



**AValiação DE CICLO DE VIDA DO BIOQUEROSENE
DE CANOLA**

Tainara da Silva Costa

**Dissertação de Mestrado
Ciências Mecânicas**

Brasília, 15 de setembro de 2022

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA DO BIOQUEROSENE DE
CANOLA

Tainara da Silva Costa

Orientador: Edgar Amaral Silveira, Dr. Univ (UnB)
Coorientador:

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

PUBLICAÇÃO: ENM.DM - XXX.XXX

BRASÍLIA/DF: 15 de outubro de 2022

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Avaliação de Ciclo de Vida do Bioquerosene de Canola

Tainara da Silva Costa

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS PARCIAIS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS MECÂNICAS.

APROVADA POR:

Edgar Amaral Silveira, Dr. Univ (UnB)
(Orientador)

Convidado 1, Rosineide Miranda Leão. (UNIP/IFB)
(Examinadora Externa)

Convidado 2, Thiago Oliveira Rodrigues. (Ibict)
(Examinador Externo)

BRASÍLIA/DF, 15 DE OUTUBRO DE 2022.

FICHA CATALOGRÁFICA

Costa, T. S.
Avaliação de Ciclo de Vida do Bioquerosene de Canola
[Distrito Federal] 2022.
xiii, 69p. (ENM/FT/UnB, Mestre, Ciências Mecânicas, 2022.
Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília.
Faculdade de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Mecânica.

Palavras-chave:

- | | |
|-------------------|-------------------------------|
| 1. biocombustível | 2. aviação |
| 3. canola | 4. avaliação de ciclo de vida |
| I. ENM/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Costa, T. S.(2022). Avaliação de Ciclo de Vida do Bioquerosene de Canola. Dissertação de Mestrado, Publicação ENM.DM - XXX.XXX, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, xiii, 69p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Tainara da Silva Costa.

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Avaliação de Ciclo de Vida do Bioquerosene de Canola.

GRAU / ANO: MESTRE / 2022

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Tainara da Silva Costa

Dedico esse trabalho à minha família, por todo amor, dedicação e apoio durante a minha caminhada.

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais e a minha irmã, minha família querida, por sempre me apoiarem incondicionalmente, incentivando e proporcionando todo o suporte para que eu pudesse traçar o meu caminho até aqui. Agradeço também ao meu grande parceiro e namorado Paulo, por todas as incansáveis palavras de incentivo e apoio que fizeram toda a diferença.

Gostaria de agradecer a todas as amigas que cultivei durante esse período, aos queridos amigos do LEA/UnB por todas as horas de estudo e experiências compartilhadas, palavras de incentivo e conhecimento transmitido.

Agradeço em especial ao meu orientador, Professor Edgar Silveira, pela oportunidade de realizar esse trabalho e por me auxiliar com tamanha paciência e dedicação, transmitindo todo o conhecimento necessário para o desafio proposto. Agradeço ao Professor Armando Caldeira-Pires por permitir meu ingresso no projeto que originou esse trabalho e por todos os ensinamentos.

Agradeço também a Embrapa Agroenergia e o CNPq, com destaque ao Alexandre Cardoso que me proporcionou acesso à todas as ferramentas e conhecimentos necessários para que eu pudesse alcançar os objetivos dessa pesquisa.

Por fim, deixar registrada a minha gratidão por todas as pessoas que direta ou indiretamente colaboraram com meu trabalho.

Resumo

O transporte aéreo comercial é responsável por aproximadamente 2,6% das emissões globais de dióxido de carbono (CO_2) para a atmosfera e a promoção de combustíveis renováveis é considerada uma estratégia promissora para a redução desses impactos, tendo como recurso a biomassa. A canola é uma das mais importantes oleaginosas em crescimento no mundo, responsável por 16% da produção de óleo vegetal, ocupando a terceira posição mundial em produção de óleo e dessa forma se destaca como potencial matéria-prima para obtenção de combustíveis alternativos. Nesse cenário, informações detalhadas sobre a cadeia de produção são necessárias para que se possa avaliar com precisão os impactos ambientais do ciclo de vida do biocombustível e atestar sua sustentabilidade. Tais dados podem ser obtidos por meio da metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida, que por sua vez envolve o estudo dos fluxos elementares de entradas e saídas para um sistema de produto e pode indicar os pontos críticos que mais contribuem para os impactos ambientais. Com base nesta metodologia, foi elaborado um modelo de produção utilizando dados secundários da obtenção do bioquerosene de óleo de canola, desde a plantação do grão até o processamento final do biocombustível. A rota de produção definida para esse estudo é a HEFA, responsável pela conversão de óleos vegetais em bioquerosene. Em posse dessas informações, foram determinadas as correntes mássicas e energéticas ao longo do modelo tecnológico e após esse mapeamento, o processo de produção do biocombustível foi modelado com o auxílio do software openLCA. Com a aplicação dessa ferramenta e a utilização dos métodos ILCD 2011 Midpoint+ e CML-IA baseline foram analisados os indicadores de desempenho ambiental e determinadas as etapas que são consideradas pontos críticos que mais contribuem para os impactos ambientais. Foi observado através das análises das emissões atmosféricas e das categorias de impactos ambientais que a fase industrial, principalmente no que diz respeito a produção do farelo seco, e a fase de conversão possuem as maiores contribuições para os indicadores de impacto.

Palavras-chaves: biocombustível; aviação; canola; avaliação de ciclo de vida.

Abstract

Commercial air transport is responsible for approximately 2.6% of global emissions of carbon dioxide (CO_2) into the atmosphere and the promotion of renewable fuels is considered a promising strategy to reduce these impacts, having biomass as resource. Canola is one of the most important growing oilseeds in the world, responsible for 16% of vegetable oil production, ranking third in the world in oil production and thus stands out as a potential raw material for obtaining alternative fuels. In this scenario, detailed information about the production chain is necessary in order to accurately assess the environmental impacts of the biofuel's life cycle and attest to its sustainability. Such data can be obtained through the Life Cycle Assessment methodology, which in turn involves the study of the elementary flows of inputs and outputs for a product system and can indicate the critical points that most contribute to environmental impacts. Based on this methodology, a production model was developed using secondary data for obtaining biokerosene from canola oil, from the planting of the grain to the final processing of the biofuel. The production route defined for this study is HEFA, responsible for converting vegetable oils into biokerosene. With this information, the mass and energy currents were determined along the technological model and after this mapping, the biofuel production process was modeled with the help of openLCA software. With the application of this tool and the use of the ILCD 2011 Midpoint+ and CML-IA baseline methods, the environmental performance indicators were analyzed and the stages that are considered critical points that most contribute to environmental impacts were determined. It was observed through the analysis of atmospheric emissions and the categories of environmental impacts that the industrial phase, especially with regard to the production of dry bran, and the conversion phase have the greatest contributions to the impact indicators.

Key-words: biofuels; aviation; canola; life cycle assessment.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivo Geral	3
1.2	Objetivos Específicos	3
1.3	Estrutura do Trabalho	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Biocombustível de Aviação	5
2.1.1	Rotas de Produção	7
2.1.1.1	Alcohol-to-jet	7
2.1.1.2	Oil-to-jet	7
2.1.1.3	Gas-to-jet	8
2.1.1.4	Sugar-to-jet	9
2.1.2	Características de desempenho de biocombustíveis de aviação	9
2.2	Produção do Grão e Óleo de Canola no Brasil	11
2.3	Avaliação do Ciclo de Vida	15
2.3.1	Conceito	15
2.3.2	Estrutura	16
2.3.2.1	Definição de Objetivo e Escopo	17
2.3.2.2	Inventário do Ciclo de Vida (ICV)	18
2.3.2.3	Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV)	19
2.3.2.4	Interpretação	20
2.3.3	Revisão Bibliométrica	20
3	ESTUDO DE CASO	25
3.1	Objetivos	25
3.2	Escopo	26
3.2.1	Sistema de Produto	26
3.2.2	Fronteira do Sistema de Produto	26
3.2.3	Unidade Funcional	27
3.2.4	Procedimentos de Alocação	27

3.2.5	Metodologia de Avaliação	27
3.2.6	Requisitos da Qualidade de Dados	29
3.3	Inventário de Ciclo de Vida	29
3.3.1	Fase Agrícola	30
3.3.2	Fase Industrial	33
3.3.3	Processo de Conversão - HEFA	37
3.4	Modelagem no <i>software</i> openLCA	40
4	RESULTADOS	42
4.1	Emissões Atmosféricas	42
4.2	Indicadores de Impactos Ambientais	44
5	CONCLUSÃO	49
	REFERÊNCIAS	51

