou emissões líquidas menores para o bioóleo (fast pyrolysis oil) no FCC em comparação à mesma corrente processada no HDT, apresentando valores de 35 kg CO₂/GJ e 56 kg CO₂/GJ combustível, respectivamente. De uma forma geral, a literatura sugere emissões maiores de correntes renováveis quando processadas em HDT, se comparadas ao FCC, contudo, variando bastante a depender da origem do hidrogênio. Sorunmu; et al, (2020) revisaram³⁰ a literatura relacionada a emissões no hidrotreatamento de bio-óleo, constatando que, a depender da origem do hidrogênio (fóssil ou renovável) podem dobrar as emissões observadas. O trabalho de Yáñez et al. (2021) sugere ainda que as emissões de CO₂ são menores no processamento de bioóleo, em comparação com óleo vegetal.

Na etapa de processamento do vetor energético considerou-se que todos os óleos vegetais, incluindo óleo vegetal residual, geram a mesma carga ambiental ao serem processados na mesma unidade. De forma análoga Julio et al (2022) comentaram que este resultado é esperado, ao considerar que a conversão de diferentes óleos vegetais não deve variar de forma significativa.

Neste trabalho, o indicador potencial de emissões foi medido por ordem de preferência de 1 a 5, onde o número 1 representa o pior potencial e o número 5 o maior potencial. Dado o contexto apresentado, as seguintes considerações podem ser estabelecidas:

- ⇒ Óleos vegetais não residuais receberam as notas mais baixas. Entre estes, a pior nota foi atribuída à soja. Óleo de Palma e óleo de Macaúba receberam as mesmas notas, dado que a referência observada apurou emissões muito próximas para estas duas oleaginosas

²⁹ As seguintes considerações fizeram parte do estudo: 1) biomassa CPO-pirólise catalítica originou-se de resíduos florestais; 2) nenhuma alternativa considerou captura de carbono, o que reduz emissão de CO₂; 3) óleo vegetal considerado foi o óleo de palma, em diferentes cenários de produção do óleo de palma na colômbia, para os quais são esperados redução em 40% nas emissões de cenários futuros..4) rotas que utilizam unidades de FCC apresentam emissões diretas maiores que no HDT em função do processo de regeneração do catalisador, mas o CO₂ evitado em FCC é maior que no HDT devido ao consumo de hidrogênio desta rota.

³⁰ Trabalho envolveu análise de ciclo de vida, economicidade e prontidão tecnológica

- ⇒ Rotas que utilizam resíduos, gerando vetores como WCO e bio-óleo, receberam as maiores notas, com preferência ao bio-óleo
- ⇒ Rotas utilizando FCC receberam nota superior às rotas utilizando HDT.

Desta forma, foram atribuídas as notas ao indicador “Potencial para mitigação de emissões”, conforme descrito na tabela 28.

Tabela 28- Notas do indicador "Potencial para mitigação de emissões"

Vetor energético	Unidade Proc	Nota
Óleo de soja	FCC/HDT	2
	HDT	1
Óleo de Palma	FCC/HDT	3
	HDT	2
Óleo de Macaúba	FCC/HDT	3
	HDT	2
OVR	FCC/HDT	4
	HDT	3
Bio-óleo	FCC/HDT	5
	HDT	4

4.4.2.1. Mudança de uso do solo

Apesar de todo potencial que combustíveis renováveis possuem para mitigar emissões, impactos não intencionais podem ocorrer a partir da expansão de uso destes produtos, como por exemplo a troca de culturas alimentares por culturas energéticas (AOUN; GABRIELLE; GAGNEPAIN, 2013).

As mudanças no uso do solo (*LUC-Land Use Change*) são de duas naturezas: direta (DLUC) e indireta (ILUC). A primeira se refere a mudanças diretas de uso, observado nos casos em que terras previamente não cultivadas são agora destinadas ao cultivo de matérias primas para produção de combustíveis. ILUC ocorre quando uma demanda adicional destas matérias primas induz ao deslocamento de regiões destinadas à produção de alimentos para áreas até então sem cultivo. Ambos ocorrem em função de diversos fatores, como crescimento populacional, alteração na produção de alimentos, geração de energia, entre outros, onde alterações em atividades agrícolas representam o principal fator (SANTOS; REIS; MEDIONDO, 2020).

Em estudo sobre Mudanças na Cobertura e Uso da Terra no Brasil entre os anos de 2000 e 2014, o IBGE (2017) concluiu que áreas destinadas a atividades agrícolas foram

ampliadas em 16 milhões de hectares e áreas de pastagens aumentaram em 38 milhões de hectares, representando aumentos de 40% e 61% respectivamente, no período. Novaes et al. (2017) observam que emissões relacionadas a mudanças no uso do solo podem representar um impacto significativo na pegada de carbono de um determinado produto. Contudo, é uma parcela altamente incerta e de difícil mensuração (GARBIN; HENKES, 2018). Desta forma, emissões resultantes de mudança de uso no solo não foram consideradas neste trabalho, pois a complexidade do tema demanda estudos dedicados.

4.4.3. Geração de emprego

Os Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável (ODS) integrantes da Agenda 2030 da ONU, englobam 17 objetivos relacionadas à erradicação de pobreza e à promoção de vida digna para todos. À luz do indicador “Geração de emprego”, destaca-se o 8o ODS, referente a “Emprego digno e crescimento econômico”. (UNITED NATIONS, 2016). Neste sentido, o indicador, “Geração de emprego” tem o propósito de identificar contribuições de cada rota na geração de emprego a partir de uma escala que privilegia o potencial para desenvolvimento de agricultura familiar, atribuindo-se nota a cada rota na análise multicritério. A escala adotada atribui pontuação de 1 a 5 com relação “quanto maior, melhor”, ou seja, quanto maior a nota, maior é o potencial para geração de emprego de cada alternativa, conforme descrito na Tabela 29.

Tabela 29 - Escala de pontuação para o indicador “Geração de emprego”

Potencial para geração de emprego	Pontuação
Baixo	1
Médio	2
Alto	3
Muito alto	4
Extremamente alto	5

Desta forma foram atribuídas notas que diferenciam combinações de matérias primas/vetores energético: Soja/óleo vegetal, Palma/óleo vegetal, Macaúba/óleo vegetal oleaginosas diversas/OVR (óleo vegetal residual) e Biomassa lignocelulósica/bio-óleo.

Em relação à soja, de forma geral, a cadeia apresenta tendência crescente de geração de empregos. Entre os anos 2000 e 2004 o número total de empregos passou de 2.352.839 para 3.758.773 (MONTROYA et al., 2019). Em nível nacional, estas parcelas representaram 3,0% e 3,6% respectivamente. Santos (2019) observa que a soja vem trazendo emprego para as regiões onde é cultivada, mostrando os empregos formais gerados entre 2007 e 2017, conforme Tabela 30.

Tabela 30 - Números de empregos formais gerados no cultivo de soja

Ano	Centro Oeste	Sul	Nordeste	Sudeste	Norte	Total
2007	38722	21178	6835	7106	1303	75144
2008	43192	21581	7557	7201	1418	80949
2009	45458	22073	8127	7186	1594	84438
2010	49409	22292	8653	7353	1604	89311
2011	53309	22898	11046	7854	1905	97012
2012	60589	23028	11969	8549	2279	106414
2013	63961	23681	12349	9221	3068	112280
2014	68481	24202	12226	9462	3425	117796
2015	70399	25314	12952	9205	4078	121948
2016	71347	25935	12658	9756	4486	124182
2017	74031	25618	13657	10363	4910	128579

Fonte: Santos (2019).

Números mais recentes mostram ainda que o cultivo de soja liderou o ranking da criação de postos com carteira assinada em 2020, no setor agropecuário, com 13396 novas vagas (FAEG, 2021). Colocação esperada no ranking, já que se trata da maior cultura agrícola do país (IBGE, 2021). Contudo, segundo Montoya et al. (2019), ao se observar a intensidade de mão de obra da cadeia de soja, medida pelo coeficiente trabalhador por PIB gerado, o período de 2000 a 2014 mostra uma redução constante:

“Observando os segmentos da Cadeia Soja pode-se atribuir que houve inovação tecnológica, com ganhos de produtividade na mão de obra, no segmento de produção de insumos para a soja e, principalmente, com mais intensidade no segmento propriedade rural, visto que, no período de 2000 a 2014, o segmento “antes da porteira” insumos da soja em grão passou de 51,20 para 22,00 trabalhadores por milhão de reais e o segmento “dentro da porteira” produção de soja em grão passou de 110,30 para 42,00 trabalhadores por milhão. Em particular, chama atenção os ganhos de produtividade da mão de obra no produto soja em grão, já que no período reduziu 68,30 trabalhadores por milhão de reais gerado” (MONTTOYA et al., 2019)

A macaúba não tem essa intensidade de mão de obra, não apresentando a mesma característica da soja. A macaúba é uma cultura perene, logo, menos intensiva em mecanização (BAZZO et al., 2018). Além disso, está concentrada em áreas de pastos,

bordas de matas e regiões acidentadas o que inviabiliza a colheita mecanizada e intensifica a utilização de mão de obra humana (MELO, 2012).

O plantio desta cultura tem sido visto como uma oportunidade para agricultores familiares ocuparem e recompoem áreas de pastagens ociosas e degradadas (FRANCO; ZIMPEL, 2020). Adicionalmente, a macaúba já foi apontada como alternativa para o desenvolvimento de sistemas agroflorestais, no contexto da integração lavoura, pecuária e floresta - ILPF (COLLARES, 2015). Trata-se de uma estratégia de produção que vem crescendo no Brasil nos últimos anos, a qual integra diferentes sistemas de produção, buscando otimizar o uso da terra, conservar características produtivas do solo e promover eficiência na utilização de recursos (PORTAL EMBRAPA, 2017).

Seguindo este conceito, o Projeto Macaúba, desenvolvido pela empresa INOCAS, tem por objetivo a plantação de 2000 hectares de macaúba na região do bioma cerrado do Alto Paranaíba, Minas Gerais. Baseado em sistema sivilpastoril e agricultura familiar, possui expectativa de promover a coleta de até 1500 toneladas de frutos de palmeira nativa por ano. Outro exemplo prático é a Plataforma de Bioquerosene e Renováveis em Juiz de Fora, a qual envolve 46 municípios da Zona da Mata mineira e tem por objetivo a descentralização da produção de matéria-prima para a produção de combustíveis renováveis (ALMG, 2019).

De forma similar, a palma também é indicada em sistemas de agricultura familiar. O primeiro projeto de integração da agricultura familiar à cadeia produtiva do óleo de palma no país teve início em 2022, para desenvolvimento da cultura no município de Moju, no Pará, por meio de convênio de cooperação técnica (AGROPALMA, 2022). Silva (2022) atribui destaque à palma em função de produzir ao longo de todo ano e com elevado rendimento por hectare, enquadrando-a como uma das melhores opções para plantios em agricultura familiar, que possuem em média 10 hectares. Descreve ainda:

“O plantio de dendê tem todos os atributos para que seja formado um consistente sistema agroindustrial entre grandes empresas e pequenos produtores, pois por demandar alta utilização de mão de obra não qualificada, é uma ótima opção para agricultura familiar ao sustentar uma família de cinco pessoas, por um período de quase três décadas, que é o tempo médio de produção do dendezeiro”. (SILVA, 2022).

Diante deste cenário, é possível observar que tanto a Macaúba quanto a Palma apresentam um grande potencial de geração de emprego para agricultores familiares e comunidades extrativistas. Lima (2004) faz uma comparação entre a criação de postos de trabalho na agricultura, na qual estima-se o emprego de 1 trabalhador para cada 100 hectares cultivados na agricultura empresarial, enquanto na familiar a relação é de apenas 10 hectares por trabalhador.

No Brasil e no mundo, a agricultura familiar é associada à geração de emprego e desenvolvimento. Dentre os instrumentos que podem ser utilizados visando alcançar emprego e crescimento econômico, foco do 8º Objetivo para o Desenvolvimento Sustentável, destacam-se os modelos que promovam a inserção da agricultura familiar no âmbito de programas energéticos (EPE, 2021). No PNPB, a inclusão da agricultura familiar ocorreu através de um mecanismo denominado Selo Combustível Social – SCS, que mais tarde, a partir do Decreto nº 10.527/2020, passou a denominar-se Selo Biocombustível Social – SBS (BRASIL, 2021). Esse mecanismo definiu regras estabelecendo que empresas produtoras de biocombustível devem comprar um percentual mínimo de matéria-prima de famílias/agentes intermediários e prestar assistência técnica a agricultores familiares, o que lhes garante benefícios fiscais (EPE, 2021). Os benefícios fiscais variam em função de diversos fatores, dentre eles, a matéria prima utilizada, sendo maiores quando o insumo for diferente de soja ou milho (BRASIL, 2019)

Analisando o contexto apresentado, as notas atribuídas ao critério “Geração de Emprego e renda” privilegiaram o potencial para desenvolvimento de agricultura familiar. Para simplificar a atribuição de notas para a rota, assumiu-se ainda:

- As rotas compostas por oleaginosas diversas/OVR receberam nota superior às demais rotas com óleo vegetal a fim de considerar que a logística de coleta nas rotas que tratam resíduos gera toda uma cadeia de empregos adicionais. Em sendo uma opção viável, o OVR vai demandar a criação de diversas empresas ao longo de toda a cadeia, que gerem escala para o coprocessamento.
- Da mesma forma, as rotas compostas por Biomassa lignocelulósica/bioóleo receberam nota superior às rotas com óleo vegetal a fim de considerar que o potencial aproveitamento de biomassa residual proveniente de cultivos como milho (similar a soja) também gera toda uma cadeia de empregos adicionais (ROCHA, 2015).

- Os benefícios identificados para a matéria prima/vetor energético serão, na mesma proporção, observados ao longo de toda a cadeia.
- Potencial de geração é atribuído para cada giga joule gerado pela rota, colocando todas as opções na mesma base.

Desta forma, a Tabela 31 consolida as notas para cada rota analisada.

Tabela 31 - Notas do indicador "Geração de emprego"

Matéria prima	Vetor Energético	Rota/ derivado principal	Nota
Soja	Óleo vegetal	HVO/Diesel	2
Soja	Óleo vegetal	HEFA/QAV	2
Soja	Óleo vegetal	HVO/Bunker	2
Palma ou Macaúba	Óleo Vegetal	HVO/Diesel	4
Palma ou Macaúba	Óleo Vegetal	HEFA/QAV	4
Palma ou Macaúba	Óleo Vegetal	HVO/Bunker	4
Oleaginosas diversas	OVR	HVO/Diesel	5
Oleaginosas diversas	OVR	HEFA/QAV	5
Oleaginosas diversas	OVR	HVO/Bunker	5
Biomassa lignocelulósica	Bio-óleo	HDCD/Diesel	5
Biomassa lignocelulósica	Bio-óleo	HDCJ/QAV	5
Biomassa lignocelulósica	Bio-óleo	HDPO/Bunker	5

4.5. Atribuição das notas

As notas atribuídas em cada indicador foram aplicadas às alternativas, detalhadas em 5 níveis: região de refino, matéria prima, vetor energético, unidade de processo e produto. Isoladamente, os indicadores não são capazes de diferenciar as alternativas em todos os níveis. Desta forma, as notas naturalmente se repetem quando não há diferenciação. Exemplificando, as notas do indicador “geração de emprego” atribuídas à soja/óleo vegetal foram as mesmas em todas as diferentes regiões de refino, produtos e unidades de processo.

O capítulo a seguir é dedicado à aplicação do método, consolidando resultados. Incertezas com relação às notas atribuídas serão discutidas na seção Análise de sensibilidade.

5. APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP

Neste capítulo, os pesos de cada macro critério/indicadores são incorporados à análise, consolidando-se o resultado final para cada alternativa. Por fim, análise de sensibilidade é apresentada com o objetivo de estimar o quanto o resultado se altera em função de mudanças nos pesos relativos, ao considerar novas perspectivas e mudança de notas atribuídas.

5.1 Cálculo dos pesos relativos

Conforme descrito no item 3.1.2 Fluxo de etapas, o grupo de especialistas respondentes consolidou quatro setores de atuação profissional³¹: Empresa, Governo, Organização não governamental e Instituição de pesquisa. As perguntas foram feitas em 5 quadros (Anexo I), refletindo comparações pareadas entre critérios dentro de cada nível hierárquico, ou seja, segundo macro critérios e indicadores. A matriz agregada de comparações pareadas, que consolida a percepção dos especialistas consultados para cada um dos 5 quadros, foi descrita no Anexo III.

Seguindo-se as etapas detalhadas no capítulo 3.1.2., obteve-se o vetor de prioridades (pesos) para cada macro-critério e indicadores considerados, mostrados respectivamente na Tabela 32 e na Tabela 33.

Tabela 32 - Vetor de prioridade (pesos) dos macro-critérios

Macrocritérios	Empresa	Governo	Inst. Pesq.	ONG	Geral
Disponibilidade	38,7%	51,9%	34,4%	14,7%	34,6%
Logística	20,7%	20,1%	17,6%	30,2%	19,7%
Técnicos	20,0%	20,1%	21,3%	15,5%	20,7%
Socio Ambientais	20,6%	7,9%	26,8%	39,5%	25,0%
Total	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

³¹ As respostas representam um julgamento pessoal dos especialistas e não necessariamente refletem a visão das empresas, governos, ou demais entidades aos quais estão profissionalmente vinculados.

Tabela 33 - Vetor de prioridade (pesos) dos indicadores

Macrocritérios	Indicadores	Empresa	Governo	Inst. Pesq	ONG	Geral
Disponibilidade	Oferta MP	11%	16%	11%	4%	11%
	Sazonalidade	8%	16%	7%	1%	7%
	Competição AgroP	6%	7%	9%	4%	8%
	Oferta Vetor	13%	13%	7%	4%	9%
Logística	Escala Proc	6%	4%	6%	5%	6%
	Custo Vetor	10%	4%	7%	16%	8%
	Estabilidade Vetor	5%	12%	5%	9%	5%
Técnicos	Maturidade Tec	9%	9%	8%	3%	8%
	Qualidade Vetor	6%	9%	6%	9%	6%
	Conformidade Reg	6%	3%	7%	4%	7%
Socio Ambientais	Vulnerab Hidrica	9%	1%	10%	23%	10%
	Mitig Emissões	7%	5%	10%	9%	9%
	Geração Empregos	4%	2%	6%	7%	5%

A avaliação mostra que o macro critério Disponibilidade apresenta maior importância para todos os grupos exceto ONG, o qual atribui o menor grau de importância ao referido macro critério e maior importância ao macro critério Sócio-Ambiental.

A Figura 12 ilustra de forma gráfica a preferência dos 4 setores representados (coluna Geral da Tabela 33).

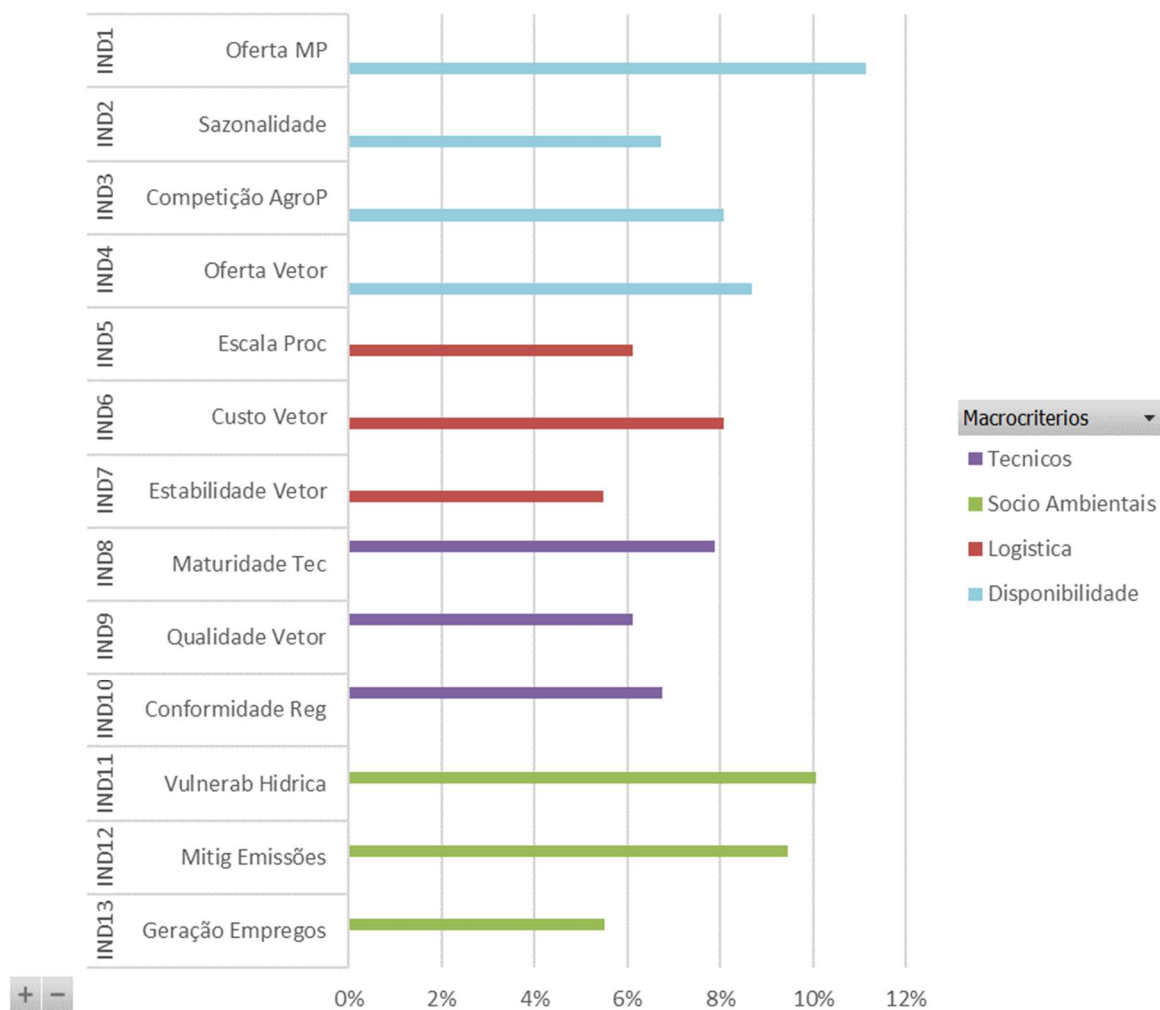


Figura 12 - Pesos atribuídos aos indicadores

Aplicando-se o método descrito no capítulo 3.1, foi possível avaliar a consistência dos julgamentos efetuados para 5 classes de critérios: entre os 4 macrocritérios; entre os indicadores do macrocritério Disponibilidade; entre os indicadores Logísticos do Vetor energético; entre os indicadores Técnicos da rota; entre os indicadores Sócio-ambientais da rota.

