



**Uso da RenovaCalc para avaliação da intensidade
de carbono na produção de QAV-alternativo
HEFA considerando diversas rotas de obtenção
de hidrogênio**

Sissa Lorryne da Silva Pereira

**Projeto Final de Curso
em Engenharia de Bioprocessos**

Orientadores:

**Prof. Yordanka Reyes Cruz, D.Sc.
Mellyssa Soares de Souza, M.Sc.**

Novembro de 2021

USO DA RENOVACALC PARA AVALIAÇÃO DA INTENSIDADE DE CARBONO NA PRODUÇÃO DE QAV- ALTERNATIVO HEFA CONSIDERANDO DIVERSAS ROTAS DE OBTENÇÃO DE HIDROGÊNIO

Sissa Lorryne da Silva Pereira

Projeto Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Bioprocessos.

Aprovada por:

Leonard Guimarães Carvalho

Marcelo Mendes Viana

Orientado por:

Yordanka Reyes Cruz, D.Sc.

Mellyssa Soares de Souza, M.Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Novembro de 2021

Pereira, Sissa Lorryne da Silva.

Avaliação da intensidade de carbono pela RenovaCalc do QAV alternativo HEFA em diferentes rotas de obtenção de hidrogênio / Sissa Lorryne da Silva Pereira. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2021. x, 86 p.; il

(Projeto Final) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2021.

Orientadora: Yordanka Reyes Cruz.

Coorientadora: Mellyssa Soares de Souza

1. Querosene alternativo de aviação 2. Intensidade de Carbono. 3. Renovabio. 4. RenovaCalc. 5. Hidrogênio 6. Projeto Final (Graduação UFRJ/EQ). 5. Yordanka Reyes Cruz e Mellyssa Soares de Souza. I. Uso da RenovaCalc para avaliação da intensidade de carbono na produção de QAV-alternativo HEFA considerando diversas rotas de obtenção de hidrogênio.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à saúde de minha mãe, que mesmo durante o difícil período de tratamento de dois cânceres ao longo de minha graduação, me deu todo apoio e carinho. E à memória de meus queridos avós.

CITAÇÃO

“Protegei-me da sabedoria que não chora, da filosofia que não ri, e da grandeza que não se curva diante das crianças.”

(Khalil Gibran)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha mãe Teresinha e meu irmão João, que são minha fortaleza e minha primeira referência. Também por sempre me incentivar e acreditar no meu potencial. E ao meu pai, Assis, pelo fornecimento de material didático.

À meu amor, Eloá, por me dar todo o suporte material e mental durante a reta final da graduação. Sua ajuda e companhia foram indispensáveis.

À família Pereira, pela referência acadêmica e profissional. Principalmente tia Imaculada pelo suporte durante minha estadia em Caxias.

À família Souza da Silva pela confiança enorme, pelos conselhos e momentos leves essenciais no período da graduação.

Às minhas amigas Fernanda e Mellyssa pelo apoio constante durante o período da graduação. Por todos os momentos únicos, festas e caronas dessa amizade que a UFRJ me proporcionou.

À minha amiga/irmã Carol por ser minha companheira de todos os momentos. Sua amizade foi o grande presente que a UFRJ me deu.

Ao professor e amigo Jorge Rodrigues por me ensinar muito além da formação de micelas e reações orgânicas. Sou grata pelas oportunidades e confiança concedidas. E pelo apoio pedagógico/emocional.

Aos meus queridos amigos do LASSA e Polo de Xistoquímica. Carol, Larissa, Lucas, Mylla, Bárbara, Vinícius, Luiza, Mariana, Gustavo, Aienicla, Paula, Vanici, Luís e Ricardo.

Aos meus amigos e companheiros de graduação Raphael, Yuri e Juliana que me ajudaram desde o início até o fim dessa jornada.

À equipe da SBQ-Renovabio da ANP pela rápida oportunidade de estágio no projeto que admiro desde sua criação e que culminou na inspiração deste trabalho. Em especial à coordenadora Maria Auxiliadora pela carinhosa recepção.

À minha orientadora professora Yordanka, pelos ensinamentos fornecidos com enorme carinho e prontidão. Tenho você como uma grande referência acadêmica e profissional.

À minha coorientadora Mellyssa, pelo olhar analítico, disponibilidade e ensinamentos acadêmicos fundamentais para o desenvolvimento desse trabalho.

Aos professores da EQ que foram essenciais durante minha formação: Andréa Medeiros, Eliana Sérvulo, Caroline Cayres, Élcio, Flávia,IVALDO, Maria Antonieta, Selma, Suzana e Yordanka.

Resumo do Projeto Final apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia de Bioprocessos.

USO DA RENOVALCALC PARA AVALIAÇÃO DA INTENSIDADE DE CARBONO NA PRODUÇÃO DE QAV-ALTERNATIVO HEFA CONSIDERANDO DIVERSAS ROTAS DE OBTENÇÃO DE HIDROGÊNIO

Sissa Lorryne da Silva Pereira

Novembro, 2021

Orientadora Responsável: Prof. Yordanka Reyes Cruz, D.Sc.

Coorientadora: Mellyssa Soares de Souza, M.Sc.

A busca por estratégias de redução dos impactos ambientais agravados desde o início das atividades industriais vem sendo discutida globalmente em conferências e debates pelo clima. Com o propósito de alcançar os objetivos firmados em acordos recentes, o Brasil vem buscando desenvolver projetos que associem a redução de impactos ambientais com desenvolvimento econômico e benefícios sociais. Dessa forma, em 2015, durante a 21^a Conferência do Clima da ONU, o país apresentou suas Contribuições Nacionalmente Determinadas, na qual comprometeu-se a reduzir em 37% as emissões de gases de efeito estufa em 2025. Além de outras medidas desenvolvidas, criou-se a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio). Essa política, instituída por lei, visa promover a expansão dos biocombustíveis, garantindo previsibilidade, eficiência energética e redução de emissões dos gases do efeito estufa (GEE). A diferença de valores da intensidade de carbono (IC, medidos em $\text{gCO}_2\text{eq/MJ}$) entre determinada rota de biocombustível analisada e seu fóssil substituto fornece a Nota de Eficiência Energético-Ambiental (NEEA). Junto ao volume de biocombustível produzido, é permitido o fornecimento de ativos ambientais chamados Créditos de Descarbonização (CBIO), que equivale a 1 tonelada de CO_2 não emitido. Um dos combustíveis habilitados pelo Renovabio é o querosene de aviação alternativo (QAV-alternativo), cujo potencial de descarbonização vem sendo analisado, devido ao relevante impacto do setor aéreo na emissão de gases, que representa 2% do valor total no mundo. Diante do cenário exposto, esse estudo buscou verificar os valores de IC da produção de QAV-alternativo obtidos por ésteres e ácidos graxos hidroprocessados (HEFA, do inglês *hydroprocessed esters and fatty acids*) considerando diferentes rotas de obtenção de hidrogênio e usando óleo de soja e óleo de palma como matéria-prima, por meio da calculadora RenovaCalc. Os resultados confirmam a redução da IC na produção e uso de todas as rotas de QAV-alternativo analisadas em comparação ao querosene de aviação de origem fóssil, segundo os parâmetros do Renovabio. A rota com menor IC foi a de QAV-alternativo produzido com óleo de palma e hidrogênio obtido pela reforma do biogás (PRGB), registrando 31,83 $\text{gCO}_2\text{eq/MJ}$. Esse valor representa uma redução de 63,62% em relação ao QAV de origem fóssil. Foi possível também avaliar a contribuição da produção de hidrogênio e da distância da matéria-prima da unidade produtora de combustível na IC e a quantidade de CBIO gerados.

Sumário

Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 - Justificativa.....	1
1.2 – Objetivos	3
1.2.1 – Objetivo geral	3
1.2.2 – Objetivos específicos.....	3
1.3 – Estrutura do trabalho.....	4
Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica	5
2.1 – Discussões internacionais pelo meio ambiente.....	5
2.2 – RenovaBio	6
2.2.1 – Avaliação do ciclo de vida	10
2.2.2 – RenovaCalc	10
2.2.3 – Crédito de Descarbonização (CBIO).....	11
2.3 – Biocombustíveis na matriz energética brasileira	12
2.3 – Combustíveis de aviação	14
3.3.1 – Querosene de aviação.....	14
2.3.2 – Impactos e estratégias do setor aéreo no meio ambiente	16
2.3.3 – Combustíveis alternativos para aviação	16
2.3.4 – SPK–HEFA	18
2.3.5 – Matérias–primas	20
2.4 – Hidrogênio	23
2.4.1 – O mercado de hidrogênio	23
2.4.2 – Rotas tecnológicas para produção de hidrogênio.....	25

Capítulo 3 – Metodologia.....	27
3.1 - Calculadora da intensidade de carbono: RenovaCalc	27
3.2 – Fases agrícolas	28
3.2.1 - Fase agrícola da soja	28
3.2.2 – Fase agrícola da palma de óleo	29
3.3 - Fases industriais de extração do óleo	29
3.3.1 - Fase industrial de extração do óleo de soja.....	29
3.3.2 – Fase industrial de extração do óleo de palma.....	30
3.4 - Fase industrial de produção do querosene alternativo.....	30
3.4.1 – Rotas tecnológicas propostas para o querosene alternativo	30
3.4.2 – Transporte do fornecedor de óleo até usina de produção de bioquerosene alternativo	36
3.4.3 – Dados utilizados na fase industrial de produção de querosene alternativo SPK-HEFA seguindo as rotas propostas.....	38
3.5 – Cálculo da intensidade de carbono das diferentes rotas de produção do querosene alternativo SPK-HEFA utilizando a RenovaCalc v.7	42
3.6 – Emissão de Créditos de Descarbonização (CBIO)	45
Capítulo 4 – Resultados e Discussão	47
4.1 – Valores das intensidades de carbono das diferentes rotas analisadas	47
4.2 – Comparação das intensidades de carbono das diferentes rotas de combustíveis analisados	51
4.3 - Efeito da distância entre a matéria-prima e a produção de biocombustível	58
4.4 - Comparação com outros biocombustíveis inseridos no RenovaBio	59
4.5 – CBIO gerado pelas diferentes rotas e matérias-primas.....	61
Capítulo 5 – Conclusões	65

Capítulo 6 – Sugestões para trabalhos futuros	68
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69

LISTA DE SIGLAS

CBIO - Crédito de Descarbonização

CCUS - *Carbon Capture Utilisation and Storage*

CMBC - Comitê de Monitoramento de Biocombustíveis e Combustíveis

COP 21 – 21ª Conferência do Clima da ONU

CO₂eq – Dióxido de Carbono Equivalente.

CORSIA – *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*

CPEB – Certificação da produção eficiente de biocombustíveis

EA – Eletrólise da Água

FI – Firma Inspetora

FIEC - Federação das Indústrias do Estado do Ceará

GEE – Gases de Efeito Estufa

H2V – Hidrogênio Verde

IATA – *International Air Transport Association*

IC – Intensidade de Carbono

ICAO/UN – *International Civil Aviation Organization*

MDL – Mecanismo do desenvolvimento limpo

NDC - *Nationally Determined Contributions*

NEEA - Nota de Eficiência Energético-Ambiental

RBG – Reforma do Biogás

RGL – Reforma da Glicerina

RGN – Reforma à vapor do Gás Natural

SAF - *Sustainable Aviation Fuel*

SPK-HEFA - *Synthesized paraffinic kerosene produced from hydroprocessed esters and fatty acids*

UFC – Universidade Federal do Ceará

Capítulo 1 – Introdução

1.1 - Justificativa

A temperatura global média deve aumentar em 1,5 °C entre 2030 e 2050 o ritmo atual permaneça. Nesse cenário, projeta-se que os riscos relacionados à mudança climática para a saúde, meios de subsistência, segurança alimentar, abastecimento de água, segurança humana e crescimento econômico aumentem. Para o aumento de 2 °C os riscos projetados são ainda maiores (IPCC, 2019).

Em trajetórias modeladas limitadas ao aumento de 1,5°C, as emissões antrópicas líquidas globais de CO₂ – que precisam ser reduzidas ao máximo para evitar os piores impactos da mudança do clima - declinarão em torno de 45%, em relação aos níveis de 2010, até 2030, atingindo o valor líquido zero em torno de 2050 (IPCC, 2019).

Em 2015, durante a 21ª Conferência do Clima da ONU (COP21) foi assinado o Acordo de Paris, no qual as nações participantes se comprometeram a manter o aumento da temperatura média global menor do que os 2 °C e buscar esforços para limitar o aumento em até 1,5 °C, reconhecendo que isso reduziria significativamente os riscos e impactos das mudanças climáticas (ONU, 2015). O Brasil é um dos países signatários do Acordo e se comprometeu a reduzir em 37% as emissões de gases do efeito estufa (GEE) - em relação aos níveis de emissões de 2005 - até 2025, e 43% até 2030 (MRE, 2020).

A fim de cumprir as metas das Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC, sigla em inglês) firmadas durante a COP21, está previsto que o Brasil deverá aumentar a participação de bioenergia na matriz energética brasileira para aproximadamente 18% até 2030, expandindo o consumo e oferta de biocombustíveis (BNDES, 2017). Nesse contexto, em dezembro de 2017 foi sancionada a Lei nº 13.576 estabelecendo a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) na qual busca-se, principalmente, promover a expansão dos biocombustíveis na matriz energética brasileira (ANP, 2020).

Por meio da política do RenovaBio, são atribuídas Notas de Eficiência Energético-Ambiental (NEEA) equivalentes à mitigação de GEE dos agentes produtores de biocombustíveis em relação ao seu substituto fóssil. A NEEA é inversamente proporcional a Intensidade de Carbono do biocombustível produzido por determinado produtor (ANP, 2020). De acordo com sua NEEA,

o produtor pode obter um ativo financeiro negociado em bolsa chamado Crédito de Descarbonização (CBIO), no qual 1 CBIO equivale a 1 tonelada de CO₂ que deixou de ser emitida.

Em 2019 o setor de transportes foi o que mais consumiu energia e emitiu GEEs no país (EPE, 2020a). A nível mundial, só o subsetor de aviação representou 2% das emissões totais (IATA, 2020). Nesse cenário, a *International Civil Aviation Organization* (ICAO), em conjunto com as empresas aéreas, instituíram um acordo denominado CORSIA para o crescimento neutro de carbono a partir de 2021. Uma de suas estratégias é o uso de combustíveis alternativos *drop in*, ou seja, de hidrocarbonetos equivalentes aos de origem fóssil e compatíveis com a infraestrutura existente (EPE, 2021a).

O querosene de aviação alternativo (QAV- alternativo) é um combustível *drop in* e pode ser obtido por diferentes processos. Uma das rotas tecnológicas mais promissoras é do querosene parafínico produzido a partir de ésteres e ácidos graxos hidroprocessados (SPK-HEFA, do inglês *Synthesized paraffinic kerosene produced from hydroprocessed esters and fatty acids*), que utiliza óleos e gorduras de origem animal ou vegetal para sua obtenção. Considerando os custos e potencial de redução de emissões, os óleos de soja e palma são matérias-primas com relevante destaque nacional (DE SOUZA, 2019).

Além de ser um grande produtor de oleaginosas, o Brasil já realiza o hidrotreatamento de diesel em refinarias, processo no qual há adição de hidrogênio a fim de melhorar as propriedades do combustível, e que é semelhante ao praticado para obtenção de QAV-alternativo pela rota HEFA (DE SOUZA, 2019). Apesar da vantagem tecnológica, de abastecimento e das metas estabelecidas, ainda não há produção significativa de QAV-alternativo no país. Uma das principais incertezas desse novo mercado está relacionado com o custo do combustível alternativo em relação ao equivalente fóssil (DE SOUZA, 2019). A geração de CBIOs a partir do RenovaBio pela produção em grande escala pode surgir como uma nova fonte de receita.

Nesse contexto, foi proposto o presente trabalho, que buscou avaliar a intensidade de carbono (IC, em gCO₂/MJ de combustível) de diferentes rotas de produção de QAV-alternativo, usando a calculadora desenvolvida pelo programa Renovabio (RenovaCalc), a fim de comparar o impacto ambiental gerado pela emissão de GEE entre essas rotas com o provocado na produção de

QAV de origem fóssil. Além disso, foi possível obter a Nota de Eficiência Energético-Ambiental (NEEA) e os créditos de descarbonização (CBIO) dos combustíveis avaliados.

1.2 – Objetivos

1.2.1 – Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo avaliar a intensidade de carbono da produção e uso de querosene alternativo HEFA em diferentes rotas de obtenção de hidrogênio usando óleo de soja e óleo de palma como matéria-prima por meio da calculadora RenovaCalc. Adicionalmente, serão calculadas as respectivas Notas de Eficiência Energético-Ambiental e a quantidade de CBIO de acordo com os critérios estabelecidos pela Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio).

1.2.2 – Objetivos específicos

1. Propor matérias-primas relevantes no contexto brasileiro e rotas de produção de querosene alternativo HEFA a serem avaliadas;
2. Apresentar balanço de massa das rotas selecionadas;
3. Levantamento de dados da contribuição da fase agrícola para as matérias-primas escolhidas;
4. Definir a melhor localização para a unidade produtora de QAV-alternativo HEFA a partir do mapeamento da localização das regiões fornecedoras de matéria-prima;
5. Obter os valores de intensidade de carbono e as Notas de Eficiência Energético-Ambiental por meio da RenovaCalc v.7 utilizando os dados definidos;
6. Comparar os valores de intensidade de carbono entre as rotas propostas e com o QAV de origem fóssil;
7. Avaliar qual fase de produção e uso dos combustíveis apresentou maior impacto na emissão de GEE pelo valor da IC.
8. Gerar a quantidade de CBIO de acordo com os critérios estabelecidos pela Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio);

9. Propor os valores de receita que podem ser obtidos pela comercialização total dos CBIOs calculados.

1.3 – Estrutura do trabalho

Este trabalho é composto por 8 capítulos:

No Capítulo 1 apresenta-se uma descrição das principais motivações do trabalho, considerando as discussões atuais pelo clima, e descrevem-se os objetivos do mesmo. Há a divisão dos objetivos gerais e específicos.

No capítulo 2 exhibe-se as considerações teóricas que fundamentam os objetivos propostos neste trabalho. Aborda-se sobre o Renovabio, os combustíveis de aviação, as rotas propostas e as matérias-primas utilizadas para sua produção.

No capítulo 3 expõe-se a metodologia do trabalho, na qual são reveladas as fases de produção e uso do QAV-alternativo utilizados pela RenovaCalc e os parâmetros considerados. Além de indicar o cálculo para contagem dos CBIOs.

No capítulo 4 revela-se os resultados de IC e NEEA obtidos pela RenovaCalc, além dos valores de CBIO e receita pela comercialização total desses. É desenvolvido também comparações de IC entre as rotas de QAV-alternativo e QAV de origem fóssil, além da análise das fases de produção e uso.

No capítulo 5 apresenta-se as conclusões desenvolvidas a partir dos resultados gerados. É divulgado que todas as rotas de QAV-alternativo propostas apresentam menor IC em comparação ao QAV de origem fóssil. Além disso, a rota de menor impacto ambiental e conseqüentemente que gerou mais CBIOs, segundo os parâmetros do RenovaBio, foi a de QAV-alternativo produzido com óleo de palma e hidrogênio obtido pela reforma do biogás.

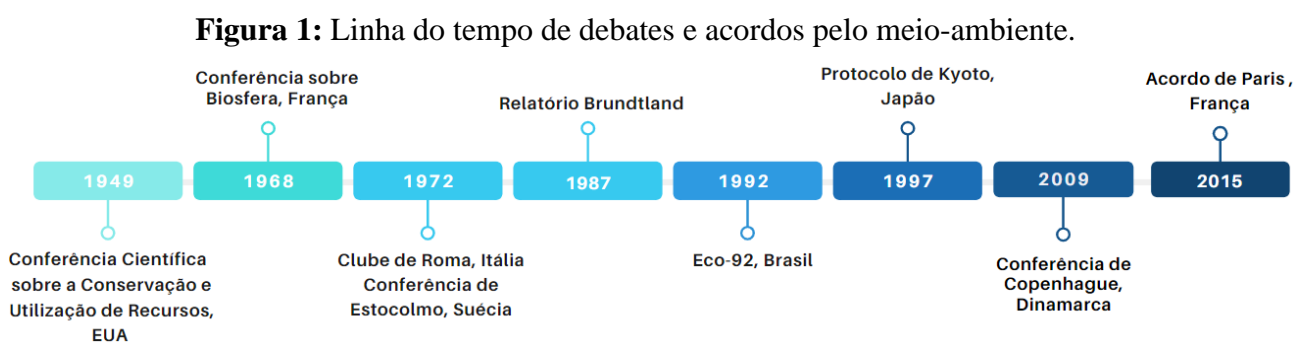
No capítulo 7 sugeriu-se algumas propostas de estudo após a observação das conclusões alcançadas nesse trabalho.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica

2.1 – Discussões internacionais pelo meio ambiente

Entende-se que a atenção internacional às questões ambientais passou a existir majoritariamente na segunda metade do século XX. Após a segunda guerra, em outubro de 1945, houve a criação da ONU, que permitiu a formulação da primeira conferência de abrangência internacional para debate de questões ambientais, a Conferência Científica da ONU sobre a Conservação e Utilização de Recursos, em 1949. Ao mesmo molde, em 1968, houve em Paris a Conferência sobre Biosfera (BELLEN, 2013).

No ano de 1972 ocorreram o Clube de Roma e a Conferência de Estocolmo, que foram importantes debates sobre o desenvolvimento sustentável. Esses eventos foram considerados um marco na discussão ambiental, devido ao alerta sobre as consequências da ação humana no ambiente e a necessidade da tomada de ações, caracterizando uma ruptura com as visões tradicionais de meio ambiente. Em sequência, até os dias de hoje, ocorreram diversos debates pelo ambiente, como mostrado na Figura 1, com destaque para o Relatório *Brundtland* (1987), Eco-92, protocolo de Kyoto (1995), Conferência de Copenhague (2009) e Acordo de Paris (2015) (OLIVEIRA, 2018).



O Acordo de Paris é um tratado global, realizado na 21ª Conferência das Partes (COP21), em 2015, na França, e teve como principais compromissos firmados: manter o aumento da temperatura média global abaixo de 2 °C, amplo comprometimento das nações mundiais, exigência

de estratégias de longo prazo para o equilíbrio entre emissões e remoções de GEE, adoção de metas determinadas em cada país (NDC) e investimento em adaptação aos impactos negativos da mudança do clima (ONU, 2015; PROLO, ANGELO, *et al.*, 2021).

O Brasil é historicamente protagonista nas convenções sobre o clima. Atuou na elaboração de estratégias globais como o Mecanismo do Desenvolvimento Limpo (MDL), foi signatário do Protocolo de Quioto, assumiu compromisso nacional voluntário de redução de GEE na COP 15 e apresentou sua Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) na COP 21. Nesse último evento, o Brasil comprometeu-se a reduzir em 37% dos GEE até 2025 e 43% até 2030 (MACHADO, COSTA, *et al.*, 2017).