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Características de desempenho dos biocombustíveis de aviação com suas respectivas propriedades. Adaptado de Yang et al. (2019).	10
Figura 2.2 – Área plantada de canola no Brasil.	12
Figura 2.3 – Produtividade de canola no Brasil.	13
Figura 2.4 – Produção de canola no Brasil.	13
Figura 2.5 – Evolução da capacidade instalada da indústria de óleos vegetais brasileira.	14
Figura 2.6 – Fases de uma ACV (ABNT, 2009a).	16
Figura 2.7 – Procedimentos simplificados para análise de inventário (ABNT, 2009b).	19
Figura 2.8 – Evolução da produção científica sobre o tema.	21
Figura 2.9 – Mapa de evolução.	21
Figura 2.10 – Países com mais publicações relacionadas ao tema.	23
Figura 2.11 – Instituições com mais publicações relacionadas ao tema.	23
Figura 3.1 – Modelo tecnológico genérico do sistema de produção.	26
Figura 3.2 – Fase agrícola.	31
Figura 3.3 – Fase industrial	34
Figura 3.4 – Refinamento e processamento do óleo de canola.	38
Figura 3.5 – Sistema de produto completo modelado no openLCA.	40
Figura 4.1 – Representação do percentual dos gases nas emissões totais das fases agrícola e industrial.	43
Figura 4.2 – Representação do percentual dos gases nas emissões totais da fase de conversão.	44
Figura 4.3 – Resultados dos indicadores relativos das fases do sistema de produto aplicando o método ILCD 2011 Midpoint+.	46
Figura 4.4 – Resultados dos indicadores relativos das fases do sistema de produto aplicando o método CML-IA baseline.	47

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Rotas tecnológicas e de produção de SPK aprovadas pela ASTM e ANP. Adaptado de Yang et al. (2019), Doliente et al. (2020), Carvalho et al. (2019) e Escalante et al. (2022).	7
Tabela 2 – Capacidade instalada da indústria brasileira de óleos vegetais por região (ABIOVE, 2020).	14
Tabela 3 – Fluxos de Entrada da Fase Agrícola para a produção de 1 kg de grão de canola.	32
Tabela 4 – Fluxos de Saída da Fase Agrícola.	33
Tabela 5 – Fluxos de Entrada da Fase Industrial - Farelo Seco.	36
Tabela 6 – Fluxos de Saída da Fase Industrial - Farelo Seco.	37
Tabela 7 – Fluxos de Entrada da Fase Industrial - Óleo Cru.	37
Tabela 8 – Fluxos de Saída da Fase Industrial - Óleo Cru.	37
Tabela 9 – Fluxos de Entrada da Fase de Refinamento.	39
Tabela 10 – Fluxos de Saída da Fase de Refinamento.	39
Tabela 11 – Fluxos de Entrada da Fase de Conversão - HEFA.	39
Tabela 12 – Fluxos de Saída da Fase de Conversão - HEFA.	39
Tabela 13 – Desempenhos das emissões atmosféricas para as fases agrícola e industrial.	42
Tabela 14 – Desempenho das emissões atmosféricas para a fase de conversão.	43
Tabela 15 – Desempenhos das categorias de impacto para as fases do sistema de produto aplicando o método ILCD 2011 Midpoint+.	45
Tabela 16 – Desempenhos das categorias de impacto para as fases do sistema de produto aplicando o método CML-IA baseline.	47

Lista de Abreviaturas e Siglas

<i>ABIOVE</i>	Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais
<i>ABRASCANOLA</i>	Associação Brasileira dos Produtores de Canola
<i>ACV</i>	Avaliação do Ciclo de Vida
<i>AICV</i>	Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida
<i>ANP</i>	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
<i>ASTM</i>	<i>American Society for Testing and Materials</i>
<i>ATJ</i>	<i>Alcohol-to-jet</i>
<i>CHJ</i>	Querosene de hidrotermólise catalítica
<i>CONAB</i>	Companhia Nacional de Abastecimento
<i>CORSIA</i>	Esquema de Compensação e Redução de Carbono para a Aviação Internacional
<i>GTJ</i>	<i>Gas-to-jet</i>
<i>HEFA</i>	Hidroprocessamento de ésteres e ácidos graxos
<i>IATA</i>	Associação Internacional de Transporte Aéreo
<i>ICAO</i>	Organização Internacional da Aviação Civil
<i>ICV</i>	Inventário do Ciclo de Vida
<i>RJF</i>	<i>Renewable Jet Fuel</i>
<i>SICV</i>	Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida
<i>SIP</i>	Isoparafinas sintetizadas de açúcares fermentados e hidroprocessados
<i>SPK</i>	<i>Synthesized Paraffinic Kerosene</i>
<i>SPK/A</i>	Querosene parafínico sintetizado com aromáticos
<i>SPK – ATJ</i>	Querosene parafínico sintetizado por álcool

SPK – FT Querosene parafínico hidroprocessado e sintetizado por Fischer-Tropsch

SPKHC – HEFA Querosene parafínico sintetizado por hidrocarbonetos bioderivados, ácidos graxos e ésteres hidroprocessados

SPK – HEFA Querosene parafínico sintetizado por ácidos graxos e ésteres hidroprocessados

STJ *Sugar-to-jet*

OTJ *Oil-to-jet*

1 Introdução

O transporte aéreo comercial é responsável por aproximadamente 2,6% das emissões globais de dióxido de carbono (CO_2) para a atmosfera (STAPLES et al., 2018), além de contribuir aproximadamente 3,5% da forçante radiativa antropogênica (LEE et al., 2009). O combustível de aviação é o maior custo operacional no transporte aéreo, por isso a indústria aeronáutica é afetada principalmente pela variação dos preços dos combustíveis fósseis (ESCALANTE et al., 2022).

Devido às emissões excessivas de gases de efeito estufa e à alta dependência de combustíveis de origem fóssil, o desenvolvimento sustentável da aviação tem chamado cada vez mais a atenção em todo o mundo (WEI et al., 2019). A aviação comercial emite aproximadamente 859 milhões de toneladas métricas de CO_2 , e a previsão é que a porcentagem total de emissões produzidas pelo ser humano atinja o patamar de 20,2% até 2050 (ALAM; DWIVEDI, 2019).

A promoção de combustíveis renováveis é considerada uma estratégia promissora para a redução dessas emissões, tendo em vista que o consumo total mundial de combustível de aviação pelas companhias aéreas comerciais aumentou de 260 milhões de m^3/ano em 2005 para mais de 340 milhões de m^3/ano em 2018, e é esperado um aumento anual adicional de cerca de 5% até 2050 (WANG et al., 2019).

Entre as ações estabelecidas pelo setor de aviação para reduzir a pegada de carbono, destacam-se três medidas inicialmente estabelecidas para voos internacionais pelas empresas da Associação Internacional de Transporte Aéreo (IATA): (1) melhorar a eficiência de combustível da frota em 1,5% por ano até 2020; (2) estabilização das emissões a partir de 2020 por meio da expansão neutra em carbono; e (3) reduzir pela metade as emissões de carbono em 2050 em comparação aos níveis de 2005 (ATAG, 2011).

Somado a isso, a Organização Internacional da Aviação Civil (ICAO) que também defende que os combustíveis sustentáveis são um elemento essencial para reduzir as emissões, implementou o Esquema de Compensação e Redução de Carbono para a Aviação Internacional (CORSIA) com o objetivo de abordar qualquer aumento anual nas emissões totais de CO_2 da aviação civil internacional acima dos níveis de 2020 e contribuir para o compromisso da indústria para um crescimento neutro em carbono (ICAO, 2016).

As matérias-primas utilizadas para a produção de combustíveis alternativos para

aviação são de origem biológica e muitas tecnologias consideram como recurso a biomassa, com rotas de conversão que incluem abordagens termoquímicas e bioquímicas (HARI; YAAKOB; BINITHA, 2015). Segundo Souza, Mendes e Aranda (2018) o Brasil emergiu como líder na produção e uso de combustíveis alternativos para aviação, tendo em vista a experiência com biocombustíveis, bem como o potencial para produzir matérias-primas renováveis.

Considerando que a canola é uma das mais importantes oleaginosas em crescimento no mundo, responsável por 16% da produção de óleo vegetal e ocupando a terceira posição mundial em produção de óleo, atrás apenas de óleo de soja e óleo de palma, é possível perceber seu potencial como matéria-prima para produção de biocombustíveis (CONFORTIN et al., 2019).

Essa oleaginosa de clima temperado pode ser cultivada em regiões tropicais, tais como as savanas de baixas latitudes do Brasil. Uma parte considerável das regiões tropicais e subtropicais de produção de grãos da América do Sul têm potencial para atender à crescente demanda mundial por produtos derivados desse grão, como proteínas e óleo de alta qualidade (TOMM et al., 2018).

De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), no seu Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos de março de 2022, a estimativa de área de canola plantada no país é de 39.100 ha, com uma estimativa de produtividade de grãos de 1.404 kg/ha e produção de 54.900 toneladas de grãos (CONAB, 2022a).

No que diz respeito ao desempenho ambiental de processos produtivos, a avaliação do ciclo de vida (ACV) tem sido uma ferramenta frequentemente empregada para a análise de diferentes categorias de impacto ambiental (CAPAZ et al., 2020). Especificamente para a indústria da aviação, tem sido utilizada para estimar o potencial de redução de gases de efeito estufa (CAPAZ et al., 2020).