Desta forma, foram observados os valores descritos na Tabela 34.

Tabela 34 - Consistência nos julgamentos

Classe de critérios	λ_{max}	IA (tabelado)	$IC = (\lambda_{max}-n)/(n-1)$	RC = IC/IA	RC < 0,1
Macrocritérios	4,032	0,9	0,01079	0,01199	SIM
Disponibilidade	4,037	0,9	0,01218	0,01353	SIM
Logísticos	3,038	0,58	0,01912	0,03297	SIM
Tecnológicos	3,006	0,58	0,00296	0,00511	SIM
Sócio-Ambientais	3,021	0,58	0,01045	0,01802	SIM

Os resultados obtidos geram RC calculados abaixo de 0,1 para todos os 5 quadros, indicando consistência dos julgamentos realizados pelo grupo de especialistas. Caso o resultado indicasse inconsistência, as alternativas seriam: 1) desprezar julgamentos inconsistentes, calculando os pesos sem considerá-los; 2) resubmeter o questionário aos julgadores, para correção.

5.2 Consolidação das notas e discussões

As alternativas analisadas nesta dissertação consideraram 5 níveis de decisão: Região, Matéria prima, Vetor energético, Unidades de processamento e Produtos. A partir dos critérios considerados e notas atribuídas, aplicou-se o método AHP, obtendo-se a matriz de desempenho de cada alternativa. O Anexo IV apresenta as tabelas de resultados, consolidando notas e pesos, detalhando a aplicação do método.

A partir da matriz de desempenho (notas) de cada alternativa e dos pesos estabelecidos para cada macro critério e indicador (Anexo IV), obteve-se o ranking das alternativas em cada nível, identificando as opções mais vantajosas para o conjunto de critérios estabelecidos, conforme apresentado na Tabela 35.

Tabela 35 - Ranking das alternativas por nível de decisão

Ranking de preferência - Regiões	
SP	Primeira opção
Sul	Segunda Opção
RJ / MG	Terceira opção
Nordeste	Quarta opção
Ranking de preferência - Unidade de processo	
HDT	Primeira opção
FCC + HDT	Segunda opção
Ranking de preferência - Vetor energético	
OVR	Primeira opção
Bio-óleo	Segunda opção
Óleo de soja	Terceira opção
Óleo de Palma	Quarta opção
Óleo de macaúba	Quinta opção
Ranking de preferência - Produto	
Diesel	Primeira opção
QAV	Segunda opção
Bunker	Terceira opção

A partir do resultado também é possível comparar vantagens e desvantagens de cada opção, consolidando o desempenho de cada uma sob a ótica de múltiplos indicadores, agrupados nas 4 perspectivas consideradas (disponibilidade, logística, técnica e ambiental). O resultado pode ser observado no mapa de desempenho ilustrado na Figura 13.

Regiões		MG	Nordeste	RJ	SP	SUL
Escala proc		Menor nota	Menor nota	Menor nota	Maior nota	Alta nota
Vulnerabilidade hid		Baixa nota	Menor nota	Baixa nota	Maior nota	Alta nota

		Vetores Energéticos	Bio-óleo	Óleo de Macaúba	Óleo de Palma	Óleo de soja	OVR
Disponib.	Oferta de MP	Maior nota	Menor nota	Baixa nota	Maior nota	Maior nota	Maior nota
	Sazonalidade	Maior nota	Menor nota	Maior nota	Baixa nota	Maior nota	Maior nota
	Competição agro	Maior nota	Alta nota	Menor nota	Menor nota	Maior nota	Maior nota
Logística	Oferta vetor	Menor nota	Menor nota	Alta nota	Maior nota	Maior nota	Menor nota
	Escala proc	Menor nota	Menor nota	Maior nota	Maior nota	Maior nota	Menor nota
	Custo do vetor	Alta nota	Mediana	Mediana	Menor nota	Maior nota	Maior nota
Técnica	Estabilidade	Menor nota	Maior nota	Maior nota	Maior nota	Maior nota	Maior nota
	Maturidade tec	Menor nota	Maior nota	Maior nota	Maior nota	Maior nota	Maior nota
	Qualidade	Menor nota	Maior nota	Maior nota	Maior nota	Maior nota	Maior nota
Sócio ambiental	Conf. Regulatória	Menor nota	Maior nota	Maior nota	Maior nota	Maior nota	Maior nota
	Vulnerabilidade hid	Alta nota	Alta nota	Baixa nota	Menor nota	Maior nota	Maior nota
	Potencial mit emis.	Maior nota	Mediana	Mediana	Menor nota	Alta nota	Alta nota
	Geração de emprego	Maior nota	Mediana	Mediana	Menor nota	Maior nota	Maior nota

Produtos		Bunker	Diesel	QAV
Maturidade tec		Menor nota	Maior nota	Maior nota
Conf. Regulatória		Menor nota	Maior nota	Alta nota

Figura 13 - Mapa de desempenho das alternativas

Óleo vegetal residual apresentou-se como a opção (de vetor energético) mais indicada em todas as regiões de refino, para todas as rotas avaliadas. Contudo, demanda desenvolvimento de infraestrutura de coleta e distribuição. Hillairet et al, (2017) estudaram o desenvolvimento da infraestrutura de coleta de óleo usado em países da União Europeia. O estudo mostrou taxas de coleta variando de 0% a 64% (caso da Bélgica). Taxas elevadas evidenciam potenciais metas a serem traçadas para o caso brasileiro.

O bio-óleo aparece na segunda posição dentre os vetores energéticos considerados, com notas relativamente altas nos critérios oferta de matéria prima, sazonalidade de matéria prima, competição com setor agropecuário, custo do vetor energético, vulnerabilidade hídrica, potencial para mitigação de emissões e geração de emprego. Contudo, recebeu notas relativamente mais baixas em disponibilidade do vetor energético (o que diminui também a escala de processamento), maturidade tecnológica da rota e estabilidade da corrente.

O bio-óleo tem muito mais heteroátomos presentes na sua composição do que o petróleo, sendo o oxigênio o que mais se destaca (seguido do nitrogênio) o que favorece a instabilidade durante estocagem (KARGBO; HARRIS; PHAN, 2021). No entanto, o bio-óleo proveniente da pirólise de microalga pode apresentar qualidade superior, se comparado ao proveniente de biomassa lignocelulósica, a depender do tipo de microalga utilizada, do cultivo ao qual foram submetidas e das condições operacionais do processo de pirólise como tempo de residência, taxa de aquecimento entre outras. (MIAO; WU; YANG, 2004).

A terceira posição é ocupada por óleo de soja, sendo a opção cuja oleaginosa apresenta a maior oferta e em consequência, sendo o vetor energético com maior escala de processamento, porém a um custo relativo alto. O óleo de palma aparece como a opção seguinte, com notas elevadas em critérios técnicos tal como os demais óleos vegetais, contudo recebeu notas baixas em oferta de matéria prima e vulnerabilidade hídrica.

Óleo de macaúba ocupou a última alternativa dentre as opções analisadas. Esta colocação é influenciada por baixa disponibilidade (refletida nas mais baixas notas em 3 dos 4 indicadores relacionados a este macro critério) e baixa escala de processamento, apresentando, contudo, baixa vulnerabilidade hídrica (nota alta neste indicador).

Os indicadores que permitiram diferenciar as regiões são “Escala de processamento” e “Vulnerabilidade Hídrica”, levando à região de São Paulo a maior indicação para o coprocessamento, principalmente em função da alta escala de processamento. A região Sul fica em segundo lugar, seguida por RJ e MG (empatados) e por último, a região Nordeste.

Os indicadores que diferenciaram as unidades de processo foram Maturidade tecnológica, Qualidade do vetor, Conformidade Regulatória e Potencial para mitigação de emissões, com os três primeiros favorecendo o HDT e o último favorecendo o FCC. Por sua vez, os indicadores que trouxeram diferenciação aos produtos (derivados produzidos) foram: Escala de processamento, Maturidade tecnológica da rota, Conformidade regulatória.

No indicador mitigação de emissões não foram consideradas emissões provenientes de mudança de uso do solo, o que pode representar uma parcela importante, porém não considerada no escopo desta dissertação por demandar estudos dedicados. Adicionalmente, a literatura indica que o uso de técnicas adequadas, envolvendo Sistema

de Plantio Direto (SPD), rotação de culturas e adequado gerenciamento de nitrogênio permite mitigar impactos de mudanças indiretas de uso do solo (CORDEIRO et al., 2021; DOS SANTOS CORDEIRO; ECHER, 2019; SILVA et al., 2020).

Mudanças no uso do solo podem ainda comprometer uma série de serviços ecossistêmicos, o que, por sua vez, também gera impacto na disponibilidade de recursos hídricos (SANTOS; REIS; MEDIONDO, 2020). Efeitos de mudança de uso do solo não foram considerados no critério vulnerabilidade hídrica.

Emissões advindas de mudança de uso do solo não são calculadas no âmbito do RenovaBio. Contudo, para que tenham direito aos créditos de carbono, produtores participantes do programa devem cumprir critérios de elegibilidade que minimizam efeitos negativos relacionados à mudança de uso do solo, dentre os quais destacam-se (FOLEGATTI, 2018): i) a produção deve ser proveniente de área sem desmatamento ii) toda área cultivada deve estar em conformidade com o Código Florestal, atestado em Cadastro Ambiental Rural (CAR). Sendo assim, o programa RenovaBio busca minimizar esses impactos por meio da regulação, o que reforça o papel normativo na mitigação das emissões e conseqüentemente, a importância de estudos que considerem o ambiente regulatório.

No tocante às emissões, atividades de uso e produção de energia representam mais de 70% das emissões mundiais de gases de efeito estufa (CAIT/WRI, 2019), o que reafirma a relevância do indicador “potencial para mitigação de emissões”. Neste cenário, empresas e governos são desafiados a garantir segurança energética ao mesmo tempo em que se adaptam no caminho rumo à transição. No contexto apresentado, destacam-se setores de difícil descarbonização como é o caso da aviação e da navegação.

A aviação é dependente de combustíveis com alta densidade energética em razão de limitações naturais de massa e volume carregados nas aeronaves. Em função das condições de uso, os combustíveis de aviação devem possuir ainda estabilidade térmica e propriedades de escoamento adequadas, entre diversos outros requisitos de qualidade especificados (SOUZA, 2019). Considerando este contexto e requisitos de qualidade tão específicos, o alto custo de produção aliado à falta de cadeia de suprimentos, apresentam-se como importantes desafios a serem superados para desenvolvimento de um mercado global de bioquerosene de aviação (HARI; YAAKOB; BINITHA, 2015).

No setor de navegação, os custos de combustível correspondem de 24% a 41% dos custos totais (IRENA, 2019). Combustíveis alternativos como metanol, gás natural liquefeito ou hidrogênio possuem menor densidade energética (DE VRIES, 2019), ao mesmo tempo em que o bunker é produzido a partir de correntes residuais do refino, de menor valor agregado, fazendo com que alternativas ao combustível fóssil dificilmente se tornem economicamente competitivas no curto prazo.

Com relação aos produtos (derivados) considerados neste trabalho, o diesel ocupou a primeira posição, seguido pelo QAV e por último o Bunker. O combustível marítimo aparece no último lugar em função da baixa maturidade tecnológica das rotas envolvendo a produção desta corrente, bem como uma regulação ainda incipiente. O critério custo do vetor energético não foi analisado sob a ótica dos derivados produzidos, a comparação foi feita para os vetores energéticos entre si. No entanto, o trabalho de WEI (2021), que compara combustíveis alternativos para o transporte marítimo observa que a produção de bunker via HVO é promissora no contexto da transição energética, destacando como fatores limitantes da rota o alto custo³² (refletido no alto preço do vetor energético) e a demanda de hidrogênio.

De forma geral, a produção de combustíveis avançados tende a ser mais custosa que a produção de combustíveis fósseis ou biocombustíveis de primeira geração, demandando políticas baseadas em mandatos que estimulem a demanda, promovendo o desenvolvimento de mercado (IRENA, 2016). Políticas públicas de longo prazo podem ainda facilitar o desenvolvimento da infraestrutura necessária, garantindo que os biocombustíveis avançados tenham acesso ao mercado. No entanto, IRENA (2016) observou que políticas públicas pioneiras, ao introduzir metas reduzidas, não obtiveram êxito no desenvolvimento do mercado. Foi citado o exemplo da Itália, o qual foi o pioneiro a introduzir uma meta obrigatória para produção de biocombustíveis avançados em 2022, contudo, sem gerar impacto visível na capacidade produtiva.

O macro critério disponibilidade, apesar de ter peso variando entre 15% e 52% em função das diferentes perspectivas de grupos julgadores (conforme Tabela 33) é um critério relevante para viabilizar a efetiva escolha da alternativa. Van Dyk (2019) sugere que o principal desafio do coprocessamento de correntes renováveis não é tecnológico, mas de disponibilidade e custo. Adicionalmente, Lucon, Romeiro e Fransen, (2015)

³² O bunker convencional é produzido com correntes residuais, sendo um derivado de custo mais baixo, em comparação com outros derivados como diesel ou QAV, o que torna ainda mais crítico o critério custo.

concluem que as principais barreiras para o desenvolvimento de bicompostíveis líquidos no Brasil residem em aspectos logísticos e de conflitos relacionados ao uso do solo.

5.3. Análise de sensibilidade e considerações

Os cenários de sensibilidade considerados neste trabalho relacionam-se a 1) mudanças nos pesos atribuídos aos indicadores e macro critérios, de acordo com perspectiva de cada grupo; 2) mudanças temporais nos cenários considerados que podem alterar notas atribuídas; 3) incertezas relacionadas a ausência de informações de mesma base metodológica, caso do indicador “potencial para mitigação de emissões”;

5.3.1. Sensibilidade relacionada a diferentes perspectivas

A Tabela 32 - Vetor de prioridade (pesos) dos indicadores traz o julgamento de cada grupo de especialistas consultados neste trabalho. Quatro cenários de sensibilidade foram considerados, baseando-se na visão dos diferentes grupos, sendo estes: Empresa, Governo, Institutos de pesquisa e ONG. Os pesos atribuídos por estes grupos foram aplicados ao cálculo, obtendo-se os seguintes resultados.

Na visão Empresa, que atribui peso maior a oferta do vetor energético (13% no lugar de 9%), a soja passa a ocupar a segunda posição no ranking, em regiões com maior escala de processamento como SP e SUL, quando coprocessamento ocorre no HDT (unidade com melhor performance em termos de maturidade tecnológica, qualidade do vetor e conformidade regulatória).

Seguindo a visão governo, a qual foi composta por representantes³³ que atribuíram peso maior à oferta do vetor energético e à oferta de matéria prima, e menor a indicadores relacionados a macro-critérios socioambientais, a soja ocupa a segunda opção em todas as regiões, quando o processamento ocorre no HDT, nas regiões SP e SUL para o coprocessamento em FCC.

A visão ONG, a qual atribui peso baixo à oferta da matéria prima e oferta do vetor energético e especialmente alto ao custo do vetor e vulnerabilidade hídrica, desloca a soja

³³ As respostas ao questionário não necessariamente refletem a visão das empresas, governos, ou demais entidades aos quais seus representantes estão profissionalmente vinculados.

para a última posição dentre os vetores energéticos considerados, em todas as regiões e opções de unidades.

Por fim, a visão Instituto de pesquisa não alterou o ranking

5.3.2. Sensibilidade relacionada a mudanças temporais

No processo de transformação do setor energético, deslocamentos temporais podem alterar de forma especial aspectos relacionados à maturidade tecnológica e ao ambiente regulatório nos quais estão inseridas as alternativas de coprocessamento.

No que concerne à maturidade tecnológica da rota, Soares et al (2021) observam que o componente tecnológico recebe destaque como vetor principal da transição energética, trazendo incertezas inerentes ao processo, tal como descrito por Helm (2016):

“É impossível saber com antecedência quais tecnologias serão bem-sucedidas. É da natureza do progresso técnico que haja surpresas. Se tivéssemos o conhecimento para prever, já teríamos as tecnologias”. Livre tradução de Helm (2016).

Adicionalmente, o arcabouço regulatório de diferentes países (assim como a estratégia das empresas), são reorientados de maneira progressiva a fim de atingir novas demandas do setor, no processo de transição energética (SOARES; QUEIROZ PINTO JR; BOMTEMPO MARTINS, 2021).

Considerando potenciais avanços tecnológicos³⁴ e mudanças no ambiente regulatório ao longo do tempo, foi proposto o cenário alternativo conforme descrito na Tabela 36.

³⁴ Como por exemplo no sentido minimizar desativação catalítica e melhorar seletividade do catalizador, no processo de pirólise, aumentando rendimento de líquidos.

Tabela 36 - Premissas de sensibilidade: Mudanças temporais

Vetor Energético	Unidade de processo	Produto	Mudança no TRL	Mudança na nota de TRL	Mudança na nota de conformidade regulatória
Óleo vegetal OVR	FCC/HDT	Diesel	Sem alteração na premissa de TRL		Sem alteração na premissa de conformidade regulatória
	HDT	Diesel			
	FCC/HDT	QAV			
	HDT	QAV			
	FCC/HDT	Bunker	De 4 para 6	De 2 para 3	De 1 para 2
	HDT	Bunker	De 4 para 6	De 2 para 3	De 2 para 3
Bio-óleo	FCC/HDT	Diesel	De 5 para 8	De 3 para 4	De 1 para 2
	HDT	Diesel	De 4 para 7	De 2 para 4	De 3 para 4
	FCC/HDT	QAV	De 5 para 8	De 3 para 4	De 1 para 2
	HDT	QAV	De 4 para 7	De 2 para 4	De 2 para 3
	FCC/HDT	Bunker	De 2 para 4	De 1 para 2	De 1 para 2
	HDT	Bunker	De 2 para 4	De 1 para 2	De 1 para 2

Esta sensibilidade não alterou o ranking de classificações.

5.3.3. Sensibilidade relacionada ao potencial para mitigação de emissões

O óleo de soja foi o vetor energético que recebeu a menor nota no indicador Potencial para mitigação de emissões. Em paralelo o OVR recebeu a segunda maior nota. O cenário de sensibilidade proposto trouxe ambos ao mesmo patamar de mitigação das emissões, conforme Tabela 37.

Tabela 37 - Premissas de sensibilidade: Potencial para mitigação de emissões

Vetor energético	Unidade Proc.	Nota
Óleo de soja	FCC/HDT	De 2 para 3
	HDT	De 1 para 2
Óleo de Palma	FCC/HDT	Sem alteração
	HDT	
Óleo de Macaúba	FCC/HDT	
	HDT	
OVR	FCC/HDT	De 4 para 3
	HDT	De 3 para 2
Bio-óleo	FCC/HDT	Sem alteração
	HDT	

Como resultado, a posição do OVR não se alterou e o óleo de soja passou a ocupar a segunda posição em todas as regiões, para o coprocessamento em HDT; e nas regiões SUL e SP para o coprocessamento em FCC.

6. CONCLUSÃO

O trabalho alcançou o objetivo proposto ao identificar e classificar de forma objetiva as alternativas de coprocessamento de insumos renováveis no país, dado o escopo analisado no âmbito do mestrado. Para o desenvolvimento do trabalho, aplicou-se um questionário para o qual foram obtidas 26 respostas. É uma quantidade que não possui relevância estatística, contudo, atende ao objetivo de representar diferentes perspectivas. Ao considerar diversos pontos de vista, sob a ótica de disponibilidade, logística, técnica e socioambiental, o resultado deste trabalho fornece apoio e orientação úteis em decisões estratégicas envolvendo energia renovável.

Óleo vegetal residual aparece como primeira opção de insumo renovável destinado ao coprocessamento, dentre as alternativas consideradas. Porém demanda desenvolvimento em infraestrutura de coleta e distribuição de forma a viabilizar seu efetivo uso.