Com a finalidade de cumprir os compromissos traçados no Acordo de Paris, foram elaboradas as NDCs, na qual cada país desenvolveu uma estratégia viável, considerando sua realidade socioeconômica. Essa metodologia, denominada *bottom-up*, substituiu a lógica adotada em Quioto, na qual os compromissos eram elaborados de acordo com o grupo industrial e econômico pertencente (PROLO, ANGELO, *et al.*, 2021).

Para pôr em prática as NDCs, entre outras medidas, o país se comprometeu a aumentar a participação de bioenergia na sua matriz energética para aproximadamente 18% até 2030 (MACHADO, COSTA, *et al.*, 2017). Tendo em vista o destaque e a consolidação dos biocombustíveis no setor de transportes nacional, aliado a capacidade de redução de emissões, esses combustíveis são considerados como um vetor para consolidação das metas firmadas. Nesse contexto, a Política Nacional de Biocombustíveis foi desenvolvida e instituída pela Lei 13.576/2017.

2.2 – RenovaBio

A Lei nº 13576 de dezembro de 2017 define as ações, instrumentos e metas da Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), que tem os seguintes objetivos: (1) contribuir para o cumprimento das metas das NDCs afirmadas pelo Brasil no âmbito do Acordo de Paris, (2) contribuir para sinergia entre a eficiência energética e redução de emissões dos GEEs no ciclo de vida dos biocombustíveis, (3) promover a expansão da produção e uso dos biocombustíveis na

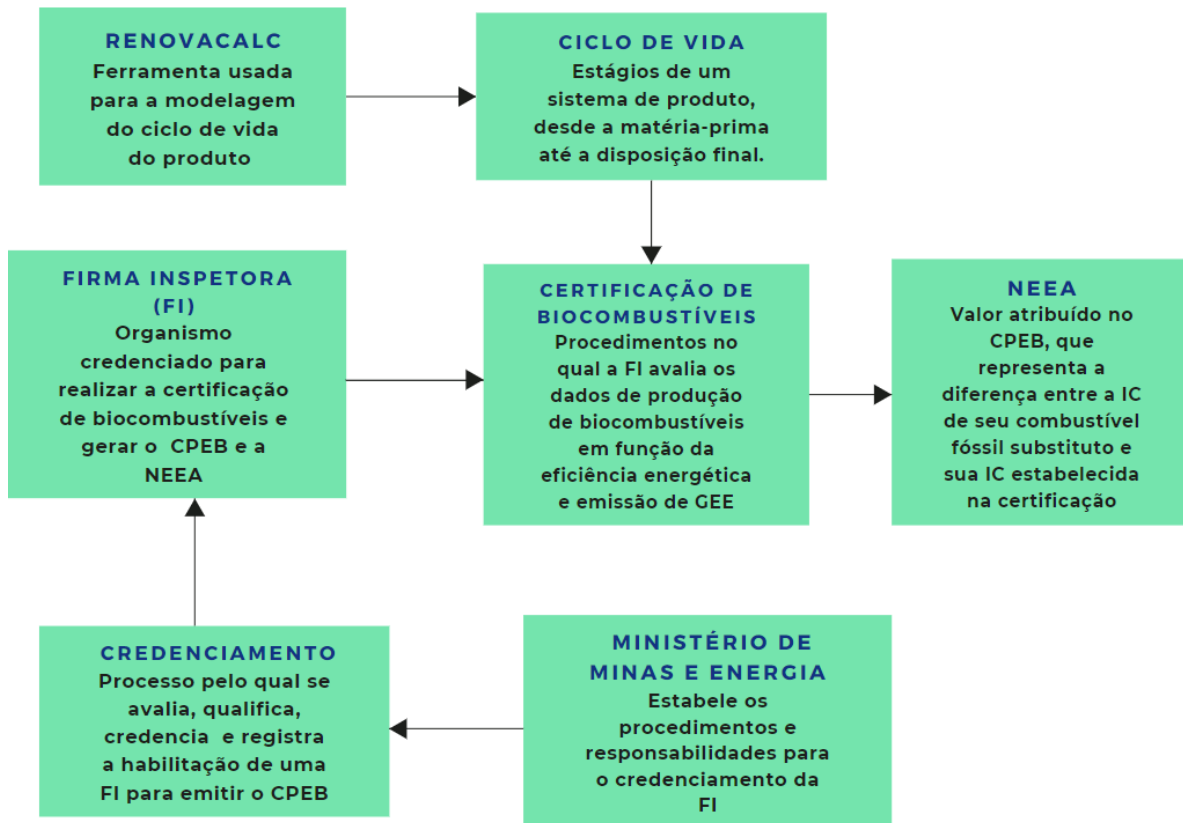
matriz energética brasileira, (4) garantir a previsibilidade do setor de biocombustíveis no mercado nacional de combustíveis (REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL, 2017).

Com a finalidade de realizar os objetivos traçados, o programa definiu a criação de instrumentos, são eles: (1) metas anuais de redução de GEEs na matriz de combustíveis, incluindo metas individuais para os distribuidores de combustíveis, (2) Créditos de Descarbonização (CBIOS), (3) a Certificação da Produção Eficiente, atribuindo uma nota para cada unidade produtora de biocombustível (4) adições compulsórias de biocombustíveis aos combustíveis fósseis, (5) incentivos fiscais, financeiros e creditícios, (6) as ações no âmbito do Acordo de Paris sob a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL, 2017).

O instrumento essencial na construção do RenovaBio é a definição das Metas Nacionais para Redução de Emissões na Matriz de Combustíveis. Esse mecanismo visa induzir a redução da intensidade de carbono no setor, que só é possível mediante ao aumento da participação dos biocombustíveis, considerando um aumento de demanda. A partir desse dispositivo, são criadas as metas individuais de descarbonização, que devem ser exercidas pelos distribuidores de combustíveis fósseis, de acordo com a participação no mercado. O cumprimento das metas deve acontecer pela compra dos CBIOS, que são ofertados pelos produtores de biocombustíveis, em mercado organizado (MME, MMA, *et al.*, 2021) .

A Certificação da Produção Eficiente de Biocombustíveis é concedida após auditoria realizada pelas Firms Inspetoras credenciadas nos dados técnicos declarados pela unidade produtora do biocombustível. Os valores referentes ao ciclo de vida de produção dos biocombustíveis, depois de auditados, são usados para gerar a NEEA por meio da calculadora RenovaCalc, como representado no fluxograma da Figura 2 (LIMA, 2020).

Figura 2: Esquema de representação parcial do funcionamento do RenovaBio.



Fonte: Adaptado de (EPE, 2018a)

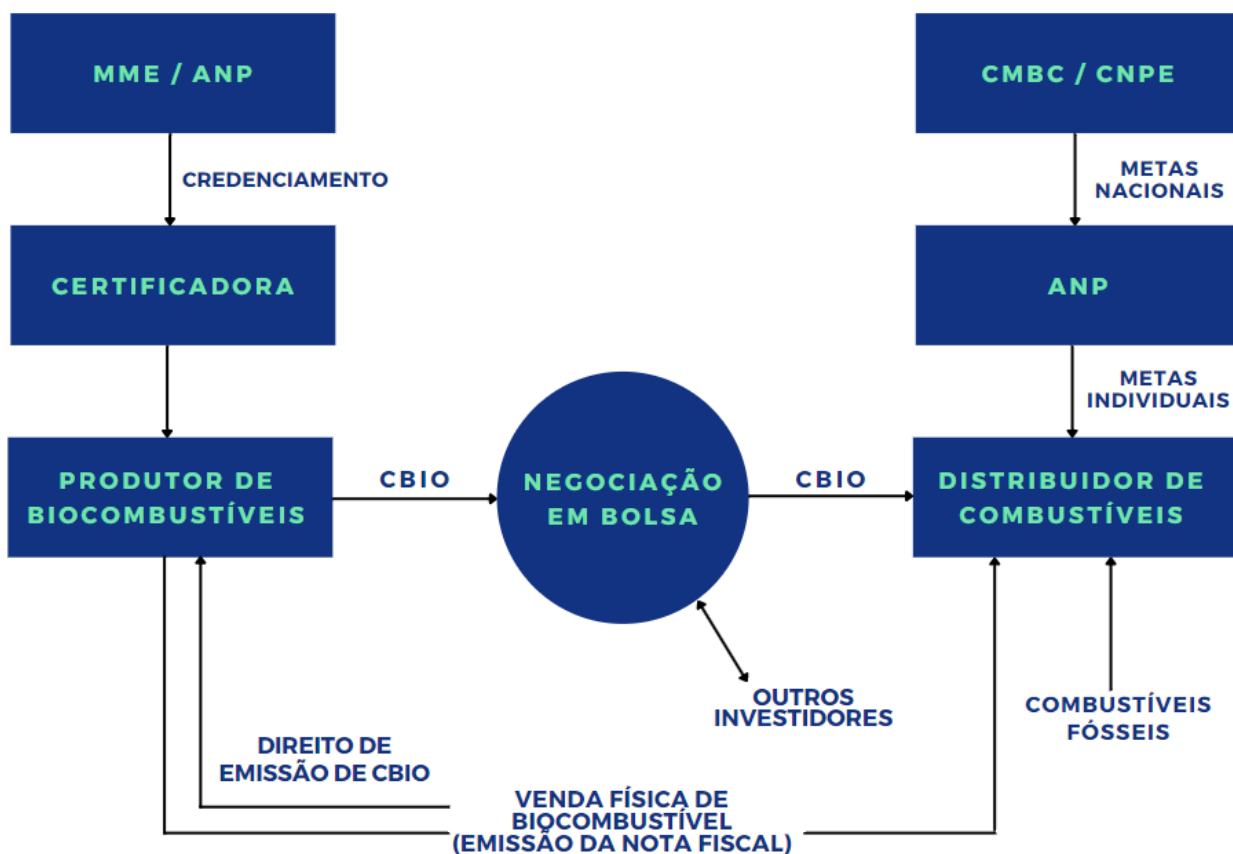
As rotas de biocombustíveis habilitadas a receber o Certificado da Produção Eficiente de Biocombustíveis, segundo a Resolução nº 758 de 23 de Novembro de 2018, são: (1) biodiesel, (2) biometano, (3) combustíveis alternativos sintetizados por ácidos graxos e ésteres hidroprocessados (HEFA), (4) etanol combustível de primeira geração produzido a partir de cana-de-açúcar, (5) etanol combustível de primeira e segunda geração produzido em usina integrada, (6) etanol combustível de segunda geração, (7) etanol combustível de primeira geração produzido a partir de cana-de-açúcar e milho em usina integrada, (8) etanol combustível de primeira geração produzido a partir de milho, (9) etanol combustível importado de primeira geração produzido a partir de milho (MME, ANP, 2018).

A NEEA, obtida após preenchimento da RenovaCalc e processo de certificação, é quantificada em gCO₂eq/MJ e representa a diferença de intensidade de carbono entre o combustível

fóssil substituto e o biocombustível produzido. A IC mede a quantidade de GEEs emitidos no ciclo de vida por unidade de energia do combustível avaliado. Após a elaboração da NEEA, é possível calcular o número de CBIOs utilizando os valores da fração do volume elegível, massa específica, poder calorífico inferior (PCI) e volume do biocombustível comercializado (ANP, 2019a).

De maneira geral, o RenovaBio permite a emissão e comercialização de ativos ambientais por unidades produtoras de biocombustíveis de acordo com o grau de descarbonização promovido. Cada CBIO equivale a 1 tonelada de CO₂ que deixou de ser emitida. Sua aquisição é imposta às distribuidoras de combustíveis em quantidade proporcional a participação na comercialização de combustíveis, a fim de cumprimento das metas individuais. Além das distribuidoras, qualquer investidor, seja pessoa física ou jurídica, pode adquirir esses ativos, como pode ser visto no esquema presente na Figura 3.

Figura 3: Esquema geral de funcionamento do RenovaBio



Fonte: (MME, MMA, *et al.*, 2021)

2.2.1 – Avaliação do ciclo de vida

O ciclo de vida de um produto pode ser definido como os processos que ocorrem para a obtenção de todos os elementos necessários para elaborá-lo, passando pela manufatura, pelo uso e pela decisão do que se deve fazer após o uso. O escopo denominado “do berço ao túmulo” refere-se a análise dos dados desde o surgimento do produto até após o uso. Já a abordagem “do berço ao portão” avalia todos os processos até o fim fabricação do produto. Além disso, a Avaliação do ciclo de vida (ACV) pode ser classificada como atribucional, no qual considera-se um período determinado ou consequential, que considera as consequências de modificações na produção (MATTHEWS, HENDRICKSON, *et al.*, 2015).

O RenovaBio utiliza a análise do ciclo de vida para avaliar o impacto ambiental dos biocombustíveis. Para isso, o programa utiliza o escopo “do berço ao portão” com abordagem atribucional. Entretanto, apesar da ACV abordar várias categorias de impacto ambiental e social, o RenovaBio considera apenas a categoria “Mudança Climática” para obtenção da NEEA (MME, MMA, *et al.*, 2021). A unidade de medida da IC após a ACV é a gCO_2eq e a unidade funcional é 1 MJ de combustível.

2.2.2 – RenovaCalc

A RenovaCalc é a ferramenta utilizada para calcular a intensidade de carbono dos biocombustíveis inseridos no programa RenovaBio. Essa calculadora realiza uma avaliação ambiental baseada exclusivamente na categoria de impacto *Mudança Climática* que ocorre durante o ciclo de vida de cada biocombustível. Para isso, foi desenvolvido um conjunto de planilhas, com parâmetros específicos, a fim de contemplar a avaliação de todas as rotas tecnológicas dos biocombustíveis inseridos no programa. Os processos de obtenção da NEEA utilizando a RenovaCalc são realizados individualmente para cada unidade produtora de biocombustível (ALVES, 2020).

De maneira geral, a ferramenta atende às seguintes etapas: (1) fase a montante do processo agrícola; (2) processo agrícola; (3) processo agroindustrial; (4) distribuição e uso. É possível

utilizar a RenovaCalc de duas maneiras: com o perfil de produção específico ou padrão. No primeiro, são considerados dados primários realmente utilizados pela unidade produtora. No segundo, os dados primários são gerados a partir de informações de bancos de dados, no qual há adoção de penalização (MME, MMA, *et al.*, 2021).

A respeito da fase agrícola de produção da matéria-prima, a RenovaCalc apresenta campos específicos para o preenchimento dos dados de produção própria da unidade produtora e de fornecedores. Apenas nessa etapa é permitido optar pelo “perfil padrão” ou “perfil específico”. Na fase industrial, que corresponde à etapa agroindustrial, são solicitados os dados primários referentes ao processo de produção dos biocombustíveis. Por fim, na etapa de distribuição, é considerado uma mesma distância média de distribuição da usina até o consumidor final para cada sistema logístico (MATSUURA, SCACHETTI, *et al.*, 2018).

2.2.3 – Crédito de Descarbonização (CBIO)

O CBIO é classificado como o ativo ambiental emitido por unidades produtoras de biocombustíveis, e que é utilizado como instrumento para cumprir as metas e financiar a descarbonização (AMBRÓSIO, MOTA, *et al.*, 2020). Cada unidade desse ativo representa uma tonelada de CO₂ que deixou de ser emitido.

O Crédito de descarbonização faz parte da Política Brasileira de Biocombustíveis, visto que o cumprimento das metas individuais de redução de emissão se dá pela aquisição desses ativos pelas distribuidoras de combustível. Além disso, é possível realizar a negociação do CBIO por partes não obrigadas, ou seja, por investidores comuns, o que permite um amplo financiamento. Dessa forma, além da promoção do setor de biocombustíveis, há também a contribuição com o meio ambiente, produção agroindustrial e fortalecimento da economia verde (AMBRÓSIO, MOTA, *et al.*, 2020).

Após a obtenção da NEEA, o produtor de biocombustível deve solicitar autorização de emissão do CBIO à Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) para o escriturador realizar o registro da emissão no ambiente da bolsa de valores brasileira (B3) e da negociação no mercado primário. O acesso direto aos sistemas da B3 ocorre a partir de

representantes dos distribuidores, que devem confirmar a troca de titularidade do ativo no sistema (BOLSA DE VALORES B3, 2019).

A Figura 4 ilustra a variação do preço médio e quantidade de CBIOs negociados desde o início da comercialização desses ativos. Nota-se que o menor valor comercializado em um ciclo de negociação foi de R\$ 15,00 e o maior de R\$ 64,61.

Figura 4: Quantidade negociada de CBIOs e preço médio por data



Fonte: (ANP, 2021b)

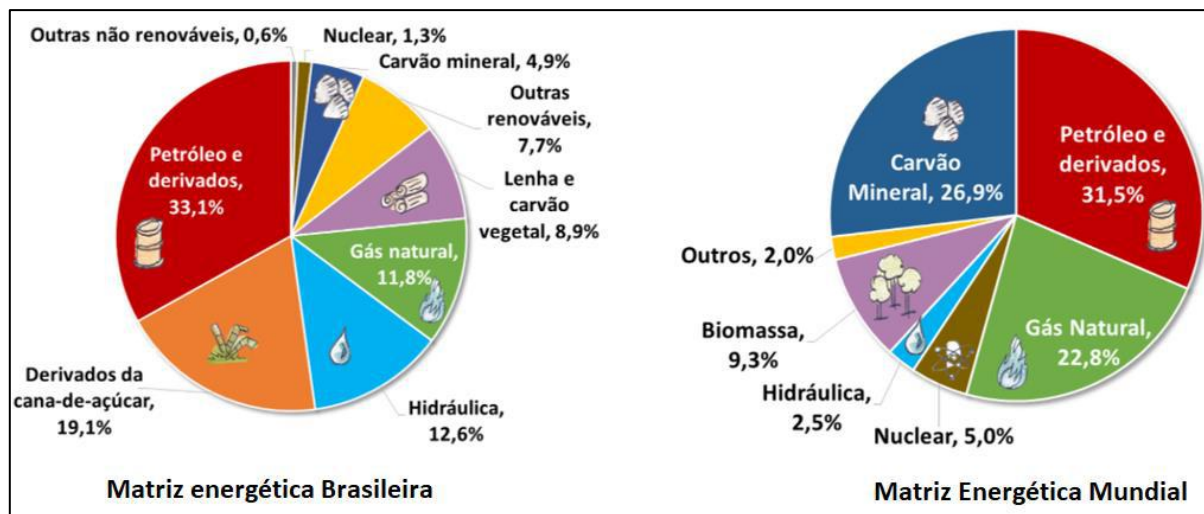
2.3 – Biocombustíveis na matriz energética brasileira

Os biocombustíveis iniciaram sua participação na matriz energética nacional na década de 1970, por meio de políticas públicas, em resposta à crise do petróleo. Para isso, buscou-se o etanol de cana como opção nacional para os combustíveis, pelo desenvolvimento do Programa Nacional do Álcool (PROALCOOL). Outros momentos relevantes para o aumento da participação dos biocombustíveis foram a inserção da tecnologia *flex-fuel* (2003) e o desenvolvimento do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB), em 2005 (MACHADO, COSTA, *et al.*, 2017).

Atualmente, a matriz energética brasileira é notavelmente mais renovável do que a do resto do mundo, representando quase 50% de participação (Figura 5). Como as fontes não renováveis de

energia são responsáveis pela maioria das emissões de GEE, a emissão de gases por habitante no Brasil é consideravelmente menor do que a média global. O maior responsável pelas emissões em território nacional é o desmatamento, seguido pelo setor de transportes, que ainda possui importante contribuição de combustíveis fósseis.

Figura 5: Matriz energética brasileira e mundial no ano de 2021(EPE, 2021d).



Fonte: (EPE, 2021d)

O setor industrial foi responsável pelo consumo de 32,1% de toda a energia nacional produzida, seguido pelo setor de transportes, com 31,2%. Destaca-se o protagonismo do setor de transportes mesmo com a diminuição de 6,4% do consumo desde o início da pandemia (EPE, 2021b). Considerando a consolidação histórica dos biocombustíveis, o grande consumo energético do setor de transportes e sua configuração majoritariamente fóssil, a estratégia de política pública para redução de emissão de GEE pelos combustíveis por meio do aumento da participação dos biocombustíveis torna-se essencial. A melhoria da eficiência energética da frota, qualidade do ar e redução de impactos ambientais justificam os esforços para o desenvolvimento do RenovaBio.

Dessa maneira, a exemplo do transporte terrestre, no qual já houve o início da substituição parcial de gasolina e diesel por etanol e biodiesel, respectivamente, o setor aéreo também precisará transitar para a substituição dos combustíveis de origem fóssil (QAV) para combustíveis sustentáveis (QAV-alternativo).

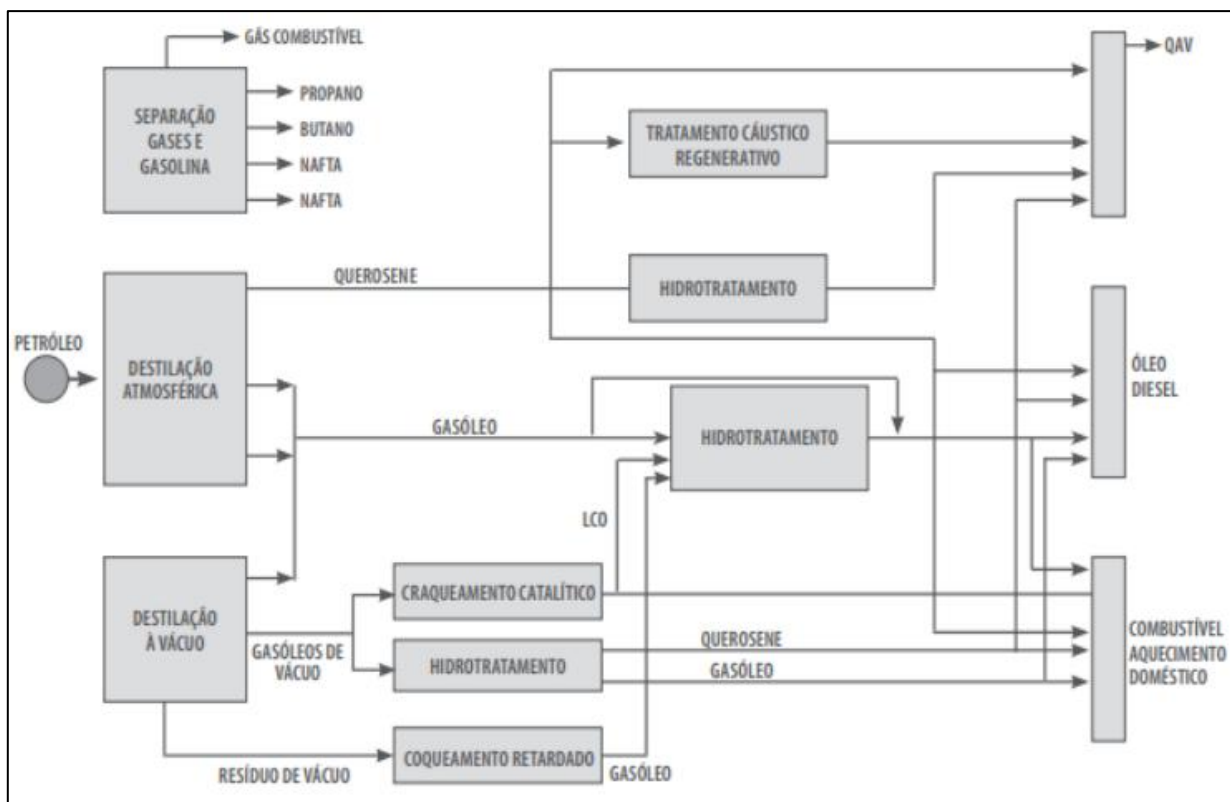
2.3 – Combustíveis de aviação

3.3.1 – Querosene de aviação

As turbinas a gás, comumente usadas na propulsão de aviões, são movidas a combustíveis líquidos derivados do petróleo conhecidos como querosene de aviação (QAV). Após a Segunda Guerra, o desenvolvimento de combustíveis de aviação, como o querosene, se intensificou em virtude do aprimoramento dos motores a jato e turbinas (GARBIN, HENKES, 2018).