Nesse cenário, informações detalhadas da produção da matéria-prima são necessárias para que se possa avaliar com precisão os impactos do ciclo de vida do biocombustível (SIEVERDING et al., 2016). Tais dados podem ser obtidos por meio da metodologia ACV, que por sua vez envolve o estudo dos fluxos elementares de entradas e saídas para um sistema de produto e pode indicar os pontos críticos que mais contribuem para os impactos ambientais (ABNT, 2009a).

Com base nesta metodologia, o presente trabalho tem como objetivo realizar o diagnóstico do desempenho ambiental da produção de bioquerosene oriundo do óleo da canola, a partir da identificação das principais correntes mássicas e energéticas dos processos unitários do modelo tecnológico elaborado para esta análise.

1.1 Objetivo Geral

O principal objetivo dessa pesquisa é avaliar os impactos ambientais do processo de produção do bioquerosene de canola utilizando a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

1.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo principal dessa pesquisa foi elaborado um modelo de produção utilizando dados secundários da obtenção do óleo da canola, desde a plantação do grão até o processamento final. Os dados foram agrupados e organizados em duas fases, a fase agrícola e a fase industrial.

A primeira fase abrange as etapas de correção do solo, semeadura, adubação, manejo e colheita. Já a segunda fase abrange o recebimento do grão, armazenagem, prensagem, extração, degomagem do óleo e produção do farelo.

Foi incluído no modelo uma rota específica de conversão para bioquerosene a partir de óleo vegetal e sementes oleaginosas, a HEFA, também com a utilização de dados secundários. E em posse dessas informações, foram determinados os fluxos de entrada e saída.

Após esse mapeamento, o processo de produção do biocombustível foi modelado com o auxílio do *software* openLCA. E com a utilização dos métodos ILCD 2011 Midpoint+ e CML-IA baseline foram analisados os indicadores de desempenho ambiental e determinadas as etapas que são consideradas pontos críticos que mais contribuem para os impactos ambientais.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado em capítulos. O primeiro capítulo trata-se de uma introdução sobre o tema, onde é abordada a relevância da discussão do desenvolvimento de tecnologias para a produção de biocombustíveis diante do problema mundial enfrentado atualmente, a alta taxa de emissão de dióxido de carbono para a atmosfera e a forte dependência de combustíveis fósseis. Em âmbito nacional, os dados demonstram a capacidade consolidada para a geração de biocombustíveis e disponibilidade de matéria prima.

No segundo capítulo é apresentada a revisão bibliográfica, onde foram analisadas as mais diversas contribuições científicas sobre o tema, com o objetivo de agregar uma sólida fundamentação teórica a esse trabalho. Nesse capítulo, são desenvolvidos os temas: biocombustíveis de aviação, produção do grão e óleo de canola no Brasil, a metodologia de avaliação do ciclo de vida e a revisão bibliométrica elaborada sobre o tema.

O terceiro capítulo dessa pesquisa, trata sobre o estudo de caso, que por sua vez consiste na avaliação do ciclo de vida do bioquerosene de canola. São apresentados os detalhes da metodologia aplicada para levantamento das informações, elaboração dos inventários e dos modelos tecnológicos e obtenção dos dados necessários para alcançar os objetivos propostos.

No quarto capítulo são discorridos os resultados obtidos por meio da aplicação da metodologia utilizada no estudo de caso. E por fim, no quinto capítulo temos as conclusões que foram percebidas a partir da análise dos resultados.

2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo são apresentados os principais conceitos para compreensão do tema. O atual cenário dos biocombustíveis para aviação, a produção do grão e óleo de canola e a metodologia de avaliação de ciclo de vida.

2.1 Biocombustível de Aviação

Devido a limitação das opções para descarbonização, o sucesso da implementação dos biocombustíveis na aviação é crucial para as estratégias de mitigação de emissões de gases de efeito estufa do setor de aviação (DOLIENTE et al., 2020).

No Brasil, o biocombustível faz parte de um grupo de combustíveis definido como querosene de aviação alternativo (JET alternativo). De acordo com a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e conforme foi estabelecido pela Resolução ANP nº 856, de 2021: querosene de aviação alternativo é um combustível derivado de fontes alternativas, como biomassa, óleos vegetais, gordura animal, gases residuais, resíduos sólidos, carvão e gás natural, produzido pelos processos que atendam ao estabelecido nesta Resolução (MME; ANP, 2021).

Contudo, a Lei Brasileira nº 12.490 de 2011, criada para promover a produção e fornecimento de biocombustíveis, considera bioquerosene de aviação somente derivados de biomassa renovável que podem ser utilizados em turborreatores e turbopropulsores aeronáuticos ou, conforme regulamento, em outro tipo de aplicação que possa substituir parcial ou totalmente combustível de origem fóssil (BRASIL, 2011). Dessa forma, devido à regulamentação brasileira, não são todos os combustíveis alternativos de aviação que são considerados bioquerosene (SOUZA; MENDES; ARANDA, 2018).

O biocombustível de aviação é considerado um querosene parafínico sintetizado (*Synthesized Paraffinic Kerosene* - SPK) derivado de biomassa que é misturado ao combustível de aviação convencional derivado do petróleo (YANG et al., 2019). Também conhecido como combustível de aviação renovável (*Renewable Jet Fuel* - RJF), pode ser produzido a partir de grãos de milho, sementes oleaginosas, algas, gorduras animais, resíduos agrícolas, resíduos florestais e recursos residuais (EBRAHIMI et al., 2022).

Em âmbito nacional, a aprovação para novos querosenes de aviação alternativos é

obtida a partir da ASTM International (*American Society for Testing and Materials*). Essa instituição foi responsável pela publicação de um guia de qualificação e certificação para simplificar o processo de aprovação de novas alternativas como o querosene de aviação (SOUZA; MENDES; ARANDA, 2018).

Os combustíveis de aviação seguem uma regulação rigorosa de acordo com as normas internacionais, principalmente para garantir segurança ao transporte e devido ao fato das aeronaves sobrevoarem e serem reabastecidas em diferentes países do mundo. Qualquer combustível de aviação alternativo, incluindo biocombustíveis, deve cumprir os mesmos padrões de desempenho dos combustíveis de aviação convencionais. Dessa forma, os biocombustíveis para aviação devem ter propriedades que os caracterizem como "*drop in*", ou seja, devem ser completamente intercambiáveis ou misturados com combustíveis convencionais para a aviação, de modo que não sejam necessárias adaptações dos motores atuais das aeronaves (CANTARELLA et al., 2015).

Atualmente, a ASTM Internacional (ASTM, 2021) e o Brasil (MME; ANP, 2021) aprovaram e certificaram sete tipos de combustíveis SPK:

I - Querosene parafínico hidroprocessado e sintetizado por Fischer-Tropsch (SPK-FT);

II - Querosene parafínico sintetizado por ácidos graxos e ésteres hidroprocessados (SPK-HEFA);

III - Querosene parafínico sintetizado com aromáticos (SPK/A);

IV - Querosene parafínico sintetizado por álcool (SPK-ATJ);

V - Isoparafinas sintetizadas de açúcares fermentados e hidroprocessados (SIP);

VI - Querosene de hidrotermólise catalítica (CHJ); e

VII - Querosene parafínico sintetizado por hidrocarbonetos bioderivados, ácidos graxos e ésteres hidroprocessados (SPK HC-HEFA).

A ASTM D7566-21 é a norma que define os tipos de combustíveis, e também padroniza em qual porcentagem de volume essas substâncias podem ser misturadas ao combustível de aviação convencional para compor os biocombustíveis de aviação (ASTM, 2021).

Os sete tipos de combustíveis aprovados podem ser classificados em basicamente três rotas tecnológicas: termoquímica, química e bioquímica. Além disso, é possível analisar os querosenes parafínicos sintetizados por meio da sua rota de produção: *Gas-to-jet*, *Oil-to-jet*, *Alcohol-to-jet*, e *Sugar-to-jet*. Na Tabela 1 estão reunidas as principais informações sobre os processos para obtenção dos sete tipos de SPK aprovados atualmente.

Tabela 1 – Rotas tecnológicas e de produção de SPK aprovadas pela ASTM e ANP. Adaptado de [Yang et al. \(2019\)](#), [Doliente et al. \(2020\)](#), [Carvalho et al. \(2019\)](#) e [Escalante et al. \(2022\)](#).

ABREVIACÃO	ROTA DE PROD.	ROTA TEC.	VOL. MÁX. DE SPK
SPK-FT	<i>Gas-to-jet</i>	Termoquímica	50%
SPK-HEFA	<i>Oil-to-jet</i>	Química	50%
SPK/A	<i>Gas-to-jet</i>	Termoquímica	50%
SPK-ATJ	<i>Alcohol-to-jet</i>	Bioquímica	50%
SIP	<i>Sugar-to-jet</i>	Bioquímica	10%
CHJ	<i>Oil-to-jet</i>	Química	50%
SPK HC-HEFA	<i>Oil-to-jet</i>	Química	10%

2.1.1 Rotas de Produção

Existem diferentes rotas de produção para converter biomassa em combustíveis alternativos. A tecnologia escolhida depende fortemente do tipo de biomassa que será utilizada como matéria-prima ([CARVALHO et al., 2019](#)). As rotas podem ser classificadas em quatro tipos principais, que estão descritas nas sessões a seguir.