O bio-óleo ocupa a segunda posição no ranking, com notas altas em oferta de matéria prima, sazonalidade de matéria prima, competição com setor agropecuário, custo do vetor energético, vulnerabilidade hídrica, potencial para mitigação de emissões e geração de emprego, porém com limitações importantes em aspectos relacionados à qualidade do vetor. Contudo, a literatura consultada sugere que bio-óleo proveniente de pirólise de microalga pode apresentar qualidade superior. As algas não foram consideradas no conjunto de matérias-primas deste trabalho, podendo ser objeto de análise em estudos futuros.

A terceira e quarta posição são ocupadas respectivamente pelo óleo de soja e óleo de palma. Óleo de macaúba ocupa a última posição, tendo recebido as notas mais baixas no macro critério disponibilidade. Sugere-se o estudo de iniciativas que promovam o cultivo da macaúba, tendo em vista ainda que se apresenta como a oleaginosa de menor vulnerabilidade hídrica dentre as alternativas consideradas.

É relevante considerar também a necessidade de pré-tratamento das diversas cargas. Óleos vegetais residuais por exemplo tendem a possuir alto conteúdo de fósforo, os quais acabam por contaminar catalisadores de HDT, influenciando nas reações de hidrotreatamento. Processos e localização do pré-tratamento precisam ser identificados para refinar possíveis locais de origem do vetor energético pré-tratado, o que impacta no custo do vetor e não foi considerado neste trabalho.

Para a abordagem multicritério foram considerados 13 indicadores. O que recebeu maior peso foi a oferta de matéria prima, seguido por vulnerabilidade hídrica, mitigação de emissões e oferta do vetor energético. Apenas dois indicadores são capazes de diferenciar regiões: Escala de processamento e vulnerabilidade hídrica. De forma similar, apenas dois indicadores diferenciam os produtos (derivados produzidos): Maturidade tecnológica e conformidade regulatória.

O indicador “Custo do vetor energético” não considerou detalhamento de frete, pois a informação não estava disponível no tempo de desenvolvimento desta dissertação. Em trabalhos futuros baseados em análise multicritério, sugere-se que o custo do vetor contenha detalhamento relacionado à frete.

Nesta dissertação o indicador de qualidade do vetor refletiu características relacionadas à facilidade de coprocessamento, não avaliando atributos específicos que tenham relação com o derivado produzido. Desta forma, sugere-se que o indicador “Qualidade do vetor energético” considere também características relacionadas ao produto em estudos futuros.

Foram feitas sensibilidades variando-se o peso dos indicadores (a partir da perspectiva de cada um dos quatro diferentes grupos), o que alterou a posição da soja entre segundo e último colocado no ranking de vetor energético.

Outro cenário de sensibilidade alterou as notas relacionadas à maturidade tecnológica e arcabouço regulatório (representando mudanças temporais que promovessem avanço tecnológico e desenvolvimento regulatório). Contudo não gerou alteração no ranking.

Foi proposto ainda um cenário de sensibilidade trazendo o OVR e o óleo de soja ao mesmo patamar de mitigação das emissões, o qual alterou a posição da soja (para segunda colocação), mas sem desbancar o OVR da primeira colocação. Este resultado sugere que o coprocessamento de soja comprovadamente sustentável pode destacá-la como uma boa alternativa de vetor energético.

Sob a ótica dos derivados produzidos, o diesel é o derivado mais favorável à produção via coprocessamento seguido pelo querosene de aviação, enquanto o bunker ocupa a última opção entre as alternativas consideradas neste trabalho. É possível observar que ambos os setores citados, navegação e aviação, não possuem alternativas de baixo carbono em escala economicamente viáveis atualmente. Isso faz com que o Bunker,

utilizado no transporte marítimo e o QAV sejam derivados de difícil substituição no curto e médio prazo, o que pode inclusive promover um atraso no ritmo da transição energética desejada.

Neste contexto, sugere-se estudo relacionado à produção futura de biocombustíveis em larga escala. Aumentar a escala de produção se apresenta como um grande desafio já que a depender da matéria prima utilizada, levantam-se questões relevantes quanto à infraestrutura necessária de distribuição e o uso intenso do solo. Sugere-se aprofundamento em análises futuras considerando outras opções de matérias primas como por exemplo gordura animal, oleaginosas alternativas ou até mesmo uso de algas para produção de bio-óleo, dando enfoque ao desenvolvimento de novas cadeias de suprimento. É necessário desenvolver cadeias de matérias primas lipídicas alternativas.

Nos estudos de produção em larga escala, deve-se observar ainda os potenciais impactos relacionados à sustentabilidade, em particular relativos à demanda hídrica. Por exemplo, a expansão acentuada de culturas energéticas representará uma nova fonte de demanda de água, o que aponta para a necessidade de desenvolverem-se políticas públicas destinadas à mitigação de riscos e impactos ambientais possivelmente observados a partir do aumento no uso de recurso hídrico. Impactos na mudança de uso do solo não foram considerados no critério vulnerabilidade hídrica, demandando aprofundamento em estudos posteriores.

As emissões provenientes de mudança de uso do solo, da mesma forma, não foram consideradas no escopo deste trabalho. Contudo, é possível mitigar impactos de mudanças indiretas de uso do solo a partir da produção em áreas degradadas, o que também demanda estudos para dimensionamento de áreas propícias.

No âmbito do planejamento do refino, destacam-se os possíveis destinos das correntes não tratadas no HDT, por conta da substituição por corrente renovável. Um possível destino é como diluente de escuros, como óleo combustível, por exemplo. Ou até mesmo uma mudança no elenco processado (com menor rendimento de médios, ou seja, de correntes tratadas no HDT) poderia ajustar de forma adequada a utilização das unidades frente à necessidade de atendimento ao mercado dos diferentes derivados. O planejamento de refino precisa ser analisado de forma mais detalhada, a fim de considerar o adequado balanço de correntes da refinaria, o que pode ser feito também a partir de modelos matemáticos detalhados que contemplem capacidade das unidades de processo

(unidades de refino), qualidades de correntes intermediárias produzidas e vetores de rendimento.

De forma prática, o carbono renovável fica distribuído em vários produtos, durante o processo de refino, como no processamento em unidades de FCC. Mas é possível alocar contabilmente o conteúdo renovável em produtos de interesse. Desta forma sugerem-se avaliações desta natureza, que considerem também derivados que não fizeram parte do escopo desta dissertação, como é o caso da nafta, que pode ser direcionada ao mercado de petroquímicos.

É destacado ainda o interesse em desenvolver e consolidar o mercado de hidrogênio no Brasil, sendo reconhecido seu potencial de contribuição para uma matriz energética de baixo carbono. Neste sentido, é possível desenvolver trabalhos que avaliem produção de hidrogênio com menor pegada de carbono para uso no contexto do refino de petróleo.

Por fim, recomendam-se pesquisas futuras relacionadas ao processamento de correntes fósseis produzidas de forma mais eficiente, logo, com menor pegada de carbono. Neste sentido, algumas empresas estabeleceram alvos relacionados às emissões advindas do processo de produção de petróleo (CARBONTRACKER, 2019). Tal questão não foi considerada no escopo deste trabalho, mas também recebe destaque na indústria de O&G, no caminho rumo à transição energética.

7. REFERÊNCIAS

ABIOVE. **Estatísticas**. Disponível em: <<https://abiove.org.br/estatisticas/>>. Acesso em: 17 out. 2022.

ADAMI, A. C. DE O.; BACCHI, M. D. **Evolução da Participação das Fontes de Energias Renováveis nas Matrizes Energéticas dos Países da América do Sul**. Disponível em: <<https://www.revistaespacios.com/a16v37n19/16371901.html>>. Acesso em: 3 maio. 2022.

AGBLEVOR, F. A. et al. Co-processing of standard gas oil and biocrude oil to hydrocarbon fuels. **Biomass and Bioenergy**, v. 45, p. 130–137, out. 2012.

AGROPALMA. **Cultivo de dendê transforma vidas**. Disponível em: <<https://www.agropalma.com.br/cultivo-de-dende-transforma-vidas/>>. Acesso em: 27 set. 2022.

ALBEMARLE. FCC pathways to co-processing. n. August 2020, 2021.

ALMEIDA, A. T. DE; COSTA, A. **Aplicações com métodos multicritério de apoio à decisão**. Recife: Editora Universitária, 2003.

ALMEIDA, F. H. L. DE. **Desenvolvimento, acúmulo de óleo e armazenamento de cocomacáuba**. Dissertação de Mestrado — Universidade estadual de montes de montes claros-Unimontes, 2014.

ALMEIDA, M. B. B. DE. **Bio-óleo a partir da pirólise rápida, térmica ou catalítica, da palha da cana-de-açúcar e seu co-processamento com gásóleo em craqueamento catalítico Marlon**. Dissertação (Mestrado) — Rio de Janeiro: Universidade Federal do rio de Janeiro, 2008.

ALMG. **Projeto Macaúba seria saída sustentável para economia de MG - Assembleia de Minas**. Disponível em: <https://www.almg.gov.br/acompanhe/noticias/arquivos/2019/08/22_audiencia_conjunta_bioquerosene.html>. Acesso em: 8 jul. 2022.

ANA. Índice De Segurança Hídrica - Manual Metodológico. 2017.

ANA. **Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil — Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos**. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/central-de-publicacoes/ana_manual_de_usos_consuntivos_da_agua_no_brasil.pdf/view>. Acesso em: 5 set. 2022.

ANP. **Resolução anp nº 778, de 5.4.2019, dou 8 de abril de 2019**. Disponível em: <<https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-778-2019-estabele-ce-as-especificacoesdo-querosene-de-aviacao-querosenes-de-avia-cao-alternativos-e-do-querosene-de-aviacao-c-bem-como-as-obrigacoes-quanto-ao-controle-da-qualidade-a-serem-atendidas-pelos->>.

ANP. **Resolução N° 842, de 14 de maio de 2021.** Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-anp-n-842-de-14-de-maio-de-2021-320059616>>.

ANP. **Anuário Estatístico 2022.** Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/anuario-estatistico-2022>>.

AOUN, B. W.; GABRIELLE, B.; GAGNEPAIN, B. The importance of land use change in the environmental balance of biofuels. **OCL**, v. 20, n. 5, p. D505, 1 set. 2013.

ARAÚJO, K. The emerging field of energy transitions: Progress, challenges, and opportunities. **Energy Research & Social Science**, v. 1, p. 112–121, 2014.

ARVIDSSON, R. et al. Life cycle assessment of hydrotreated vegetable oil from rape, oil palm and Jatropha. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, n. 2–3, p. 129–137, jan. 2011.

BAPTISTA, P. **Um modelo multicritério para avaliar o sistema de qualidade de um ambiente de produção.** Tese de Doutorado—Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2000.

BAZZO, B. R. et al. Development of novel EST-SSR markers in the macaúba palm (*Acrocomia aculeata*) using transcriptome sequencing and cross-species transferability in Arecaceae species. **BMC Plant Biology**, v. 18, n. 1, p. 1–10, 2018.

BEIMS, R. F. et al. Co-Processing of Thermal Cracking Bio-Oil At Petroleum Refineries. **Brazilian Journal of Petroleum and Gas**, v. 11, n. 2, p. 99–113, 2017.

BENEZOLI, V. H.; IMBUZEIRO, H. M. A.; ABRAHÃO, G. M. **Water limitations for the natural occurrence of macaúba and dendê in Brazil.** 2017 Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/319205289>>. Acesso em: 1 jul. 2022

BERGMANN, J. C. et al. Biodiesel production in Brazil and alternative biomass feedstocks. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 21, p. 411–420, 2013.

BERNDES, G. Bioenergy and water - The implications of large-scale bioenergy production for water use and supply. **Global Environmental Change**, v. 12, n. 4, p. 253–271, 2002.

BEZERGIANNI, S. Catalytic Hydroprocessing of Liquid Biomass for Biofuels Production. **Advanced Biofuels: Using Catalytic Routes for the Conversion of Biomass Platform Molecules**, n. February, p. 47–82, 2013.

BEZERGIANNI, S. et al. Refinery co-processing of renewable feeds. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 68, p. 29–64, 2018.

BHUIYA, M. M. K. et al. Prospects of 2nd generation biodiesel as a sustainable fuel - Part: 1 selection of feedstocks, oil extraction techniques and conversion technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 55, p. 1109–1128, 2016.

BIANCO, G. L. Metodologia para auxiliar a Tomada de Decisão Gerencial na priorização de investimentos públicos em rodovias utilizando-se da análise multicritério. 2016.

BIELANSKY, P.; REICHHOLD, A.; SCHÖNBERGER, C. **Processing of pure vegetable oils in a continuous fcc pilot plant**. Viena: Vienna University of Technology, 2010. Disponível em:

<https://dc.engconfintl.org/cgi/viewcontent.cgi?article=1034&context=fluidization_xiii>. Acesso em: 20 out. 2021

BIODIESELBR. **Rendimento de óleo das Sementes**. Disponível em:

<<https://www.biodieselbr.com/biodiesel/sementes/rendimento-sementes-oleo>>. Acesso em: 24 maio. 2022. 2011.

BIODIESELBR. **UE impõe limites ao uso óleo de palma na produção de biocombustíveis | BiodieselBR.com**. Disponível em:

<<https://www.biodieselbr.com/noticias/inter/ue/ue-impoe-limites-ao-uso-oleo-de-palma-na-producao-de-biocombustiveis-140319>>. Acesso em: 24 maio. 2022.

BIODIESELBR. **FAO: óleos vegetais abrem 2022 no maior patamar de preços da história**. Disponível em:

<<https://www.biodieselbr.com/noticias/materia-prima/alimento/fao-oleos-vegetais-abrem-2022-no-maior-patamar-de-precos-da-historia-030222>>. Acesso em: 29 nov. 2022a.

BIODIESELBR. **Óleos vegetais seguem em queda pelo quinto mês seguido, segundo FAO**. Disponível em:

<<https://www.biodieselbr.com/noticias/materia-prima/alimento/oleos-vegetais-seguem-em-queda-pelo-quinto-mes-seguido-segundo-fao-0509322>>. Acesso em: 29 nov. 2022b.

BIODIESELMAGAZINE.COM. **ConocoPhillips begins production of renewable diesel**. Disponível em:

<<http://www.biodieselmagazine.com/articles/1481/conocophillips-begins-production-of-renewable-diesel>>. Acesso em: 27 out. 2021.

BIODIESELMAGAZINE. **Getting It Renewable Ready | BiodieselMagazine.com**.

Disponível em: <<https://biodieselmagazine.com/articles/2517585/getting-it-renewable-ready>>. Acesso em: 25 set. 2022.

BIOFUELSINTERNATIONAL. Europe's HVO feedstock conundrum. v. 13, n. 6, 2019.

BIOFUELSINTERNATIONAL. From waste to renewable diesel. v. 15, n. 2, 2021.

BONOMI, A. et al. Comparison of Biofuel Life Cycle Analysis Tools Phase 2, Part 1: FAME and HVO/HEFA Prepared by. 2018.

BRANCO, M. D. O mercado brasileiro para óleo de palma (Azeite de dende) equatoriano. 2011.

BRANS, JEAN-PIERRE; MARESCHAL, B. Multiple Criteria decision Analysis - State of the art surveys. *Environmental Sciences*, v. 78, n. 23, p. 163–195, 2005.

BRASIL. **Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005. Dispõe sobre a introdução do biocombustível na matriz energética brasileira**. Disponível em:

<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2005/lei/111097.htm>. Acesso

em: 20 jun. 2022.

BRASIL. **Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis e dá outras providências.** Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/113576.htm>. Acesso em: 20 jun. 2022.

BRASIL. **Portaria nº 144, de 22 de julho de 2019 - portaria nº 144, de 22 de julho de 2019 - DOU - Imprensa Nacional.** Disponível em: <<https://www.in.gov.br/web/dou/-/portaria-n-144-de-22-de-julho-de-2019-203419910>>. Acesso em: 25 set. 2022.

BRASIL. **Solicitar direito de uso do Selo Biombustível Social — Português (Brasil).** Disponível em: <<https://www.gov.br/pt-br/servicos/solicitar-selo-combustivel-social-scs>>. Acesso em: 25 set. 2022.

BRASIL. **Presidente da República aprova parcialmente a Resolução nº 12, de 21 de novembro de 2022, do Conselho Nacional de Política Energética.** Disponível em: <[https://www.gov.br/secretariageral/pt-br/noticias/2022/novembro/presidente-da-republica-aprova-parcialmente-a-resolucao-no-12-de-21-de-novembro-de-2022-do-conselho-nacional-de-politica-energetica#:~:text=O Presidente da República aprovou,em 10%25%2C no pe](https://www.gov.br/secretariageral/pt-br/noticias/2022/novembro/presidente-da-republica-aprova-parcialmente-a-resolucao-no-12-de-21-de-novembro-de-2022-do-conselho-nacional-de-politica-energetica#:~:text=O%20Presidente%20da%20República%20aprovou,em%2010%25%2C%20no%20pe)>.

BRASIL. **Conselho Nacional de Política Energética.** Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/cnpe>>.

BRASIL (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA). **Plano Nacional de Segurança Hídrica.** Disponível em: <<https://arquivos.ana.gov.br/pnsh/pnsh.pdf>>.

BRASIL, N. Í. DO; SANTOS, A. A.; SOUZA, E. C. M. DE. **Processamento de Petróleo e Gás: petróleo e seus derivados, processamento primário, processos de refino, petroquímica, meio ambiente.** 2a. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

BRAZ, D. S. **Produção de combustível de aviação em biorrefinarias anexas a fábricas kraft de celulose de eucalipto : avaliação técnico-econômica, de ciclo de vida e tomada de decisão por múltiplos critérios.** Dissertação de Mestrado—Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2018.

BRIDGWATER, A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. **Biomass and Bioenergy**, v. 38, p. 68–94, 2012.

BRUGGEMANN, R.; CARLSEN, L. Multi-criteria decision analyses . Viewing MCDA in terms of both process and aggregation methods : Some thoughts , motivated by the paper of Huang , Keisler and Linkov. **The Science of the Total Environment**, v. 425, p. 293–295, 2012.

BUENO, C. **Planejamento Operacional de Refinarias.** Dissertação de Mestrado—Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.

BUFFI, M. et al. Emissions characterization tests for hydrotreated renewable jet fuel from used cooking oil and its blends. **Applied Energy**, v. 201, p. 84–93, 2017.

CAIT/WRI. **CAIT Climate Data Explorer**. Disponível em: <<http://cait.wri.org/>>. Acesso em: 30 out. 2021.

CALDECOTT, B.; TILBURY, J.; CAREY, C. Stranded Assets and Scenarios. p. 22, 2014.

CALLEGARI, F. C. **Desenvolvimento e avaliação físico-química e microbiológica de cosméticos para a pele humana contendo óleos de macaúba (acrocomia aculeata (jacq.) Lodd. Ex mart)**. Dissertação de Mestrado—Belo Horizonte, Minas Gerais: UFMG, 2015.

CAMPBELL, P. K.; BEER, T.; BATTEN, D. Life cycle assessment of biodiesel production from microalgae in ponds. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 1, p. 50–56, 2011.

CANADA'S BIOJET SUPPLY CHAIN INITIATIVE (CBSCI). HEFA Production and Feedstock Selection. 2019.

CARB, C. A. R. B. California Environmental Protection Agency Air Resources Board Staff Report: Calculating Carbon Intensity Values from Indirect Land Use Change of Crop-Based Biofuels Industrial Strategies Division Transportation Fuels Branch Alternative Fuels Section. 2015.

CARBONTRACKER. **The missing link – bridging the gap between emission targets and fossil fuel output - Carbon Tracker Initiative**. Disponível em: <<https://carbontracker.org/the-missing-link-bridging-the-gap-between-emission-targets-and-fossil-fuel-output/>>. Acesso em: 27 out. 2021.

CARVALHO, F. M. DE. **Evaluation of the brazilian potential for producing aviation biofuels through consolidated routes**. Dissertação de mestrado—Rio de Janeiro: UFRJ, 2017.

CARVALHO, F. et al. Biofuels for Maritime Transportation: A Spatial, Techno-Economic, and Logistic Analysis in Brazil, Europe, South Africa, and the USA. 2021.

CASTRO, C. N. Plano Nacional De Segurança Hídrica, Problemas Complexos E Participação Social. p. 303, 2021.

CASTRO, J. C. DE. **Aplicação do método de análise multicritério para selecionar políticas públicas de incentivo à redução da informalidade no polo de confecções do agreste pernambucano**. Dissertação de Mestrado—Pernambuco: Universidade Federal de Pernambuco, 2013.

CÉSAR, A. D. S. et al. The prospects of using *Acrocomia aculeata* (macaúba) a non-edible biodiesel feedstock in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 49, p. 1213–1220, 1 out. 2015.

CHERIF, R.; HASANOV, F.; PANDE, A. Riding the Energy Transition : Oil Beyond 2040. 2017.

CICONINI, G. **Caracterização de frutos e óleo de polpa de macaúba dos biomas Cerrado e Pantanal do estado de Mato Grosso do Sul , Brasil.** Dissertação de Mestrado—Campo Grande, Mato Grosso do Sul: Universidade católica Dom Bosco, 2012.

CLIMATE ACTION TRACKER. A government roadmap for addressing the climate and post COVID-19 economic crises. n. April, p. 33, 2020.