O QAV-1 é obtido da destilação fracionada do petróleo, com temperatura de ebulição entre 130 e 300 °C. É constituído por hidrocarbonetos isoparafínicos, parafínicos e aromáticos contendo de 9 a 16 átomos, além de heteroátomos (MONTEIRO, NETO, *et al.*, 2018). Após a destilação atmosférica, ocorre o processo cáustico regenerativo (MEROX) ou hidrotreatamento (HDT) para remoção de compostos de enxofre, nitrogenados, oxigenados e com heteroátomos, além da saturação de hidrocarbonetos, como mostrado na Figura 6.

Figura 6: Produção de querosene de aviação pela Petrobras.



Fonte: (PETROBRAS, 2019)

O hidrotreatamento é um processo importante na especificação do QAV-1, pois tem como objetivo melhorar as propriedades do combustível pela remoção de compostos, redução de acidez e estabilização (CARVALHO, 2017). O hidrogênio é o responsável pelo tratamento dessas frações de petróleo, juntamente às condições de temperaturas e pressões elevadas na presença de catalisador.

A especificação brasileira de QAV é realizada pela ANP, que tem como objetivo fiscalizar a composição química, fluidez, propriedades de combustão, corrosão, ponto de congelamento, teor de contaminantes e aditivos, entre outros (CARVALHO, 2017).

O Brasil é historicamente um país importador de querosene de aviação e, caso não haja previsão de investimento na capacidade de produção, a necessidade de importações aumentará, já que a demanda é crescente. As principais unidades de produção de QAV no país estão alocadas

principalmente próximo a importantes aeroportos, sendo elas na Revap, em de São José dos Campos, SP e Reduc, em Duque de Caxias, RJ (EPE, 2018b).

No ano de 2019, o país produziu 16,6 mil m³/dia de querosene de aviação e projeta-se que em 2030 a importação atingirá 7,2 mil m³/dia, que é um valor superior ao valor máximo histórico, de 5,4 m³/dia em 2013 (EPE, 2020b).

2.3.2 – Impactos e estratégias do setor aéreo no meio ambiente

Segundo a *International Air Transport Association* (IATA), a indústria da aviação emitiu 915 milhões de toneladas de CO₂ em 2019, o que representa aproximadamente 2% do total das emissões globais. O *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) projeta que a participação aumentará para cerca de 3% em 2050.

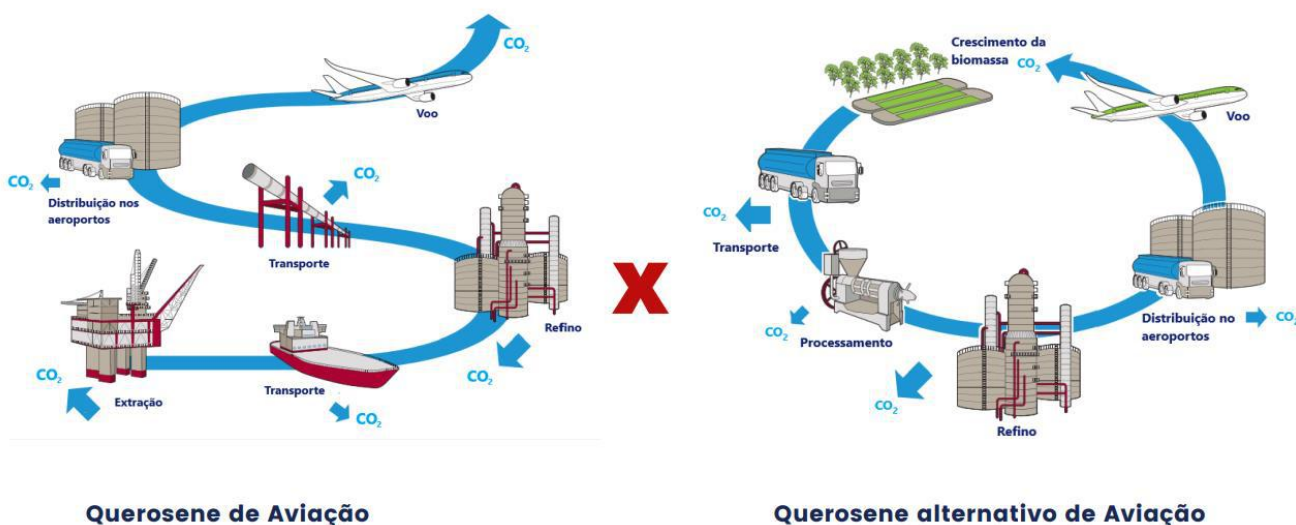
Dado esse cenário, o setor aéreo assumiu compromissos para reduzir o seu impacto nas emissões, sendo a meta de redução de 915 para 325 toneladas de CO₂ em 2050. Para cumprimento do objetivo, projeta-se que além do investimento em desenvolvimento tecnológico de aeronaves e motores, é preciso um importante esforço na promoção de combustíveis de aviação *drop-in*, ou seja, que possuem de hidrocarbonetos equivalentes aos de origem fóssil e compatíveis com a infraestrutura existente. Visto que as aeronaves apresentam vida útil de 25 anos, os avanços em eficiência de motores não serão suficientes e a maior parte das reduções das emissões deverá depender da produção e uso de combustíveis alternativos (ROITMAN, 2018).

2.3.3 – Combustíveis alternativos para aviação

A ausência de estratégias tecnológicas de significativa redução de impactos, a descarbonização na aviação passa necessariamente pela compensação de emissões ou implementação de combustíveis alternativos (ROITMAN, 2018). Os *Sustainable Aviation Fuel* (SAF) representam os combustíveis sustentáveis de aviação produzidos de fontes alternativas às convencionais, de composição fóssil, e caracterizam uma importante fonte de combustível mais limpa.

A Organização Internacional da Aviação Civil (ICAO, do inglês *International Civil Aviation Organization*) define os combustíveis alternativos para aviação como “qualquer combustível com o potencial de gerar menores emissões de carbono que o querosene convencional em seu ciclo de vida”. Além disso, esses combustíveis apresentam menor teor de impurezas, como enxofre, permitindo uma redução adicional nas emissões de dióxido de enxofre e de material particulado (ATAG, CLIMATE ACTION TAKES FLIGHT, 2017). O ciclo de vida dos combustíveis para aviação e as respectivas emissões de CO₂ estão ilustradas na Figura 7.

Figura 7: Representação da emissão de CO₂ no ciclo de vida dos combustíveis para aviação



Querosene de Aviação

Querosene alternativo de Aviação

Fonte: Adaptado de (SILVA, 2020)

Uma importante característica dos SAF é a compatibilidade das características físico-químicas com os combustíveis convencionais de aviação. Sendo assim, apresentam miscibilidade, permitindo a mistura desses combustíveis em diversas proporções, e a utilização da estrutura logística sem adaptação das aeronaves. Por essa característica, são denominados de *drop-in* (ROITMAN, 2018).

No Brasil, a especificação do querosene e bioquerosene de aviação é realizada pela ANP. A resolução 778/2019 indica as regras para o querosene de aviação (QAV-1), querosene alternativo (QAV alternativo) e Querosene de Aviação C (QAV-C). Segundo esse documento, o QAV-C só

pode ser obtido pela mistura com QAV alternativo em proporções estabelecidas, de acordo com a rota tecnológica do combustível (ANP, 2019b). As rotas definidas por essa resolução e a mistura máxima estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Rotas tecnológicas de obtenção de querosene alternativo e seus limites de mistura.

Sigla	Rota Tecnológica	Limite de mistura
SPK-FT	Querosene parafínico hidroprocessado e sintetizado por Fischer Tropsch	Até 50%
SPK-HEFA	Querosene parafínico sintetizado de ácidos graxos e ésteres hidroprocessados	Até 50%
SPK/A	Querosene parafínico sintetizado com aromáticos	Até 50%
SPK-ATJ	Querosene parafínico sintetizado a partir de álcool	Até 50%
SIP	Isoparafinas sintetizadas de açúcares fermentados e hidroprocessados	Até 10%

Fonte: (ANP, 2019b)

2.3.4 – SPK-HEFA

O querosene parafínico sintetizado de ácidos graxos e ésteres hidroprocessados (SPK-HEFA) é obtido pelo processamento de bio-óleo ou gordura animal de forma semelhante ao refino do querosene fóssil, como mostrado na Figura 8. Nesse processo, oxigênio é removido das moléculas de éster, ácidos graxos ou triglicerídeos por reações de hidrodessoxigenação (HDO). As reações são: descarboxilação, decarbonilação e desidratação (Reações 1 - 3). Em seguida, as ligações duplas são saturadas por adição de hidrogênio, produzindo assim hidrocarbonetos lineares de cadeia longa (GIRAFÁ, BARBOLO, *et al.*, 2021b).

Descarboxilação: $R - COOH \rightarrow R' - H + CO_{2(g)}$ (Reação 1)

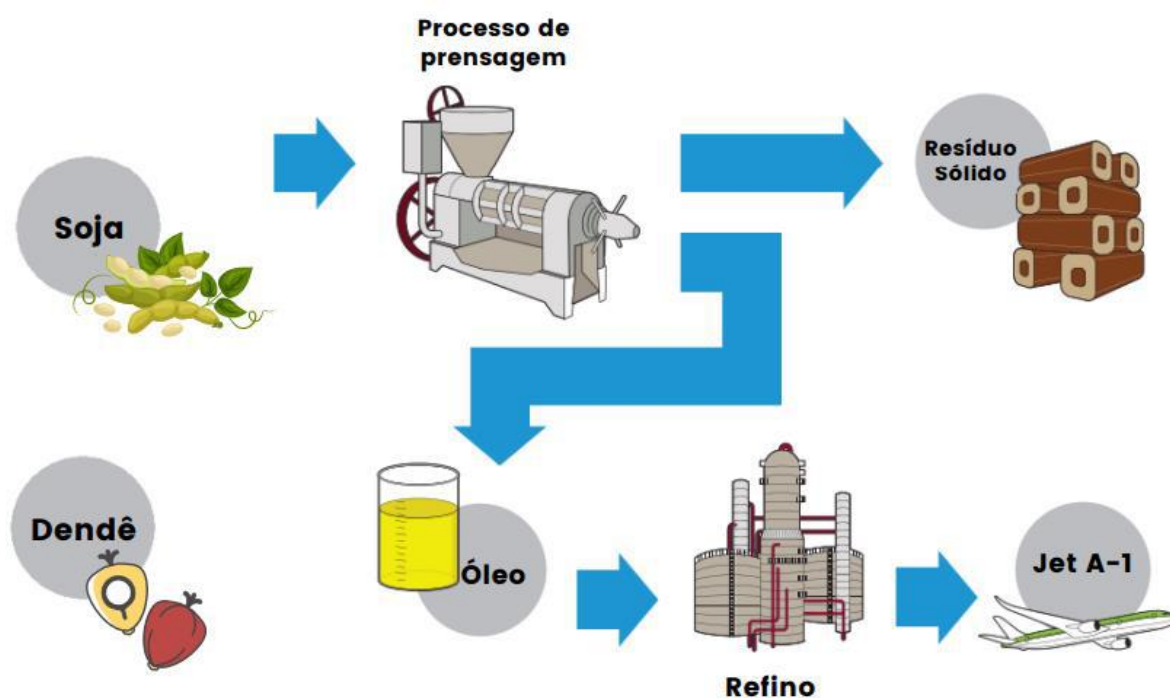
Descarbonilação: (Reação 2a e 2b)

(a) Direta: $R - COOH \rightarrow R'' - H + CO_{(g)} + H_2O_{(g)}$

(b) Indireta: $R - COOH + H_{2(g)} \rightarrow R - H + CO_{(g)} + H_2O_{(g)}$

Hidrogenação/Desidratação: $R - COOH + 3H_{2(g)} \rightarrow R - CH_3 + 2H_2O_{(g)}$ (Reação 3)

Figura 8: Processo de obtenção do querosene alternativo HEFA



Fonte: Adaptado de (ATAG, CLIMATE ACTION TAKES FLIGHT, 2017)

Após a obtenção dos hidrocarbonetos de cadeia saturada, ocorrem as etapas de craqueamento e isomerização, pois ácidos graxos obtidos a partir de triglicerídeos apresentam geralmente de 12 a 20 carbonos, estando na faixa do diesel verde. Para produção de hidrocarbonetos na faixa do querosene de aviação é preciso obter cadeias na faixa de C9 a C15, obtendo também nafta e propano como subprodutos (GIRAFÁ, BARBOLO, *et al.*, 2021a).

A rota tecnológica HEFA é considerada comercialmente viável e representa a maior parte dos volumes comercialmente disponíveis de bioquerosene. Além disso, é considerada a principal tecnologia disponível em escala comercial no mundo, já que necessita de menores custos e investimentos do que outras rotas de obtenção de querosene alternativo (ROITMAN, 2018).

2.3.5 – Matérias-primas

O Brasil apresenta importante competência para se tornar fornecedor de matéria-prima renovável para o querosene alternativo de aviação devido à oferta descentralizada e consequente redução dos custos logísticos (MADSEN, HENKES, 2021). Além das matérias-primas comumente utilizadas na produção de outros biocombustíveis já estabelecidos, como soja, colza, palma e sebo, outras culturas vêm sendo estudadas para uso no setor aeronáutico. São elas: pinhão-manso, babaçu, falso linho ou camelina e algas. A investigação de outras fontes é justificada pela busca por maior produtividade, a possibilidade de cultivo em terras marginais e pela composição de ácidos graxos (CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2010).

Além da busca por produtividade e sustentabilidade por meio de novas características físico-químicas dos reagentes utilizados na produção do querosene alternativo, há uma atenção à redução de custos e obtenção de preços competitivos aos do querosene de origem fóssil, pois a matéria representa hoje cerca de 85% do custo do biocombustível (UBRABIO, 2017).

Em face das diversas opções de matérias-primas nacionais, é necessário considerar as particularidades que podem favorecer cada região produtora, como solo e clima. Além das características biológicas regionais, de mercado e infraestrutura, deve-se atentar na questão logística para a diversificação da produção.

O cultivo de soja vem apresentando notável expansão nas últimas décadas, com aumento da área de cultivo devido ao crescimento no consumo como alimento humano e animal e uso no setor energético. A cultura nacional da soja se destaca pelo uso de tecnologias de produção maduras e modernas e capital intensivo. O Brasil possui 1.674 cultivares de soja registrados, que é muitas vezes maior que o número registrado de outras espécies (DE SOUZA, 2019).

Segundo DE SOUZA (2019), a soja é a oleaginosa de maior potencial produtivo para a produção de bioquerosene em todas as regiões do Brasil. Isso se deve principalmente ao seu domínio tecnológico e escala de produção. A alta disponibilidade dessa espécie contribui para a redução do custo final de seu óleo. Por isso, entende-se que a soja é a matéria-prima mais viável para a produção de bioquerosene de tecnologia HEFA a curto prazo.

Entretanto, como o óleo de soja é a principal matéria-prima para a produção de biodiesel, há a possibilidade de concorrência entre os combustíveis sobre essa fonte, o que não é considerado estratégico. Sendo assim, é fundamental o desenvolvimento de outras oleaginosas com potencial de produção de querosene alternativo para aviação (GALVÊAS, 2015).

A palmeira ou dendezeiro é uma oleaginosa capaz de fornecer óleos com perfis lipídicos diferentes a partir de seu fruto. Do mesocarpo extrai-se o óleo de palma e da semente o óleo de palmiste. O corte longitudinal do fruto está ilustrado na Figura 9.

Figura 9: Corte longitudinal do dendê, fruto do dendezeiro.



Fonte: (BBC, 2018)

Atualmente, o óleo de palma é o óleo vegetal mais vendido no mundo. No Brasil, teve suas primeiras unidades de processamento na década de 1950 no litoral sul da Bahia e na década

seguinte no estado do Pará. Juntos, estes representam os estados com maior produção nacional (REIS, DE LIMA, *et al.*, 2017).

De acordo com DE SOUZA (2019), o bioquerosene produzido pela tecnologia HEFA foi capaz de reduzir em 66% as emissões de GEE em comparação ao querosene de aviação convencional. Esse valor é superior ao apresentado por outras oleaginosas com relevância para produção de querosene alternativo, como soja, girassol, pinhão-manso e colza com potencial de redução das emissões de 55%, 51%, 44% e 39%, respectivamente.

A produtividade do dendezeiro também se destaca diante de outras oleaginosas. Estima-se que sua cultura e processamento renda aproximadamente 3.700 kg por hectare, o que supera os valores do óleo de soja (627 kg/ha) e do óleo de amendoim (857 kg/ha) (MAPA, 2018). Outro fator positivo para o uso do óleo de palma como matéria-prima para biocombustíveis é sua composição de ácidos graxos (Tabela 2). Em comparação ao perfil lipídico do óleo de soja, percebe-se um maior teor de ácidos graxos de cadeia saturada. Dessa maneira, para a produção de querosene alternativo HEFA, a proporção de H₂ necessária para hidrogenar as insaturações dos ácidos graxos será menor, contribuindo para a redução de custos e impacto ambiental.

Tabela 2: Perfil lipídico típico dos óleos de palma e de soja

Ácidos graxos	Óleo de palma	Óleo de soja
Láurico (C12:0)	0,20%	0,03%
Mirístico (C14:0)	1,10%	0,07%
Palmítico (C16:0)	44,1%	9,98%
Esteárico (C18:0)	4,40%	11,53%
Oleico (C18:1)	39,0%	12,62%
Linoleico (C18:2)	10,6%	52,33%
Linolênico (C18:3)	0,30%	9,2%
Ácidos graxos saturados	49,80%	21,61%
Ácidos graxos insaturados	49,90%	74,15%

Fonte: Adaptado de (GAIOTTO, 2000), (SOUZA, 2020)

2.4 – Hidrogênio

2.4.1 – O mercado de hidrogênio

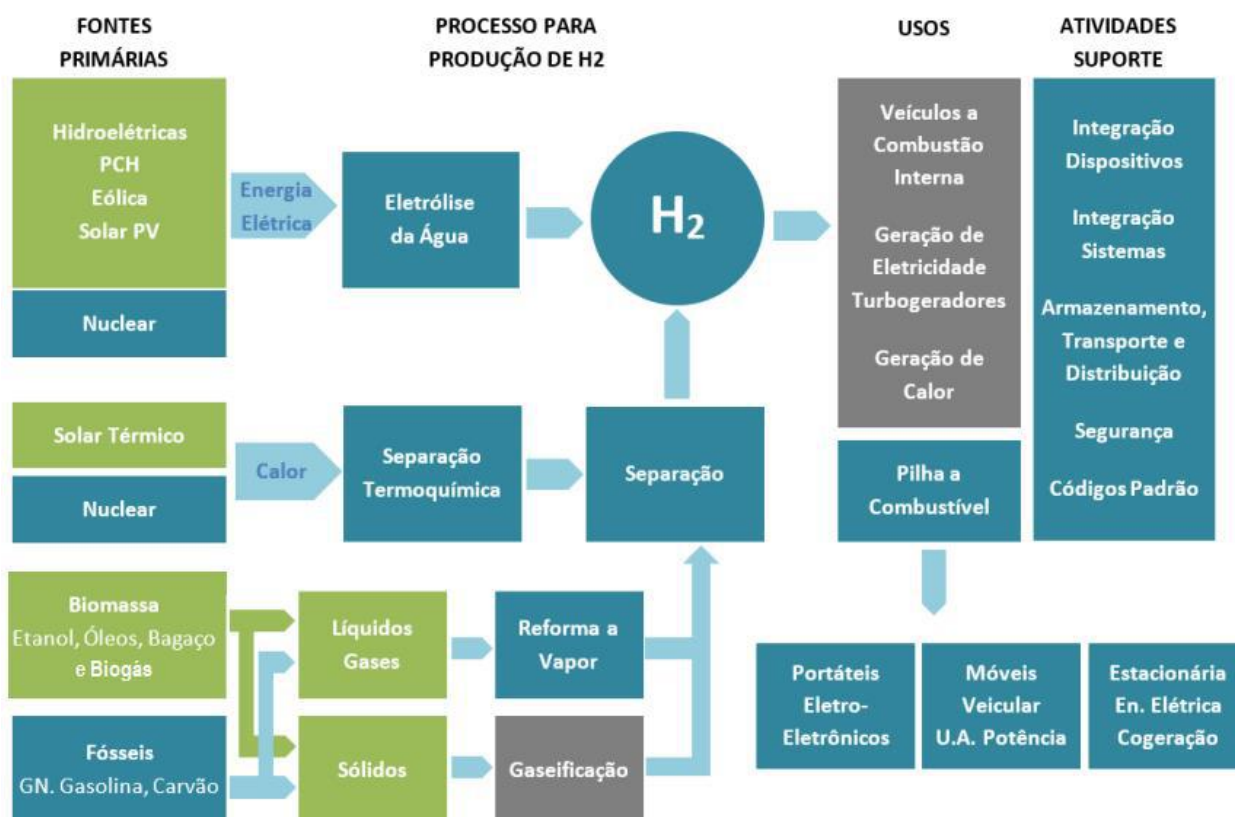
Devido à necessidade de descarbonização da economia e execução dos compromissos climáticos internacionais, novas tecnologias vêm sendo analisadas para coordenar a transição energética. A produção e uso de hidrogênio é encarada como vetor energético necessário, especialmente em setores de difícil redução de emissões, como o industrial e o de transportes. Nesse cenário, o desenvolvimento de uma economia de baixo carbono, devido à substituição de combustíveis fósseis pelo uso de hidrogênio verde, pode atender a duas importantes exigências do Acordo de Paris: segurança energética e redução de emissões de GEE (GESEL, 2021).

Apesar de o hidrogênio ser um elemento abundante na natureza, sua produção e transporte ainda apresentam adversidades quando esse é usado como recurso energético. O progresso de sua economia apresenta andamentos diferentes de acordo com aspectos econômicos, geopolíticos e socioambientais de cada país. Destaca-se o estágio de desenvolvimento do Japão e da União Europeia pela ampla experiência na elaboração do mercado de hidrogênio e projetos de P&D, e Austrália devido ao potencial produtor para exportação (Figura 10) (GESEL - UFRJ, 2021).