2.1.1.1 *Alcohol-to-jet*

O combustível ATJ, também chamado de oligomerização de álcool, é convertido em combustível de álcoois, como metanol, etanol, butanol e álcoois graxos de cadeia longa. O aproveitamento do etanol para a mistura de combustível de aviação apresenta um caminho potencial para o desenvolvimento de combustíveis *drop-in* ou fungíveis para o mercado de combustível de aviação ([WANG; TAO, 2016](#)).

Na fase de desidratação, o álcool é convertido em olefina por meio de uma reação catalítica, que normalmente utiliza ácidos inorgânicos ou óxidos de metais. Em seguida, a olefina de cadeia curta é fundida a moléculas mais longas pelo processo de oligomerização, para depois passar por uma etapa de hidrogenação para remoção das insaturações. Por fim, o produto é destilado para ser utilizado como biocombustível ([NEULING; KALTSCHMITT, 2014](#)).

Em resumo, o processo de conversão pode ser descrito como uma hidrólise para obtenção de açúcares fermentescíveis; fermentação de açúcares para produção de isobutanol e etanol, seguida de desidratação, oligomerização, hidrogenação e fracionamento ([YANG et al., 2019](#)).

2.1.1.2 *Oil-to-jet*

Três processos são classificados como rota de conversão OTJ: HRJ, também conhecido como HEFA; hidrotérólise catalítica (CH), também denominada liquefação

hidrotérmica; e HC-HEFA, sintetizado por hidrocarbonetos bioderivados, ácidos graxos e ésteres hidroprocessados. (WANG; TAO, 2016). Essa rota é caracterizada como desoxigenação de mono-, di- e triglicerídeos, ácidos graxos livres e ésteres de ácidos graxos, seguido de hidroprocessamento (YANG et al., 2019).

No processo para obtenção do querosene parafínico sintetizado por ácidos graxos e ésteres hidroprocessados (HEFA), o óleo extraído obtido a partir de plantas e sementes é submetido a uma etapa de hidrotratamento a altas temperaturas na presença de hidrogênio e catalisador. O objetivo dessa etapa é a remoção de oxigênio e conversão dos ácidos graxos em hidrocarbonetos. Em seguida, ocorre o craqueamento e isomerização do produto bruto, produzindo uma mistura de parafinas e isoparafinas. A mistura é então fracionada para a obtenção do querosene sintético (IRENA, 2021).

O querosene de hidrotermólise catalítica (CH₄) é constituído por uma mistura de parafinas, isoparafinas, cicloparafinas e aromáticos, originado da conversão hidrotérmica de ácidos graxos livres ou ésteres de ácidos graxos em conjunto com hidrotratamento, hidrocraqueamento ou hidroisomerização e outros processos convencionais utilizados em refinarias, incluindo o fracionamento como etapa final (CAAFI, 2022).

Para a produção do querosene parafínico sintetizado HC-HEFA, os hidrocarbonetos bioderivados, ácidos graxos e ésteres são submetidos ao tratamento com hidrogênio para a remoção do oxigênio e outras moléculas. Após isso, os hidrocarbonetos passam pelos processos de craqueamento e isomerização, resultando em um combustível sintético constituído por uma mistura de parafinas. As fontes reconhecidas de hidrocarbonetos bioderivados atualmente incluem apenas os tri-terpenos produzidos pelas espécies de algas *Botryococcus braunii* (CAAFI, 2022).

2.1.1.3 Gas-to-jet

A rota GTJ descreve os processos de conversão que transformam biogás, gás natural ou gás de síntese em biocombustível para aviação (WANG; TAO, 2016). O processo de conversão compreende gaseificação para obtenção de Syn-gás (CO+H₂); Fisher-Tropsch (FT) para sintetizar parafinas e olefinas, seguido de hidroprocessamento (YANG et al., 2019).

O processo FT é capaz de produzir combustíveis de hidrocarbonetos líquidos a partir de gás de síntese. Os combustíveis FT são normalmente isentos de enxofre e contêm muito poucos aromáticos em comparação com a gasolina e o diesel, o que leva a emissões mais baixas quando usado em motores a jato (WANG; TAO, 2016).

Por meio do processo de fermentação a gás é possível fermentar gás de síntese para biocombustíveis líquidos. Se a biomassa lignocelulósica for usada como matéria-prima, ela é primeiro convertida em gás de síntese via gaseificação. O gás de síntese resfriado pode ser fermentado em etanol ou butanol por bactérias acetogênicas. A fermentação gasosa

pode converter não apenas culturas energéticas e resíduos agrícolas típicos, mas também resíduos orgânicos municipais e industriais (WANG; TAO, 2016).

O querosene parafínico sintético FT-SPK é proveniente da gaseificação da biomassa, processo em que a matéria-prima é convertida em uma mistura de monóxido de carbono e hidrogênio. O gás de síntese é convertido em alcanos de cadeia longa, olefinas e ceras parafínicas pelo processo Fischer-Tropsch. O produto bruto é hidroprocessado por meio da reação com hidrogênio na presença de um catalisador. Por fim, realiza-se o fracionamento para a obtenção de um bioquerosene com as propriedades adequadas para utilização em motores de aeronaves (BOEIRA, 2022).

Querosene parafínico sintetizado com aromáticos (SPK/A) possui a primeira etapa do processo de produção idêntica à síntese via Fischer-Tropsch utilizando gás de síntese. Contudo, em um segundo momento é realizada uma reação de alquilação, utilizando principalmente benzeno não derivado do petróleo, a fim de obter-se uma mistura de hidrocarbonetos com maior teor de aromáticos. Os compostos aromáticos são necessários com uma porcentagem mínima de 8% em combustíveis de aviação para garantir o aumento da vedação no sistema de armazenamento e distribuição de combustível em aeronaves (BOEIRA, 2022).

2.1.1.4 *Sugar-to-jet*

A conversão biológica e catalítica de açúcares em hidrocarbonetos fornece uma rota bioquímica para a produção de combustíveis líquidos para transporte e produtos químicos. Os processos do STJ incluem (1) atualização catalítica de açúcares para hidrocarbonetos, (2) fermentação de açúcares em hidrocarbonetos, e (3) açúcar-para-açúcar intermediário e transformação em combustível (WANG; TAO, 2016). Esse processo abrange a hidrólise para obtenção de açúcares fermentescíveis; fermentação de açúcares para produção de farneseno, seguida de hidroprocessamento e fracionamento (YANG et al., 2019).

O processo denominado de isoparafinas sintetizadas de açúcares fermentados e hidroprocessados (SIP) é constituído por hidrocarbonetos sintéticos, produzidos a partir do hidroprocessamento e fracionamento do farneseno. Em um primeiro momento, microrganismos são utilizados para a fermentação da sacarose presente na matéria-prima, produzindo farneseno. O farneseno é então convertido em parafina através de uma reação catalítica com H_2 . Que em seguida passa por um processo de purificação para fins de adequação às especificações (BOEIRA, 2022).

2.1.2 Características de desempenho de biocombustíveis de aviação

Para garantir a segurança do combustível, confiabilidade e compatibilidade com os componentes estruturais das aeronaves e motores aeronáuticos existentes, é essencial avaliar as características de desempenho dos biocombustíveis e compará-los com os padrões

especificados nas normas (YANG et al., 2019). Na figura 2.1 é apresentado um esquema com as principais características de desempenho dos biocombustíveis de aviação com suas respectivas propriedades.

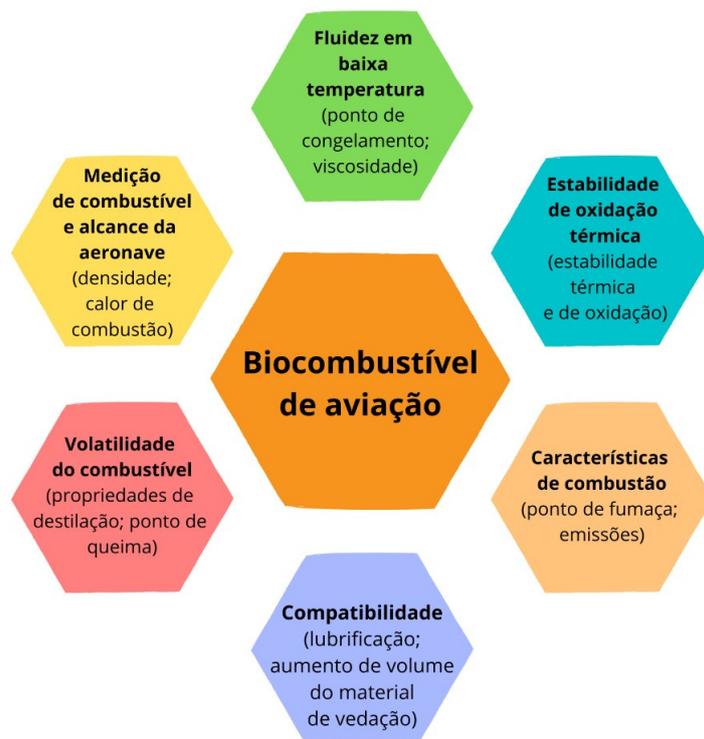


Figura 2.1 – Características de desempenho dos biocombustíveis de aviação com suas respectivas propriedades. Adaptado de Yang et al. (2019).