CNPE. Resolução nº 6, de 20 de abril de 2021. p. 10–11, 2021.

COBULOGLU, H. I.; BÜYÜKTAHTAKIN, I. E. A stochastic multi-criteria decision analysis for sustainable biomass crop selection. **Expert Systems with Applications**, v. 42, n. 15–16, p. 6065–6074, 2015.

COLLARES, D. **Embrapa busca viabilizar o cultivo da Macaúba em sistemas sustentáveis.** Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/6438362/embrapa-busca-viabilizar-o-cultivo-da-macauba-em-sistemas-sustentaveis>>. Acesso em: 17 jun. 2022.

CONAB. Calendário de Plantio e Colheita de Grãos no Brasil 2019. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**, p. 75, 2019.

CONNELLY, E. B. et al. Risk Analysis of Biofuels Industry for Aviation with Scenario-Based Expert Elicitation. p. 178–191, 2015.

CORDEIRO, C. et al. Cover crop increases soybean yield cropped after degraded pasture in sandy soil. **Rev. Bras. Eng. Agrícola Ambient**, v. 25, p. 514–521, 2021.

CORTEZ, L. A. B. **Roadmap for sustainable aviation biofuels for Brazil: a flightpath to aviation biofuels in Brazil.** São Paulo: BOEING/EMBRAER/UNICAMP and FAPESP, 2014.

CROWN. **Biofuel - Crown Iron Works.** Disponível em: <<https://www.crowniron.com/biofuel/>>. Acesso em: 25 set. 2022.

DE PAZ CARMONA, H. et al. Suitability of used frying oil for co-processing with atmospheric gas oil. **Fuel**, v. 214, n. November 2017, p. 165–173, 2018.

DE PAZ CARMONA, H. et al. Co-processing of straight run gas oil with used cooking oil and animal fats. **Fuel**, v. 254, n. February, p. 115583, 2019.

DE SOUZA, L. M.; MENDES, P. A. S.; ARANDA, D. A. G. Oleaginous feedstocks for hydro-processed esters and fatty acids (HEFA) biojet production in southeastern Brazil: A multi-criteria decision analysis. **Renewable Energy**, v. 149, p. 1339–1351, 2020.

DE SOUZA, T. A. Z. et al. Biodiesel in South American countries: A review on policies, stages of development and imminent competition with hydrotreated vegetable oil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 153, 1 jan. 2022.

DE VRIES, N. **Safe and effective application of ammonia as a marine fuel.** Delft, Holanda: Delft University of technology, 2019.

DÍAZ, H. J. N. Produção de ésteres alquílicos de ácidos graxos a partir do óleo da polpa de macaúba com álcoois em condições supercríticas : estudo da cinética de reação e dos custos de manufatura em escala industrial Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-Gradu. 2016.

DICKERSON, T.; SORIA, J. Catalytic fast pyrolysis: A review. **Energies**, v. 6, n. 1, p. 514–538, 2013.

DISCONZI, G. S. Coleta seletiva de óleo residual doméstico: Desafios e perspectivas para um aproveitamento socioambiental sustentável. p. 122, 2014.

DOS SANTOS CORDEIRO, C. F.; ECHER, F. R. Interactive Effects of Nitrogen-Fixing Bacteria Inoculation and Nitrogen Fertilization on Soybean Yield in Unfavorable Edaphoclimatic Environments. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 1–11, 2019.

DOU. RESOLUÇÃO Nº 12, DE 21 DE NOVEMBRO DE 2022. p. 2022, 2022.

DUQUE, M. A. **O futuro da indústria do refino europeu à luz do conflito entre soberania energética e política climática**. Tese de Doutorado—Rio de Janeiro: UFRJ, 2017.

E4TECH. Advanced drop-in biofuels: UK production capacity outlook to 2030. n. February, p. 1–91, 2017.

EC, E. C. **Renewable Energy – Recast to 2030 (RED II)**. Disponível em: <https://joint-research-centre.ec.europa.eu/welcome-jec-website/reference-regulatory-framework/renewable-energy-recast-2030-red-ii_en>. Acesso em: 10 jul. 2022.

ECOFYS. Determining the renewability of co-processed fuels Final report. p. 34, 2018.

EIA. International Energy Outlook 2019 with projections to 2050. **Choice Reviews Online**, v. 44, n. 07, p. 44-3624-44–3624, 2020.

EMBRAPA. **Tecnologia de alimentos**. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/tecnologia_de_alimentos/arvore/CONT000gc8yujq302wx5ok01dx9lcx1g7v3u.html>. Acesso em: 24 maio. 2022. 2008.

EMBRAPA. Manual sobre o Uso da Escala TRL/MRL. p. 44, 2018.

EMBRAPA. Estudos Preliminares sobre Colheita e Armazenamento de Frutos de Macaúba. 2020.

EMPRAPA. A nova cadeia produtiva da macaúba para bioprodutos e descarbonização. 2022.

ENSSLIN, L.; MONTIBELLER, G.; NORONHA, M. S. Apoio à Decisão – Metodologias para Estruturação de Problemas e Avaliação multicritério de Alternativas. p. 296, 2001.

EPA. **Renewable Fuel Standard (RFS2): Final Rule | US EPA**. Disponível em: <<https://www.epa.gov/renewable-fuel-standard-program/renewable-fuel-standard-rfs2->

final-rule>. Acesso em: 10 jul. 2022.

EPE. Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis – Ano 2020. **EPE - Empresa de Pesquisa Energética**, p. 87, 2021.

ERICKSON, P. et al. Assessing carbon lock-in. **Environmental Research Letters**, v. 10, n. 8, 2015.

ESCHENBACHER, A. et al. Co-processing of wood and wheat straw derived pyrolysis oils with FCC feed — Product distribution and effect of deoxygenation. **Fuel**, v. 260, n. June 2019, p. 116312, 2020.

FACCINI, C. S. **Obtenção De Bio-Óleos Por Pirólise De Resíduos Da Indústria De Celulose E Sua Caracterização Por Cromatografia Gasosa**. Tese (Doutorado)—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

FAEG. **Agropecuária tem maior geração de empregos dos últimos 10 anos: Goiás se destaca em 2020**. Disponível em: <<https://sistemafaeg.com.br/faeg/noticias/id-agro/agropecuaria-tem-maior-geracao-de-empregos-dos-ultimos-10-anos-goias-se-destaca-em-2020>>.

FAO-ESTATÍSTICS. **FAOSTAT**. Disponível em: <<https://www.fao.org/faostat/en/#home>>. Acesso em: 9 set. 2022.

FARIA, R. A. DE et al. Demanda de irrigação suplementar para a cultura do milho no estado de minas gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 1, p. 46–50, 2000.

FELIZARDO, P. et al. Production of biodiesel from waste frying oils. **Waste Management**, v. 26, n. 5, p. 487–494, 2006.

FERNÁNDEZ-COPPEL, I. A. et al. Life cycle analysis of macauba palm cultivation: A promising crop for biofuel production. **Industrial Crops and Products**, v. 125, p. 556–566, 2018.

FEROLDI, M.; CREMONEZ, P. A.; ESTEVAM, A. **Dendê: Do Cultivo Da Palma À Produção De Biodiesel**. Disponível em: <<https://periodicos.ufsm.br/remoa/article/view/14674/pdf>>. Acesso em: 1 out. 2022.

FERREIRA DA MOTTA, P. E. et al. Ocorrência da macaúba em Minas Gerais: relação com atributos climáticos, pedológicos e vegetacionais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 7, p. 1023–1031, 2002.

FIGUEIRA, J.; GRECO, S.; EHRGOTT, M. Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys. **Environmental Sciences**, v. 78, n. 23, p. 953–986, 2005.

FIGUEIREDO, L. O papel do plano nacional de segurança hídrica: a universalização do acesso a água no país, principalmente no nordeste e ceará. **FGV-Fundação Getúlio Vargas**, 2020.

FILHO, R. J. C. DOS R. **Produtividade da palma forrageira cv. orelha de elefante**

mexicana sob diferentes sistemas de irrigação e frequências de corte. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/54825/3/2020_tese_rjcreisfilho.pdf>.

FOLEGATTI, M. **Renovacalc: avaliando as emissões dos biocombustíveis.** 2018

FONSECA, F. A. DA. **Extração de óleo residual das tortas de polpa e amêndoa da macaúba (*Acrocomia aculeata*) utilizando como solvente o etanol e isopropanol.** Dissertação de mestrado—Belo Horizonte, Minas Gerais: UFMG, 2016.

FRANCO, V. S. F.; ZIMPEL, J. Projeto Macaúba-Introdução de sistema silvipastoril inovador no cerrado brasileiro para a produção de óleos vegetais sustentáveis. p. 12, 2020.

FURIMSKY, E. Catalytic hydrodeoxygenation. v. 199, p. 147–190, 2000.

GANDARIAS, I.; ARIAS, P. L. We are IntechOpen , the world ' s leading publisher of Open Access books Built by scientists , for scientists TOP 1 %. **Intech**, v. i, n. tourism, p. 13, 2016.

GARBIN, R. B.; HENKES, J. A. a Sustentabilidade Na Produção De Biocombustíveis De Aviação No Brasil. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 7, n. 2, p. 67, 2018.

GAVADE, R. K. Multi-Criteria Decision Making: An overview of different selection problems and methods. **International Journal of Computer Science and Information Technologies**, v. 5, n. 4, p. 5643–5646, 2014.

GAZZONI, D. **Biocombustíveis e o uso da água.** Disponível em: <<https://www.biodieselbr.com/noticias/colunistas/gazzoni/biocombustiveis-uso-agua-17-12-09>>. Acesso em: 1 jul. 2022.

GERBENS-LEENES, W.; HOEKSTRA, A. Y.; VAN DER MEER, T. H. The water footprint of bioenergy. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 106, n. 25, p. 10219–10223, 2009.

GERBENS-LEENES, W. P.; HOEKSTRA, A. Y. Water footprint quantification of energy at a global level. p. 15, 2013.

GHG PROTOCOL. Global Warming Potential Values. **Greenhouse Gas Protocol**, v. 2014, n. 1995, p. 1–4, 2016.

GOMES, L.; ARAYA, M.; CARIGNANO, C. **Tomada de decisão em cenários complexos.** São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2009. São Paulo: Cengage Learning, 2009.

GOMES, L. F. A. M.; GOMES, C. F. S. **Tomada de decisão Gerencial: Enfoque Multicritério.** 3a edição ed. Rio de Janeiro: Editora Atlas, 2009.

GOVINDAN, K.; JEPSEN, M. ELECTRE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. **European Journal of Operational Research**, v. 250, n. 1, p. 1–29, 2014.

- GRIFFITHS, S. et al. Decarbonizing the oil refining industry: A systematic review of sociotechnical systems, technological innovations, and policy options. **Energy Research and Social Science**, v. 89, 1 jul. 2022.
- GUARENGHI, M. M. et al. Areas Available for the Potential Sustainable Expansion of Soy in Brazil: A Geospatial Assessment Using the SAFmaps Database. **Remote Sensing**, v. 14, n. 7, 2022.
- GUEDES, F. P. D. C. **A multi-regional optimization model for the brazilian oil refining industry Fernanda**. Rio de Janeiro: UFRJ, COPPE, 2019.
- HAN, X. et al. Energy Conversion and Management : Advancing the application of bio-oils by co-processing with petroleum intermediates : A review. **Energy Conversion and Management**, v. 10, p. 100069, 2021.
- HANDFIELD, R. et al. Applying environmental criteria to supplier assessment : A study in the application of the Analytical Hierarchy Process Applying environmental criteria to supplier assessment : A study in the application of the Analytical Hierarchy Process. v. 2217, n. October 2017, 2002.
- HARI, K.; YAAKOB, T. Z.; BINITHA, N. N. Aviation biofuel from renewable resources: Routes, opportunities and challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 1234–1244, 2015.
- HARVEY, D. L. A Guide to Global Sourcing. **Journal of Business Strategy**, v. 12, n. 2, p. 11, 1993.
- HELM, D. The future of fossil fuels – is it the end? **Current History**, v. 115, n. 779, p. 120–120, 2016.
- HENDERSON, J.; OSBORNE, D. J. The oil palm in all our lives: how this came about. **Endeavour**, v. 24, n. 2, p. 63–68, 1 jun. 2000.
- HILLAIRET, F.; ALLEMANDOU, V.; GOLAB, K. Analysis of the current development of household UCO collection systems in the EU. **Water Resources and Industry**, v. 4, n. 1, p. 37–48, 2017.
- HIRAKURI, M.; LAZZAROTTO, J. O agronegócio da soja nos contextos mundial e brasileiro. **Embrapa Soja**, v. 1^a Edição, n. 2176–2937, p. 37, 2014.
- HOEKSTRA, A. Y. et al. The Water Footprint Assessment Manual. **Water Footprint Network**, p. 228, 2011.
- HUANG, H. J.; YUAN, X. Z. Recent progress in the direct liquefaction of typical biomass. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 49, p. 59–80, 1 ago. 2015.
- HUANG, I. B.; KEISLER, J.; LINKOV, I. Multi-criteria decision analysis in environmental sciences : Ten years of applications and trends. **The Science of the Total Environment**, v. 409, n. 19, p. 3578–3594, 2011.
- HUBER, G. W.; IBORRA, S.; CORMA, A. Synthesis of Transportation Fuels from

Biomass : Chemistry , Catalysts , and Engineering. v. 2, p. 4044–4098, 2006.

IBGE. Uso da Terra. 2017.

IBGE. **Sistema IBGE de Recuperação Automática—SIDRA**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/home/cnt/brasil>>.

ICAO. **Carbon offsetting and reduction scheme for international aviation (CORSA)**. Disponível em: <https://info.carbon-clear.com/hubfs/Factsheets/CORSA/CORSA_Factsheet_EN.pdf?submissionGuid=c319185f-35af-4e9a-b10a-8875f97a53c2>. Acesso em: 22 set. 2022.

IEA-BIOENERGY. Biobased gasoline from sawdust via pyrolysis oil and refinery upgrading. 2021.

IEA. The Oil and Gas Industry in Energy Transitions. 2020.

IHA, O. K. **Produção e análise de bioóleo e biodiesel utilizando oleaginosas que possam contribuir para o aumento da matriz energética renovável brasileira**. Dissertação de mestrado—Distrito Federal, Brasília: UNB, 2010.

IMO. **UN body adopts climate change strategy for shipping**. Disponível em: <<http://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/Pages/06GHGinitialstrategy.aspx>>. Acesso em: 20 set. 2022.

INDEX MUNDI. **Brazil Palm Oil Production by Year**. Disponível em: <<https://www.indexmundi.com/agriculture/?country=br&commodity=palm-oil&graph=production>>. Acesso em: 27 set. 2022.

INFOMONEY. Petrobras (PETR4) recebe certificação internacional para produção do Diesel R. 2023.

INOCAS. **Produtos Sustentáveis da biodiversidade do cerrado**. Disponível em: <<https://www.inocas.com.br/produtos/>>. Acesso em: 24 maio. 2022.

IBGE. **Tabela 1612: Área plantada, área colhida, quantidade produzida, rendimento médio e valor da produção das lavouras temporárias**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1612>>. Acesso em: 11 out. 2022.

INSTITUTO ESCOLHAS. Setor Elétrico: Como Precificar a água em um cenário de escassez. p. 1–13, 2019.

IPEA. **Água, problemas complexos e o Plano Nacional de Segurança Hídrica**. Rio de Janeiro: IPEA, 2021.

IPIECA. **The role of the oil and gas industry in the energy transition | Ipieca**. Disponível em: <<https://www.ipieca.org/our-work/climate/ipieca-at-cop26/the-role-of-the-oil-and-gas-industry-in-the-energy-transition/>>. Acesso em: 3 maio. 2022.

IRENA. Innovation Technology Outlook for Advanced Liquid Biofuels. **International Renewable Energy Agency (IRENA)**, p. 132, 2016.

- IRENA. Navigating to a renewable future: Solutions for decarbonising shipping, Preliminary findings. n. September, 2019.
- IRENA. WORLD ENERGY TRANSITIONS OUTLOOK. p. 1–312, 2020.
- ISHIZAKA, A.; NEMERY, P. Multi-criteria Decision Analysis: Methods and Software. p. 312, 2013.
- ISO_14046. **Environmental management. ISO 14046. Water footprint — principles, requirements and guidelines.** Disponível em: <<https://www.iso.org/standard/43263.html>>. Acesso em: 16 set. 2022.
- JULIO, A. A. V. et al. Techno-economic and environmental potential of Renewable Diesel as complementation for diesel and biodiesel in Brazil: A comprehensive review and perspectives. **Journal of Cleaner Production**, v. 371, n. March, 2022.
- JUNQUEIRA, N. **Macaúba é matéria-prima promissora para biodiesel.** Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/2329636/macauba-e-materia-prima-promissora-para-biodiesel>>. Acesso em: 7 jun. 2022.
- KAISER, M. J. A review of refinery complexity applications. **Petroleum Science**, v. 14, n. 1, p. 167–194, 2017.
- KALNES, T.; MARKER, T.; SHONNARD, D. R. Green diesel: A second generation biofuel. **International Journal of Chemical Reactor Engineering**, v. 5, 2007.
- KARATZOS, S.; MCMILLAN, J.; SADDLER, J. The potential and challenges of “drop in” biofuels. **IEA Bioenergy - Task 39**, n. July, p. 202, 2014.
- KARGBO, H.; HARRIS, J. S.; PHAN, A. N. “Drop-in” fuel prodfile:///C:/Users/vanes/OneDrive/Documentos/Mestrado/Nota Tecnica Hidrogenio Turquesa_12.04.22.pdfuction from biomass: Critical review on techno-economic feasibility and sustainability. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 135, n. August 2020, p. 110168, 2021.
- KNOTHE, VAN G. AND K. **The Biodiesel Handbook - Knothe, van Gerpen and Krahl (full version).pdf.** 1a. ed. Champaign, Illinois: AOCS Press, 2005.
- KURNIA, J. C. et al. Advances in biofuel production from oil palm and palm oil processing wastes: A review. **Biofuel Research Journal**, v. 3, n. 1, p. 332–346, 2016.
- LE QUÉRE, C. et al. Temporary reduction in daily global CO2 emissions during the COVID-19 forced confinement. **Nature Climate Change**, v. 10, n. 7, p. 647–653, 2020.
- LEBRE, E. et al. Sustainable expansion of electricity sector : Sustainability indicators as an instrument to support decision making. v. 14, p. 422–429, 2010.
- LEPITZKI, J.; AXSEN, J. The role of a low carbon fuel standard in achieving long-term GHG reduction targets. **Energy Policy**, v. 119, p. 423–440, 1 ago. 2018.
- LIMA, P. C. R. O Biodiesel e a Inclusão Social. **Brasil**, p. 33, 2004.

- LØKEN, E. Use of multicriteria decision analysis methods for energy planning problems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 11, n. 7, p. 1584–1595, 2007.
- LUCON, O.; ROMEIRO, V.; FRANSEN, T. Bridging the gap between energy and climate policies in Brazil. p. 84, 2015.
- MAITY, J. P. et al. Microalgae for third generation biofuel production, mitigation of greenhouse gas emissions and wastewater treatment: Present and future perspectives - A mini review. **Energy**, v. 78, p. 104–113, 2014.
- MALLESWARA RAO, T. V.; DUPAIN, X.; MAKKEE, M. Fluid catalytic cracking: Processing opportunities for Fischer-Tropsch waxes and vegetable oils to produce transportation fuels and light olefins. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 164, p. 148–163, 2012.
- MALM, A. **Purification of feedstock by heat treatment** Worldwide applications, 2021. Disponível em: <<https://patents.google.com/patent/EP3494201B1/en>>
- MAPA-MINISTERIO DA AGRICULTURA PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Diagnóstico da produção sustentável da Palma de Óleo. 2018.
- MARAFI, M.; STANISLAUS, A.; FURIMSKY, E. Chapter 4 - Catalyst Deactivation.. Amsterdam: Elsevier, 2010. p. 51–92.
- MARÍA, P. D. DE. **Biorenewables - A Practical Viewpoint**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2016.
- MATHIOUDAKIS, V. et al. The water footprint of second-generation bioenergy: A comparison of biomass feedstocks and conversion techniques. **Journal of Cleaner Production**, v. 148, p. 571–582, 1 abr. 2017.
- MATOS, P. R. R. **O Óleo de Macaúba como Matéria-Prima Básica de um Biolubrificante: Um Estudo Teórico-Experimental**. [s.l.] UNB, 2018.
- MCKINSEY. Mercado voluntário de carbono tem potencial gigantesco no Brasil. 2022.
- MCSWEENEY, R.; TANDON, A. Coronavirus causes record fall in fossil-fuel emissions in 2020. **Carbon Brief**, p. 1–22, 2021.
- MEHER, L. C.; VIDYA, D.; NAIK, S. N. Technical aspects of biodiesel production by transesterification-a review. 2004.
- MELERO, J. A. et al. Storage stability and corrosion studies of renewable raw materials and petrol mixtures: A key issue for their co-processing in refinery units. **Fuel**, v. 89, n. 3, p. 554–562, 2010.
- MELO, P. G. DE. **Produção e caracterização de biodieseis obtidos a partir da oleaginosa Macaúba (acrocomia aculeata)**. Dissertação de Mestrado—Uberlândia, Minas Gerais: Universidade Federal de Uberlândia, 2012.
- MENDES, F. L. **Hidrotratamento de bio-óleo empregando fosfatos de níquel**

suportados em alumina recoberta por carbono. [s.l.] UFRJ, 2018.