2.4.2 – Rotas tecnológicas para produção de hidrogênio

O hidrogênio pode ser obtido a partir de diferentes matérias-primas e variadas rotas tecnológicas. Atualmente a via de maior produção de H₂ é a partir da reforma a vapor do metano. Apesar de esta ser uma rota comercialmente viável, apresenta elevada emissão de CO₂. Em um cenário de descarbonização, essa tecnologia se torna pouco atraente. Algumas das diversas rotas tecnológicas de produção de hidrogênio existentes estão presentes na Figura 11.










Figura 11: Rotas tecnológicas de produção e uso de hidrogênio



Fonte: (EPE, 2021c)

A fim de facilitar a caracterização da origem e referência aos processos utilizados na produção de hidrogênio, criou-se uma classificação por cores, exibida na Tabela 3.

Tabela 3: Classificação do hidrogênio em escala de cores

Cor	Classificação	Descrição
	Hidrogênio Preto	Produzido por gaseificação do carvão mineral (antracito), sem captura, utilização e sequestro de carbono (CCUS)
	Hidrogênio Marrom	Produzido por gaseificação do carvão mineral (hulha), sem CCUS
	Hidrogênio Cinza	Produzido por reforma a vapor do gás natural, sem CCUS
	Hidrogênio Azul	Produzido por reforma a vapor do gás natural (ou de outros combustíveis fósseis), com CCUS
	Hidrogênio Verde	Produzido via eletrólise da água com energia de fontes renováveis (particularmente, energias eólica e solar)
	Hidrogênio Branco	Produzido por extração de hidrogênio natural ou geológico
	Hidrogênio Turquesa	Produzido por pirólise do metano, sem gerar CO ₂ (também pode usar biometano)
	Hidrogênio Musgo	Produzido por reformas catalíticas, gaseificação de plásticos residuais ou biodigestão anaeróbica de biomassa ou biocombustíveis, com ou sem CCUS
	Hidrogênio Rosa	Produzido com fonte de energia nuclear

Fonte: (EPE, 2021c)

As matérias-primas renováveis mais comumente utilizadas são a água, a biomassa e os biocombustíveis, como o etanol e o biogás. Devido à necessidade e relevância da descarbonização, as rotas tecnológicas de obtenção do hidrogênio também são classificadas de acordo com a utilização de tecnologias de captura, utilização e sequestro de carbono. Além disso, a fonte de geração da energia elétrica apresenta importância na pegada de carbono das tecnologias descritas (EPE, 2021c).

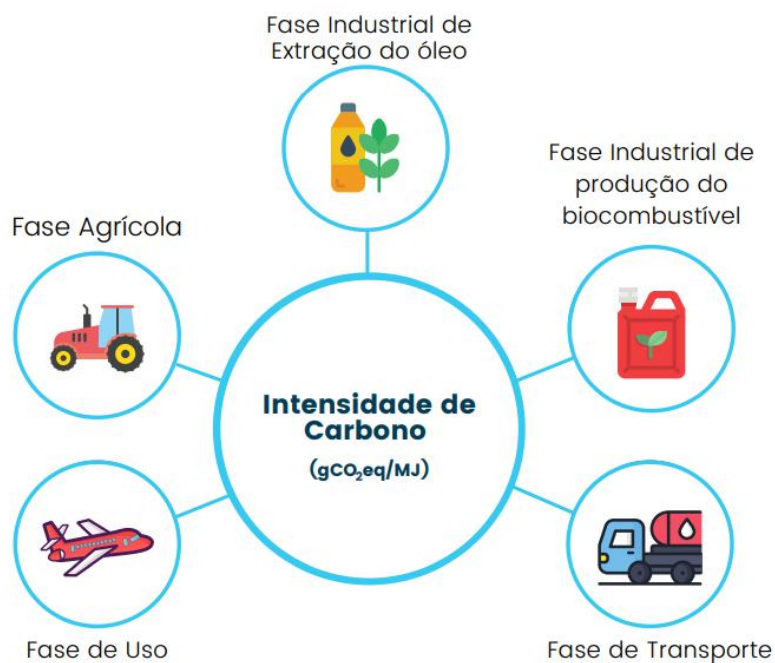
Capítulo 3 – Metodologia

3.1 - Calculadora da intensidade de carbono: RenovaCalc

O programa RenovaBio compara a categoria *mudança no clima* de impacto ambiental no ciclo de vida entre combustíveis fósseis e seus biocombustíveis equivalentes. A ferramenta utilizada para fundamentar quantitativamente essa análise é a calculadora RenovaCalc, desenvolvida pela parceria entre as instituições Embrapa Meio Ambiente, Unicamp e Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol, CTBE.

Na RenovaCalc, a intensidade de carbono (IC) é contabilizada em $\text{gCO}_2\text{eq/MJ}$ e dividida em algumas categorias. A calculadora que avalia a IC do combustível alternativo da rota HEFA apresenta cinco fases referentes à sua produção e uso. São elas: fase agrícola, fase industrial de extração do óleo, fase industrial de produção do biocombustível, fase de transporte e fase de uso (Figura 12).

Figura 12: Esquema representativo do cálculo da intensidade de carbono e das etapas consideradas pela RenovaCalc para o combustível alternativo HEFA.



Como este estudo tem interesse na avaliação do impacto da obtenção do combustível alternativo tecnologia HEFA, produzido a partir de duas matérias-primas e diferentes rotas de produção de hidrogênio, foi manipulada somente a fase industrial de produção do biocombustível. Para as outras fases, utilizaram-se valores de referência e estudos recentes.

3.2 – Fases agrícolas

3.2.1 - Fase agrícola da soja

Os dados adotados para a fase agrícola da soja, uma das matérias-primas consideradas neste estudo para a produção de querosene alternativo a partir da rota HEFA, estão baseados nas informações divulgadas em audiência pública pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2018) e são apresentados na Tabela 4. Essa fase contribuiu com 20,60 gCO₂/MJ para intensidade de carbono do combustível.

Tabela 4: Dados adotados pela RenovaCalc na fase agrícola da soja.

Parâmetros	Dados Penalizados
Área total	1 ha
Produção total (base úmida)	3 t
Umidade da soja	9%
Calcário dolomítico	249,0 kg/t soja
Gesso	53,3 kg/t soja
Sementes	17,39 kg/ t soja
Ureia	2,80 kg N/t soja
Superfosfato simples (SSP)	27,23 kgP ₂ O ₅ /t soja
Cloreto de potássio (KCl)	32,70 kgK ₂ O/t soja
Diesel – B11	10,70 L/t soja

3.2.2 – Fase agrícola da palma de óleo

A RenovaCalc não apresenta uma planilha específica para biocombustíveis oriundos da palma de óleo. A calculadora está em fase de desenvolvimento e, por enquanto, considera apenas a soja como matéria-prima. Dessa maneira, adotou-se o valor de 16,80 gCO₂/MJ para intensidade de carbono na fase agrícola dessa cultura. O valor foi recentemente modelado para os parâmetros da RenovaCalc (CAPAZ, POSADA, *et al.*, 2021).

3.3 - Fases industriais de extração do óleo

3.3.1 - Fase industrial de extração do óleo de soja

Os dados adotados para a fase industrial de extração de óleo de soja estão baseados nos dados típicos divulgados em audiência pública pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (CAPAZ, POSADA, *et al.*, 2021) e são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Dados adotados pela RenovaCalc para valores típicos na fase de extração de óleo de soja.

Parâmetros	Dados Utilizados
Processamento efetivo - soja	1,0 t
Umidade	9,0%
Distância de transporte – soja	334,93 km
Hexano	1,10 kg/t soja
Água	449,14 kg/t soja
Rendimento óleo	191,9 kg/t soja
Rendimento Farelo	800,4 kg/t soja
Eletricidade da rede – mix médio	34,55 kWh/t soja
Diesel - B11	0,114 L/t soja
Cavaco de madeira (base úmida)	86,4 kg/t soja
Umidade cavaco de madeira	35%
Transporte cavaco de madeira	150 km

3.3.2 – Fase industrial de extração do óleo de palma

Conforme mencionado anteriormente, a RenovaCalc não apresenta uma planilha específica para biocombustíveis oriundos da palma de óleo. Adotou-se o valor 0,10 gCO₂/MJ para intensidade de carbono na fase industrial de extração desse óleo. O valor foi recentemente modelado para os parâmetros da RenovaCalc (CAPAZ, POSADA, *et al.*, 2021).

3.4 - Fase industrial de produção do querosene alternativo

3.4.1 – Rotas tecnológicas propostas para o querosene alternativo

De acordo com o perfil tecnológico nacional atual, buscou-se destacar algumas rotas em que o Brasil poderia ter vantagens competitivas para a síntese de hidrogênio visando a produção de querosene alternativo. São elas:

- Variante 1: Produção de querosene alternativo usando hidrogênio produzido pela eletrólise da água (Figura 13).
- Variante 2: Produção de querosene alternativo usando hidrogênio produzido pela reforma a vapor do gás natural (Figura 14).
- Variante 3: Produção de querosene alternativo usando hidrogênio produzido pela reforma a vapor do biogás (Figura 15).
- Variante 4: Produção de querosene alternativo usando hidrogênio produzido pela reforma líquida da glicerina (Figura 16).

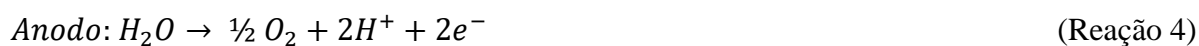
Em cada fluxograma exibe-se valores de balanço de massa que representam a obtenção de querosene alternativo produzido com óleo de soja como matéria-prima.

3.4.1.1 – Produção de querosene alternativo com hidrogênio obtido pela eletrólise da água

A obtenção de H₂ via eletrólise da água vem recebendo atenção internacional pela capacidade de atingir metas de redução de emissão, principalmente quando utiliza fontes renováveis de energia. Neste trabalho, considerou-se a produção de hidrogênio via eletrólise com uso de energia elétrica da rede, já que o perfil médio de geração no país tem pegada de carbono inferior que a mundial e, pela ausência de projetos consolidados de H₂ acoplados à geração de eletricidade com menor impacto.

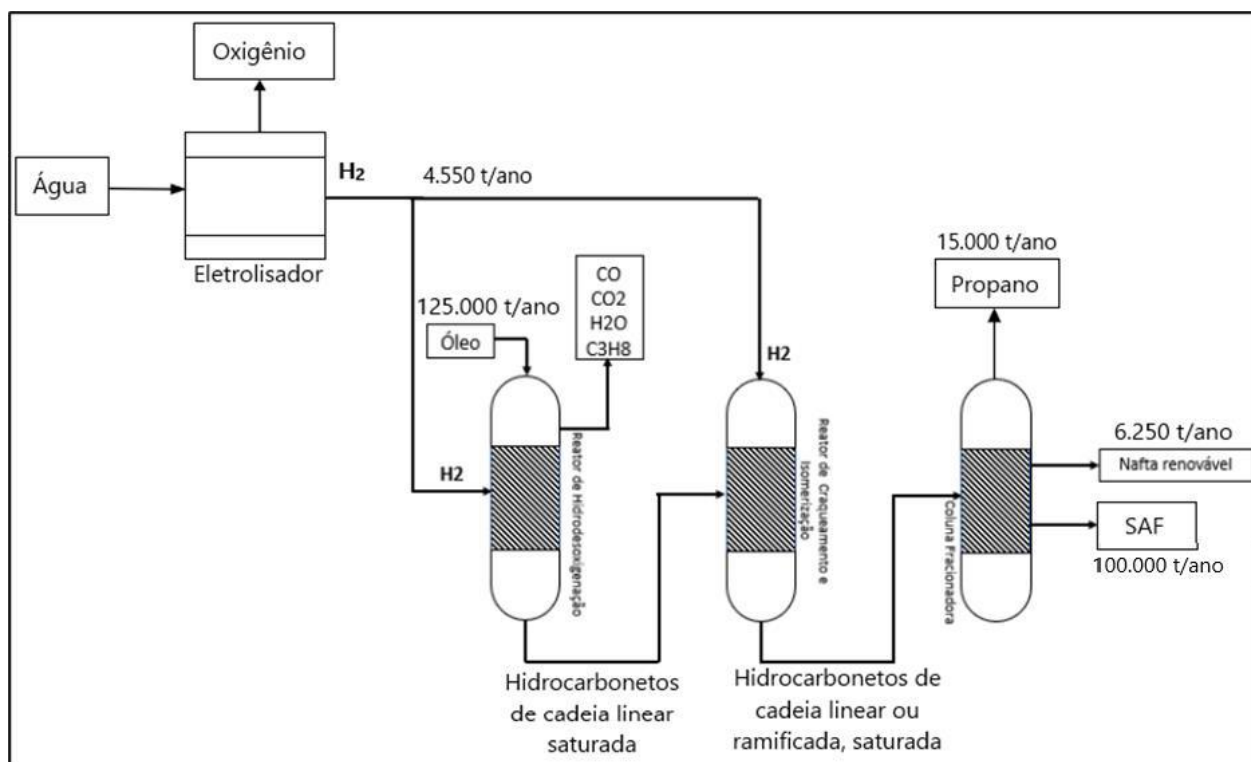
A Figura 13 exemplifica a obtenção de querosene alternativo usando hidrogênio produzido pela eletrólise da água mediante eletrolisador PEM (membrana polimérica condutora de prótons). Após a obtenção do hidrogênio, ocorrem as reações de hidredesoxigenação (HDO) do óleo, já citadas anteriormente.

Nessa rota ocorre a produção de oxigênio e hidrogênio a partir do consumo de água. Primeiramente, a água é oxidada no anodo produzindo oxigênio, elétrons e prótons (Reação 4). A membrana não é permeável aos gases hidrogênio e oxigênio, somente aos prótons. Dessa maneira, os prótons são capazes de migrar até o catodo, onde são reduzidos, produzindo hidrogênio (Reação 5) (BHANDARI, TRUDEWIND, *et al.*, 2014).



Após a obtenção do hidrogênio, ocorrem as reações de hidredesoxigenação (HDO) do óleo, já citadas anteriormente. Obtidos os hidrocarbonetos de cadeia longa e saturada, ocorrem as etapas de craqueamento e isomerização para produção de hidrocarbonetos na faixa do querosene de aviação, obtendo também nafta e propano (GIRAFÁ, BARBOLO, *et al.*, 2021a).

Figura 13: Fluxograma da rota tecnológica de produção do combustível alternativo HEFA obtido com hidrogênio produzido pela eletrólise da água.



Fonte: O próprio autor

3.4.1.2 - Produção de querosene alternativo com hidrogênio obtido pela reforma a vapor do gás natural

Atualmente, a maior fração de hidrogênio produzido no mundo ocorre a partir da reforma a vapor do metano, que é classificado como hidrogênio cinza. As análises indicam que o H₂ cinza é a opção mais competitiva no curto e médio prazo e seu desenvolvimento é considerado como etapa transitória para a produção do hidrogênio verde (GESEL - UFRJ, 2021).

A Figura 14 ilustra que, durante a reforma, o metano reage com o vapor de água e é convertido em monóxido de carbono e hidrogênio na faixa de temperatura entre 750 e 900 °C (Reação 6). Simultaneamente, tem-se a reação de deslocamento gás-água, na qual há o consumo do monóxido de carbono produzido, que reage com água para produção adicional de hidrogênio e dióxido de carbono (Reação 7) (SCHULTZ, SOARES, 2014). A alta eficiência e o baixo custo

tornam essa rota a mais comum para produção de H₂. Após a produção do hidrogênio, ocorrem as etapas de hidrodesoxigenação do óleo (HDO) e isomerização e craqueamento.

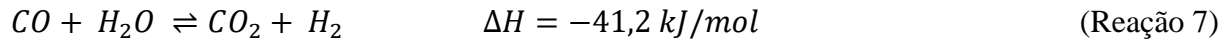
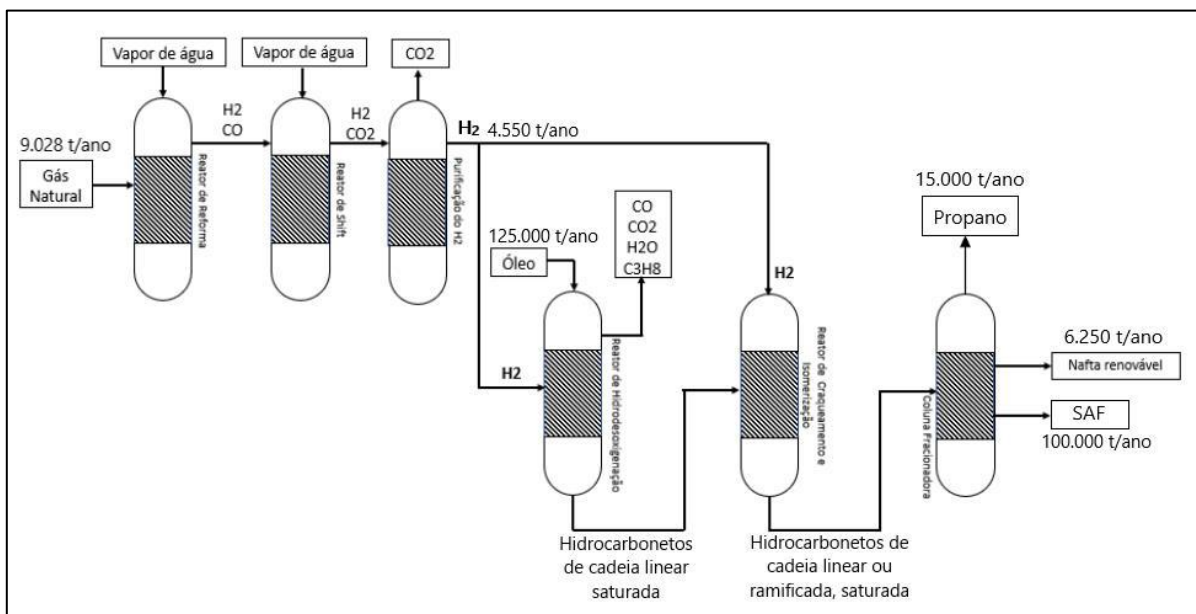


Figura 14: Fluxograma da rota tecnológica de produção do combustível alternativo HEFA obtido com hidrogênio produzido pela reforma a vapor do gás natural



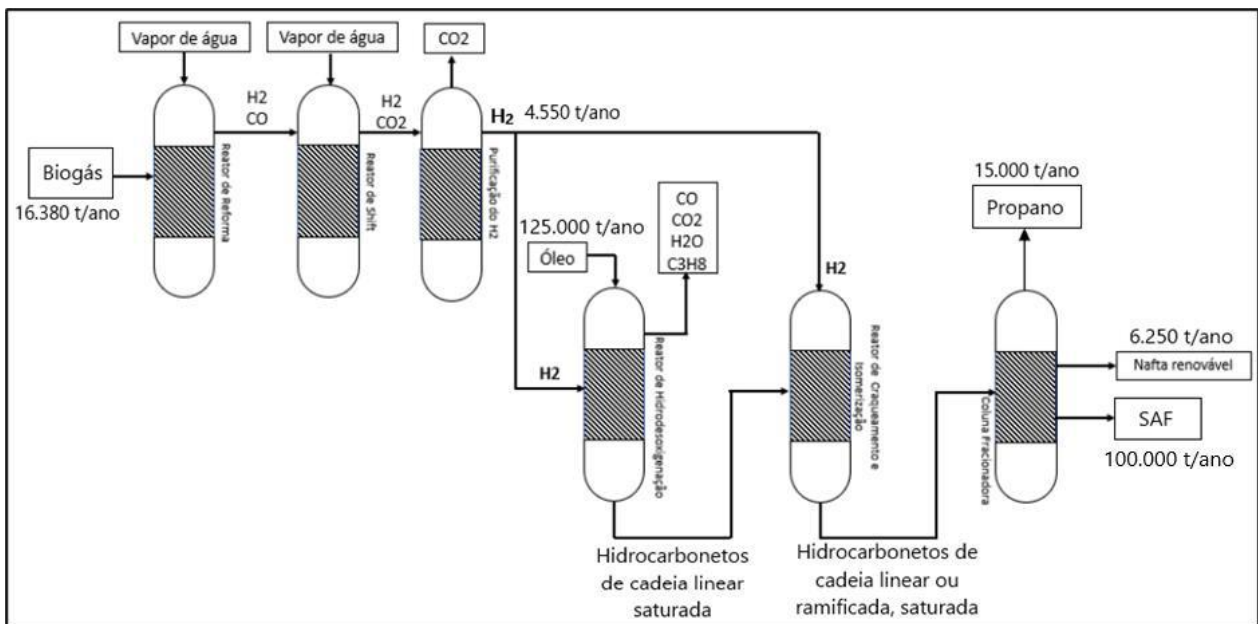
Fonte: O próprio autor

3.4.1.3 - Produção de querosene alternativo com hidrogênio obtido pela reforma a vapor do biogás

Como exposto, o Brasil apresenta vantagem competitiva no desenvolvimento de rotas de produção de hidrogênio que utilizam biocombustíveis e biomassa, dada a consolidação desse mercado no país. Além desse fator, a obtenção de H₂ pela reforma do biogás apresenta menor pegada de carbono que a rota do gás natural, podendo utilizar condições e instalações semelhantes.

A Figura 15 retrata a rota tecnológica de produção do querosene alternativo com hidrogênio obtido pela reforma a vapor do biogás. Os processos aplicados para formação do hidrogênio na rota que utiliza o gás natural também são aplicados ao biogás, já que o metano é o principal componente em ambos os casos. Em seguida, também ocorrem os processos de hidrotreatamento (HDT) para obtenção do querosene alternativo de aviação, propano e nafta.

Figura 15: Fluxograma da rota tecnológica de produção do combustível alternativo HEFA obtido com hidrogênio produzido pela reforma a vapor do biogás.