Em seu trabalho "*An overview on performance characteristics of bio-jet fuels*", Yang et al. (2019) apresenta detalhadamente cada uma dessas características. Em resumo, ainda segundo o autor, podemos destacar:

Fluidez em baixa temperatura:

Devido ao fato da temperatura de um tanque de combustível de aeronave ser extremamente baixa em grandes altitudes, o ponto de congelamento e a viscosidade cinemática do biocombustível devem ser suficientemente baixos para garantir a fluidez adequada do combustível no sistema do motor de turbina.

Estabilidade de oxidação térmica:

A estabilidade do combustível à oxidação na temperatura de operação encontrada em aeronaves é um importante requisito de desempenho, e uma alta estabilidade térmica à oxidação é geralmente desejável.

Características de combustão:

As características de combustão do biocombustível de aviação podem ser avaliadas por parâmetros como ponto de fumaça, emissões de material particulado, monóxido (CO) e dióxido de carbono (CO_2) e número de cetano derivado que caracterizam a ignição do

combustível propriedade.

Compatibilidade:

O aumento do volume de materiais de vedação em sistemas de aviação depende principalmente da força de interação entre combustíveis de aviação e materiais de vedação. Esta força de interação está intimamente relacionada com a estrutura e composição dos compostos químicos em combustíveis de aviação alternativos.

A lubricidade, uma medida da capacidade de um combustível de reduzir o desgaste dos componentes do motor, é outra característica importante para esse tipo de combustível.

Volatilidade do combustível:

A propriedade de destilação do biocombustível de aviação pode ser determinada pela porcentagem da fração de recuperação em diferentes temperaturas, e o ponto de queima é definido como a temperatura mais baixa na qual o combustível formará uma mistura inflamável com o ar.

Medição de combustível e alcance da aeronave:

Uma baixa energia térmica da combustão de combustível é acompanhada por um aumento no consumo do mesmo e, em última análise, custos de operação mais elevados. A densidade e o calor líquido de combustão são dois parâmetros característicos para medição de combustível e desempenho de alcance da aeronave.

2.2 Produção do Grão e Óleo de Canola no Brasil

A canola é um cultivar pertencente à família Brassicaceae (*Cruciferae*) que compreende cerca de 350 gêneros e 3000 espécies (BARTHET, 2016), nacionalmente utilizam-se somente híbridos dessa cultura. Seu nome é um termo genérico internacional referente a cultivares de colza com baixos níveis de ácido erúico e de glucosinolatos, adequadas tanto ao consumo humano quanto animal, seu óleo pode ser aproveitado como matéria-prima para produção de biocombustíveis (MORI et al., 2019).

A inserção de híbridos com maior resistência genética e com tolerância a herbicidas, somada às melhorias no manejo do cultivo, à crescente demanda de óleos vegetais de melhor qualidade, à necessidade de substituição de combustíveis fósseis e à formação de meios de comercialização, são fatores que estimulam a escolha da canola como alternativa de variação nos sistemas de rotação de culturas (MORI; FERREIRA; TOMM, 2019).

Esta oleaginosa de clima temperado pode ser cultivada em regiões tropicais, como as savanas de baixa latitude do Brasil. Uma parte considerável da região tropical da América do Sul e regiões subtropicais produtoras de grãos tem potencial para atender a crescente demanda mundial por produtos derivados desse grão, como proteínas e óleo de alta qualidade (TOMM et al., 2018).

Na região sul do Brasil é onde se concentram a maior parte das pesquisas e produção de canola, em especial nos estados do Rio Grande do Sul e no Paraná, fomentadas pela existência e proximidade de indústrias que processam os grãos, tornando de fácil acesso a condução técnica do cultivo e a comercialização (TOMM et al., 2010). O potencial para compor sistemas de rotação de culturas no período de safrinha e outono-inverno é outro fator de destaque dessa cultura, essa possibilidade permitiu a tropicalização da canola e a expansão do cultivo para regiões subtropicais como às do cerrado mineiro (TOMM et al., 2010).

De acordo com a CONAB, na publicação da Série Histórica das Safras (CONAB, 2022b), observa-se que na última década as maiores áreas plantadas de canola no Brasil foram entre os anos de 2010 e 2017. O ano de 2019 é destacado pela baixa área plantada, sendo o segundo menor número desde 2009. Contudo, após esse ano, a curva tem apresentado um aumento crescente, com uma estimativa de 42.700 ha de área plantada de canola no país em 2022, como é possível observar na figura 2.2.

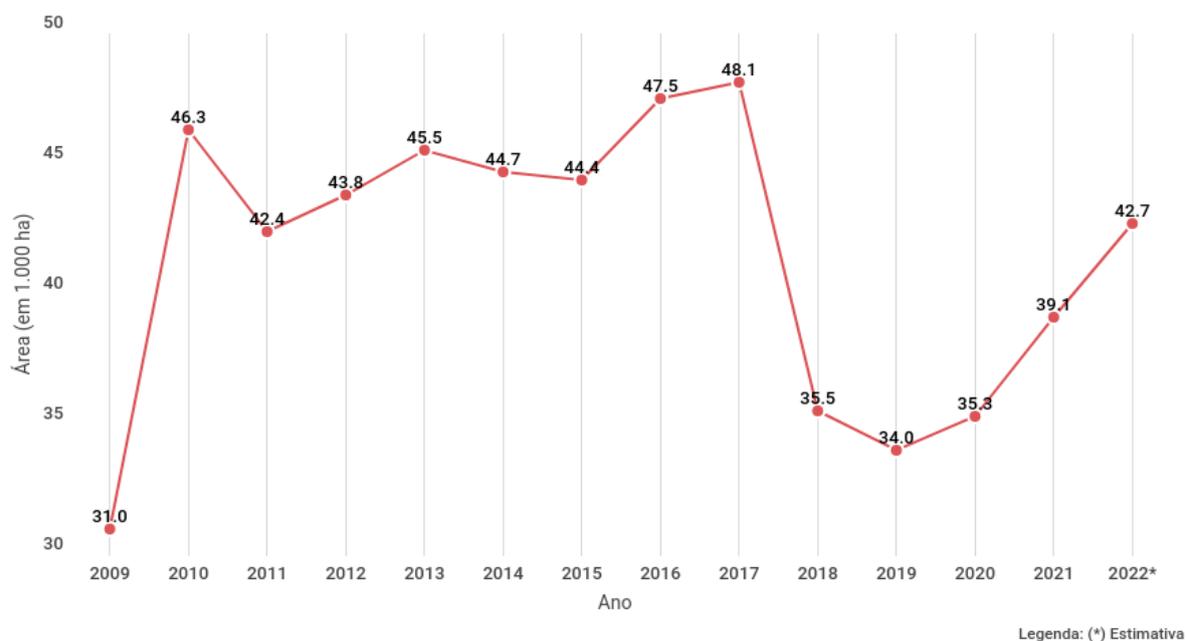


Figura 2.2 – Área plantada de canola no Brasil.

Ainda sobre esse levantamento recente, publicado em junho de 2022 e em destaque na figura 2.3, a produtividade de canola teve seu ápice no ano de 2016 com 1.514 kg/ha. Para o ano de 2022, a estimativa é que a produtividade desse grão seja de 1.405 kg/ha, números próximos ao melhor cenário observado nos últimos anos.

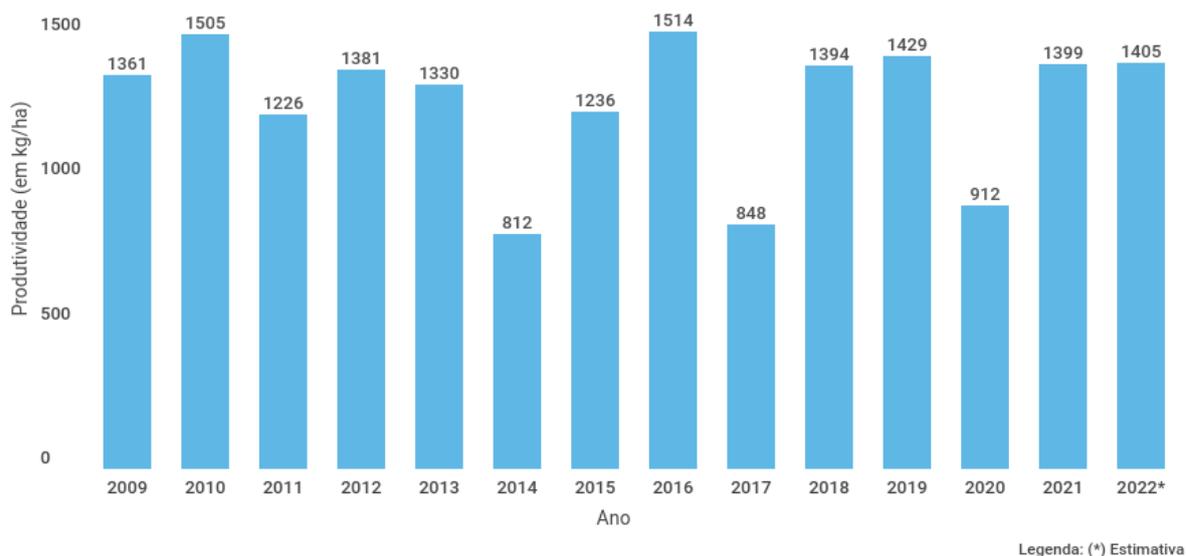


Figura 2.3 – Produtividade de canola no Brasil.