MENDES, M. A.; NASCIMENTO, C. A. O. DO. Hidrogênio Turquesa: Produção a partir da pirólise do gás natural. p. 6, 2022.

MESA, J. et al. Pirólise rápida em leiteo fluidizado: uma opção para transformar biomassa em energia limpa. 2003.

MIRODATOS, C. et al. Co-processing of pyrolysis bio oils and gas oil for new generation of bio-fuels : " acol and SRGO mixed feed Hydrodeoxygenation of gua1. v. 143, p. 172–178, 2009.

MONTOYA, M. A. et al. Uma Nota Sobre Consumo Energético, Emissões, Renda e Emprego na Cadeia de Soja no Brasil. **Revista brasileira de economia**, v. 73, p. 8, 2019.

MORAES, M. R. D. F. D. S. Pirólise Catalítica De Biomassa Vegetal Para Produção De Biocombustíveis. p. 4–5, 2017.

MORONI, E. J.; CHIWIACOWSKY, L. D. Um Modelo de Decisão Multicritério para Auxílio à Tomada de Decisão na Aquisição de Sistemas Informatizados. **Scientia cum Industria**, v. 7, n. 2, p. 135–155, 2019.

MOTA, C. S. ET AL. Exploração sustentável da macaúba para produção de biodiesel: Colheita, pós-colheita e qualidade dos frutos. **Informe Agropecuário**, v. 32, n. 265, p. 41–51, 2022.

MÜLLER-CASSERES, E. et al. Production of alternative marine fuels in Brazil: An integrated assessment perspective. **Energy**, v. 219, 15 mar. 2021.

MUSSOI, F. L. R. **Modelo de decisão integrado para a priorização multiestágio de projetos de distribuição considerando a qualidade da energia elétrica.** Tese de doutorado—Florianópolis: Universidade Federal de Sntan Catarina, 2013.

NAJI, S. Z.; TYE, C. T.; ABD, A. A. State of the art of vegetable oil transformation into biofuels using catalytic cracking technology: Recent trends and future perspectives. **Process Biochemistry**, v. 109, p. 148–168, 1 out. 2021.

NASCIMENTO DA SILVA, G.; ROCHEDO, P. R. R.; SZKLO, A. Renewable hydrogen production to deal with wind power surpluses and mitigate carbon dioxide emissions from oil refineries. **Applied Energy**, v. 311, p. 118631, 1 abr. 2022.

NESTE. **MY Sustainable Aviation Fuel.** Disponível em: <<https://www.neste.com/products/all-products/saf>>.

NOGUEIRA, L. A. H. Does biodiesel make sense ? **Energy**, v. 36, n. 6, p. 3659–3666, 2011.

NOVAES, R. M. L. et al. Estimating 20-year land-use change and derived CO2 emissions associated with crops, pasture and forestry in Brazil and each of its 27 states. **Global Change Biology**, v. 23, n. 9, p. 3716–3728, 1 set. 2017.

OASMAA, A.; CZERNIK, S. Fuel oil quality of biomass pyrolysis oils - state of the art for the end users. **Energy and Fuels**, v. 13, n. 4, p. 914–921, 1999.

OASMAA, A.; ELLIOTT, D. C.; KORHONEN, J. Acidity of biomass fast pyrolysis bio-oils. **Energy and Fuels**, v. 24, n. 12, p. 6548–6554, 2010.

OLIVEIRA, C. M. R. DE; ANDRADE, P. C. DE A.; SANTOS, M. DO S. F. DOS. Análise dos pontos de coleta do óleo vegetal residual no Brasil para a logística reversa. **Sustentabilidade: Diálogos Interdisciplinares**, v. 3, p. 1–13, 2022.

OLIVEIRA, R. D. DE. **Impacto de qualidades de óleo cru e esquemas de refino em um modelo global de análise integrada**. Dissertação de Mestrado—Rio de Janeiro: UFRJ, 2021.

OLIVEIRA, M. **Diesel e biodiesel de murumuru e de soja: desempenho operacional de trator agrícola no preparo do solo**. Tese de Doutorado—Ribeirão Preto: UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA, 2016.

PETROBRAS. **Defendemos concorrência no segmento de biocombustíveis**. Disponível em: <https://petrobras.com.br/en_us/fatos-e-dados/defendemos-concorrenca-no-segmento-de-biocombustiveis.htm>.

PINHEIRO, A. et al. Membrane Fractionation of Biomass Fast Pyrolysis Oil and Impact of its Presence on a Petroleum Gas Oil Hydrotreatment. **Oil and Gas Science and Technology**, v. 68, n. 5, p. 815–828, 2013.

PINHO, A. D. R. et al. Co-processing raw bio-oil and gasoil in an FCC Unit. **Fuel Processing Technology**, v. 131, p. 159–166, 2015.

PINHO, A. D. REZENDE et al. Fast pyrolysis oil from pinewood chips co-processing with vacuum gas oil in an FCC unit for second generation fuel production. **Fuel**, v. 188, p. 462–473, 2017.

PONTES, N. S. et al. Chemical speciation of petroleum and bio-oil coprocessing products: Investigating the introduction of renewable molecules in refining processes. **Fuel**, v. 288, n. June 2020, 2021.

PORTAL EMBRAPA. **Integração Lavoura Pecuária Floresta**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/tema-integracao-lavoura-pecuaria-floresta-ilpf>>. Acesso em: 17 jun. 2022.

PORTAL MACAÚBA - CERRATINGA. **Espécie de vários biomas**. Disponível em: <<https://www.cerratinga.org.br/especies/macauaba/>>. Acesso em: 24 maio. 2022.

PREEM. **Preem estende operação de teste bem-sucedida de óleo de pirólise**. Disponível em: <<https://www.preem.se/om-preem/insikt-kunskap/2022/fornybart-fcc/>>.

REBOUÇAS, A. D. S. et al. Contexto ambiental e aspectos tecnológicos das graxarias no Brasil para a inserção do pequeno produtor na indústria da carne. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 39, n. SUPPL. 1, p. 499–509, jul. 2010.

- REGATIERI, H. R. **Estudo da termodegradação em biodiesel de soja e gordura animal**. Dissertação de mestrado—Medianeira: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.
- RICARDO. Targeted Aviation Advanced Biofuels Demonstration Competition – Feasibility Study. n. 1, 2020.
- ROCHA, F. Utilização de biomassa residual em relação à produção anual de grãos. **UFP**, n. 3, p. 1576–1580, 2015.
- RODRIGUES, A. S. **Inventário do ciclo de vida da produção de biodiesel utilizando macaúba como fonte de matéria-prima**. Dissertação de Mestrado—Diamantina: Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, 2019.
- RODRIGUES, K. L. T. **Otimização multivariada dos parâmetros do processo de produção de ésteres etílicos e modelagem cinética da reação de esterificação via catálise heterogênea utilizando óleo não comestível da polpa de macaúba, resina macroporosa de troca iônica e rota etíli**. Tese de Doutorado—Belo Horizonte, Minas Gerais: UFMG, 2018.
- RODRIGUES, K. L. T. C. **Exploração do potencial do óleo de macaúba (Acrocomia aculeata) como fonte de matéria-prima e avaliação do uso de resinas macroporosas de troca-iônica como catalisadores sólidos para a produção do biodiesel**. Associação Brasileira de Química. **Anais**. 2017. Disponível em: <<http://www.abq.org.br/cbq/2017/trabalhos/9/12142-22123.html>>. Acesso em: 7 jun. 2022
- ROLDAN, F.; MIYAKE, D. I. Mudanças de forecast na indústria automobilística: iniciativas para a estruturação dos processos de tomada de decisão e processamento da informação. **Gestão & Produção**, v. 11, n. 3, p. 413–427, dez. 2004.
- ROOZEN, A. Availability of sustainable lignocellulosic biomass residues in Brazil for export to the EU. n. November 2014, p. 92, 2015.
- RUSSEL, J. B. **Química Geral**. 2a. ed. São Paulo: Makron Books, 1994.
- RUTZ, D. et al. **Technical options for retrofitting industries with bioenergy - A Handbook**. Biofit, 2020.
- SAATY, R. W. The analytic hierarchy process-what and how it is used. v. 9, n. 3, p. 161–176, 1987.
- SAATY, T. L. How to make a decision: The analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research**, v. 48, n. 1, p. 9–26, 1990.
- SABER, M.; NAKHSHINIEV, B.; YOSHIKAWA, K. A review of production and upgrading of algal bio-oil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 58, p. 918–930, 2016.
- SANTOS, A.; REIS, A.; MEDIONDO, M. Segurança hídrica no Brasil: situação atual,

- principais desafios e perspectivas futuras. **Revista DAE**, v. 68, n. 225, p. 167–179, 2020.
- SANTOS, C. DA COSTA. **Sojicultura no Amapá: desafios e oportunidades**. Dissertação de mestrado—Macapá: Universidade Federal do Amapá, 2019.
- SANTOS, K. G. DOS. **Aspectos Fundamentais da pirólise de biomassa em leito de jorro: fluidodinâmica e cinética do processo**. Tese de doutorado. Minas Gerais: Universidade Federal de Uberlândia, 2011.
- SANTOS, M. J. et al. Scenarios for the future Brazilian power sector based on a multi-criteria assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 167, p. 938–950, 2017.
- SAYDAH, B. (SAPPHIRE E. **Co-Processing of green crude in existing petroleum refineries**. Disponível em: <https://www.caafi.org/resources/pdf/CoProcessing_of_Green_Crude_in_Existing_Oil_Refineries_Jan232015.pdf>. Acesso em: 20 out. 2021.
- SCOTT, S. A. et al. Biodiesel from algae: Challenges and prospects. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 21, n. 3, p. 277–286, 2010.
- SEDIYAMA, A. F. **Análise da estrutura, conduta e desempenho da indústria processadora de soja no Brasil no período de 2003 a 2010**. Dissertação de Mestrado—Universidade Federal de Lavras, 2013.
- SENL, O. I. et al. Reactions of methyl heptanoate hydrodeoxygenation on sulphided catalysts. **Journal of Molecular Catalysis A: Chemical**, v. 268, n. 1–2, p. 1–8, 2007.
- SETRAGROUP. The Pyrolysis plant. 2022.
- SHARMA, P. et al. Evaluation of various waste cooking oils for biodiesel production: A comprehensive analysis of feedstock. **Waste Management**, v. 136, n. August, p. 219–229, 2021.
- SILVA, A. D. B. P. E. **Produção sustentável de óleo de palma: estudo de caso da Denpasa**. Dissertação de Mestrado—São Paulo: FGV, 2022.
- SILVA, D. M. R. **Aplicação do Método AHP para avaliação de projetos Industriais**. Dissertação de mestrado—Rio de Janeiro: PUC-RJ, 2007.
- SILVA, G. N. DA. **Produção de hidrogênio renovável via power to gas para mitigação de emissões de CO₂ do refino do petróleo e maior aproveitamento da energia eólica**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2017.
- SILVA, P. C. G. DA et al. **No-tillage and crop rotation increase crop yields and nitrogen stocks in sandy soils under agroclimatic risk**. Disponível em: <<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0378429020312314?token=5A81DC588E847A541DB7E03580D8EC1733F46E8C968389A3D23D18FC212DB3372FD1C82E373DAE4A71413F00FEA3CDFD&originRegion=us-east-1&originCreation=20220909142119>>. Acesso em: 9 set. 2022.
- SOARES, G.; QUEIROZ PINTO JR, H.; BOMTEMPO MARTINS, J. V. Arcabouço

regulatório e diretrizes de políticas: os desafios para a regulamentação de combustíveis sustentáveis de aviação Drop-in. **Revista Brasileira de Energia**, v. 27, n. 1, p. 40–57, 2021.

SOLANTAUSTA, Y. **Task 35: Techno-economic Assessments for Bioenergy Applications - IEA Bioenergy**. Disponível em: <www.directives.doe.gov>.

SORUNMU, Y.; BILLEN, P.; SPATARI, S. A review of thermochemical upgrading of pyrolysis bio-oil: Techno-economic analysis, life cycle assessment, and technology readiness. **GCB Bioenergy**, v. 12, n. 1, p. 4–18, 1 jan. 2020.

SOUSA-AGUIAR, E. F. et al. Catalysts for Co-processing Biomass in Oil Refining Industry. **The Royal Society of Chemistry**, p. 1–24, 2018.

SOUZA, A. C. B. H. Aplicação do Método AHP na análise de projetos da indústria de refino de petróleo. **Departamento de Administração de Empresas**, Dissertação, 2012.

SOUZA, L. M. DE. **O Mercado Brasileiro De Bioquerosene De Aviação: Mapeamento Multicritério Para Seleção De Oleaginosas Para O Processo Hefa**. Tese de Doutorado—[s.l.] Universidade Federal Do Rio de Janeiro, 2019.

SPARREVIK, M. et al. Use of Multicriteria Involvement processes to enhance transparency and stakeholder participation at Bergen Harbor, Norway. **Integrated Environmental Assessment and Management**, v. 7, n. 3, p. 414–425, jul. 2011.

SPATARI, S. et al. Environmental, exergetic and economic tradeoffs of catalytic- and fast pyrolysis-to-renewable diesel. **Renewable Energy**, v. 162, p. 371–380, 1 dez. 2020.

STARCK, L. et al. Production of Hydroprocessed Esters and Fatty Acids (HEFA) – Optimisation of Process Yield. **Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP Energies nouvelles**, 2016.

STONEX. **Spread entre óleo de soja e óleo de palma atinge mínima de 21 anos - Mercados Agrícolas**. Disponível em: <<https://www.mercadosagricolas.com.br/oleos-vegetais/spread-entre-oleo-de-soja-e-oleo-de-palma-atinge-minima-de-21-anos/>>. Acesso em: 29 nov. 2022.

SU, J. et al. Challenges in determining the renewable content of the final fuels after co-processing biogenic feedstocks in the fluid catalytic cracker (FCC) of a commercial oil refinery. **Fuel**, v. 294, p. 120526, 15 jun. 2021.

TIRITAN, M. G. Refino De Óleos Vegetais Via Extração Líquido-Líquido Em Escala Piloto Com Eliminação Das Etapas De Clarificação E Desodorização. 2020.

TOOR, S. S.; ROSENDAHL, L.; RUDOLF, A. Hydrothermal liquefaction of biomass: A review of subcritical water technologies. **Energy**, v. 36, n. 5, p. 2328–2342, 2011.

TZENG, G. H.; HUANG, J. J. Multiple attribute decision making: methods and application. p. 349, 2011.

UFJF. **Óleo no futuro: criando combustível renovável a partir do óleo de cozinha**.

Disponível em: <<https://www2.ufjf.br/noticias/2022/07/28/oleo-no-futuro-criando-combustivel-renovavel-a-partir-do-oleo-de-cozinha/>>.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Palm oil explorer.**

Disponível em:

<<https://ipad.fas.usda.gov/cropexplorer/cropview/commodityView.aspx?cropid=4243000>>. Acesso em: 27 set. 2022.

UNITEDNATIONS. Report of the Inter-Agency and Expert Group on Sustainable Development Goal Indicators. Items for discussion and decision: data and indicators for the 2030 Sustainable Development Agenda. 2016.

UNRUH, G. C. Understanding carbon lock-in. **Energy Policy**, v. 30, n. 4, p. 317–325, 2002.

VAN DYK, S. ET AL. DROP-IN ' BIOFUELS : The key role that co-processing will play in its production. n. January, 2019.

VAN DYK, S. et al. Potential synergies of drop-in biofuel production with further co-processing at oil refineries. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 13, n. 3, p. 760–775, 2019a.

VAN DYK, S. et al. Potential yields and emission reductions of biojet fuels produced via hydrotreatment of biocrudes produced through direct thermochemical liquefaction. **Biotechnology for Biofuels**, v. 12, n. 1, p. 1–12, 2019b.

VAN STRAELEN, J. et al. CO2 capture for refineries, a practical approach. **Energy Procedia**, v. 1, n. 1, p. 179–185, 2009.

VÁSQUEZ, M. C. et al. Holistic approach for sustainability enhancing of hydrotreated aviation biofuels, through life cycle assessment: A Brazilian case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 237, 10 nov. 2019.

VENDERBOSCH, R. H. et al. Stabilization of biomass-derived pyrolysis oils. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v. 85, n. 5, p. 674–686, 2010.

VIENESCU, D. N. et al. A life cycle assessment of options for producing synthetic fuel via pyrolysis. **Bioresource Technology**, v. 249, p. 626–634, 1 fev. 2018.

VILJAVA, T. R.; SAARI, E. R. M.; KRAUSE, A. O. I. Simultaneous hydrodesulfurization and hydrodeoxygenation: Interactions between mercapto and methoxy groups present in the same or in separate molecules. **Applied Catalysis A: General**, v. 209, n. 1–2, p. 33–43, 2001.

WANG, H.; MALE, J.; WANG, Y. Recent advances in hydrotreating of pyrolysis bio-oil and its oxygen-containing model compounds. **ACS Catalysis**, v. 3, n. 5, p. 1047–1070, 2013.

WANG, J. J. et al. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 9, p. 2263–

2278, dez. 2009.

WANG, W. C.; TAO, L. Bio-jet fuel conversion technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 801–822, 2016.

WEI, H. KEN. **Análise comparativa do porto ao navio de combustíveis alternativos para transporte marítimo**. Dissertação de Mestrado—Rio de Janeiro: UFRJ, 2021.

WILDSCHUT, J. et al. Hydrotreatment of Fast Pyrolysis Oil Using Heterogeneous Noble-Metal Catalysts. p. 10324–10334, 2009.

WITCOVER, J.; WILLIAMS, R. B. Comparison of “Advanced” biofuel cost estimates: Trends during rollout of low carbon fuel policies. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 79, n. November 2019, p. 102211, 2020.

YÁÑEZ, É. et al. Assessing bio-oil co-processing routes as CO₂ mitigation strategies in oil refineries. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 15, n. 1, p. 305–333, 2021.

ZEMAN, P. et al. Hydrotreated vegetable oil as a fuel from waste materials. **Catalysts**, v. 9, n. 4, 2019.

ZHANG, Y.; ALVAREZ-MAJMUTOV, A. Production of Renewable Liquid Fuels by Coprocessing HTL Biocrude Using Hydrotreating and Fluid Catalytic Cracking. **Energy and Fuels**, v. 35, n. 23, p. 19535–19542, 2 dez. 2021.

ZHAO, X. et al. Optimization of catalytic cracking process for upgrading camelina oil to hydrocarbon biofuel. **Industrial Crops and Products**, v. 77, p. 516–526, 2015.

ZIOLKOWSKA, J. R. Optimizing biofuels production in an uncertain decision environment: Conventional vs. advanced technologies. **Applied Energy**, v. 114, p. 366–376, 2014.

ZUFAROV, O.; SCHMIDT, Š.; SEKRETÁR, S. Degumming of rapeseed and sunflower oils. n. 1, p. 321–328, 2008.

Anexo I – Questionário para atribuição de pesos

Questionário: Importância relativa entre macro critérios e indicadores

Sessão 1 de 3

Para fins de análise das alternativas à produção de combustíveis renováveis utilizando-se refino convencional (unidades que processam correntes derivadas do petróleo).

Gostaríamos de convidá-lo (a) a responder, de maneira voluntária, ao questionário para estabelecimento de pesos relativos entre os macro critérios e indicadores pré-determinados. O formulário está sendo aplicado a especialistas da área, no âmbito do trabalho de dissertação em desenvolvimento, cujo tema é: Aplicação da abordagem multicritério na análise de alternativas para o coprocessamento de correntes renováveis no refino de petróleo brasileiro. Ativos de refino convencionais podem ter um papel importante nos curto e médio prazos, garantindo a oferta e disponibilidade de serviços energéticos ao mesmo tempo em que contribuem no processo de transição energética com o refino de correntes renováveis.

A resposta ao questionário será utilizada para cálculo de pesos relativos entre critérios, utilizando-se o método AHP (*Analytic Hierarchy Process*). A partir de comparações paritárias, o método permite determinar a importância relativa entre os critérios considerados.

O tempo estimado para resposta é de menos de 10 minutos. As análises serão feitas de forma consolidada por área de atuação dos respondentes, sendo estas: empresa; governo; ONG; Instituição de pesquisa. As perguntas direcionam-se aos especialistas e não refletem necessariamente a opinião da instituição na qual atuam. É garantido o sigilo de nome e instituição dos especialistas.

Agradecemos a sua participação.

Mestranda:

Vanessa Bandeira Dias / vanessa.bandeira@ppe.ufrj.br

Orientadores:

Alexandre Szklo / szklo@ppe.ufrj.br

Pedro R.R. Rochedo / pedro.rochedo@ppe.ufrj.br

Antes de prosseguir, por gentileza informe seu setor de atuação profissional.