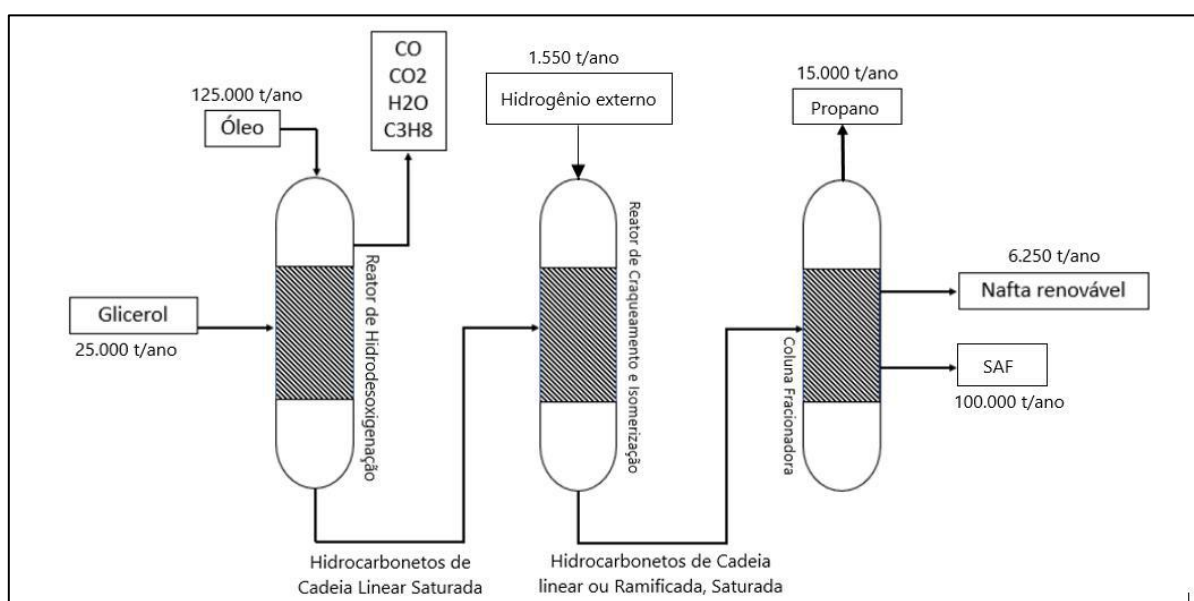
Fonte: O próprio autor

3.4.1.4 - Produção de querosene alternativo com hidrogênio obtido pela reforma da glicerina

Dada a relevante produção de biodiesel em território nacional e acoplado à esse a síntese de glicerol, que é encarado como obstáculo na cadeia de produção de biodiesel, foi proposta a rota de produção de querosene alternativo utilizando hidrogênio obtido a partir da reforma do glicerol. Somado à essa justificativa, entende-se que essa via tecnológica apresenta pequena pegada de carbono, devido ao caráter de sua obtenção, que é classificado como resíduo pelos critérios do RenovaBio.

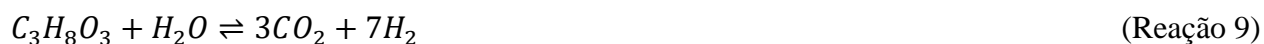
A Figura 16 representa a rota que usa hidrogênio produzido *in-situ* pela reforma do glicerol. Esse glicerol está presente nas moléculas de triglicerídeos do próprio óleo utilizado como matéria-prima. Além disso, acrescenta-se 20% m/m de glicerol ao reator de hidrodessoxigenação, pois somente a glicerina presente no triglicerídeo não seria suficiente para produção do hidrogênio necessário.

Figura 16: Fluxograma da rota tecnológica de produção do combustível alternativo HEFA obtido com hidrogênio produzido pela reforma do glicerol.



Fonte: O próprio autor

Como mostrado na Figura 16, o hidrogênio é produzido na mesma etapa de hidroprocessamento do óleo. Com o início da reação de reforma da glicerina (Reação 8) e produção do hidrogênio, iniciam-se as reações de hidrodessoxigenação (HDO) e em seguida os hidrocarbonetos lineares e saturados são submetidos às reações de craqueamento e isomerização. O hidrogênio externo utilizado nas reações de isomerização e craqueamento é obtido a partir da rota de eletrólise da água.



3.4.2 – Transporte do fornecedor de óleo até usina de produção de bioquerosene alternativo

Para formação do valor da intensidade de carbono de cada rota proposta para produção de querosene alternativo, foram feitas algumas considerações logísticas baseadas no contexto brasileiro atual.

A RenovaCalc apresenta uma entrada para inserção da distância entre os fornecedores de óleo terceirizados e o local de produção do bioquerosene alternativo. Este valor variará de acordo com as seguintes considerações:

- ✓ Nas rotas de produção de querosene alternativo, produzido a partir do óleo de soja e usando hidrogênio obtido pelas rotas de eletrólise da água (EA), reforma à vapor do gás natural (RGN) e reforma do biogás (RBG) adotou-se a distância de 300 km. Esse valor é referente à distância aproximada entre a unidade de processamento de óleo de soja localizada no município de Orlândia, SP (Brejeiro) e a refinaria REVAP, localizada no município de São José dos Campos, SP.
- ✓ Na rota de produção de querosene alternativo, produzido a partir do óleo de soja usando hidrogênio obtido pela reforma de glicerina (RGL), adotou-se a distância de 30 km. Esse valor é referente à distância entre a unidade de processamento de óleo de soja em Cuiabá, MT (Sperafico S/A) e uma usina de biodiesel em Cuiabá, MT (Delta Cuiabá Produtora de Biocombustíveis), fornecedora da glicerina e onde estima-se a instalação da unidade produtora de querosene alternativo referente à essa rota tecnológica.
- ✓ Nas rotas de produção de querosene alternativo, produzido a partir do óleo de palma e usando hidrogênio obtido pelas rotas eletrólise da água (EA), reforma à vapor do gás natural (RGN) e reforma do biogás (RBG) adotou-se a distância de 1.500 km. Esse valor é referente à distância aproximada entre a unidade de processamento de óleo de palma em Iraquara, BA (Oleoplan) e a refinaria REDUC, no município de Duque de Caxias, RJ.

- ✓ Na rota de produção de querosene alternativo, produzido a partir de palma e usando hidrogênio obtido pela reforma de glicerina (RGL), foi admitida a distância de 2.100 km referente à unidade de processamento de óleo de palma, no município de Iraquara, BA (Oleoplan) e a usina produtora de Biodiesel em Cuiabá, MT (Delta Cuiabá Produtora de Biocombustíveis), fornecedora da glicerina e onde se estima a instalação da unidade produtora de querosene alternativo referente à esta rota tecnológica.

Figura 17: Localização dos locais de produção de extração de óleo vegetal e produção do querosene alternativo.



A produção de bioquerosene alternativo foi preferencialmente alocada em refinarias que já possuem infraestrutura para o hidrocessamento (processo HDT), dispensando a necessidade de maiores investimentos iniciais. Já o bioquerosene alternativo que utiliza hidrogênio obtido pela reforma de glicerina foi alocado em uma usina de biodiesel, visando uma possível integração pela utilização do glicerol. A usina selecionada está localizada em Cuiabá, Mato Grosso, por ser o estado

com maior número de unidades produtoras de biodiesel e segundo maior produtor nacional desse biocombustível no ano de 2021 (ANP, 2021a).

A escolha da localização da unidade de produção de óleo de soja no estado de São Paulo, deveu-se à relevante capacidade instalada (ABIOVE, 2019) e à descentralização da produção desse óleo, possibilitando uma oferta próxima às refinarias onde seria produzido o biocombustível. No caso da produção de querosene alternativo integrada às usinas de biodiesel, a produção do óleo foi considerada no estado do Mato Grosso, onde se registra o maior volume de produção desse óleo (ABIOVE, 2019) e um número considerável de usinas de biodiesel.

Para a localização da produção do óleo de palma, foi considerado o estado da Bahia por apresentar relevante produção e ser o maior fornecedor dessa matéria-prima para produção de biocombustível (GALVÊAS, 2015).

3.4.3 – Dados utilizados na fase industrial de produção de querosene alternativo SPK-HEFA seguindo as rotas propostas

Para composição dos valores utilizados na fase industrial de produção do querosene alternativo SPK-HEFA na RenovaCalc, seguindo as quatro rotas propostas, foram considerados os dados técnicos de balanço de massa obtidos por GIRAFÁ, BARBOLO, *et al.*, (2021) (Tabelas 6-10). Os autores realizaram uma avaliação econômica comparativa entre as rotas HEFA, Alcohol to Jet process (ATJ) e Fischer-Tropsch para produção de bioquerosene no Brasil. Os valores médios de intensidade de carbono dos óleos (soja e palma) foram definidos a partir de um estudo realizado pela Empresa de Pesquisa Energética (TOLMASQUIM, SERVA, *et al.*, 2005) e os valores de impacto da produção de hidrogênio em cada rota, segundo as referências apresentadas nas Tabelas 6 a 13. A produção de hidrogênio pela eletrólise da água é a rota considerada pela própria RenovaCalc e seus valores de emissão podem ser acessados na planilha fornecida em consulta pública pela ANP (ANP, 2018).

Tabela 6: Dados adotados para cálculo da IC na fase industrial de produção de querosene alternativo com óleo de soja e H₂ obtido pela eletrólise da água.

Parâmetros	Dados utilizados
Capacidade de produção de querosene alternativo	100.000,00 t/ano
Processamento efetivo de óleo de soja	125.000,00 t óleo
Distância de transporte óleo de soja - fornecedores	300 km
Intensidade de Carbono média do óleo	442,0 gCO ₂ eq/kg óleo
Rendimento – Querosene alternativo	800,00 kg/t óleo
Rendimento – Gás combustível	120,0 kg/t óleo
Eletricidade da rede (KLEIN, CHAGAS, <i>et al.</i> , 2018)	2.291,44 kWh/t óleo
Hidrogênio	36,40 kg/ t óleo
Impacto da produção de hidrogênio	10,29 kgCO ₂ eq/MJ combustível

Tabela 7: Dados adotados para cálculo da IC na fase industrial de produção de querosene alternativo o com óleo de soja e H₂ obtido pela reforma a vapor do gás natural.

Parâmetros	Dados utilizados
Capacidade de produção de querosene alternativo	100.000,00 t/ano
Processamento efetivo de óleo de soja	125.000,00 t óleo
Distância de transporte óleo de soja - fornecedores	300 km
Intensidade de Carbono média do óleo	442,0 gCO ₂ eq/kg óleo
Rendimento - Bioquerosene	800,00 kg/t óleo
Rendimento – Gás Combustível	120,0 kg/t óleo
Eletricidade da rede	31 kWh/t óleo
Impacto da produção de hidrogênio (CAPAZ, DE MEDEIROS, <i>et al.</i> , 2020)	10,80 kgCO ₂ eq/kgH ₂

Tabela 8: Dados adotados para cálculo da IC na fase industrial de produção de querosene alternativo com óleo de soja e H₂ obtido pela reforma do biogás.

Parâmetros	Dados utilizados
Capacidade de produção de querosene alternativo	100.000,00 t/ano
Processamento efetivo de óleo de soja	125.000,00 t óleo
Distância de transporte óleo de soja - fornecedores	300 km
Intensidade de Carbono média do óleo	442,0 gCO ₂ eq/kg óleo
Rendimento - Bioquerosene	800,00 kg/t óleo
Rendimento – Gás Combustível	120,0 kg/t óleo
Eletricidade da rede	31 kWh/t óleo
Impacto da produção de hidrogênio (HAJJAJI, MARTINEZ, <i>et al.</i> , 2016)	5,59 kgCO ₂ eq/kgH ₂

Tabela 9: Dados adotados para cálculo da IC na fase industrial de produção de querosene alternativo com óleo de soja e H₂ obtido pela reforma do glicerol.

Parâmetros	Dados Utilizados
Capacidade de produção de querosene alternativo	100.000,00 t/ano
Processamento efetivo de óleo de soja	125.000,00 t óleo
Distância de transporte óleo de soja - fornecedores	30 km
Intensidade de Carbono média do óleo	442,0 gCO ₂ eq/kg óleo
Rendimento - Bioquerosene	800,00 kg/t óleo
Rendimento – Gás Combustível Alternativa	120,0 kg/t óleo
Eletricidade da rede	31 kWh/t óleo
Impacto da produção de hidrogênio pela reforma do glicerol (WULF, KALTSCHMITT, 2012)	4,86 kgCO ₂ eq/kgH ₂

Tabela 10: Dados adotados para cálculo da IC na fase industrial de produção de bioquerosene de aviação com óleo de palma e H₂ obtido pela eletrólise da água.

Parâmetros	Dados Utilizados
-------------------	-------------------------

Capacidade de produção de querosene alternativo	100.000,00 t/ano
Processamento efetivo de óleo de soja	125.000,00 t óleo
Distância de transporte óleo de soja - fornecedores	1.500 km
Intensidade de Carbono média do óleo	160,0 gCO ₂ eq/kg óleo
Rendimento - Bioquerosene	800,00 kg/t óleo
Rendimento – Gás Combustível alternativa	120,0 kg/t óleo
Hidrogênio	36,40 kg/ t óleo
Eletricidade da rede (KLEIN, CHAGAS, <i>et al.</i> , 2018)	2.012,50 kWh/t óleo
Impacto da produção de Hidrogênio	9,29 kgCO ₂ eq/MJ combustível

Tabela 11: Dados adotados para cálculo da IC na fase industrial de produção de querosene alternativo com óleo de palma e H₂ obtido pela reforma a vapor do gás natural.

Parâmetros	Dados utilizados
Capacidade de produção de querosene alternativo	100.000,00 t/ano
Processamento efetivo de óleo de soja	125.000,00 t óleo
Distância de transporte óleo de soja - fornecedores	1.500 km
Intensidade de Carbono média do óleo	160,0 gCO ₂ eq/kg óleo
Rendimento - Bioquerosene	800,00 kg/t óleo
Rendimento – Gás Combustível Alternativa	120,0 kg/t óleo
Eletricidade da rede	31 kWh/t óleo
Impacto da produção de hidrogênio (CAPAZ, DE MEDEIROS, <i>et al.</i> , 2020)	10,80 kgCO ₂ eq/kgH ₂

Tabela 12: Dados adotados para cálculo da IC na fase industrial de produção de querosene alternativo com óleo de palma e H₂ obtido pela reforma do biogás.

Parâmetros	Dados utilizados
Capacidade de produção de querosene alternativo	100.000,00 t/ano
Processamento efetivo de óleo de soja	125.000,00 t óleo
Distância de transporte óleo de soja - fornecedores	1.500 km
Intensidade de Carbono média do óleo	160,0 gCO ₂ eq/kg óleo
Rendimento - Bioquerosene	800,00 kg/t óleo
Rendimento – Gás Combustível alternativa	120,0 kg/t óleo
Eletricidade da rede	31 kWh/t óleo
Impacto da produção de hidrogênio (HAJJAJI, MARTINEZ, <i>et al.</i> , 2016)	5,59 kgCO ₂ eq/kg H ₂

Tabela 13: Dados adotados para cálculo da IC na fase industrial de produção de querosene alternativo com óleo de palma e H₂ obtido pela reforma do glicerol.

Parâmetros	Dados utilizados
Capacidade de produção de querosene alternativo	100.000,00 t/ano
Processamento efetivo de óleo de soja	125.000,00 t óleo
Distância de transporte óleo de soja - fornecedores	1.500 km
Intensidade de Carbono média do óleo	160,0 gCO ₂ eq/kg óleo
Rendimento - Bioquerosene	800,00 kg/t óleo
Rendimento – Gás Combustível alternativa	120,0 kg/t óleo
Eletricidade da rede	31 kWh/t óleo
Impacto da produção de hidrogênio (WULF, KALTSCHMITT, 2012)	4,86 kgCO ₂ eq/kg H ₂

3.5 – Cálculo da intensidade de carbono das diferentes rotas de produção do querosene alternativo SPK-HEFA utilizando a RenovaCalc v.7

A partir da aplicação dos dados referentes a todas as fases de obtenção do querosene alternativo e com a adição da contribuição do processo de produção do H₂, é possível formar o valor da intensidade de carbono de cada rota e suas respectivas notas de eficiência energético-ambiental, utilizando a RenovaCalc v.7. Os dados obtidos são apresentados no Capítulo 4, de resultados.

A RenovaCalc do combustível alternativo produzido pela rota HEFA exhibe cinco etapas (Figuras 18-21), são elas: agrícola, industrial de extração do óleo, industrial de produção do combustível, transporte e uso. Cada fase contribui para a emissão de GEEs com relevâncias diferentes devido às suas características, como por exemplo, o uso de insumos agrícolas e industriais, práticas de produção, eficiência energética, distância entre as etapas de produção e emissões diretas. Neste estudo, a análise ocorre na etapa industrial de produção do biocombustível, segundo as rotas propostas. Para as demais etapas, utilizou-se valores de referência, como exposto na subseção 4.3.2.

Figura 18: Apresentação da fase agrícola da calculadora RenovaCalc v.7 para o combustível alternativo HEFA.

Fase agrícola - Dados consolidados			
Informações gerais			
Área total	0,00	ha	
Produção total (base úmida)	0,00	t soja	Umidade 0,00%
Quantidade comprada pela unidade produtora de biocombustível (base úmida)	0,00	t soja	
Corretivos			
Calcário calcítico	0,00	kg/t soja	
Calcário dolomítico	0,00	kg/t soja	
Gesso	0,00	kg/t soja	
Sementes			
Sementes	0,00	kg/t soja	
Fertilizantes Sintéticos			
Ureia	0,00	kg N/t soja	
Fosfato Monoamônico (MAP)	0,00	kg N/t soja	
Fosfato Monoamônico (MAP)	0,00	kg P ₂ O ₅ /t soja	
Fosfato diamônico (DAP)	0,00	kg N/t soja	
Fosfato diamônico (DAP)	0,00	kg P ₂ O ₅ /t soja	
Nitrato de amônio	0,00	kg N/t soja	
Solução de nitrato de amônio e ureia (UAN)	0,00	kg N/t soja	
Amônia anidra	0,00	kg N/t soja	
Sulfato de amônio	0,00	kg N/t soja	
Nitrato de amônio e cálcio (CAN)	0,00	kg N/t soja	
Superfosfato simples (SSP)	0,00	kg P ₂ O ₅ /t soja	
Superfosfato triplo (TSP)	0,00	kg P ₂ O ₅ /t soja	
Cloreto de potássio (KCl)	0,00	kg K ₂ O/t soja	
Outros	especificar	0,00	kg N/t soja
Outros	especificar	0,00	kg P ₂ O ₅ /t soja
Outros	especificar	0,00	kg K ₂ O/t soja
Fertilizantes Orgânicos/Organominerais			
Outros	especificar	0,00	kg/t soja
Outros	especificar	0,00	kg/t soja
Outros	especificar	0,00	kg/t soja
Outros	especificar	0,00	kg/t soja
Outros	especificar	0,00	kg/t soja
Outros	especificar	0,00	kg/t soja
Combustíveis e eletricidade			
Diesel - B10	0,00	L/t soja	
Diesel - B11	0,00	L/t soja	
Diesel - B15	0,00	L/t soja	
Diesel - BX	0,00	L/t soja	Teor de biodiesel na mistura 0,00%
Diesel - B20	0,00	L/t soja	
Diesel - B30	0,00	L/t soja	
Biodiesel - B100	0,00	L/t soja	
Gasolina C	0,00	L/t soja	
Etanol hidratado	0,00	L/t soja	
Biometano de terceiros	0,00	Nm ³ /t soja	
Biometano próprio	0,00	Nm ³ /t soja	
Eletricidade da rede - mix médio	0,00	KWh/t soja	
Eletricidade - PCH	0,00	KWh/t soja	
Eletricidade - biomassa	0,00	KWh/t soja	
Eletricidade - eólica	0,00	KWh/t soja	
Eletricidade - solar	0,00	KWh/t soja	

Figura 19: Apresentação da fase industrial de extração do óleo da calculadora RenovaCalc v.7 para o combustível alternativo HEFA.

Fase industrial - extração do óleo de soja			
Processamento e Rendimentos			
Processamento efetivo - soja		t soja	
Distância de transporte - soja		km	Umidade
Rendimento Óleo		kg/t soja	
Rendimento Farelo		kg/t soja	
Combustíveis e eletricidade			
Eletricidade da rede - mix médio		kWh/t soja	
Eletricidade - PCH		kWh/t soja	
Eletricidade - biomassa		kWh/t soja	
Eletricidade - eólica		kWh/t soja	
Eletricidade - solar		kWh/t soja	
Diesel - B10		L/t soja	
Diesel - B11		L/t soja	
Diesel - B15		L/t soja	
Diesel - BX		L/t soja	Teor de biodiesel na mistura
Diesel - B20		L/t soja	
Diesel - B30		L/t soja	
Biodiesel - B100		L/t soja	
Óleo combustível		L/t soja	
Biogás de terceiros		Nm ³ /t soja	PCI do biogás MJ/Nm ³
Biogás próprio		Nm ³ /t soja	PCI do biogás MJ/Nm ³
Gás natural		Nm ³ /t soja	
Cavaco de madeira			
Quantidade (base úmida)		kg/t soja	
Umidade			
Distância de transporte		km	
Resíduos florestais			
Cavaco de madeira			
Quantidade (base úmida)		kg/t soja	
Umidade			
Distância de transporte		km	
Lenha			
Quantidade (base úmida)		kg/t soja	
Umidade			
Distância de transporte		km	
Bagaço de cana			
Quantidade (base úmida)		kg/t soja	
Umidade			
Distância de transporte		km	
Palha de cana			
Quantidade (base úmida)		kg/t soja	
Umidade			
Distância de transporte		km	

Figura 20: Apresentação da fase industrial de produção de combustíveis alternativos da calculadora RenovaCalc v.7 para o combustível alternativo HEFA.

Fase industrial - produção dos combustíveis alternativos			
Processamento e rendimentos			
Óleo de soja próprio			
Processamento efetivo - óleo de soja próprio	<input type="text"/>	t óleo	
Distância de transporte - óleo de soja próprio	<input type="text"/>	km	
Alguma fração dessa matéria-prima é elegível?	<input type="text"/>		
Óleo de soja de terceiros			
Processamento efetivo - óleo de soja fornecedores	<input type="text"/>	t óleo	Intensidade de Carbono <input type="text"/> g CO ₂ e/kg óleo
Distância de transporte - óleo de soja fornecedores	<input type="text"/>	km	média do óleo adquirido
Alguma fração dessa matéria-prima é elegível?	<input type="text"/>		
Rendimento - Bioquerosene	<input type="text"/>	kg/t óleo	
Rendimento - Gasolina alternativa	<input type="text"/>	kg/t óleo	
Rendimento - Diesel alternativo	<input type="text"/>	kg/t óleo	
Rendimento - Gás combustível alternativo	<input type="text"/>	kg/t óleo	
Energia elétrica comercializada	<input type="text"/>	kWh/t óleo	
Insumos			
Hidrogênio	<input type="text"/>	kg/t óleo	
Combustíveis e energia			
Eletricidade da rede - mix médio	<input type="text"/>	kWh/t óleo	
Eletricidade - PCR	<input type="text"/>	kWh/t óleo	
Eletricidade - biomass	<input type="text"/>	kWh/t óleo	
Eletricidade - eólica	<input type="text"/>	kWh/t óleo	
Eletricidade - solar	<input type="text"/>	kWh/t óleo	
Diesel - B10	<input type="text"/>	L/t óleo	
Diesel - B15	<input type="text"/>	L/t óleo	
Diesel - B20	<input type="text"/>	L/t óleo	
Diesel - B30	<input type="text"/>	L/t óleo	
Biodiesel - B100	<input type="text"/>	L/t óleo	
Óleo combustível	<input type="text"/>	Nm ³ /t óleo	
Biogás de terceiros	<input type="text"/>	Nm ³ /t óleo	PCI do biogás <input type="text"/> MJ/Nm ³
Biogás próprio	<input type="text"/>	Nm ³ /t óleo	PCI do biogás <input type="text"/> MJ/Nm ³
Gás combustível renovável próprio	<input type="text"/>	Nm ³ /t óleo	PCI do gás combustível renovável <input type="text"/> MJ/Nm ³
Gás natural	<input type="text"/>	Nm ³ /t óleo	
Cavaco de madeira			
Quantidade (base úmida)	<input type="text"/>	kg/t óleo	
Umidade	<input type="text"/>		
Distância de transporte	<input type="text"/>	km	
Lenha			
Quantidade (base úmida)	<input type="text"/>	kg/t óleo	
Umidade	<input type="text"/>		
Distância de transporte	<input type="text"/>	km	
Resíduos florestais			
Quantidade (base úmida)	<input type="text"/>	kg/t óleo	
Umidade	<input type="text"/>		
Distância de transporte	<input type="text"/>	km	
Bagagaço de cana			
Quantidade (base úmida)	<input type="text"/>	kg/t óleo	
Umidade	<input type="text"/>		
Distância de transporte	<input type="text"/>	km	
Palha de cana			
Quantidade (base úmida)	<input type="text"/>	kg/t óleo	
Umidade	<input type="text"/>		
Distância de transporte	<input type="text"/>	km	

Figura 21: Apresentação da fase de transporte da calculadora RenovaCalc v.7 para o combustível alternativo HEFA.