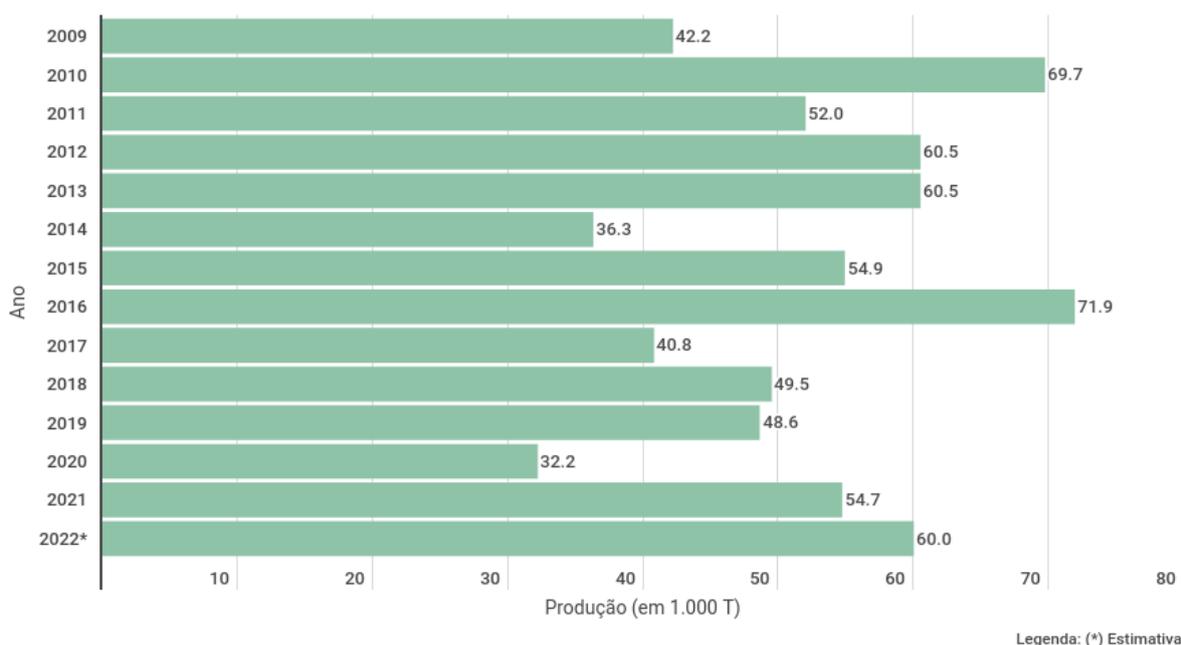


Figura 2.4 – Produção de canola no Brasil.

A taxa de produtividade pode ser interpretada como a eficiência da produção de determinado produto, logo para o ano de 2016, temos também o maior valor observado de produção de canola no Brasil desde 2009. A projeção para o ano de 2022 é de aumento, estima-se que a produção chegará à 60.000 toneladas, conforme é apresentado na figura 2.4.

Quanto a produção de óleo, de acordo com os dados divulgados pela ABIOVE (Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais) referente ao ano de 2020, a capacidade instalada da indústria brasileira é formada por 62 empresas e 121 unidades industriais de processamento. Para os processos de refino e envase, o país possui 30 empresas e 59 unidades industriais (ABIOVE, 2020).

Na figura 2.5 é possível observar o histórico de evolução da capacidade instalada da indústria de óleos vegetais em âmbito nacional. As informações englobam os três principais estágios da produção: o processamento, refino e envase (ABIOVE, 2020).

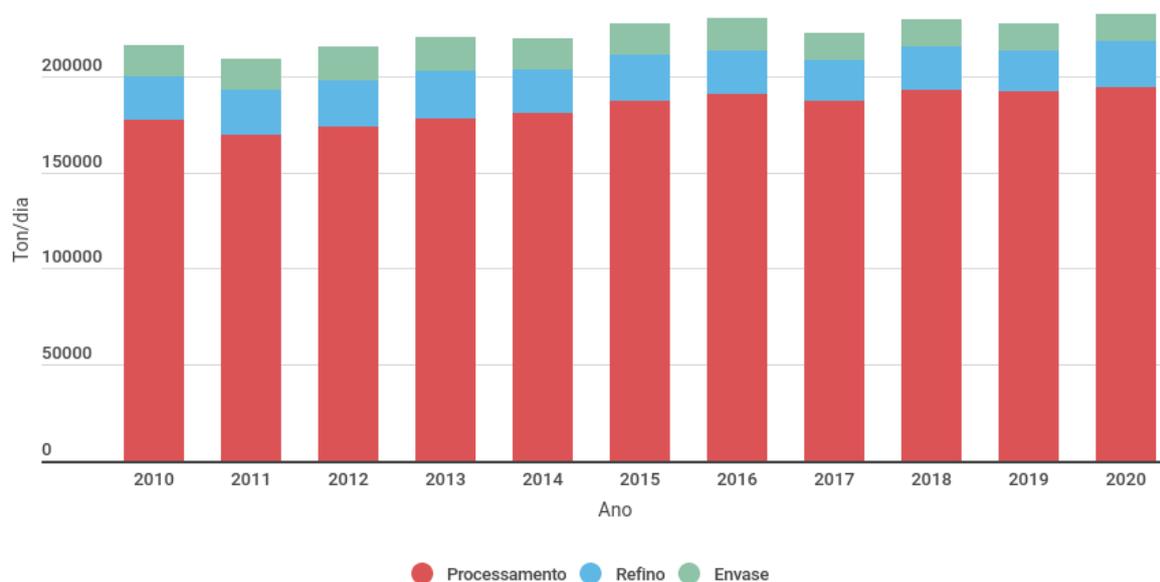


Figura 2.5 – Evolução da capacidade instalada da indústria de óleos vegetais brasileira.

Ainda segundo a ABIOVE e conforme está destacado na Tabela 2, a região com a maior capacidade instalada de produção agroindustrial de óleo vegetal no Brasil é o Centro-Oeste. Seguido da região Sul, que se destaca principalmente em processamento e a região Sudeste, a segunda maior em refino.

Tabela 2 – Capacidade instalada da indústria brasileira de óleos vegetais por região (ABIOVE, 2020).

Região	PROCESSAMENTO		REFINO		ENVASE	
	ton/dia	%	ton/dia	%	ton/dia	%
Centro-Oeste	83.968	43,2	8.494	36,0	6.701	45,9
Sul	68.666	35,3	5.247	22,3	3.248	22,2
Sudeste	23.566	12,1	7.338	31,1	3.153	21,6
Nordeste	12.903	6,6	2.496	10,6	1.510	10,3
Norte	5.250	2,7	0	0	0	0

De acordo com Guiducci et al. (2020), é possível observar uma certa coerência entre a localização das indústrias de processamento, refino e envase e a localização da matéria-prima. Um exemplo disso é a região Centro-Oeste, onde está localizada a maior

parte da produção nacional de grãos e apresenta uma significativa parcela das indústrias processadoras. Com destaque para os estados do Mato Grosso do Sul e Goiás, ambos com potencial para plantio de canola de acordo com o zoneamento agrícola.

Outro ponto de destaque é a capacidade da canola de se enquadrar como uma colheita de entressafra da soja, possibilitando um prologamento do período de processamento das unidades em funcionamento, podendo assim viabilizar uma maior competitividade das agroindústrias (GUIDUCCI et al., 2020).

2.3 Avaliação do Ciclo de Vida

Alinhada com os interesses de redução das emissões de gases de efeito estufa, a metodologia de avaliação do ciclo de vida (ACV) se apresenta como uma ferramenta de abordagem sistemática dos aspectos ambientais relacionados à cadeia de suprimentos de um produto, possibilitando uma visão mais transversal e apoiando a tomada de decisão para gestão mais efetiva do processo produtivo (SILVEIRA et al., 2017).

As metodologias baseadas na ACV podem ajudar as economias emergentes e os países desenvolvidos a avançar para economias circulares sustentáveis, onde a circularidade fornece eficiência no manejo de recursos sem redirecionamento (PEÑA et al., 2021).