- Empresa
- Governo
- Organização não governamental
- Instituição de pesquisa

Exemplo de preenchimento

As preferências são estabelecidas por comparações par a par, usando uma escala de importância. O exemplo a seguir é ilustrativo, no qual são avaliados os critérios A, B, C e D. O avaliador possui a seguinte opinião:

- Comparando A e B, considera B muito mais importante que A, então A é muito menos importante que B;
- Comparando A e C, considera C um pouco mais importante que A, então A é um pouco menos importante que C;
- Comparando A e D, considera D um pouco mais importante que A, então é um pouco menos importante que D;
- Comparando B e C, considera B um pouco mais importante que C;
- Comparando B e D, considera B um pouco mais importante que D;
- Comparando C e D, considera ambos igualmente importantes;

Tal julgamento é refletido na seguinte resposta ao questionário

Em sua opinião, como se dá a importância par a par, entre os Itens listados:

	Muito mais importante	Um pouco mais importante	Igualmente importante	Um pouco menos importante	Muito menos importante
Item A em relação a B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Item A em relação a C	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Item A em relação a D	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Item B em relação a C	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Item B em relação a D	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Item C em relação a D	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Sessão 2 de 3

Com o objetivo de estudar alternativas para o coprocessamento de correntes renováveis no refino de petróleo brasileiro, foram definidos macro critérios e indicadores relevantes para a análise. Os tópicos a seguir trazem a descrição de conceitos-chave. Na sequência, a Tabela 1 traz a definição de cada item.

Vetor energético: Diversas cargas renováveis podem ser processadas em unidades de refino de petróleo pré-existentes, como óleos vegetais, óleo residual, gordura animal, bio-óleo e biometano. Tais cargas são aqui definidas como vetores energéticos

Matéria Prima: a corrente original que gera o vetor energético . Podem ser i) oleaginosas, como soja, mamona, palma, macaúba, colza etc.; ii) biomassa de origem animal, como sebos e gordura; iii) Biomassa lignocelulósica

Rota: A rota é definida pelo conjunto 1) matéria prima utilizada; 2) processo de obtenção do vetor energético; 3) vetor energético processado; 4) unidade de processo utilizada; 5) derivado produzido.

Tabela 1- Macro critérios e indicadores

Macro critério	Definição	Indicador	Definição
Disponibilidade de matéria prima e vetor energético	Incorpora indicadores que refletem a quantidade de matéria prima e vetor energético disponíveis no país, para o uso energético	Oferta de matéria prima	Produção anual de matéria prima em escala nacional
		Sazonalidade da matéria prima	Se a quantidade de matéria prima produzida na estação de menor produção compromete a oferta, sazonalidade é significativa
		Competição com setor agropecuário	Se uma determinada cultura pode destinar-se ao setor agropecuário, seu uso energético fica comprometido.
		Oferta do vetor energético	Produção anual do vetor energético em escala nacional
Logística do vetor energético	Contém indicadores que refletem aspectos logísticos relacionados ao vetor energético	Escala de processamento nas unidades de processo existentes	Disponibilidade do vetor energético na proximidade da refinaria
		Custo do vetor energético*	Composição do custo considera os componentes: preço do vetor energético e frete até a refinaria.
		Estabilidade do vetor energético	Caso existam questões relevantes no aspecto logístico.
Técnicos da rota	Incorpora indicadores com perspectiva técnica, desde a conversão da matéria prima até o processamento do vetor energético	Maturidade tecnológica da rota	Nível de amadurecimento de cada tecnologia, expressa em escala de TRL (<i>Technology Readines Level</i>)
		Qualidade do vetor energético	Reflete características relacionadas à facilidade de processamento do vetor energético
		Conformidade regulatória	Alinhamento à regulação e a demandas de padrões ou certificação que comprovem origem renovável
Sócio Ambientais da rota	Consiste em indicadores que abordam os efeitos de adoção da rota nas condições socioambientais	Vulnerabilidade hídrica	Impactos da rota na disponibilidade de recursos hídricos para a sociedade.
		Potencial para mitigação de emissões	Potencial de redução de emissões associado à adoção da rota
		Geração de emprego	Contribuições da rota na geração de emprego.

*originalmente, o custo seria composto por parcela de frete até a refinaria. Contudo, a escassez de dados que contemplassem o detalhamento proposto levou à revisão deste critério para ordem de preferência de custo

Julgamento par a par

Os julgamentos são feitos em 5 blocos. O primeiro corresponde aos macro critérios e os demais avaliam os indicadores correspondentes a cada macro critério.

Bloco1: Em sua opinião, como se dá a importância par a par, entre os macro critérios listados: *

	Muito mais importante	Um pouco mais importante	Igualmente importante	Um pouco menos importante	Muito menos importante
Disponibilidade em relação à Logística do vetor energético	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Disponibilidade em relação aos Aspectos Técnicos da rota	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Disponibilidade em relação aos Aspectos Sócio ambientais da rota	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Logística do vetor energético em relação aos Aspectos Técnicos	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Logística do vetor energético em relação aos Aspectos Sócio ambientais	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Aspectos Técnicos da rota em relação aos Aspectos Sócio ambientais	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Bloco 2: Em sua opinião, como se dá a importância par a par, entre os indicadores listados a seguir, correspondentes ao macro critério disponibilidade de matéria prima e vetor energético:

*

	Muito mais importante	Um pouco mais importante	Igualmente importante	Um pouco menos importante	Muito menos importante
Oferta de matéria prima em relação à Sazonalidade de matéria prima	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Oferta de matéria prima em relação à Competição com setor agropecuário	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Oferta de matéria prima em relação à Oferta do vetor energético	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sazonalidade de matéria prima em relação à Competição com setor agropecuário	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Sazonalidade de matéria prima em relação à Oferta do vetor energético	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Competição com setor agropecuário em relação à Oferta do vetor energético	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Bloco 3: Em sua opinião, como se dá a importância par a par, entre os indicadores listados a seguir, correspondentes ao macro critério logística do vetor energético:

*

	Muito mais importante	Um pouco mais importante	Igualmente importante	Um pouco menos importante	Muito menos importante
Escala de processamento em relação à custo do vetor energético	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Escala de processamento em relação à Estabilidade do vetor energético	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Custo do vetor energético em relação à Estabilidade do vetor energético	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Bloco 4: Em sua opinião, como se dá a importância par a par, entre os indicadores listados a seguir, correspondentes ao macro critério Técnicos da rota:

*

	Muito mais importante	Um pouco mais importante	Igualmente importante	Um pouco menos importante	Muito menos importante
Maturidade tecnológica em relação à Qualidade do vetor energético	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Maturidade tecnológica em relação à Conformidade regulatória	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Qualidade do vetor energético em relação à Conformidade regulatória	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Bloco 5: Em sua opinião, como se dá a importância par a par, entre os indicadores listados a seguir, correspondentes ao macro critério Sócio ambiental da rota *

	Muito mais importante	Um pouco mais importante	Igualmente importante	Um pouco menos importante	Muito menos importante
Vulnerabilidade hídrica em relação à Potencial para mitigação de emissões	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Vulnerabilidade hídrica em relação à Geração de emprego	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Potencial para mitigação de emissões em relação à Geração de emprego	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

O espaço a seguir é destinado a comentários e opiniões adicionais. Agradecemos sua participação

Sua resposta

Anexo II – Cálculo da concentração de refinadores de óleo vegetal em cada estado

Óleo de soja		
Total (Oferta vetor energético_cenário Base-Mil t/ano		3.138
Estado	Percentual de esmagamento	Mil t/ano
Mato Grosso	21,1	661
Paraná	17,5	549
Rio Grande do Sul	15,3	479
Goiás	13,5	424
Mato Grosso do Sul	8,5	268
São Paulo	7,1	222
Minas Gerais	4,8	151
Bahia	3,7	117
Tocantins	2,5	78
Piauí	1,5	48
Santa Catarina	2,1	65
Amazonas	1	31
Maranhão	0,7	23
Ceará	0,5	16
Rondônia	0,2	6
Acre	0	0
Roraima	0	0
Pará	0	0
Amapá	0	0
Alagoas	0	0
Sergipe	0	0
Rio de Janeiro	0	0
Rio Grande do Norte	0	0
Distrito Federal	0	0
Paraíba	0	0
Pernambuco	0	0
Espírito Santo	0	0

Anexo III – Aplicação do método AHP -Tabelas de Pesos Agregados

Julg. Agregados	Disponibilidade	Logistica	Tecnicos	Socio Ambientais	STANDARDIZED MATRIX				Weight	Cl and CR worksheet				Sum	SUM/Weight	Lâmbida máximo (média)	RI (tabelado)	CI = (lambdian)/(n-1)	CR = CI/RI
Disponibilidade	1,00	2,13	1,69	1,14	0,34	0,404	0,35	0,289	0,35	0,346	0,418	0,35	0,284	1,398	4,042489	4,032	0,9	0,010789	0,011988
Logistica	0,47	1,00	1,11	0,81	0,16	0,19	0,23	0,207	0,197	0,163	0,197	0,23	0,203	0,793	4,028328				
Tecnicos	0,59	0,90	1,00	0,98	0,201	0,171	0,208	0,25	0,207	0,205	0,177	0,207	0,245	0,835	4,023604				
Socio Ambientais	0,88	1,23	1,02	1,00	0,299	0,234	0,212	0,255	0,25	0,305	0,242	0,212	0,25	1,008	4,035053				

Julg. Agregados	Oferta MP	Sazonalidade	Competição AgroP	Oferta Vetor	STANDARDIZED MATRIX				Weight	Cl and CR worksheet				Sum	SUM/Weight	Lâmbida máximo (média)	RI (tabelado)	CI = (lambdian)/(n-1)	CR = CI/RI
Oferta MP	1,00	2,09	1,11	1,26	0,315	0,393	0,262	0,317	0,32	0,322	0,405	0,26	0,316	1,302	4,046227	4,037	0,9	0,01218	0,013533
Sazonalidade	0,48	1,00	0,90	0,90	0,151	0,188	0,212	0,226	0,194	0,154	0,194	0,21	0,225	0,783	4,030052				
Competição AgroP	0,90	1,11	1,00	0,81	0,283	0,21	0,236	0,205	0,233	0,289	0,216	0,233	0,203	0,942	4,039315				
Oferta Vetor	0,79	1,11	1,23	1,00	0,25	0,21	0,29	0,252	0,25	0,256	0,216	0,287	0,25	1,01	4,030566				

Julg. Agregados	Escala Proc	Custo Vetor	Estabilidade Vetor	0	STANDARDIZED MATRIX				Weight	Cl and CR worksheet				Sum	SUM/Weight	Lâmbida máximo (média)	RI (tabelado)	CI = (lambdian)/(n-1)	CR = CI/RI
Escala Proc	1,00	0,92	0,92	0	0,315	0,371	0,247	0	0,31	0,311	0,376	0,256	0	0,943	3,034665	3,038	0,58	0,019122	0,032969
Custo Vetor	1,09	1,00	1,80	0	0,343	0,405	0,484	0	0,411	0,339	0,411	0,502	0	1,252	3,047604				
Estabilidade Vetor	1,09	0,56	1,00	0	0,342	0,225	0,269	0	0,279	0,338	0,228	0,279	0	0,845	3,032463				

Julg. Agregados	Maturidade Tec	Qualidade Vetor	Conformidade Reg	0	STANDARDIZED MATRIX				Weight	Cl and CR worksheet				Sum	SUM/Weight	Lâmbida máximo (média)	RI (tabelado)	CI = (lambdian)/(n-1)	CR = CI/RI
Maturidade Tec	1,00	1,39	1,08	0	0,379	0,408	0,354	0	0,38	0,38	0,411	0,352	0	1,144	3,006783	3,006	0,58	0,002964	0,00511
Qualidade Vetor	0,72	1,00	0,98	0	0,272	0,293	0,32	0	0,295	0,273	0,295	0,318	0	0,886	3,005265				
Conformidade Reg	0,92	1,02	1,00	0	0,349	0,299	0,326	0	0,325	0,351	0,301	0,325	0	0,976	3,005736				

Julg. Agregados	Vulnerab Hidrica	Mitig Emissões	Geração Empregos	0	STANDARDIZED MATRIX				Weight	Cl and CR worksheet				Sum	SUM/Weight	Lâmbida máximo (média)	RI (tabelado)	CI = (lambdian)/(n-1)	CR = CI/RI
Vulnerab Hidrica	1,00	1,23	1,59	0	0,409	0,45	0,346	0	0,40	0,402	0,464	0,349	0	1,215	3,02466	3,021	0,58	0,010453	0,018023
Mitig Emissões	0,81	1,00	1,99	0	0,333	0,366	0,435	0	0,378	0,327	0,378	0,438	0	1,144	3,024368				
Geração Empregos	0,63	0,50	1,00	0	0,258	0,184	0,218	0	0,22	0,253	0,19	0,22	0	0,663	3,013692				

Anexo IV – Aplicação do método AHP -Tabela de Resultados

			Produto Princípio	Unidade processo	Oferta de MP		Saz da MP		Competição setor agro		Oferta vetor energético		Escala proc.		Custo do vetor		Estabilidade	
					IND1	Peso	IND2	Peso	IND3	Peso	IND4	Peso	IND5	Peso	IND6	Peso	IND7	Peso
SP	Soja	Óleo de soja	QAV	HDT	5	0,111	2	0,067	1	0,0806796	5	0,086643	4	0,061136	2	0,080799	3	0,0548
SUL	Soja	Óleo de soja	QAV	HDT	5	0,111	2	0,067	1	0,0806796	5	0,086643	4	0,061136	2	0,080799	3	0,0548
MG	Soja	Óleo de soja	QAV	HDT	5	0,111	2	0,067	1	0,0806796	5	0,086643	1	0,061136	2	0,080799	3	0,0548
RJ	Soja	Óleo de soja	QAV	HDT	5	0,111	2	0,067	1	0,0806796	5	0,086643	1	0,061136	2	0,080799	3	0,0548
Nordeste	Soja	Óleo de soja	QAV	HDT	5	0,111	2	0,067	1	0,0806796	5	0,086643	1	0,061136	2	0,080799	3	0,0548
SP	Palma	Óleo de Palma	QAV	HDT	2	0,111	4	0,067	1	0,0806796	3	0,086643	3	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
SUL	Palma	Óleo de Palma	QAV	HDT	2	0,111	4	0,067	1	0,0806796	3	0,086643	2	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
MG	Palma	Óleo de Palma	QAV	HDT	2	0,111	4	0,067	1	0,0806796	3	0,086643	1	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
RJ	Palma	Óleo de Palma	QAV	HDT	2	0,111	4	0,067	1	0,0806796	3	0,086643	1	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
Nordeste	Palma	Óleo de Palma	QAV	HDT	2	0,111	4	0,067	1	0,0806796	3	0,086643	1	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
SP	Macaúba	Óleo de Macaúba	QAV	HDT	1	0,111	1	0,067	3	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
SUL	Macaúba	Óleo de Macaúba	QAV	HDT	1	0,111	1	0,067	3	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
MG	Macaúba	Óleo de Macaúba	QAV	HDT	1	0,111	1	0,067	3	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
RJ	Macaúba	Óleo de Macaúba	QAV	HDT	1	0,111	1	0,067	3	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
Nordeste	Macaúba	Óleo de Macaúba	QAV	HDT	1	0,111	1	0,067	3	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
SP	Oleaginosas	OVR	QAV	HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	5	0,080799	3	0,0548
SUL	Oleaginosas	OVR	QAV	HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	5	0,080799	3	0,0548
MG	Oleaginosas	OVR	QAV	HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	5	0,080799	3	0,0548
RJ	Oleaginosas	OVR	QAV	HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	5	0,080799	3	0,0548
Nordeste	Oleaginosas	OVR	QAV	HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	5	0,080799	3	0,0548
SP	Biomassa lignocel	Bio-óleo	QAV	HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	4	0,080799	1	0,0548
SUL	Biomassa lignocel	Bio-óleo	QAV	HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	4	0,080799	1	0,0548
MG	Biomassa lignocel	Bio-óleo	QAV	HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	4	0,080799	1	0,0548
RJ	Biomassa lignocel	Bio-óleo	QAV	HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	4	0,080799	1	0,0548
Nordeste	Biomassa lignocel	Bio-óleo	QAV	HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	4	0,080799	1	0,0548
SP	Soja	Óleo de soja	Diesel	HDT	5	0,111	2	0,067	1	0,0806796	5	0,086643	4	0,061136	2	0,080799	3	0,0548
SUL	Soja	Óleo de soja	Diesel	HDT	5	0,111	2	0,067	1	0,0806796	5	0,086643	4	0,061136	2	0,080799	3	0,0548
MG	Soja	Óleo de soja	Diesel	HDT	5	0,111	2	0,067	1	0,0806796	5	0,086643	1	0,061136	2	0,080799	3	0,0548
RJ	Soja	Óleo de soja	Diesel	HDT	5	0,111	2	0,067	1	0,0806796	5	0,086643	1	0,061136	2	0,080799	3	0,0548
Nordeste	Soja	Óleo de soja	Diesel	HDT	5	0,111	2	0,067	1	0,0806796	5	0,086643	1	0,061136	2	0,080799	3	0,0548
SP	Palma	Óleo de Palma	Diesel	HDT	2	0,111	4	0,067	1	0,0806796	3	0,086643	3	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
SUL	Palma	Óleo de Palma	Diesel	HDT	2	0,111	4	0,067	1	0,0806796	3	0,086643	2	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
MG	Palma	Óleo de Palma	Diesel	HDT	2	0,111	4	0,067	1	0,0806796	3	0,086643	1	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
RJ	Palma	Óleo de Palma	Diesel	HDT	2	0,111	4	0,067	1	0,0806796	3	0,086643	1	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
Nordeste	Palma	Óleo de Palma	Diesel	HDT	2	0,111	4	0,067	1	0,0806796	3	0,086643	1	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548

			Produto Principi	Unidade processo	Oferta de MP		Saz da MP		Competição setor agro		Oferta vetor energético		Escala proc.		Custo do vetor		Estabilidade	
					IND1	Peso	IND2	Peso	IND3	PesoIND3	IND4	PesoIND4	IND5	PesoIND5	IND6	PesoIND6	IND7	PesoIND7
SP	Macaúba	Óleo de Macaúba	Diesel	HDT	1	0,111	1	0,067	3	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
SUL	Macaúba	Óleo de Macaúba	Diesel	HDT	1	0,111	1	0,067	3	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
MG	Macaúba	Óleo de Macaúba	Diesel	HDT	1	0,111	1	0,067	3	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
RJ	Macaúba	Óleo de Macaúba	Diesel	HDT	1	0,111	1	0,067	3	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
Nordeste	Macaúba	Óleo de Macaúba	Diesel	HDT	1	0,111	1	0,067	3	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
SP	Oleaginosas	OVR	Diesel	HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	5	0,080799	3	0,0548
SUL	Oleaginosas	OVR	Diesel	HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	5	0,080799	3	0,0548
MG	Oleaginosas	OVR	Diesel	HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	5	0,080799	3	0,0548
RJ	Oleaginosas	OVR	Diesel	HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	5	0,080799	3	0,0548
Nordeste	Oleaginosas	OVR	Diesel	HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	5	0,080799	3	0,0548
SP	Biomassa lignoc	Bio-óleo	Diesel	HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	4	0,080799	1	0,0548
SUL	Biomassa lignoc	Bio-óleo	Diesel	HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	4	0,080799	1	0,0548
MG	Biomassa lignoc	Bio-óleo	Diesel	HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	4	0,080799	1	0,0548
RJ	Biomassa lignoc	Bio-óleo	Diesel	HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	4	0,080799	1	0,0548
Nordeste	Biomassa lignoc	Bio-óleo	Diesel	HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	4	0,080799	1	0,0548
SP	Soja	Óleo de soja	Bunker	HDT	5	0,111	2	0,067	1	0,0806796	5	0,086643	4	0,061136	2	0,080799	3	0,0548
SUL	Soja	Óleo de soja	Bunker	HDT	5	0,111	2	0,067	1	0,0806796	5	0,086643	4	0,061136	2	0,080799	3	0,0548
MG	Soja	Óleo de soja	Bunker	HDT	5	0,111	2	0,067	1	0,0806796	5	0,086643	1	0,061136	2	0,080799	3	0,0548
RJ	Soja	Óleo de soja	Bunker	HDT	5	0,111	2	0,067	1	0,0806796	5	0,086643	1	0,061136	2	0,080799	3	0,0548
Nordeste	Soja	Óleo de soja	Bunker	HDT	5	0,111	2	0,067	1	0,0806796	5	0,086643	1	0,061136	2	0,080799	3	0,0548
SP	Palma	Óleo de Palma	Bunker	HDT	2	0,111	4	0,067	1	0,0806796	3	0,086643	3	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
SUL	Palma	Óleo de Palma	Bunker	HDT	2	0,111	4	0,067	1	0,0806796	3	0,086643	2	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
MG	Palma	Óleo de Palma	Bunker	HDT	2	0,111	4	0,067	1	0,0806796	3	0,086643	1	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
RJ	Palma	Óleo de Palma	Bunker	HDT	2	0,111	4	0,067	1	0,0806796	3	0,086643	1	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
Nordeste	Palma	Óleo de Palma	Bunker	HDT	2	0,111	4	0,067	1	0,0806796	3	0,086643	1	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
SP	Macaúba	Óleo de Macaúba	Bunker	HDT	1	0,111	1	0,067	3	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
SUL	Macaúba	Óleo de Macaúba	Bunker	HDT	1	0,111	1	0,067	3	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
MG	Macaúba	Óleo de Macaúba	Bunker	HDT	1	0,111	1	0,067	3	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
RJ	Macaúba	Óleo de Macaúba	Bunker	HDT	1	0,111	1	0,067	3	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
Nordeste	Macaúba	Óleo de Macaúba	Bunker	HDT	1	0,111	1	0,067	3	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
SP	Oleaginosas	OVR	Bunker	HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	5	0,080799	3	0,0548
SUL	Oleaginosas	OVR	Bunker	HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	5	0,080799	3	0,0548
MG	Oleaginosas	OVR	Bunker	HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	5	0,080799	3	0,0548
RJ	Oleaginosas	OVR	Bunker	HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	5	0,080799	3	0,0548
Nordeste	Oleaginosas	OVR	Bunker	HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	5	0,080799	3	0,0548