Fase de distribuição	
Querosene alternativo (bioquerosene)	
Rodoviário	<input type="text"/> 100,00%
Dutoviário	<input type="text"/> 0,00%
Ferrovário	<input type="text"/> 0,00%
Gasolina alternativa	
Rodoviário	<input type="text"/> 100,00%
Dutoviário	<input type="text"/> 0,00%
Ferrovário	<input type="text"/> 0,00%
Diesel alternativo	
Rodoviário	<input type="text"/> 100,00%
Dutoviário	<input type="text"/> 0,00%
Ferrovário	<input type="text"/> 0,00%

3.6 – Emissão de Créditos de Descarbonização (CBIO)

Para o cálculo dos Créditos de Descarbonização (CBIO), segundo a Equação 1, é necessário determinar previamente o fator de emissão de CBIO (f , tCO₂e/L), seguindo a Equação 2. Para isso, é necessário que a empresa produtora de biocombustível apresente no Certificado de Produção Eficiente de Biocombustíveis, entre outros dados referentes à usina, a fração do volume de

biocombustível elegível, relativa à produção total da unidade produtora ($f_{elegível}$, em %) a massa específica do biocombustível (ρ , em t/m^3), o poder calorífico inferior do biocombustível (PCI, em MJ/kg), a Nota de Eficiência Energético-Ambiental calculada pela RenovaCalc (NEEA, em gCO_2eq/MJ) e o fator de emissão de CBIO (f , tCO_2eq/L), como mostra as Equações 1 e 2. A NEEA é obtida pela subtração do valor da intensidade de carbono do combustível fóssil equivalente pela intensidade de carbono do biocombustível analisado (Equação 3).

$$CBIO = f * Volume\ de\ Biocombustível\ Comercializado\ (L) \quad (Equação\ 1)$$

$$f = NEEA * \frac{f_{elegível}}{100} * \rho * PCI * 10^{-6} \quad (Equação\ 2)$$

$$NEEA = IC_{combustível\ fóssil} - IC_{biocombustível} \quad (Equação\ 3)$$

Capítulo 4 – Resultados e Discussão

4.1 – Valores das intensidades de carbono das diferentes rotas analisadas

Para o cálculo da intensidade de carbono das rotas analisadas nesse estudo, utilizou-se a calculadora RenovaCalc desenvolvida para o RenovaBio. Essa ferramenta é empregada para cálculo do ciclo de vida das rotas inseridas no programa. Na planilha da RenovaCalc para o combustível alternativo HEFA é possível obter o impacto de emissões de GEEs nas etapas agrícolas de produção da oleaginosa, extração do óleo vegetal, etapa industrial de obtenção do biocombustível, de transporte da unidade de produção até o fornecedor e de uso do combustível.

Como descrito nos capítulos anteriores, a intensidade de carbono das etapas agrícola e de extração do óleo vegetal foram obtidas de dados da literatura. As etapas de transporte e de uso são fornecidas pela calculadora e a etapa industrial de obtenção do combustível foi modelada de acordo com a rota analisada.

Nas Figuras 22 a 29, mostra-se a IC e a NEEA dos combustíveis analisados obtidos pela RenovaCalc. A NEEA é calculada subtraindo a intensidade de carbono do combustível alternativo do combustível fóssil substituto.

Figura 22: IC e NEEA do querosene alternativo produzido com óleo de soja e hidrogênio obtido pela eletrólise da água.

Bioquerosene	
Intensidade de Carbono (g CO₂eq/MJ)	48,13
agrícola	20,60
industrial - extração do óleo	2,60
industrial	21,88
transporte	2,50
uso	0,55
Nota de Eficiência Energético- Ambiental (g CO₂eq/MJ)	39,37
Fóssil substituto: Querosene de aviação	87,50
Redução de emissões	45,00%

Figura 23: IC e NEEA do querosene alternativo produzido com óleo de palma e hidrogênio obtido pela eletrólise da água.

Bioquerosene	
Intensidade de Carbono (g CO₂eq/MJ)	36,00
agrícola	16,80
industrial - extração do óleo	0,10
industrial	16,05
transporte	2,50
uso	0,55
Nota de Eficiência Energético-Ambiental (g CO₂eq/MJ)	51,50
Fóssil substituto: Querosene de aviação	87,50
Redução de emissões	58,86%

Figura 24: IC e NEEA do querosene alternativo produzido com óleo de soja e hidrogênio obtido pela reforma a vapor do gás natural.

Bioquerosene	
Intensidade de Carbono (g CO₂eq/MJ)	48,84
agrícola	20,6
industrial - extração do óleo	2,60
industrial	22,58
transporte	2,50
uso	0,55
Nota de Eficiência Energético-Ambiental (g CO₂eq/MJ)	38,66
Fóssil substituto: Querosene de aviação	87,50
Redução de emissões	44,19%

Figura 25: IC e NEEA do querosene alternativo produzido com óleo de palma e hidrogênio obtido pela reforma a vapor do gás natural.

Bioquerosene	
Intensidade de Carbono (g CO₂eq/MJ)	36,60
agrícola	16,80
industrial - extração do óleo	0,10
industrial	16,65
transporte	2,50
uso	0,55
Nota de Eficiência Energético-Ambiental (g CO₂eq/MJ)	50,90
Fóssil substituto: Querosene de aviação	87,50
Redução de emissões	58,17%

Figura 26: IC e NEEA do querosene alternativo produzido com óleo de soja e hidrogênio obtido pela reforma do biogás.

Bioquerosene	
Intensidade de Carbono (g CO₂eq/MJ)	43,68
agrícola	20,6
industrial - extração do óleo	2,60
industrial	17,42
transporte	2,50
uso	0,55
Nota de Eficiência Energético-Ambiental (g CO₂eq/MJ)	43,82
Fóssil substituto: Querosene de aviação	87,50
Redução de emissões	50,08%

Figura 27: IC e NEEA do querosene alternativo produzido com óleo de palma e hidrogênio obtido pela reforma do biogás.

Bioquerosene	
Intensidade de Carbono (g CO₂eq/MJ)	31,83
agrícola	16,80
industrial - extração do óleo	0,10
industrial	11,88
transporte	2,50
uso	0,55
Nota de Eficiência Energético-Ambiental (g CO₂eq/MJ)	55,67
Fóssil substituto: Querosene de aviação	87,50
Redução de emissões	63,62%

Figura 28: IC e NEEA do querosene alternativo produzido com óleo de soja e hidrogênio obtido pela reforma do glicerol.

Bioquerosene	
Intensidade de Carbono (g CO₂eq/MJ)	44,21
agrícola	20,60
industrial - extração do óleo	2,60
industrial	17,96
transporte	2,50
uso	0,55
Nota de Eficiência Energético-Ambiental (g CO₂eq/MJ)	43,29
Fóssil substituto: Querosene de aviação	87,50
Redução de emissões	49,47%

Figura 29: IC e NEEA do querosene alternativo produzido com óleo de palma e hidrogênio obtido pela reforma do glicerol.

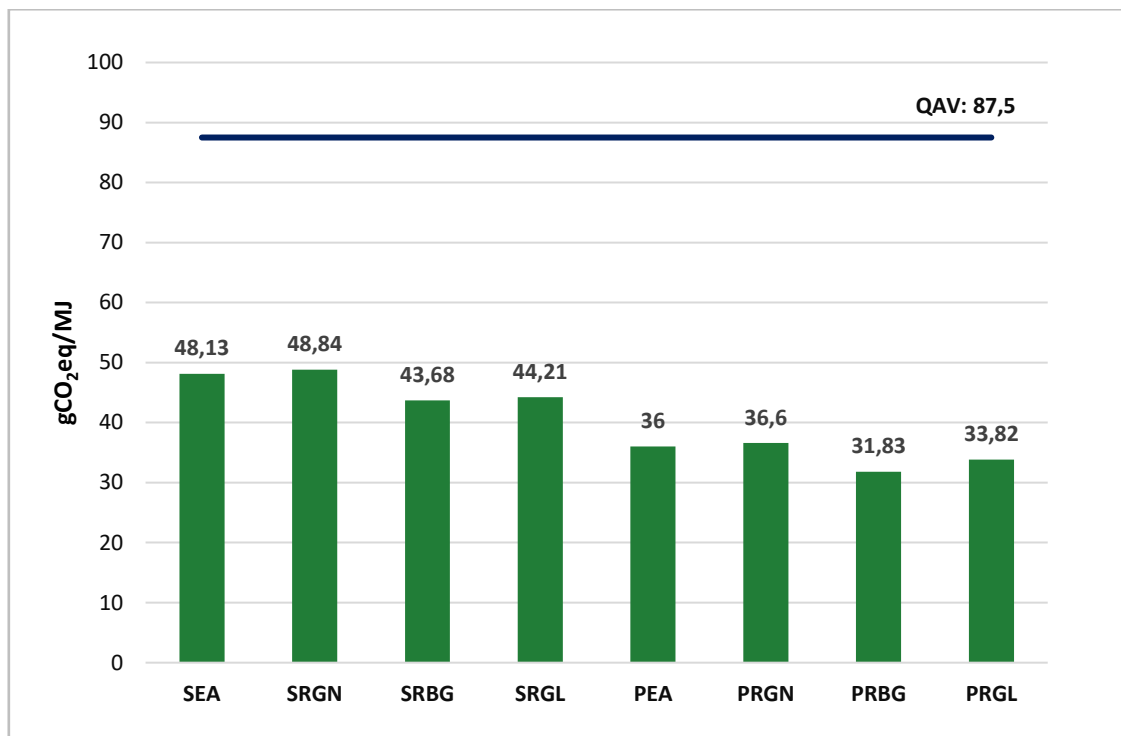
Bioquerosene	
Intensidade de Carbono (g CO₂eq/MJ)	33,82
agrícola	16,80
industrial - extração do óleo	0,10
industrial	13,87
transporte	2,50
uso	0,55
Nota de Eficiência Energético- Ambiental (g CO₂eq/MJ)	53,68
Fóssil substituto: Querosene de aviação	87,50
Redução de emissões	61,35%

4.2 – Comparação das intensidades de carbono das diferentes rotas de combustíveis analisados

Na Figura 30 estão apresentados lado a lado os valores de intensidade de carbono do biocombustível obtido a partir das diferentes matérias-primas e por meio dos diferentes processos de produção do H₂ analisados, além do valor da intensidade de carbono do seu fóssil substituto.

A rota com menor impacto foi a de querosene alternativo produzido com óleo de palma e hidrogênio obtido pela reforma do biogás que apresentou intensidade de carbono igual a 31,83 gCO₂/MJ. A rota com maior impacto foi a de querosene alternativo produzido com óleo de soja e hidrogênio obtido pela reforma à vapor do gás natural, com intensidade de carbono igual 48,84 gCO₂/MJ. Comparativamente, a rota do biocombustível com maior impacto representa uma redução de aproximadamente 55% em relação ao combustível de origem fóssil.

Figura 30: Intensidade de Carbono das diferentes rotas de obtenção do querosene alternativo HEFA.



SEA: Querosene alternativo produzido com óleo de soja e hidrogênio obtido pela eletrólise da água.

SRGN: Querosene alternativo produzido com óleo de soja e hidrogênio obtido pela reforma à vapor do gás natural.

SRBG: Querosene alternativo produzido com óleo de soja e hidrogênio obtido pela reforma do biogás.

SRGL: Querosene alternativo produzido com óleo de soja e hidrogênio obtido pela reforma do glicerol.

PEA: Querosene alternativo produzido com óleo de palma e hidrogênio obtido pela eletrólise da água.

PRGN: Querosene alternativo produzido com óleo de palma e hidrogênio obtido pela reforma à vapor do gás natural.

PRGB: Querosene alternativo produzido com óleo de palma e hidrogênio obtido pela reforma do biogás.

PRGL: Querosene alternativo produzido com óleo de palma e hidrogênio obtido pela reforma do glicerol.

É possível perceber também que todos os combustíveis alternativos HEFA produzidos com óleo de palma fornecem valores menores de IC do que as rotas respectivas que processam óleo de soja. Isso deve-se a diferença de impacto na fase industrial, pois o óleo de palma apresenta maior percentual de ácidos graxos saturados em seu perfil lipídico se comparado ao óleo de soja, sendo 49,80% e 21,61%, respectivamente (Tabela 2). O fato de a palma apresentar um perfil lipídico com maior teor de ácidos graxos saturados, contribui para um menor consumo de hidrogênio no hidrocessamento. Também se deve à fase agrícola, já que a palma apresenta maior produtividade que a soja, demandando menor área e insumos químicos.

A Figura 30 evidencia que a rota de produção do combustível alternativo em que o hidrogênio é produzido pela reforma a vapor do gás natural (RGN) tem o maior valor de IC dentre as rotas propostas. Para os combustíveis que utilizam óleo de soja como matéria-prima, a rota SRGN apresentou IC 11,94% maior que a rota SRBG, que obteve o menor valor. Já para os combustíveis produzidos utilizando óleo de palma a diferença entra a rota que de maior IC (PRGN) para a de menor (PRBG) foi de 14,98%.

Esse comportamento ocorre para os combustíveis de ambas matérias-primas, pois na RGN, além da etapa operacional de produção de H₂, que possui grande relevância nas emissões de GEEs, considera-se a etapa de produção de gás natural fóssil. A obtenção de matéria-prima fóssil costuma apresentar um impacto adicional nas emissões, quando comparado às matérias-primas originárias de resíduos.

Acerca do combustível alternativo produzido com hidrogênio obtido pela eletrólise da água (EA), observou-se que o valor da intensidade de carbono foi o segundo maior entre as rotas propostas, mesmo sem fazer uso de matéria-prima fóssil. Isso deve-se ao alto valor de eletricidade demandada para sua produção e a composição do perfil médio de geração elétrica nacional, que apesar de ser majoritariamente não fóssil, ainda contribui para emissão de GEEs.

O combustível alternativo obtido pela reforma do glicerol destacou-se como uma das rotas avaliadas de menor intensidade de carbono. Para o programa de forma geral, o glicerol é

considerado um resíduo de processamento, logo, à sua geração não são atribuídas emissões de GEEs. Dessa maneira, o fornecimento de glicerol por unidades produtoras de biodiesel para reforma e produção de querosene alternativo apresenta-se como uma possibilidade de obtenção de hidrogênio e combustível alternativo de menor impacto nas emissões, e que atribui valor aos resíduos da produção de outros biocombustíveis.

Apresentaram menor impacto as seguintes rotas: (1) consome hidrogênio produzido a partir da reforma do biogás, para o combustível alternativo obtido com óleo de soja (SRGN) e (2) consome hidrogênio produzido a partir da reforma do biogás, para o combustível alternativo que consome óleo de palma (PRBG).

A análise da intensidade de carbono de cada etapa do ciclo de vida dos combustíveis estudados (Figuras 30, 31 e 32) revela que a fase agrícola tem maior contribuição. As rotas de produção de querosene alternativo produzido com óleo de soja utilizando hidrogênio obtido pela eletrólise da água (SEA) e hidrogênio obtido pela reforma a vapor do gás natural (SRGN), apresentam maior valor de IC na etapa industrial de obtenção do combustível (Figura 20).

Figura 31: Intensidade de Carbono de cada fase das diferentes rotas de obtenção do querosene alternativo HEFA.

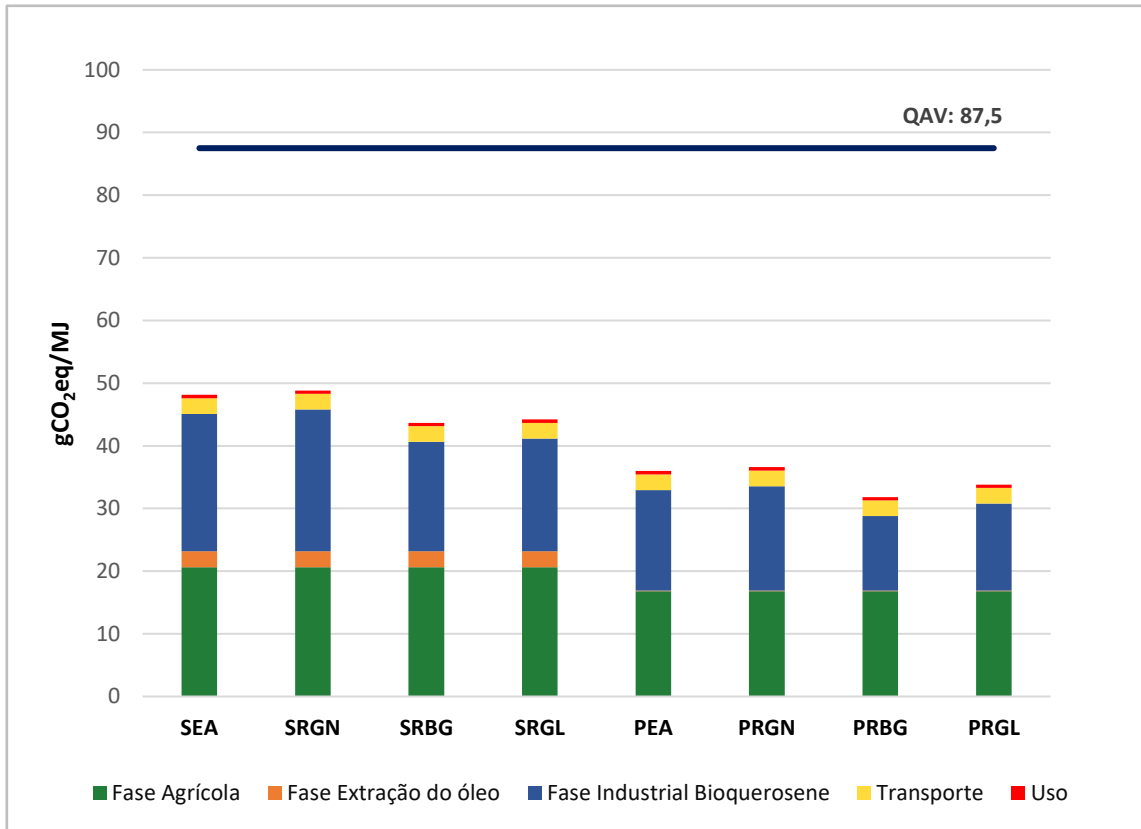


Figura 32: Contribuição das diferentes etapas analisadas pela RenovaCalc no cálculo da IC do querosene alternativo HEFA produzido de soja.

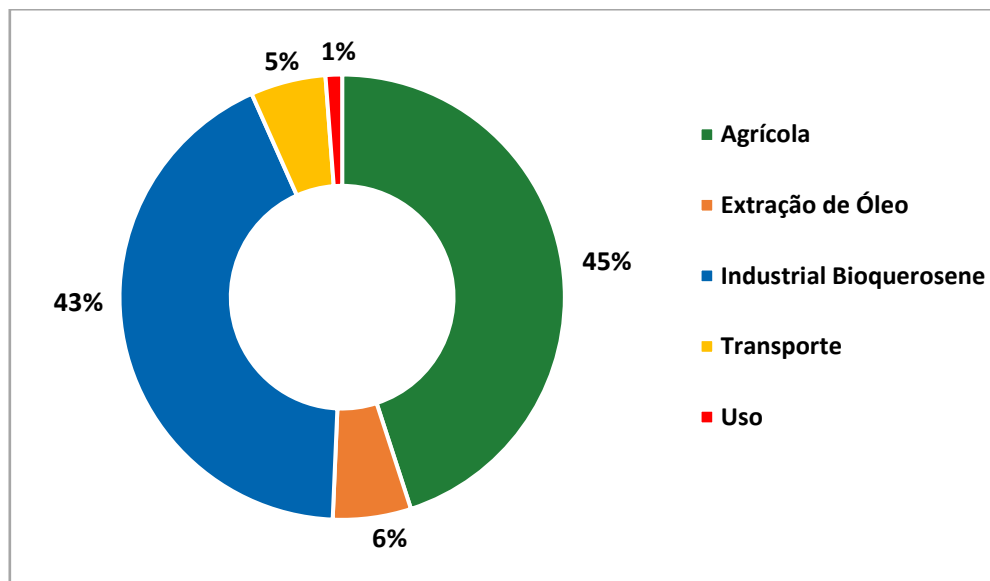
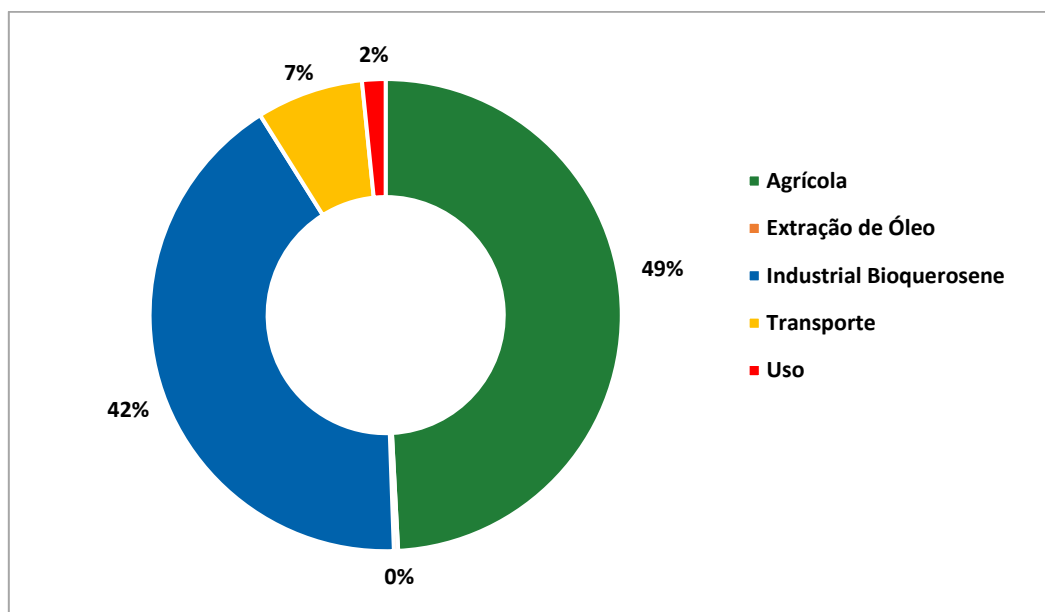


Figura 33: Contribuição das diferentes etapas analisadas pela RenovaCalc no cálculo da IC do querosene alternativo HEFA produzido de palma.