Quanto a utilização dessa ferramenta para análises de ACV aplicadas à biocombustíveis, a publicação de Zhang et al. (2020), afirma que a avaliação ambiental e do ciclo de vida delineiam importantes direções de pesquisa para melhorar a produção e o uso de biocombustíveis para a aviação. No trabalho de Taheripour, Sajedinia e Karami (2022), a metodologia foi implementada para analisar os impactos ambientais na produção de determinados biocombustíveis de aviação produzidos a partir de oleaginosas. Com aplicação direta em biocombustíveis de canola, os trabalhos de Gupta et al. (2022) e Ukaew et al. (2016) são contribuições relevantes para o tema.

2.3.1 Conceito

A Avaliação do Ciclo de Vida é uma técnica aplicada para analisar aspectos ambientais e impactos potenciais associados a um determinado produto. As normas internacionais ISO 14040 e ISO 14044, normatizam essa ferramenta e definem os seus princípios, estrutura, requisitos e orientações. Juntas fornecem uma base metodológica para a condução de estudos de ACV.

Em linhas gerais essa metodologia consiste na compilação de um inventário de entradas e saídas pertinentes de um sistema de produto; na avaliação dos impactos ambientais potenciais associados a essas entradas e saídas; e na interpretação dos resultados das fases de análise de inventário e de avaliação de impactos em relação aos objetivos dos estudos (ABNT, 2009a).

Ainda segundo as normas da ACV, os aspectos ambientais e os impactos potenciais são estudados ao longo de toda a vida do produto, desde a aquisição das matérias-primas, produção, uso, tratamento pós-uso, reciclagem até a disposição final (ABNT, 2009a; ABNT, 2009b). Aspectos ecológicos como mudanças climáticas, uso de água potável, ocupação e mudança do uso da terra, eutrofização aquática, impactos tóxicos e uso de recursos não renováveis estão inclusos na avaliação (SLAVINSKY et al., 2022).

Essa ferramenta pode ser aplicada em uma abordagem estruturada para identificar pontos críticos ao longo das cadeias de suprimentos de produtos (SLAVINSKY et al., 2022). E também para auxiliar na identificação de oportunidades para melhorar os aspectos ambientais dos produtos ao longo do seu ciclo de vida; na tomada de decisões na indústria, organizações governamentais ou não-governamentais; e na seleção de indicadores pertinentes de desempenho ambiental (ABNT, 2009a).

2.3.2 Estrutura

De acordo com a ISO 14040 e ISO 14044, a ACV deve incluir quatro fases: I) a definição de objetivo e escopo; II) análise de inventário; III) avaliação de impactos; e IV) interpretação de resultado (ABNT, 2009a; ABNT, 2009b).

Como demonstrado na figura 2.6, a metodologia não possui uma estrutura rígida, as etapas se relacionam de maneira interativa umas com as outras e todas elas interagem a qualquer momento com a fase de interpretação.

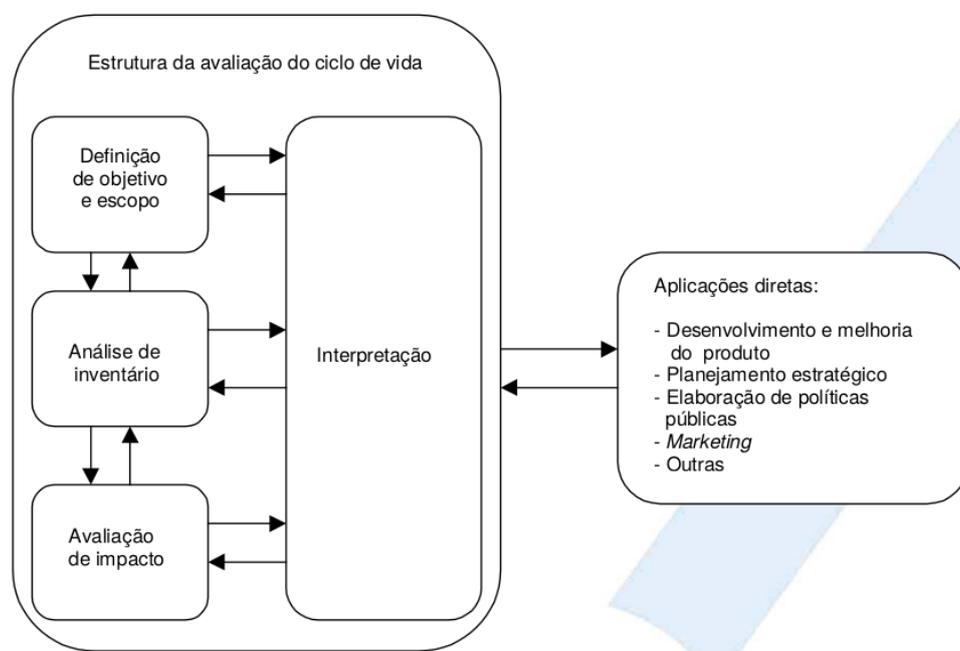


Figura 2.6 – Fases de uma ACV (ABNT, 2009a).

A partir da realização dessas etapas, é alcançada uma avaliação do ciclo de vida de um determinado produto. E por fim, temos alguns exemplos de aplicações diretas dessa

ferramenta como o desenvolvimento e melhoria de um produto, planejamento estratégico, elaboração de políticas públicas, marketing verde para empresas, entre outras.

2.3.2.1 Definição de Objetivo e Escopo

O objetivo e escopo de uma ACV devem ser os mais coerentes e alinhados possíveis com a aplicação pretendida e também devem ser definidos de forma nítida (ABNT, 2009a). Devido à natureza iterativa da ACV, é possível ajustar o escopo durante o estudo (ABNT, 2009b).

A definição do objetivo tem como função primordial informar inequivocamente a aplicação pretendida, as razões para realização do estudo e o público para quem se pretende comunicar os resultados da avaliação (ABNT, 2009a).

Para a definição do escopo devem ser considerados e descritos os seguintes itens (ABNT, 2009a):

- As funções do sistema de produto ou, no caso de estudos comparativos, dos sistemas;
- A unidade funcional;
- O sistema de produto a ser estudado;
- As fronteiras do sistema de produto;
- Procedimentos de alocação;
- Tipos de impacto e metodologia de avaliação de impacto e interpretação subsequente a ser usada;
- Requisitos dos dados;
- Suposições;
- Limitações;
- Requisitos da qualidade dos dados iniciais;
- Tipo de análise crítica, se aplicável; e
- Tipo e formato do relatório requerido para o estudo.

A unidade funcional está vinculada à finalidade do sistema geral sob investigação (OYEKALE; EMAGBETERE, 2022). Definida pela norma como desempenho quantificado de um sistema de produto para uso como uma unidade de referência em um estudo de avaliação do ciclo de vida (ABNT, 2009a).

As fronteiras são definidas para representar o escopo do estágio/tempo de produção que está sendo considerado no estudo. E segundo [Oyekale e Emagbetere \(2022\)](#), podem ser enquadradas como:

- Berço-ao-túmulo (*cradle-to-grave*): da extração da matéria-prima para a construção de cada componente do sistema até o descarte dos componentes do sistema no final da vida útil;
- Berço-ao-portão (*cradle-to-gate*): extração da matéria-prima até a fabricação do produto, imediatamente antes do uso do produto;
- Portão-ao-túmulo (*gate-to-grave*): desde a fabricação do produto até o descarte no final da vida útil; e
- Berço-ao-berço (*cradle-to-cradle*): da extração da matéria-prima até o fim da vida útil, quando os produtos residuais são reciclados para formar matérias-primas para o mesmo ou outros produtos.

Quanto aos dados a serem selecionados para uma ACV, é possível observar que possuem um relação direta com o objetivo e escopo do estudo. Podem ser coletados nos locais de produção associados aos processos elementares dentro da fronteira do sistema, ou podem ser obtidos ou calculados a partir de outras fontes. Na prática, todos os dados podem incluir uma mistura de dados medidos, calculados ou estimados ([ABNT, 2009b](#)).

Para sistemas multifuncionais, as entradas e saídas devem ser alocadas aos diferentes produtos de acordo com critérios definidos de forma clara, que devem ser documentados e explicados em conjunto com o procedimento de alocação ([ABNT, 2009a](#)).

2.3.2.2 Inventário do Ciclo de Vida (ICV)

Na etapa de análise do inventário do ciclo de vida (ICV), todos os fluxos de materiais e energia pertinentes de um sistema de produto são identificados e quantificados em uma base de entrada-saída ([OYEKALE; EMAGBETERE, 2022](#)). O fluxo de materiais e energia podem incluir o uso de recursos e liberações no ar, na água e no solo associados com o sistema ([ABNT, 2009a](#)).

Podem ser feitas interpretações destes dados, dependendo dos objetivos e do escopo da ACV. Estes dados também constituem a entrada para a avaliação do impacto do ciclo de vida ([ABNT, 2009a](#)). De acordo com [Oyekale e Emagbetere \(2022\)](#), essa é a etapa mais importante e mais trabalhosa em qualquer estudo de ACV e requer um vasto conhecimento de todos os processos envolvidos no sistema de produção.