				Oferta de MP		Saz da MP		Competição setor agro		Oferta vetor energético		Escala proc.		Custo do vetor		Estabilidade		
			Produto Princípio	Unidade processo	IND1	Peso	IND2	Peso	IND3	PesoIND3	IND4	PesoIND4	IND5	PesoIND5	IND6	PesoIND6	IND7	PesoIND7
SP	Biomassa lignoc	Bio-óleo	Bunker	HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	4	0,080799	1	0,0548
SUL	Biomassa lignoc	Bio-óleo	Bunker	HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	4	0,080799	1	0,0548
MG	Biomassa lignoc	Bio-óleo	Bunker	HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	4	0,080799	1	0,0548
RJ	Biomassa lignoc	Bio-óleo	Bunker	HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	4	0,080799	1	0,0548
Nordeste	Biomassa lignoc	Bio-óleo	Bunker	HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	4	0,080799	1	0,0548
SP	Soja	Óleo de soja	QAV	FCC + HDT	5	0,111	2	0,067	1	0,0806796	5	0,086643	4	0,061136	2	0,080799	3	0,0548
SUL	Soja	Óleo de soja	QAV	FCC + HDT	5	0,111	2	0,067	1	0,0806796	5	0,086643	4	0,061136	2	0,080799	3	0,0548
MG	Soja	Óleo de soja	QAV	FCC + HDT	5	0,111	2	0,067	1	0,0806796	5	0,086643	1	0,061136	2	0,080799	3	0,0548
RJ	Soja	Óleo de soja	QAV	FCC + HDT	5	0,111	2	0,067	1	0,0806796	5	0,086643	1	0,061136	2	0,080799	3	0,0548
Nordeste	Soja	Óleo de soja	QAV	FCC + HDT	5	0,111	2	0,067	1	0,0806796	5	0,086643	1	0,061136	2	0,080799	3	0,0548
SP	Palma	Óleo de Palma	QAV	FCC + HDT	2	0,111	4	0,067	1	0,0806796	3	0,086643	3	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
SUL	Palma	Óleo de Palma	QAV	FCC + HDT	2	0,111	4	0,067	1	0,0806796	3	0,086643	2	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
MG	Palma	Óleo de Palma	QAV	FCC + HDT	2	0,111	4	0,067	1	0,0806796	3	0,086643	1	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
RJ	Palma	Óleo de Palma	QAV	FCC + HDT	2	0,111	4	0,067	1	0,0806796	3	0,086643	1	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
Nordeste	Palma	Óleo de Palma	QAV	FCC + HDT	2	0,111	4	0,067	1	0,0806796	3	0,086643	1	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
SP	Macaúba	Óleo de Macaúba	QAV	FCC + HDT	1	0,111	1	0,067	3	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
SUL	Macaúba	Óleo de Macaúba	QAV	FCC + HDT	1	0,111	1	0,067	3	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
MG	Macaúba	Óleo de Macaúba	QAV	FCC + HDT	1	0,111	1	0,067	3	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
RJ	Macaúba	Óleo de Macaúba	QAV	FCC + HDT	1	0,111	1	0,067	3	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
Nordeste	Macaúba	Óleo de Macaúba	QAV	FCC + HDT	1	0,111	1	0,067	3	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
SP	Oleaginosas	OVR	QAV	FCC + HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	5	0,080799	3	0,0548
SUL	Oleaginosas	OVR	QAV	FCC + HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	5	0,080799	3	0,0548
MG	Oleaginosas	OVR	QAV	FCC + HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	5	0,080799	3	0,0548
RJ	Oleaginosas	OVR	QAV	FCC + HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	5	0,080799	3	0,0548
Nordeste	Oleaginosas	OVR	QAV	FCC + HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	5	0,080799	3	0,0548
SP	Biomassa lignoc	Bio-óleo	QAV	FCC + HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	4	0,080799	1	0,0548
SUL	Biomassa lignoc	Bio-óleo	QAV	FCC + HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	4	0,080799	1	0,0548
MG	Biomassa lignoc	Bio-óleo	QAV	FCC + HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	4	0,080799	1	0,0548
RJ	Biomassa lignoc	Bio-óleo	QAV	FCC + HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	4	0,080799	1	0,0548
Nordeste	Biomassa lignoc	Bio-óleo	QAV	FCC + HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	4	0,080799	1	0,0548
SP	Soja	Óleo de soja	Diesel	FCC + HDT	5	0,111	2	0,067	1	0,0806796	5	0,086643	4	0,061136	2	0,080799	3	0,0548
SUL	Soja	Óleo de soja	Diesel	FCC + HDT	5	0,111	2	0,067	1	0,0806796	5	0,086643	4	0,061136	2	0,080799	3	0,0548
MG	Soja	Óleo de soja	Diesel	FCC + HDT	5	0,111	2	0,067	1	0,0806796	5	0,086643	1	0,061136	2	0,080799	3	0,0548
RJ	Soja	Óleo de soja	Diesel	FCC + HDT	5	0,111	2	0,067	1	0,0806796	5	0,086643	1	0,061136	2	0,080799	3	0,0548
Nordeste	Soja	Óleo de soja	Diesel	FCC + HDT	5	0,111	2	0,067	1	0,0806796	5	0,086643	1	0,061136	2	0,080799	3	0,0548

Estado	Cidade	Produto	Unidade	Processo	Oferta de MP		Saz da MP		Competição		Oferta vetor		Escala		Custo do		Estabilidade	
					IND1	Peso	IND2	Peso	IND3	PesoIND3	IND4	PesoIND4	IND5	PesoIND5	IND6	PesoIND6	IND7	PesoIND7
SP	Palma	Óleo de Palma	Diesel	FCC + HDT	2	0,111	4	0,067	1	0,0806796	3	0,086643	3	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
SUL	Palma	Óleo de Palma	Diesel	FCC + HDT	2	0,111	4	0,067	1	0,0806796	3	0,086643	2	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
MG	Palma	Óleo de Palma	Diesel	FCC + HDT	2	0,111	4	0,067	1	0,0806796	3	0,086643	1	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
RJ	Palma	Óleo de Palma	Diesel	FCC + HDT	2	0,111	4	0,067	1	0,0806796	3	0,086643	1	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
Nordeste	Palma	Óleo de Palma	Diesel	FCC + HDT	2	0,111	4	0,067	1	0,0806796	3	0,086643	1	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
SP	Macaúba	Óleo de Macaúba	Diesel	FCC + HDT	1	0,111	1	0,067	3	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
SUL	Macaúba	Óleo de Macaúba	Diesel	FCC + HDT	1	0,111	1	0,067	3	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
MG	Macaúba	Óleo de Macaúba	Diesel	FCC + HDT	1	0,111	1	0,067	3	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
RJ	Macaúba	Óleo de Macaúba	Diesel	FCC + HDT	1	0,111	1	0,067	3	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
Nordeste	Macaúba	Óleo de Macaúba	Diesel	FCC + HDT	1	0,111	1	0,067	3	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
SP	Oleaginosas	OVR	Diesel	FCC + HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	5	0,080799	3	0,0548
SUL	Oleaginosas	OVR	Diesel	FCC + HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	5	0,080799	3	0,0548
MG	Oleaginosas	OVR	Diesel	FCC + HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	5	0,080799	3	0,0548
RJ	Oleaginosas	OVR	Diesel	FCC + HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	5	0,080799	3	0,0548
Nordeste	Oleaginosas	OVR	Diesel	FCC + HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	5	0,080799	3	0,0548
SP	Biomassa lignocelulose	Bio-óleo	Diesel	FCC + HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	4	0,080799	1	0,0548
SUL	Biomassa lignocelulose	Bio-óleo	Diesel	FCC + HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	4	0,080799	1	0,0548
MG	Biomassa lignocelulose	Bio-óleo	Diesel	FCC + HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	4	0,080799	1	0,0548
RJ	Biomassa lignocelulose	Bio-óleo	Diesel	FCC + HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	4	0,080799	1	0,0548
Nordeste	Biomassa lignocelulose	Bio-óleo	Diesel	FCC + HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	4	0,080799	1	0,0548
SP	Soja	Óleo de soja	Bunker	FCC + HDT	5	0,111	2	0,067	1	0,0806796	5	0,086643	4	0,061136	2	0,080799	3	0,0548
SUL	Soja	Óleo de soja	Bunker	FCC + HDT	5	0,111	2	0,067	1	0,0806796	5	0,086643	4	0,061136	2	0,080799	3	0,0548
MG	Soja	Óleo de soja	Bunker	FCC + HDT	5	0,111	2	0,067	1	0,0806796	5	0,086643	1	0,061136	2	0,080799	3	0,0548
RJ	Soja	Óleo de soja	Bunker	FCC + HDT	5	0,111	2	0,067	1	0,0806796	5	0,086643	1	0,061136	2	0,080799	3	0,0548
Nordeste	Soja	Óleo de soja	Bunker	FCC + HDT	5	0,111	2	0,067	1	0,0806796	5	0,086643	1	0,061136	2	0,080799	3	0,0548
SP	Palma	Óleo de Palma	Bunker	FCC + HDT	2	0,111	4	0,067	1	0,0806796	3	0,086643	3	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
SUL	Palma	Óleo de Palma	Bunker	FCC + HDT	2	0,111	4	0,067	1	0,0806796	3	0,086643	2	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
MG	Palma	Óleo de Palma	Bunker	FCC + HDT	2	0,111	4	0,067	1	0,0806796	3	0,086643	1	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
RJ	Palma	Óleo de Palma	Bunker	FCC + HDT	2	0,111	4	0,067	1	0,0806796	3	0,086643	1	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
Nordeste	Palma	Óleo de Palma	Bunker	FCC + HDT	2	0,111	4	0,067	1	0,0806796	3	0,086643	1	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
SP	Macaúba	Óleo de Macaúba	Bunker	FCC + HDT	1	0,111	1	0,067	3	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
SUL	Macaúba	Óleo de Macaúba	Bunker	FCC + HDT	1	0,111	1	0,067	3	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
MG	Macaúba	Óleo de Macaúba	Bunker	FCC + HDT	1	0,111	1	0,067	3	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
RJ	Macaúba	Óleo de Macaúba	Bunker	FCC + HDT	1	0,111	1	0,067	3	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548
Nordeste	Macaúba	Óleo de Macaúba	Bunker	FCC + HDT	1	0,111	1	0,067	3	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	2,1	0,080799	3	0,0548

Região	Refino	Matéria prima	Vetor Energético	Produto Princípio	Unidade processo	Oferta de MP		Saz da MP		Competição setor agro		Oferta vetor energético		Escala proc.		Custo do vetor		Estabilidade	
						IND1	Peso	IND2	Peso	IND3	Peso	IND4	Peso	IND5	Peso	IND6	Peso	IND7	Peso
SP	Oleaginosas	OVR	Bunker	FCC + HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	5	0,080799	3	0,0548	
SUL	Oleaginosas	OVR	Bunker	FCC + HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	5	0,080799	3	0,0548	
MG	Oleaginosas	OVR	Bunker	FCC + HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	5	0,080799	3	0,0548	
RJ	Oleaginosas	OVR	Bunker	FCC + HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	5	0,080799	3	0,0548	
Nordeste	Oleaginosas	OVR	Bunker	FCC + HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	5	0,080799	3	0,0548	
SP	Biomassa lignocelulósica	Bio-óleo	Bunker	FCC + HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	4	0,080799	1	0,0548	
SUL	Biomassa lignocelulósica	Bio-óleo	Bunker	FCC + HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	4	0,080799	1	0,0548	
MG	Biomassa lignocelulósica	Bio-óleo	Bunker	FCC + HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	4	0,080799	1	0,0548	
RJ	Biomassa lignocelulósica	Bio-óleo	Bunker	FCC + HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	4	0,080799	1	0,0548	
Nordeste	Biomassa lignocelulósica	Bio-óleo	Bunker	FCC + HDT	5	0,111	5	0,067	5	0,0806796	1	0,086643	1	0,061136	4	0,080799	1	0,0548	

Região	Refino	Matéria prima	Vetor Energético	Produto Principal	Unidade processo	Maturidade tecnológica		Qualidade do vetor		Conf. regulatória		Vulnerabilidade		Potencial mit emissões		Geração de emprego		Nota final
						IND8	PesoIND8	IND9	PesoIND9	IND10	PesoIND10	IND11	PesoIND11	IND12	PesoIND12	IND13	PesoIND13	
SP	Soja	Óleo de soja	QAV	HDT	5	0,078908	3	0,06117	5	0,067363	3	0,100426	1	0,094532	2	0,054976	3,19621	
SUL	Soja	Óleo de soja	QAV	HDT	5	0,078908	3	0,06117	5	0,067363	2,5	0,100426	1	0,094532	2	0,054976	3,145997	
MG	Soja	Óleo de soja	QAV	HDT	5	0,078908	3	0,06117	5	0,067363	2	0,100426	1	0,094532	2	0,054976	2,912377	
RJ	Soja	Óleo de soja	QAV	HDT	5	0,078908	3	0,06117	5	0,067363	2	0,100426	1	0,094532	2	0,054976	2,912377	
Nordeste	Soja	Óleo de soja	QAV	HDT	5	0,078908	3	0,06117	5	0,067363	1	0,100426	1	0,094532	2	0,054976	2,811952	
SP	Palma	Óleo de Palma	QAV	HDT	5	0,078908	3	0,06117	5	0,067363	3,5	0,100426	2	0,094532	4	0,054976	3,025439	
SUL	Palma	Óleo de Palma	QAV	HDT	5	0,078908	3	0,06117	5	0,067363	3	0,100426	2	0,094532	4	0,054976	2,914091	
MG	Palma	Óleo de Palma	QAV	HDT	5	0,078908	3	0,06117	5	0,067363	2,5	0,100426	2	0,094532	4	0,054976	2,802742	
RJ	Palma	Óleo de Palma	QAV	HDT	5	0,078908	3	0,06117	5	0,067363	2,5	0,100426	2	0,094532	4	0,054976	2,802742	
Nordeste	Palma	Óleo de Palma	QAV	HDT	5	0,078908	3	0,06117	5	0,067363	1,5	0,100426	2	0,094532	4	0,054976	2,702316	
SP	Macaúba	Óleo de Macaúba	QAV	HDT	5	0,078908	3	0,06117	5	0,067363	4	0,100426	2	0,094532	4	0,054976	2,628423	
SUL	Macaúba	Óleo de Macaúba	QAV	HDT	5	0,078908	3	0,06117	5	0,067363	3,5	0,100426	2	0,094532	4	0,054976	2,578211	
MG	Macaúba	Óleo de Macaúba	QAV	HDT	5	0,078908	3	0,06117	5	0,067363	3	0,100426	2	0,094532	4	0,054976	2,527998	
RJ	Macaúba	Óleo de Macaúba	QAV	HDT	5	0,078908	3	0,06117	5	0,067363	3	0,100426	2	0,094532	4	0,054976	2,527998	
Nordeste	Macaúba	Óleo de Macaúba	QAV	HDT	5	0,078908	3	0,06117	5	0,067363	2	0,100426	2	0,094532	4	0,054976	2,427572	
SP	Oleaginosas	OVR	QAV	HDT	5	0,078908	3	0,06117	5	0,067363	5	0,100426	3	0,094532	5	0,054976	3,987883	
SUL	Oleaginosas	OVR	QAV	HDT	5	0,078908	3	0,06117	5	0,067363	4,5	0,100426	3	0,094532	5	0,054976	3,93767	
MG	Oleaginosas	OVR	QAV	HDT	5	0,078908	3	0,06117	5	0,067363	4	0,100426	3	0,094532	5	0,054976	3,887457	
RJ	Oleaginosas	OVR	QAV	HDT	5	0,078908	3	0,06117	5	0,067363	4	0,100426	3	0,094532	5	0,054976	3,887457	
Nordeste	Oleaginosas	OVR	QAV	HDT	5	0,078908	3	0,06117	5	0,067363	3	0,100426	3	0,094532	5	0,054976	3,787031	
SP	Biomassa lignocelulósica	Bio-óleo	QAV	HDT	2	0,078908	1	0,06117	2	0,067363	4,5	0,100426	4	0,094532	5	0,054976	3,280652	
SUL	Biomassa lignocelulósica	Bio-óleo	QAV	HDT	2	0,078908	1	0,06117	2	0,067363	4	0,100426	4	0,094532	5	0,054976	3,230439	
MG	Biomassa lignocelulósica	Bio-óleo	QAV	HDT	2	0,078908	1	0,06117	2	0,067363	3,5	0,100426	4	0,094532	5	0,054976	3,180226	
RJ	Biomassa lignocelulósica	Bio-óleo	QAV	HDT	2	0,078908	1	0,06117	2	0,067363	3,5	0,100426	4	0,094532	5	0,054976	3,180226	
Nordeste	Biomassa lignocelulósica	Bio-óleo	QAV	HDT	2	0,078908	1	0,06117	2	0,067363	2,5	0,100426	4	0,094532	5	0,054976	3,0798	
SP	Soja	Óleo de soja	Diesel	HDT	5	0,078908	3	0,06117	5	0,067363	3	0,100426	1	0,094532	2	0,054976	3,19621	
SUL	Soja	Óleo de soja	Diesel	HDT	5	0,078908	3	0,06117	5	0,067363	2,5	0,100426	1	0,094532	2	0,054976	3,145997	
MG	Soja	Óleo de soja	Diesel	HDT	5	0,078908	3	0,06117	5	0,067363	2	0,100426	1	0,094532	2	0,054976	2,912377	
RJ	Soja	Óleo de soja	Diesel	HDT	5	0,078908	3	0,06117	5	0,067363	2	0,100426	1	0,094532	2	0,054976	2,912377	
Nordeste	Soja	Óleo de soja	Diesel	HDT	5	0,078908	3	0,06117	5	0,067363	1	0,100426	1	0,094532	2	0,054976	2,811952	
SP	Palma	Óleo de Palma	Diesel	HDT	5	0,078908	3	0,06117	5	0,067363	3,5	0,100426	2	0,094532	4	0,054976	3,025439	
SUL	Palma	Óleo de Palma	Diesel	HDT	5	0,078908	3	0,06117	5	0,067363	3	0,100426	2	0,094532	4	0,054976	2,914091	
MG	Palma	Óleo de Palma	Diesel	HDT	5	0,078908	3	0,06117	5	0,067363	2,5	0,100426	2	0,094532	4	0,054976	2,802742	
RJ	Palma	Óleo de Palma	Diesel	HDT	5	0,078908	3	0,06117	5	0,067363	2,5	0,100426	2	0,094532	4	0,054976	2,802742	
Nordeste	Palma	Óleo de Palma	Diesel	HDT	5	0,078908	3	0,06117	5	0,067363	1,5	0,100426	2	0,094532	4	0,054976	2,702316	