É possível observar nas Figuras 31, 32 e 33 que em todas as rotas, os combustíveis produzidos com óleo de soja apresentam maior valor de IC nas etapas agrícola, industrial de extração de óleo vegetal e industrial de produção de biocombustível do que os combustíveis produzidos com óleo de palma.

A respeito da contribuição do processo de produção de hidrogênio, essa etapa representa 18 e 22% da intensidade de carbono de todo ciclo de vida do combustível obtido com o óleo de soja e palma, respectivamente (Figuras 34 e 35). Analisando somente a etapa industrial de produção do querosene alternativo, a produção de hidrogênio participa com 43 e 52% dessa etapa para o querosene obtido com óleo de soja e óleo de palma, respectivamente.

Figura 34: Contribuição das diferentes etapas analisadas pela RenovaCalc considerando a contribuição do H₂ no cálculo do IC do querosene alternativo HEFA produzido de soja.

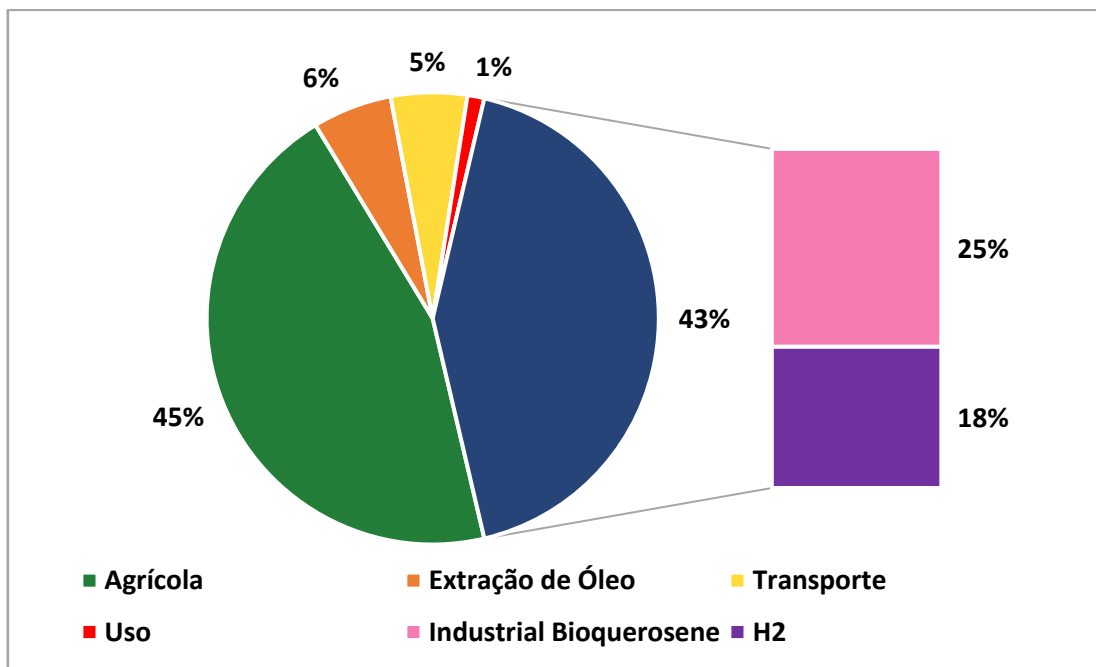
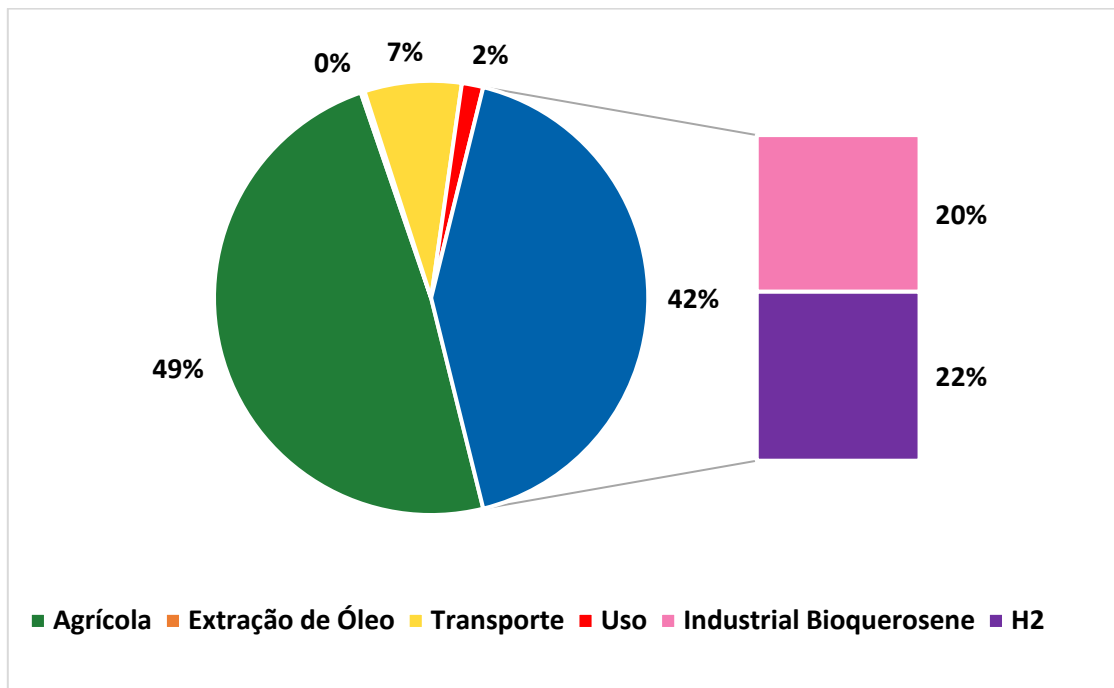


Figura 35: Contribuição das diferentes etapas analisadas pela RenovaCalc considerando a contribuição do H₂ no cálculo do IC do querosene alternativo HEFA produzido de palma.



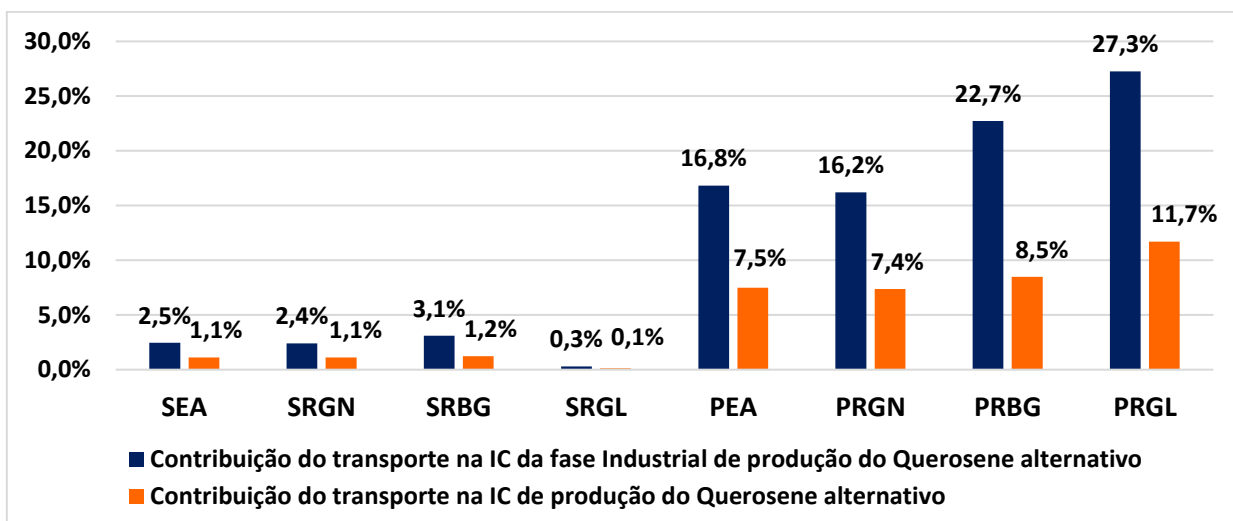
4.3 - Efeito da distância entre a matéria-prima e a produção de biocombustível

A distância de transporte da unidade de extração do óleo vegetal até a unidade de processamento do querosene alternativo é uma variável que pertence à seção da fase industrial de obtenção de biocombustível da RenovaCalc. Em uma avaliação própria, verificou-se que cada quilômetro acrescentado à distância entre a unidade de obtenção do óleo vegetal e o querosene alternativo foi responsável pelo acréscimo de 0,0018 gCO₂eq/MJ.

Analisando a maior distância percorrida nos cenários analisados, 2.100 km, referente à distância entre a unidade de processamento de óleo de palma (Iraquara, BA) e a usina produtora de biodiesel (Cuiabá, MT), verificou-se que foi adicionado 3,78 gCO₂/MJ à intensidade de carbono do combustível. Esse valor representa 11,18% da IC do querosene alternativo produzido com óleo de palma utilizando o hidrogênio obtido pela reforma da glicerina e 27,25% da fase industrial de obtenção desse combustível.

Em média, a distância da unidade de obtenção do óleo de soja à unidade de produção do querosene foi responsável por 0,419 gCO₂/MJ do valor total da IC, o que equivale a 0,96% da média da intensidade de carbono do querosene alternativo que utiliza essa matéria-prima. Já a distância entre a produção de óleo de palma e querosene alternativo acrescentou em média 2,97 gCO₂/MJ, que equivale a 8,59% da média da IC de produção do querosene alternativo obtido de óleo de palma. Os valores percentuais de contribuição do transporte dos óleos vegetais até a unidade de produção do combustível se encontram na Figura 36.

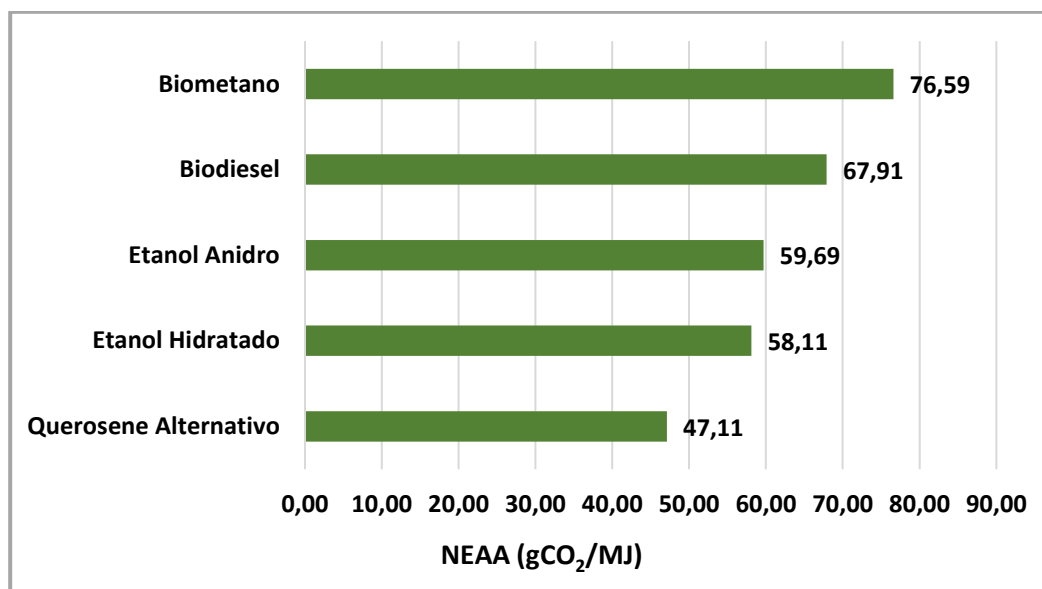
Figura 36: Contribuição do transporte dos óleos vegetais da unidade de extração do óleo até a unidade de produção do querosene alternativo na fase industrial e de produção total do combustível.



4.4 - Comparação com outros biocombustíveis inseridos no RenovaBio

Comparando os resultados obtidos nesse estudo com os demais biocombustíveis inseridos no programa RenovaBio, observa-se que o querosene alternativo apresenta a menor Nota de Eficiência Energético-Ambiental (NEEA) (Figura 26).

Figura 37: Nota de Eficiência Energético-Ambiental dos biocombustíveis do inseridos no RenovaBio e média da NEEA do querosene alternativo HEFA.



O biocombustível com maior NEEA é o biometano. Uma possível contribuição para esse resultado é a não inclusão da fase agrícola no cálculo da intensidade de carbono desse biocombustível.

A segunda maior NEEA vem do biodiesel. Um fator que contribui para essa posição é a nota típica da fase agrícola ser consideravelmente menor que a do etanol (ANP, 2018). Além disso, o diesel, seu combustível fóssil equivalente, possui a menor nota de IC em relação a todos os combustíveis do programa (Tabela 14).

Tabela 14: Valor da intensidade de carbono dos combustíveis fósseis equivalentes aos biocombustíveis inseridos no RenovaBio.

Biocombustível	Combustível fóssil equivalente	Intensidade de carbono do combustível fóssil (gCO₂/MJ)
Bioquerosene	Querosene de aviação	87,5
Etanol	Gasolina	87,4
Biometano	Média entre Gasolina, Diesel e GNV	86,7
Biodiesel	Diesel	86,1

Já para o querosene alternativo, sua menor NEEA deve-se ao elevado valor da fase industrial de produção do combustível em sua intensidade de carbono. A produção de hidrogênio apresenta contribuição considerável para a IC dessa etapa, como foi mostrado nas Figuras 34 e 35.

4.5 – CBIO gerado pelas diferentes rotas e matérias-primas

O crédito de descarbonização, CBIO, é um ativo financeiro ambiental gerado pelos produtores de biocombustíveis inseridos no RenovaBio e negociado em bolsa. A emissão de 1 CBIO equivale a 1 tonelada de CO₂ que deixou de ser emitido pela produção e uso desse biocombustível. A criação desse instrumento financeiro visa a atração de investimentos para produção de combustíveis de baixo impacto ambiental e de alta eficiência energética.

O CBIO é calculado de acordo com a Equação 1, apresentada no capítulo anterior, e é diretamente proporcional à nota de eficiência energético-ambiental (NEEA) e ao volume de biocombustível comercializado. Nesse estudo, foi considerado o volume de 136.054.421,80 L/ano de combustível alternativo produzido, que equivale à produção de 100.000 t/ano. Sendo assim, para um volume fixo de biocombustível comercializado, quanto maior for a diferença entre o valor da intensidade de carbono do combustível fóssil e do biocombustível, maior será o valor da NEEA e o número de CBIOs emitidos.

Como as rotas analisadas visam a produção do mesmo combustível fóssil equivalente, o QAV, a rota que obteve maiores valores de NEEA, gerou maior número de CBIOs, como mostra

a Figura 38. Dessa maneira, a rota de combustível alternativo com maior receita anual, R\$ 7,56 mi, proveniente da comercialização desses ativos ambientais (Figura 39) é aquela que apresenta menor impacto na categoria mudanças climáticas durante seu ciclo de vida, PRBG.

Figura 38: CBIOs gerados pelas diferentes rotas de obtenção de querosene alternativo HEFA.

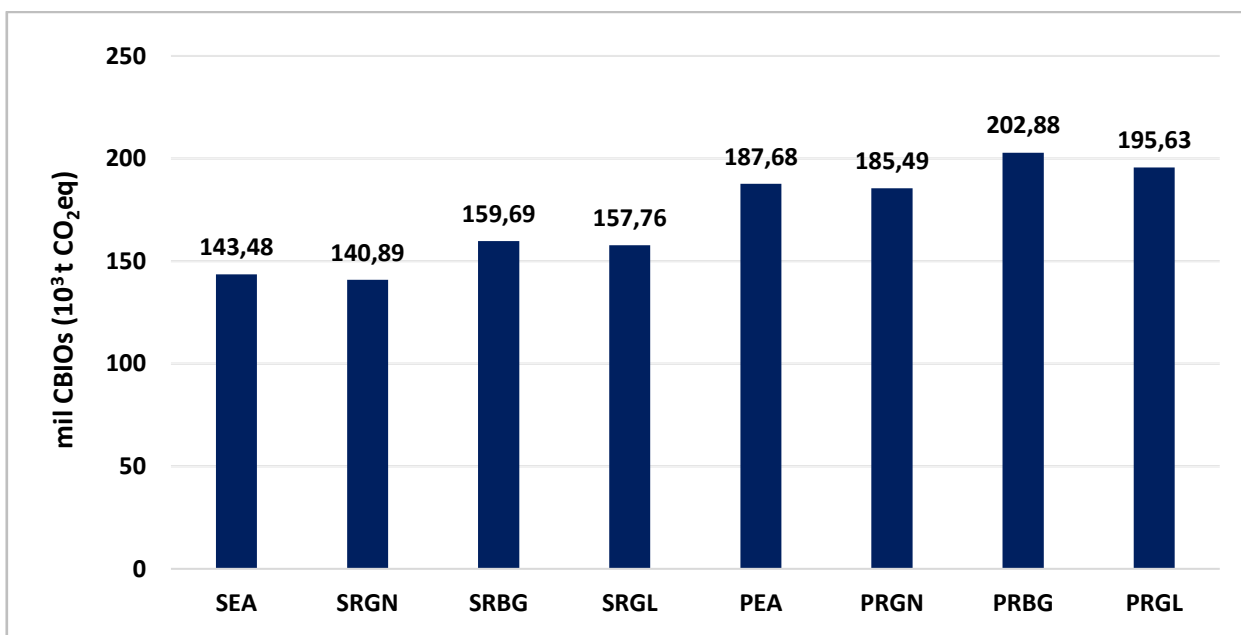
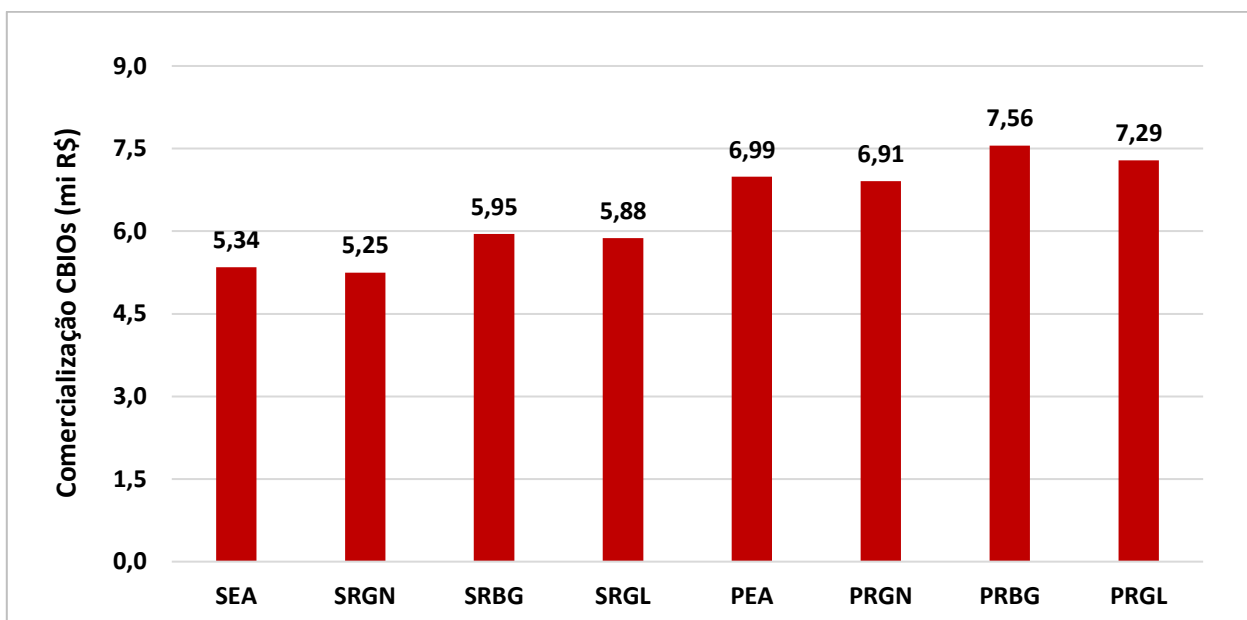


Figura 39: Valores referentes à comercialização total de CBIOs emitidos nas diferentes rotas de produção de bioquerosene HEFA.



De acordo com a variação anual do preço médio do CBIO, 0,23% (Tabela 15), (BOLSA DE VALORES B3, 2021), projetou-se o valor das receitas provenientes da comercialização dos CBIOs para cada rota proposta em um período de dez anos (Tabela 16), considerando a comercialização do mesmo volume de combustível.

Tabela 15: Valores utilizados para cálculo do CBIO emitido em um período de dez anos.

Parâmetro	Valor
Valor médio do CBIO (ANP, 2021c)	R\$ 37,24
Variação anual do preço médio do CBIO	0,23%
Volume de combustível comercializado	136.054.421,8 L/ano

Tabela 16: Receita proveniente da comercialização dos CBIOS por cada rota proposta, em um período de dez anos, em milhões de reais.

	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9	Ano 10
SEA	R\$ 5,34305	R\$ 5,35534	R\$ 5,36765	R\$ 5,38000	R\$ 5,39237	R\$ 5,40478	R\$ 5,41721	R\$ 5,42967	R\$ 5,44215	R\$ 5,45467
SRGN	R\$ 5,24669	R\$ 5,25876	R\$ 5,27085	R\$ 5,28298	R\$ 5,29513	R\$ 5,30731	R\$ 5,31951	R\$ 5,33175	R\$ 5,34401	R\$ 5,35630
SRBG	R\$ 5,94697	R\$ 5,96065	R\$ 5,97436	R\$ 5,98810	R\$ 6,00187	R\$ 6,01568	R\$ 6,02951	R\$ 6,04338	R\$ 6,05728	R\$ 6,07121
SRGL	R\$ 6,10983	R\$ 5,88856	R\$ 5,90210	R\$ 5,91568	R\$ 5,92928	R\$ 5,94292	R\$ 5,95659	R\$ 5,97029	R\$ 5,98402	R\$ 5,99778
PEA	R\$ 6,98925	R\$ 7,00533	R\$ 7,02144	R\$ 7,03759	R\$ 7,05378	R\$ 7,07000	R\$ 7,08626	R\$ 7,10256	R\$ 7,11890	R\$ 7,13527
PRGN	R\$ 6,90783	R\$ 6,92371	R\$ 6,93964	R\$ 6,95560	R\$ 6,97160	R\$ 6,98763	R\$ 7,00370	R\$ 7,01981	R\$ 7,03596	R\$ 7,05214
PRBG	R\$ 7,55518	R\$ 7,57256	R\$ 7,58997	R\$ 7,60743	R\$ 7,62493	R\$ 7,64246	R\$ 7,66004	R\$ 7,67766	R\$ 7,69532	R\$ 7,71302
PRGL	R\$ 7,49411	R\$ 7,50685	R\$ 7,51961	R\$ 7,53239	R\$ 7,54520	R\$ 7,55803	R\$ 7,57087	R\$ 7,58374	R\$ 7,59664	R\$ 7,60955

A partir desses valores estimados, pode-se observar que a produção do QAV-alternativo pelas rotas propostas pode gerar, em dez anos, uma receita líquida proveniente da comercialização de CBIOS de pelo menos R\$52,87 mi ao utilizar a rota SRGN, podendo chegar a uma receita 43,99% maior, de cerca R\$76,13 mi, ao utilizar a rota mais eficiente, que é a PRBG.