					Maturidade tecnológica		Qualidade do vetor		Conf. regulatória		Vulnerabilidade		Potencial mit emissões		Geração de emprego		
			Produto Principal	Unidade processo	IND8	PesoIND8	IND9	PesoIND9	IND10	PesoIND10	IND11	PesoIND11	IND12	PesoIND12	IND13	PesoIND13	Nota final
SP	Macaúba	Óleo de Macaúba	Diesel	HDT	5	0,078908	3	0,06117	5	0,067363	4	0,100426	2	0,094532	4	0,054976	2,628423
SUL	Macaúba	Óleo de Macaúba	Diesel	HDT	5	0,078908	3	0,06117	5	0,067363	3,5	0,100426	2	0,094532	4	0,054976	2,578211
MG	Macaúba	Óleo de Macaúba	Diesel	HDT	5	0,078908	3	0,06117	5	0,067363	3	0,100426	2	0,094532	4	0,054976	2,527998
RJ	Macaúba	Óleo de Macaúba	Diesel	HDT	5	0,078908	3	0,06117	5	0,067363	3	0,100426	2	0,094532	4	0,054976	2,527998
Nordeste	Macaúba	Óleo de Macaúba	Diesel	HDT	5	0,078908	3	0,06117	5	0,067363	2	0,100426	2	0,094532	4	0,054976	2,427572
SP	Oleaginosas	OVR	Diesel	HDT	5	0,078908	3	0,06117	5	0,067363	5	0,100426	3	0,094532	5	0,054976	3,987883
SUL	Oleaginosas	OVR	Diesel	HDT	5	0,078908	3	0,06117	5	0,067363	4,5	0,100426	3	0,094532	5	0,054976	3,93767
MG	Oleaginosas	OVR	Diesel	HDT	5	0,078908	3	0,06117	5	0,067363	4	0,100426	3	0,094532	5	0,054976	3,887457
RJ	Oleaginosas	OVR	Diesel	HDT	5	0,078908	3	0,06117	5	0,067363	4	0,100426	3	0,094532	5	0,054976	3,887457
Nordeste	Oleaginosas	OVR	Diesel	HDT	5	0,078908	3	0,06117	5	0,067363	3	0,100426	3	0,094532	5	0,054976	3,787031
SP	Biomassa lignocelulósica	Bio-óleo	Diesel	HDT	2	0,078908	1	0,06117	3	0,067363	4,5	0,100426	4	0,094532	5	0,054976	3,348015
SUL	Biomassa lignocelulósica	Bio-óleo	Diesel	HDT	2	0,078908	1	0,06117	3	0,067363	4	0,100426	4	0,094532	5	0,054976	3,297802
MG	Biomassa lignocelulósica	Bio-óleo	Diesel	HDT	2	0,078908	1	0,06117	3	0,067363	3,5	0,100426	4	0,094532	5	0,054976	3,247589
RJ	Biomassa lignocelulósica	Bio-óleo	Diesel	HDT	2	0,078908	1	0,06117	3	0,067363	3,5	0,100426	4	0,094532	5	0,054976	3,247589
Nordeste	Biomassa lignocelulósica	Bio-óleo	Diesel	HDT	2	0,078908	1	0,06117	3	0,067363	2,5	0,100426	4	0,094532	5	0,054976	3,147163
SP	Soja	Óleo de soja	Bunker	HDT	2	0,078908	3	0,06117	2	0,067363	3	0,100426	1	0,094532	2	0,054976	2,757397
SUL	Soja	Óleo de soja	Bunker	HDT	2	0,078908	3	0,06117	2	0,067363	2,5	0,100426	1	0,094532	2	0,054976	2,707185
MG	Soja	Óleo de soja	Bunker	HDT	2	0,078908	3	0,06117	2	0,067363	2	0,100426	1	0,094532	2	0,054976	2,473565
RJ	Soja	Óleo de soja	Bunker	HDT	2	0,078908	3	0,06117	2	0,067363	2	0,100426	1	0,094532	2	0,054976	2,473565
Nordeste	Soja	Óleo de soja	Bunker	HDT	2	0,078908	3	0,06117	2	0,067363	1	0,100426	1	0,094532	2	0,054976	2,373139
SP	Palma	Óleo de Palma	Bunker	HDT	2	0,078908	3	0,06117	2	0,067363	3,5	0,100426	2	0,094532	4	0,054976	2,586626
SUL	Palma	Óleo de Palma	Bunker	HDT	2	0,078908	3	0,06117	2	0,067363	3	0,100426	2	0,094532	4	0,054976	2,475278
MG	Palma	Óleo de Palma	Bunker	HDT	2	0,078908	3	0,06117	2	0,067363	2,5	0,100426	2	0,094532	4	0,054976	2,363929
RJ	Palma	Óleo de Palma	Bunker	HDT	2	0,078908	3	0,06117	2	0,067363	2,5	0,100426	2	0,094532	4	0,054976	2,363929
Nordeste	Palma	Óleo de Palma	Bunker	HDT	2	0,078908	3	0,06117	2	0,067363	1,5	0,100426	2	0,094532	4	0,054976	2,263504
SP	Macaúba	Óleo de Macaúba	Bunker	HDT	2	0,078908	3	0,06117	2	0,067363	4	0,100426	2	0,094532	4	0,054976	2,189611
SUL	Macaúba	Óleo de Macaúba	Bunker	HDT	2	0,078908	3	0,06117	2	0,067363	3,5	0,100426	2	0,094532	4	0,054976	2,139398
MG	Macaúba	Óleo de Macaúba	Bunker	HDT	2	0,078908	3	0,06117	2	0,067363	3	0,100426	2	0,094532	4	0,054976	2,089185
RJ	Macaúba	Óleo de Macaúba	Bunker	HDT	2	0,078908	3	0,06117	2	0,067363	3	0,100426	2	0,094532	4	0,054976	2,089185
Nordeste	Macaúba	Óleo de Macaúba	Bunker	HDT	2	0,078908	3	0,06117	2	0,067363	2	0,100426	2	0,094532	4	0,054976	1,988759
SP	Oleaginosas	OVR	Bunker	HDT	2	0,078908	3	0,06117	2	0,067363	5	0,100426	3	0,094532	5	0,054976	3,54907
SUL	Oleaginosas	OVR	Bunker	HDT	2	0,078908	3	0,06117	2	0,067363	4,5	0,100426	3	0,094532	5	0,054976	3,498857
MG	Oleaginosas	OVR	Bunker	HDT	2	0,078908	3	0,06117	2	0,067363	4	0,100426	3	0,094532	5	0,054976	3,448644
RJ	Oleaginosas	OVR	Bunker	HDT	2	0,078908	3	0,06117	2	0,067363	4	0,100426	3	0,094532	5	0,054976	3,448644
Nordeste	Oleaginosas	OVR	Bunker	HDT	2	0,078908	3	0,06117	2	0,067363	3	0,100426	3	0,094532	5	0,054976	3,348219

					Maturidade tecnológica		Qualidade do vetor		Conf. regulatória		Vulnerabilidade		Potencial mit emissões		Geração de emprego		Nota final
					IND8	PesoIND8	IND9	PesoIND9	IND10	PesoIND10	IND11	PesoIND11	IND12	PesoIND12	IND13	PesoIND13	
			Produto Principal	Unidade processo													
SP	Biomassa lignocelulósica	Bio-óleo	Bunker	HDT	1	0,078908	1	0,06117	1	0,067363	4,5	0,100426	4	0,094532	5	0,054976	3,134381
SUL	Biomassa lignocelulósica	Bio-óleo	Bunker	HDT	1	0,078908	1	0,06117	1	0,067363	4	0,100426	4	0,094532	5	0,054976	3,084168
MG	Biomassa lignocelulósica	Bio-óleo	Bunker	HDT	1	0,078908	1	0,06117	1	0,067363	3,5	0,100426	4	0,094532	5	0,054976	3,033955
RJ	Biomassa lignocelulósica	Bio-óleo	Bunker	HDT	1	0,078908	1	0,06117	1	0,067363	3,5	0,100426	4	0,094532	5	0,054976	3,033955
Nordeste	Biomassa lignocelulósica	Bio-óleo	Bunker	HDT	1	0,078908	1	0,06117	1	0,067363	2,5	0,100426	4	0,094532	5	0,054976	2,93353
SP	Soja	Óleo de soja	QAV	FCC + HDT	4	0,078908	2	0,06117	2	0,067363	3	0,100426	2	0,094532	2	0,054976	2,948576
SUL	Soja	Óleo de soja	QAV	FCC + HDT	4	0,078908	2	0,06117	2	0,067363	2,5	0,100426	2	0,094532	2	0,054976	2,898363
MG	Soja	Óleo de soja	QAV	FCC + HDT	4	0,078908	2	0,06117	2	0,067363	2	0,100426	2	0,094532	2	0,054976	2,664743
RJ	Soja	Óleo de soja	QAV	FCC + HDT	4	0,078908	2	0,06117	2	0,067363	2	0,100426	2	0,094532	2	0,054976	2,664743
Nordeste	Soja	Óleo de soja	QAV	FCC + HDT	4	0,078908	2	0,06117	2	0,067363	1	0,100426	2	0,094532	2	0,054976	2,564318
SP	Palma	Óleo de Palma	QAV	FCC + HDT	4	0,078908	2	0,06117	2	0,067363	3,5	0,100426	3	0,094532	4	0,054976	2,777805
SUL	Palma	Óleo de Palma	QAV	FCC + HDT	4	0,078908	2	0,06117	2	0,067363	3	0,100426	3	0,094532	4	0,054976	2,666457
MG	Palma	Óleo de Palma	QAV	FCC + HDT	4	0,078908	2	0,06117	2	0,067363	2,5	0,100426	3	0,094532	4	0,054976	2,555108
RJ	Palma	Óleo de Palma	QAV	FCC + HDT	4	0,078908	2	0,06117	2	0,067363	2,5	0,100426	3	0,094532	4	0,054976	2,555108
Nordeste	Palma	Óleo de Palma	QAV	FCC + HDT	4	0,078908	2	0,06117	2	0,067363	1,5	0,100426	3	0,094532	4	0,054976	2,454682
SP	Macaúba	Óleo de Macaúba	QAV	FCC + HDT	4	0,078908	2	0,06117	2	0,067363	4	0,100426	3	0,094532	4	0,054976	2,38079
SUL	Macaúba	Óleo de Macaúba	QAV	FCC + HDT	4	0,078908	2	0,06117	2	0,067363	3,5	0,100426	3	0,094532	4	0,054976	2,330577
MG	Macaúba	Óleo de Macaúba	QAV	FCC + HDT	4	0,078908	2	0,06117	2	0,067363	3	0,100426	3	0,094532	4	0,054976	2,280364
RJ	Macaúba	Óleo de Macaúba	QAV	FCC + HDT	4	0,078908	2	0,06117	2	0,067363	3	0,100426	3	0,094532	4	0,054976	2,280364
Nordeste	Macaúba	Óleo de Macaúba	QAV	FCC + HDT	4	0,078908	2	0,06117	2	0,067363	2	0,100426	3	0,094532	4	0,054976	2,179938
SP	Oleaginosas	OVR	QAV	FCC + HDT	4	0,078908	2	0,06117	2	0,067363	5	0,100426	4	0,094532	5	0,054976	3,740249
SUL	Oleaginosas	OVR	QAV	FCC + HDT	4	0,078908	2	0,06117	2	0,067363	4,5	0,100426	4	0,094532	5	0,054976	3,690036
MG	Oleaginosas	OVR	QAV	FCC + HDT	4	0,078908	2	0,06117	2	0,067363	4	0,100426	4	0,094532	5	0,054976	3,639823
RJ	Oleaginosas	OVR	QAV	FCC + HDT	4	0,078908	2	0,06117	2	0,067363	4	0,100426	4	0,094532	5	0,054976	3,639823
Nordeste	Oleaginosas	OVR	QAV	FCC + HDT	4	0,078908	2	0,06117	2	0,067363	3	0,100426	4	0,094532	5	0,054976	3,539397
SP	Biomassa lignocelulósica	Bio-óleo	QAV	FCC + HDT	3	0,078908	1	0,06117	1	0,067363	4,5	0,100426	5	0,094532	5	0,054976	3,386729
SUL	Biomassa lignocelulósica	Bio-óleo	QAV	FCC + HDT	3	0,078908	1	0,06117	1	0,067363	4	0,100426	5	0,094532	5	0,054976	3,336516
MG	Biomassa lignocelulósica	Bio-óleo	QAV	FCC + HDT	3	0,078908	1	0,06117	1	0,067363	3,5	0,100426	5	0,094532	5	0,054976	3,286304
RJ	Biomassa lignocelulósica	Bio-óleo	QAV	FCC + HDT	3	0,078908	1	0,06117	1	0,067363	3,5	0,100426	5	0,094532	5	0,054976	3,286304
Nordeste	Biomassa lignocelulósica	Bio-óleo	QAV	FCC + HDT	3	0,078908	1	0,06117	1	0,067363	2,5	0,100426	5	0,094532	5	0,054976	3,185878
SP	Soja	Óleo de soja	Diesel	FCC + HDT	4	0,078908	2	0,06117	4	0,067363	3	0,100426	2	0,094532	2	0,054976	3,083302
SUL	Soja	Óleo de soja	Diesel	FCC + HDT	4	0,078908	2	0,06117	4	0,067363	2,5	0,100426	2	0,094532	2	0,054976	3,033089
MG	Soja	Óleo de soja	Diesel	FCC + HDT	4	0,078908	2	0,06117	4	0,067363	2	0,100426	2	0,094532	2	0,054976	2,799469
RJ	Soja	Óleo de soja	Diesel	FCC + HDT	4	0,078908	2	0,06117	4	0,067363	2	0,100426	2	0,094532	2	0,054976	2,799469
Nordeste	Soja	Óleo de soja	Diesel	FCC + HDT	4	0,078908	2	0,06117	4	0,067363	1	0,100426	2	0,094532	2	0,054976	2,699043

			Produto Princípio	Unidade processo	Maturidade tecnológica		Qualidade do vetor		Conf. regulatória		Vulnerabilidade		Potencial mit emissões		Geração de emprego		Nota final
					IND8	PesoIND8	IND9	PesoIND9	IND10	PesoIND10	IND11	PesoIND11	IND12	PesoIND12	IND13	PesoIND13	
SP	Palma	Óleo de Palma	Diesel	FCC + HDT	4	0,078908	2	0,06117	4	0,067363	3,5	0,100426	3	0,094532	4	0,054976	2,912531
SUL	Palma	Óleo de Palma	Diesel	FCC + HDT	4	0,078908	2	0,06117	4	0,067363	3	0,100426	3	0,094532	4	0,054976	2,801182
MG	Palma	Óleo de Palma	Diesel	FCC + HDT	4	0,078908	2	0,06117	4	0,067363	2,5	0,100426	3	0,094532	4	0,054976	2,689834
RJ	Palma	Óleo de Palma	Diesel	FCC + HDT	4	0,078908	2	0,06117	4	0,067363	2,5	0,100426	3	0,094532	4	0,054976	2,689834
Nordeste	Palma	Óleo de Palma	Diesel	FCC + HDT	4	0,078908	2	0,06117	4	0,067363	1,5	0,100426	3	0,094532	4	0,054976	2,589408
SP	Macaúba	Óleo de Macaúba	Diesel	FCC + HDT	4	0,078908	2	0,06117	4	0,067363	4	0,100426	3	0,094532	4	0,054976	2,515515
SUL	Macaúba	Óleo de Macaúba	Diesel	FCC + HDT	4	0,078908	2	0,06117	4	0,067363	3,5	0,100426	3	0,094532	4	0,054976	2,465302
MG	Macaúba	Óleo de Macaúba	Diesel	FCC + HDT	4	0,078908	2	0,06117	4	0,067363	3	0,100426	3	0,094532	4	0,054976	2,415089
RJ	Macaúba	Óleo de Macaúba	Diesel	FCC + HDT	4	0,078908	2	0,06117	4	0,067363	3	0,100426	3	0,094532	4	0,054976	2,415089
Nordeste	Macaúba	Óleo de Macaúba	Diesel	FCC + HDT	4	0,078908	2	0,06117	4	0,067363	2	0,100426	3	0,094532	4	0,054976	2,314664
SP	Oleaginosas	OVR	Diesel	FCC + HDT	4	0,078908	2	0,06117	4	0,067363	5	0,100426	4	0,094532	5	0,054976	3,874974
SUL	Oleaginosas	OVR	Diesel	FCC + HDT	4	0,078908	2	0,06117	4	0,067363	4,5	0,100426	4	0,094532	5	0,054976	3,824761
MG	Oleaginosas	OVR	Diesel	FCC + HDT	4	0,078908	2	0,06117	4	0,067363	4	0,100426	4	0,094532	5	0,054976	3,774548
RJ	Oleaginosas	OVR	Diesel	FCC + HDT	4	0,078908	2	0,06117	4	0,067363	4	0,100426	4	0,094532	5	0,054976	3,774548
Nordeste	Oleaginosas	OVR	Diesel	FCC + HDT	4	0,078908	2	0,06117	4	0,067363	3	0,100426	4	0,094532	5	0,054976	3,674123
SP	Biomassa lignocelulósica	Bio-óleo	Diesel	FCC + HDT	3	0,078908	1	0,06117	1	0,067363	4,5	0,100426	5	0,094532	5	0,054976	3,386729
SUL	Biomassa lignocelulósica	Bio-óleo	Diesel	FCC + HDT	3	0,078908	1	0,06117	1	0,067363	4	0,100426	5	0,094532	5	0,054976	3,336516
MG	Biomassa lignocelulósica	Bio-óleo	Diesel	FCC + HDT	3	0,078908	1	0,06117	1	0,067363	3,5	0,100426	5	0,094532	5	0,054976	3,286304
RJ	Biomassa lignocelulósica	Bio-óleo	Diesel	FCC + HDT	3	0,078908	1	0,06117	1	0,067363	3,5	0,100426	5	0,094532	5	0,054976	3,286304
Nordeste	Biomassa lignocelulósica	Bio-óleo	Diesel	FCC + HDT	3	0,078908	1	0,06117	1	0,067363	2,5	0,100426	5	0,094532	5	0,054976	3,185878
SP	Soja	Óleo de soja	Bunker	FCC + HDT	2	0,078908	2	0,06117	1	0,067363	3	0,100426	2	0,094532	2	0,054976	2,723397
SUL	Soja	Óleo de soja	Bunker	FCC + HDT	2	0,078908	2	0,06117	1	0,067363	2,5	0,100426	2	0,094532	2	0,054976	2,673184
MG	Soja	Óleo de soja	Bunker	FCC + HDT	2	0,078908	2	0,06117	1	0,067363	2	0,100426	2	0,094532	2	0,054976	2,439564
RJ	Soja	Óleo de soja	Bunker	FCC + HDT	2	0,078908	2	0,06117	1	0,067363	2	0,100426	2	0,094532	2	0,054976	2,439564
Nordeste	Soja	Óleo de soja	Bunker	FCC + HDT	2	0,078908	2	0,06117	1	0,067363	1	0,100426	2	0,094532	2	0,054976	2,339139
SP	Palma	Óleo de Palma	Bunker	FCC + HDT	2	0,078908	2	0,06117	1	0,067363	3,5	0,100426	3	0,094532	4	0,054976	2,552626
SUL	Palma	Óleo de Palma	Bunker	FCC + HDT	2	0,078908	2	0,06117	1	0,067363	3	0,100426	3	0,094532	4	0,054976	2,441278
MG	Palma	Óleo de Palma	Bunker	FCC + HDT	2	0,078908	2	0,06117	1	0,067363	2,5	0,100426	3	0,094532	4	0,054976	2,329929
RJ	Palma	Óleo de Palma	Bunker	FCC + HDT	2	0,078908	2	0,06117	1	0,067363	2,5	0,100426	3	0,094532	4	0,054976	2,329929
Nordeste	Palma	Óleo de Palma	Bunker	FCC + HDT	2	0,078908	2	0,06117	1	0,067363	1,5	0,100426	3	0,094532	4	0,054976	2,229503
SP	Macaúba	Óleo de Macaúba	Bunker	FCC + HDT	2	0,078908	2	0,06117	1	0,067363	4	0,100426	3	0,094532	4	0,054976	2,155611
SUL	Macaúba	Óleo de Macaúba	Bunker	FCC + HDT	2	0,078908	2	0,06117	1	0,067363	3,5	0,100426	3	0,094532	4	0,054976	2,105398
MG	Macaúba	Óleo de Macaúba	Bunker	FCC + HDT	2	0,078908	2	0,06117	1	0,067363	3	0,100426	3	0,094532	4	0,054976	2,055185
RJ	Macaúba	Óleo de Macaúba	Bunker	FCC + HDT	2	0,078908	2	0,06117	1	0,067363	3	0,100426	3	0,094532	4	0,054976	2,055185
Nordeste	Macaúba	Óleo de Macaúba	Bunker	FCC + HDT	2	0,078908	2	0,06117	1	0,067363	2	0,100426	3	0,094532	4	0,054976	1,954759

Região Refino	Matéria prima	Vetor Energético	Produto Principal	Unidade processo	Maturidade tecnológica		Qualidade do vetor		Conf. regulatória		Vulnerabilidade		Potencial mit emissões		Geração de emprego		Nota final
					IND8	PesoIND8	IND9	PesoIND9	IND10	PesoIND10	IND11	PesoIND11	IND12	PesoIND12	IND13	PesoIND13	
SP	Oleaginosas	OVR	Bunker	FCC + HDT	2	0,078908	2	0,06117	1	0,067363	5	0,100426	4	0,094532	5	0,054976	3,51507
SUL	Oleaginosas	OVR	Bunker	FCC + HDT	2	0,078908	2	0,06117	1	0,067363	4,5	0,100426	4	0,094532	5	0,054976	3,464857
MG	Oleaginosas	OVR	Bunker	FCC + HDT	2	0,078908	2	0,06117	1	0,067363	4	0,100426	4	0,094532	5	0,054976	3,414644
RJ	Oleaginosas	OVR	Bunker	FCC + HDT	2	0,078908	2	0,06117	1	0,067363	4	0,100426	4	0,094532	5	0,054976	3,414644
Nordeste	Oleaginosas	OVR	Bunker	FCC + HDT	2	0,078908	2	0,06117	1	0,067363	3	0,100426	4	0,094532	5	0,054976	3,314218
SP	Biomassa lignocelulósica	Bio-óleo	Bunker	FCC + HDT	1	0,078908	1	0,06117	1	0,067363	4,5	0,100426	5	0,094532	5	0,054976	3,228913
SUL	Biomassa lignocelulósica	Bio-óleo	Bunker	FCC + HDT	1	0,078908	1	0,06117	1	0,067363	4	0,100426	5	0,094532	5	0,054976	3,1787
MG	Biomassa lignocelulósica	Bio-óleo	Bunker	FCC + HDT	1	0,078908	1	0,06117	1	0,067363	3,5	0,100426	5	0,094532	5	0,054976	3,128487
RJ	Biomassa lignocelulósica	Bio-óleo	Bunker	FCC + HDT	1	0,078908	1	0,06117	1	0,067363	3,5	0,100426	5	0,094532	5	0,054976	3,128487
Nordeste	Biomassa lignocelulósica	Bio-óleo	Bunker	FCC + HDT	1	0,078908	1	0,06117	1	0,067363	2,5	0,100426	5	0,094532	5	0,054976	3,028062