Capítulo 5 – Conclusões

- A produção do querosene alternativo HEFA apresenta menor impacto ambiental para as mudanças climáticas que o querosene de aviação fóssil, segundo os critérios da RenovaCalc. Dessa maneira, a usina produtora desse combustível, uma vez cadastrada e certificada no programa RenovaBio, é capaz de emitir CBIOs que podem contribuir para sua receita quando comercializados.
- A respeito da capacidade de produção de CBIOs das rotas propostas, nota-se que o combustível produzido a partir do óleo de palma apresenta menor impacto ambiental em todos os cenários, quando comparado com o óleo de soja, revelando maior potencial de geração de receita pela comercialização dos CBIOs. Entretanto, o querosene produzido com óleo de palma é mais impactado pelo transporte do óleo até a unidade produtora. Avalia-se que o cultivo da palma de óleo e a extração de seu óleo se tornará menos centralizada em regiões úmidas, devido a utilização de técnicas de irrigação eficientes e com aplicações que justifiquem seu uso (EMBRAPA, 2021). O aumento de CBIOs pelos produtores que reduzirem as distâncias entre a produção de óleo e o combustível pode influenciar na descentralização do cultivo dessa espécie.
- O combustível alternativo produzido com hidrogênio obtido pela eletrólise da água (EA) apresentou o segundo maior valor de intensidade de carbono entre as rotas propostas, o que se traduz no segundo maior impacto ambiental para as mudanças climáticas. O fator mais relevante para esse resultado é a alta demanda da rede elétrica dessa rota, obtido pelo perfil médio de geração nacional. Uma alternativa de menor impacto ambiental seria a utilização de hidrogênio verde, ou seja, obtido pela eletrólise da água, mas que utiliza energia proveniente de matrizes renováveis como solar e eólica. O investimento nessa rota de produção pode se tornar atrativo financeiro, não só pelo crescimento e consolidação da energia eólica e solar no país, mas também pela receita gerada a partir da comercialização de maior número de CBIOs.

- O querosene alternativo, produzido utilizando hidrogênio obtido pela reforma do glicerol, apresentou-se como uma das rotas de menor impacto nas emissões. Para o RenovaBio, a produção de glicerol é considerada um resíduo de processamento do biodiesel, logo não é concedido emissões de GEEs à sua produção. Sendo assim, a integração na produção de biodiesel e querosene alternativo pelo uso da glicerina para produção de hidrogênio torna-se uma opção atraente. O uso de matéria-prima (glicerol) para produção de hidrogênio, que não acrescenta valores à intensidade de carbono, é capaz de gerar mais CBIOS, e concede valor ao resíduo gerado na produção de outro combustível do programa, contribuindo para o aumento de receitas da empresa.
- De forma geral, percebe-se que a calculadora RenovaCalc fornece valores de intensidade de carbono coerentes com a eficiência energética e impacto ambiental da rota considerada pelo programa. Entretanto, apesar do programa revelar que não define, nem tem preferência por rotas tecnológicas, há algumas limitações que podem resultar no desfavorecimento de determinadas categorias de combustível alternativo HEFA. A ausência de opções de rotas de obtenção de hidrogênio e inclusão apenas do óleo de soja como matéria-prima limitam a contemplação de combustíveis, que até podem apresentar menor impacto, como avaliado nesse estudo.
- É importante destacar que tramita na Câmara dos Deputados o Projeto de Lei nº 3149/2020 que propõe o fornecimento de parte da receita obtida pela negociação dos CBIOS ao produtor rural da matéria-prima utilizada na produção do biocombustível (CÂMARA DOS DEPUTADOS, 2021). A proposta sugere a transferência de valores proporcionais à quantidade de matéria-prima utilizada. Se não cumprido, o produtor de biocombustível poderá ser impedido de emitir novos CBIOS. Além disso, há a indefinição sobre a tributação do CBIO por se tratar de um ativo ambiental. Devido a esses fatores, pode-se dizer que a projeção de receita proveniente do RenovaBio ainda é imprecisa, evidenciando a pouca maturidade do programa.

- Apesar de o Brasil ainda não possuir unidades produtoras de querosene alternativo em escala comercial, aponta-se que o país tem potencial atual para produção de 9 bilhões de litros (ANAC, 2021). Mesmo com a existência de fatores que dificultam o início da produção nacional, como competitividade da matéria-prima, criação de políticas públicas e viabilidade econômica das rotas, tem-se atualmente a urgência pela diminuição do impacto ambiental no setor aéreo. O surgimento de acordos internacionais pela redução de emissão de GEE, como o CORSIA e, até mesmo a criação de metas individuais pelas companhias aéreas, pode impulsionar a produção do querosene alternativo no país, tanto para fins de exportação como para abastecimento interno.

Capítulo 6 – Sugestões para trabalhos futuros

Sugestões para novos estudos em relação ao RenovaBio e RenovaCalc:

- Desenvolvimento de planilhas específicas na RenovaCalc para outras matérias-primas que apresentam produção importante em território nacional, como por exemplo, o óleo de palma para o QAV-alternativo.
- Desenvolvimento de opções de rotas de obtenção de hidrogênio, como a reforma de gás natural, biogás e glicerina, dado o potencial brasileiro para essas tecnologias.
- Avaliação da contribuição da comercialização de CBIOs pelos produtores de biocombustíveis que utilizam óleo de palma como matéria-prima, considerando o cultivo do dendezeiro menos centralizado em regiões úmidas, já que o transporte dessa oleaginosa contribui com parte considerável no valor da intensidade de carbono.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIOVE. **Estatísticas ABIOVE**. 2019. Disponível em: <https://abiove.org.br/estatisticas/>. Acesso em: 14 ago. 2021.

ALVES, L. V. **EFICIÊNCIA ENERGÉTICA AMBIENTAL NA PRODUÇÃO DE ETANOL NO SETOR SUCROALCOOLEIRO DA PARAÍBA**. 2020. 113 f. UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE, 2020.

AMBRÓSIO, C., MOTA, A., MELO, R. **Guia de operacionalização do C BIO**. . Rio de Janeiro, Brasil., ANBIMA. , 2020

ANAC. **ANAC realiza visita técnica para conhecer potencial de produção do BioQAV no Brasil**. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/anac/pt-br/noticias/2021/anac-realiza-visita-tecnica-para-conhecer-potencial-de-producao-do-bioqav-no-brasil>. Acesso em: 18 set. 2021.

ANP. **Consulta e Audiência Públicas nº 10/2018**. 2018. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/consultas-audiencias-publicas/concluidas/4469-consulta-e-audiencia-publicas-n-10-2018>. Acesso em: 24 jul. 2021.

ANP. **Informe Técnico nº 02/SBQ v.3. Orientações Gerais: Procedimentos para Certificação da Produção ou Importação Eficiente de Biocombustíveis**. . Rio de Janeiro, Brasil., Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/renovabio/renovabio/orientacoes-para-certificacao-do-renovabio>. , 2019^a

ANP. **Mapa Dinâmico: Produtores de Biodiesel**. 2021a. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiOTlkODYyODctMGJjNS00MGlyLWJmMWItNGJINDg0ZTg5NjBliwidCI6IjQ0OTlmNGZmLTI0YTYtNGI0Mi1iN2VmLTEyNGFmY2FkYzIxMyJ9&pageName=ReportSection8aa0cee5b2b8a941e5e0%22>. Acesso em: 14 ago. 2021.

ANP. **Painel dinâmico Renovabio: comercialização de CBIOs**. 2021b. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiOWI1YmYwYzQtMjgwZS00ZWVILTg3ZGYtMzA4ZWY3ODA3MDFkIiwidCI6IjQ0OTlmNGZmLTI0YTYtNGI0Mi1iN2VmLTEyNGFmY2FkYzIxMyJ9>. Acesso em: 2 nov. 2021.

ANP. **Painel Dinâmico RenovaBio Plataforma C BIO**. 2021c. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiOWI1YmYwYzQtMjgwZS00ZWVILTg3ZGYtMzA4ZWY3ODA3MDFkIiwidCI6IjQ0OTlmNGZmLTI0YTYtNGI0Mi1iN2VmLTEyNGFmY2FkYzIxMyJ9>. Acesso em: 24 ago. 2021.

ANP. **RenovaBio**. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio>. Acesso em: 13 jul. 2021.

ANP. **Resoluções ANP nº 778/2019**. 2019b. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/canais_atendimento/imprensa/noticias-comunicados/publicadas-novas-resolucoes-da-anp-

sobre-combustíveis-de-aviacao. Acesso em: 30 out. 2021.
ATAG, CLIMATE ACTION TAKES FLIGHT. "Beginner's Guide to Sustainable Aviation Fuel", **Air Transport Action Group**, v. Edition 3, n. November, p. 1–24, 2017. .
BELLEN, H. M. van. **Gestão Ambiental e Sustentabilidade**. 1ª Edição ed. Florianópolis, SC., Universidade Federal de Santa Catarina, 2013. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1414-753X1999000200017&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt.

BHANDARI, R., TRUDEWIND, C. A., ZAPP, P. "Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis - A review", **Journal of Cleaner Production**, v. 85, p. 151–163, 2014. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.07.048. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.048>.
BNDES. "O Acordo de Paris e a transição para o setor de transportes de baixo carbono: o papel da Plataforma para o Biofuturo", **BNDES Setorial**, v. 45, p. 285–340, 2017. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/11756/1/BS_45_O_Acordo_de_Paris_e_a_transicao_para_o_setor_de_transportes_de_baixo_carbono_%5B...%5D_P_BD.pdf.

BOLSA DE VALORES B3. **Crédito de Descarbonização CBIO**. . São Paulo, [s.n.] , 2019
BOLSA DE VALORES B3. **Renda Fixa B3**. 2021. Disponível em: http://www.b3.com.br/pt_br/market-data-e-indices/servicos-de-dados/market-data/historico/renda-fixa/. Acesso em: 11 set. 2021.

CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Projeto de Lei PL 3149/2020**. 2021. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=2254678>. Acesso em: 23 set. 2021.

CAPAZ, R. S., DE MEDEIROS, E. M., FALCO, D. G., *et al.* "Environmental trade-offs of renewable jet fuels in Brazil: Beyond the carbon footprint", **Science of the Total Environment**, v. 714, p. 136696, 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.136696. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136696>.

CAPAZ, R. S., POSADA, J. A., OSSEWEIJER, P., *et al.* "The carbon footprint of alternative jet fuels produced in Brazil: exploring different approaches", **Resources, Conservation and Recycling**, v. 166, n. June 2020, p. 105260, 2021. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.105260. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105260>.

CARVALHO, F. M. de. **EVALUATION OF THE BRAZILIAN POTENTIAL FOR PRODUCING AVIATION BIOFUELS THROUGH CONSOLIDATED ROUTES**. 2017. 137 f. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167273817305726%0Ahttp://dx.doi.org/10.1038/s41467-017-01772-1%0Ahttp://www.ing.unitn.it/~luttero/laboratoriomateriali/RietveldRefinements.pdf%0Ahttp://www.intechopen.com/books/spectroscopic-analyses-developme>.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. "Biocombustíveis aeronáuticos:

Progressos e desafios", **Série Documentos Técnicos**, v. 08, p. 55, 2010. Disponível em: https://www.cgee.org.br/documents/10182/734063/biocombustiveis_aeronauticos_24012011_9559.pdf.

DE SOUZA, L. M. **O MERCADO BRASILEIRO DE BIOQUEROSENE DE AVIAÇÃO: MAPEAMENTO MULTICRITÉRIO PARA SELEÇÃO DE OLEAGINOSAS PARA O PROCESSO HEFA**. 2019. 208 f. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2019.

EMBRAPA. **Embrapa avalia qualidade do óleo de palma produzido em Mato Grosso**. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-noticias/-/noticia/58841213/embrapa-avalia-qualidade-do-oleo-de-palma-produzido-em-mato-grosso>. Acesso em: 18 set. 2021.

EPE. **Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis – Ano 2020**. 2021a. EPE. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/analise-de-conjuntura-dos-biocombustiveis>.

EPE. "Balanço Energético Nacional", 2021b. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-588/BEN_Síntese_2021_PT.pdf.

EPE. "Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio", **Nota Técnica**, p. 34, 2021c. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidrogênio_23Fev2021NT\(2\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidrogênio_23Fev2021NT(2).pdf).

EPE. "Empresa de Pesquisa Energética", **Balanço Energético Nacional - Relatório Síntese**, p. 73, 2020a. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-521/Relatório_Síntese_BEN_2020-ab_2019_Final.pdf.

EPE. "Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2030: Oferta de Derivados de Petróleo", **Plano Decenal de Energia 2030**, p. 35, 2020b. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-490/topico-522/PDE_2030_Caderno_de_Oferta_de_Derivados.pdf.

EPE. "Fluxograma de Funcionamento do Renovabio", p. 1, 2018a. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-155/Fluxograma_de_funcionamento_RenovaBio_-_ARQUIVO_5.pdf.

EPE. **Matriz energética e elétrica**. 2021d. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 28 out. 2021.

EPE. "Panorama do Refino e da Petroquímica no Brasil", **NOTA TÉCNICA DPG-SPT Nº 04/2018**, p. 73, 2018b. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-/topico-412/NT_Refino_e_Petroquímica_2018.11.01.pdf.

GAIOTTO, J. B. **Óleo de soja, óleo ácido de soja e sebo bovino como fontes de gordura em rações para frangos de corte**. 2000. 71 f. Universidade de São Paulo, 2000.

GALVÊAS, B. "Disponibilidade de Matérias Primas e Oportunidades de Diversificação da Matriz Energética do Biodiesel", 2015. Disponível em: [http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/camaras_setoriais/Oleaginosas_e_biodiesel/24RO/Disp MP e Oportunidades para o Biodiesel v3.pdf](http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/camaras_setoriais/Oleaginosas_e_biodiesel/24RO/Disp%20MP%20e%20Oportunidades%20para%20o%20Biodiesel%20v3.pdf).

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. 67–104, 2018. DOI: 10.19177/rgsa.v7e2201867-104. .

GESEL. **Observatório de Hidrogênio**. . Rio de Janeiro, Brasil., GESEL - UFRJ. , 2021
GESEL - UFRJ. **Perspectivas da Economia do Hidrogênio Texto de Discussão do Setor Elétrico**. . Rio de Janeiro, [s.n.], , 2021

GIRAFÁ, C., BARBOLO, L., PAIVA, J. V. **Análise técnico – econômica comparativa entre diferentes rotas para produção de bioquerosene**. 2021a. UFRJ, 2021.

GIRAFÁ, C., BARBOLO, L., PAIVA, J. V. "Avaliação econômica comparativa entre as rotas HEFA, Fischer-Tropsch e ATJ para produção de bioquerosene", 2021b. .

HAJJAJI, N., MARTINEZ, S., TRABLY, E., *et al.* "Life cycle assessment of hydrogen production from biogas reforming", **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 41, n. 14, p. 6064–6075, 2016. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.03.006. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.03.006>.

IATA. "Climate Change Fact Sheet", p. 1–2, 2020. Disponível em: https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/fact_sheet_on_climate_change.pdf.

IPCC. **Aquecimento Global de 1,5°C: Sumário para Formuladores de Políticas**. **Ippc**. Genebra, Suíça., [s.n.], 2019. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/07/SPM-Portuguese-version.pdf>.

KLEIN, B. C., CHAGAS, M. F., JUNQUEIRA, T. L., *et al.* "Techno-economic and environmental assessment of renewable jet fuel production in integrated Brazilian sugarcane biorefineries", **Applied Energy**, v. 209, n. October 2017, p. 290–305, 2018. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.10.079. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.079>.

LIMA, I. C. M. de A. **PERSPECTIVAS E PROPOSTAS PARA A EXPANSÃO DO BIOGÁS NO BRASIL: UMA ANÁLISE DE POLÍTICAS PÚBLICAS**. 2020. 141 f. UFRJ, 2020.

MACHADO, G. V., COSTA, A. O. da, ARAUJO, R. B. **RenovaBio : Biocombustíveis 2030. Nota Técnica: Papel dos biocombustíveis na matriz**. . Rio de Janeiro, [s.n.]. Disponível em: http://www.mme.gov.br/documents/10584/7948692/EPE_NT1_PAPEL+DOS+BIOCOMBUSTÍ

VEIS.pdf/779d7ffd-4169-4e10-a1a1-9a93184f6209;jsessionid=BC69E6F175F98A700035966D239A65BA.srv154%0Ahttp://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:50050009%0Ahttp://repositorio.u. , 2017

MADSEN, R., HENKES, J. A. **A AVIAÇÃO CIVIL E A INSERÇÃO DO BIOQUEROSENE NO BRASIL**. *Revista Brasileira de Aviação Civil & e Cinêcias Aeronáuticas*. Florianópolis, SC., [s.n.], 2021

MAPA. **Diagnóstico da Produção Sustentável da Palma de Óleo**. Brasília, DF., [s.n.]. Disponível em: http://www.abrapalma.org/pt/wp-content/uploads/2018/06/DIAGNOSTICO_PALMA.pdf. , 2018

MATSUURA, M. I. S. F., SCACHETTI, M. T., CHAGAS, M. F., *et al.* "RenovaCalcMD: Método e ferramenta para a contabilidade da Intensidade de Carbono de Biocombustíveis no Programa RenovaBio", p. 1–60, 2018. Disponível em: http://www.anp.gov.br/images/Consultas_publicas/2018/n10/CP10-2018_Nota-Tecnica-Renova-Calc.pdf (in Portuguese) (accessed November 30, 2019).

MATTHEWS, H. S., HENDRICKSON, C. T., MATTHEWS, D. H. **Life Cycle Assessment: Quantitative Approaches for Decisions That Matter**. Pensilvânia, EUA., [s.n.], 2015.

MME, ANP. **RESOLUÇÃO Nº 758, DE 23 DE NOVEMBRO DE 2018**. Brasília, DF., Diário Oficial da União. , 2018

MME, MMA, ANP, *et al.* **Nota Explicativa sobre a Proposta de Criação da Política Nacional de Biocombustíveis**. Brasília, DF., Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/renovabio-1/legislacao-e-documentos/concepcao-do-renovabio/renovabionotaexplicativa.pdf/view>. , 2021

MONTEIRO, M. F., NETO, M. H. M., BEZERRA, D. V. F., *et al.* "CARACTERIZAÇÃO DO QUEROSENE DE AVIAÇÃO EM MISTURA DE PSEUDOCOMPONENTES E SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE HIDRODESSULFURIZAÇÃO", p. 8, 2018. Disponível em: https://www.editorarealize.com.br/editora/anais/conepetro/2018/TRABALHO_EV104_MD1_SA113_ID602_10072018110251.pdf.

MRE. **Apresentação da Contribuição Nacionalmente Determinada do Brasil perante o Acordo de Paris**. 2020. MRE. Disponível em: https://www.gov.br/mre/pt-br/canais_atendimento/imprensa/notas-a-imprensa/2020/apresentacao-da-contribuicao-nacionalmente-determinada-do-brasil-perante-o-acordo-de-paris. Acesso em: 13 jul. 2021.

OLIVEIRA, A. C. de. **Gestão Ambiental e Desenvolvimento Sustentável**. Ponta Grossa, PR, Atena Editora, 2018.

ONU. "Adoção do acordo paris", **Convenção Quadro sobre Mudança do Clima**, v. 4, p. 1–42, 2015. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/wp-content/uploads/2016/04/Acordo-de-Paris.pdf>.

PETROBRAS. "Querosene de Aviação", p. 1–13, 2019. Disponível em: <http://sites.petrobras.com.br/minisite/assistenciaticnica/public/downloads/QAV-Infomações-Técnicas-v.1.3-29.pdf>.

PROLO, C., ANGELO, C., CÁRCAMO, A. M. **Acordo de Paris: um guia para perplexos**. 1ª Edição ed. Brasil, Observatório do Clima, 2021.

REIS, H., DE LIMA, L., PEREZ, R. "Palma no Brasil Viabilidade da produção de óleo ou biodiesel?", **Revista de Política Agrícola**, v. 26, n. 2, p. 20–30, 2017. .

REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL. **Lei, Nº 13576, de 26 de Dezembro de 2017**. . Brasília, DF., [s.n.]. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/113576.htm. , 2017

ROITMAN, T. **PERSPECTIVAS E PROPOSTAS DE INSERÇÃO DE BIOQUEROSENE DE AVIAÇÃO NO TRANSPORTE AÉREO DE PASSAGEIROS NO BRASIL**. 2018. 158 f. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1053/j.gastro.2014.05.023%0Ahttps://doi.org/10.1016/j.gie.2018.04.013%0Ahttp://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29451164%0Ahttp://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=PMC5838726%250Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.gie.2013.07.022>.

SCHULTZ, E. L., SOARES, I. P. "Reforma do Biogás – revisão", **Circular Técnica - Embrapa**, p. 35–40, out. 2014. Disponível em: <https://www.embrapa.br/documents/1355242/0/BiogásFert++Reforma+do+biogás++Revisão.pdf>.

SILVA, V. M. D. E. S. **ESTUDO DA ROTA TECNOLÓGICA POWER-TO-LIQUIDS (PtL) PARA A PRODUÇÃO DE BIOQUEROSENE SUSTENTÁVEL - UMA ALTERNATIVA PARA O BRASIL**. 2020. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2020.

SOUZA, H. dos S. **A Cultura da Palma. Aspectos Técnicos e Comerciais**. . [S.l.], Agropalma. , 2020

TOLMASQUIM, M. T., SERVA, G. B., VENTORIM, F., *et al.* **Potencial De Redução De Emissões De CO2 Em Projetos De Produção E Uso De Biocombustíveis**. . Rio de Janeiro, Brasil., [s.n.], 2005. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-250/topico-304/EPE - 2º Biocombustíveis x MDL\[1\].pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-250/topico-304/EPE - 2º Biocombustíveis x MDL[1].pdf).

UBRABIO. "Bioquerosene no Brasil", v. 1, p. 1689–1699, 2017. Disponível em: <https://ubrablo.com.br/wp-content/uploads/2018/03/BioquerosenenoBrasil.pdf>.

WULF, C., KALTSCHMITT, M. "Life cycle assessment of hydrogen supply chain with special attention on hydrogen refuelling stations", **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 37, n. 21, p. 16711–16721, 2012. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.03.028. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.03.028>.