A ISO 14040, trás um destaque sobre a importância do processo de condução de uma análise do inventário ser iterativo. Pois na medida em que os dados são coletados e é conhecido mais sobre o sistema, podem ser identificadas questões que requeiram revisões

de objetivo ou do escopo do estudo. Na figura 2.7 são apresentados os procedimentos simplificados para análise de inventário.

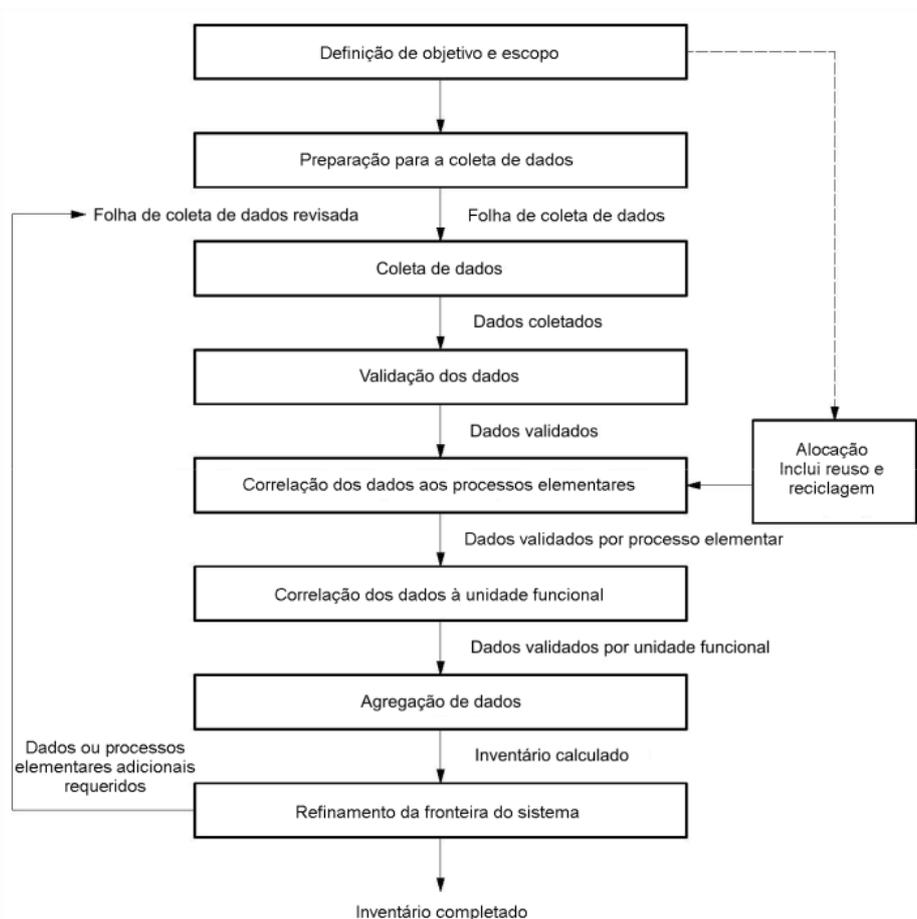


Figura 2.7 – Procedimentos simplificados para análise de inventário (ABNT, 2009b).

Para cada unidade de processo que esteja incluída dentro das fronteiras do sistema, devem ser coletados os dados qualitativos e quantitativos para inclusão no inventário. Na norma são feitas algumas considerações significativas de cálculo, como os procedimentos de alocação que são necessários para trabalhos com sistemas que envolvem produtos múltiplos. Os fluxos de materiais e de energia, assim como as liberações ao ambiente associadas, devem ser alocados aos diferentes produtos (ABNT, 2009a).

Quanto ao cálculo do fluxo de energia, deve ser levado em consideração os diferentes combustíveis e fontes de eletricidade usados, a eficiência de conversão e distribuição do fluxo de energia, assim como as entradas e saídas associadas com a geração e o uso daquele fluxo de energia (ABNT, 2009a).

2.3.2.3 Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV)

A fase de avaliação do impacto da ACV é dirigida à avaliação da significância de impactos ambientais potenciais, usando os resultados da análise de inventário do ciclo de

vida. Em geral, este processo envolve a associação de dados de inventário com impactos ambientais específicos e a tentativa de compreender estes impactos (ABNT, 2009a).

Nessa fase, considerada a terceira etapa da ACV, são aplicados alguns métodos para quantificar os impactos que o fluxo de materiais e energia identificados teriam no meio ambiente. A maioria dos softwares padrão contém uma ampla gama de métodos usados para avaliação de impacto, e vários outros novos métodos estão sendo desenvolvidos na literatura (OYEKALE; EMAGBETERE, 2022).

2.3.2.4 Interpretação

Os resultados de impacto são analisados na etapa quatro para interpretar os efeitos reais sobre o meio ambiente e decidir sobre as ações a serem tomadas. As principais estratégias frequentemente empregadas nesta etapa são subjetivas, dependendo da natureza do sistema em análise e do objetivo do estudo (OYEKALE; EMAGBETERE, 2022).

As constatações desta interpretação podem tomar a forma de conclusões e recomendações para os tomadores de decisão, de forma consistente com o objetivo e o escopo do estudo. A fase de interpretação pode envolver o processo iterativo de análise crítica e revisão do escopo da ACV, assim como da natureza e da qualidade dos dados coletados de forma consistente com o objetivo definido (ABNT, 2009a).

2.3.3 Revisão Bibliométrica

A revisão bibliométrica é um conjunto de métodos utilizados para estudar, analisar e mensurar produções científicas, principalmente quando se tem grandes quantidade de dados. Ela é usada na avaliação quantitativa de produção acadêmica, verificando o impacto de produção em determinada área, bem como de seus principais pesquisadores e trabalhos (COBO et al., 2011).

À vista disso, essa metodologia foi aplicada à esse trabalho com o objetivo de fazer uma análise bibliométrica das produções científicas relacionadas à bioquerosene de canola entre os anos de 1984 a 2019, com o auxílio do software *SciMAT* para analisar a evolução do tema medindo a continuidade das palavras-chave em períodos consecutivos e quantificando o campo de pesquisa por meio de uma análise de desempenho.

Os dados utilizados para a realização das análises foram obtidos por meio do *Scopus*, o maior banco de dados de resumos e citações da literatura com revisão por pares, apresenta um panorama geral da produção de pesquisas de todo o mundo nas áreas de ciência, tecnologia, medicina, ciências sociais e artes e humanidades e possui conteúdo de mais de 5.000 editoras.

Foi realizada uma pesquisa utilizando as palavras-chave: biomass; jet fuel; aviation fuel. Com a seguinte combinação: (TITLE-ABS-KEY (biomass) AND TITLE-ABS-

KEY ("jet fuel"OR "aviation fuel")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE, "cp") OR LIMIT-TO (DOCTYPE, "re")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE, "English")), foram localizados 407 documentos.

Os documentos foram organizados em quatro períodos. Na figura 2.8 é possível observar como a produção científica sobre o tema foi crescendo ao longo dos anos.

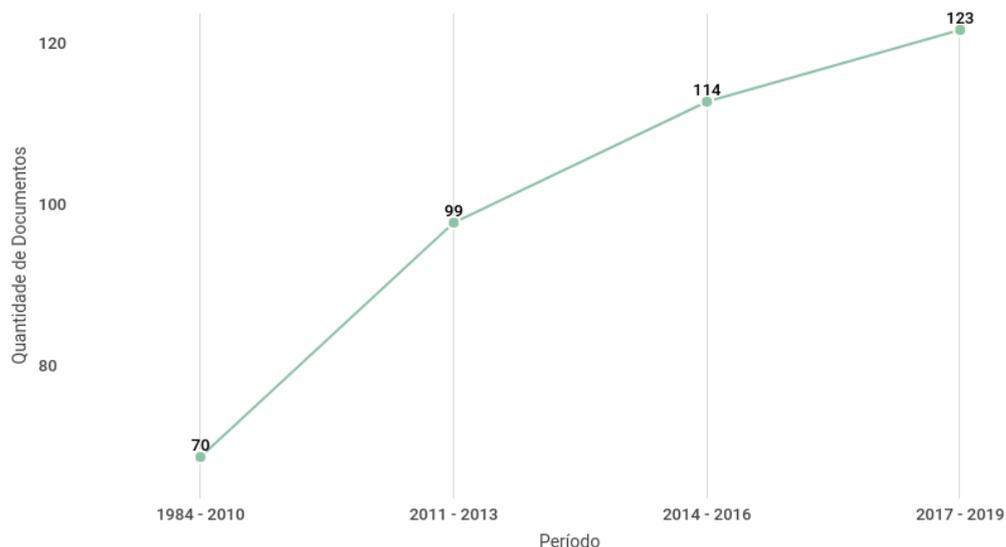


Figura 2.8 – Evolução da produção científica sobre o tema.

O mapa de evolução, apresentado na figura 2.9, auxilia na compreensão de como se deu a evolução temática da produção de bioquerosene de canola. Nesse caso foi escolhido o mapeamento de documentos principais com base no número de documentos. E durante os períodos analisados podemos observar que o primeiro é o que possui menos documentos por tema, reflexo da pouca produção de documentos científicos durante os primeiros anos.

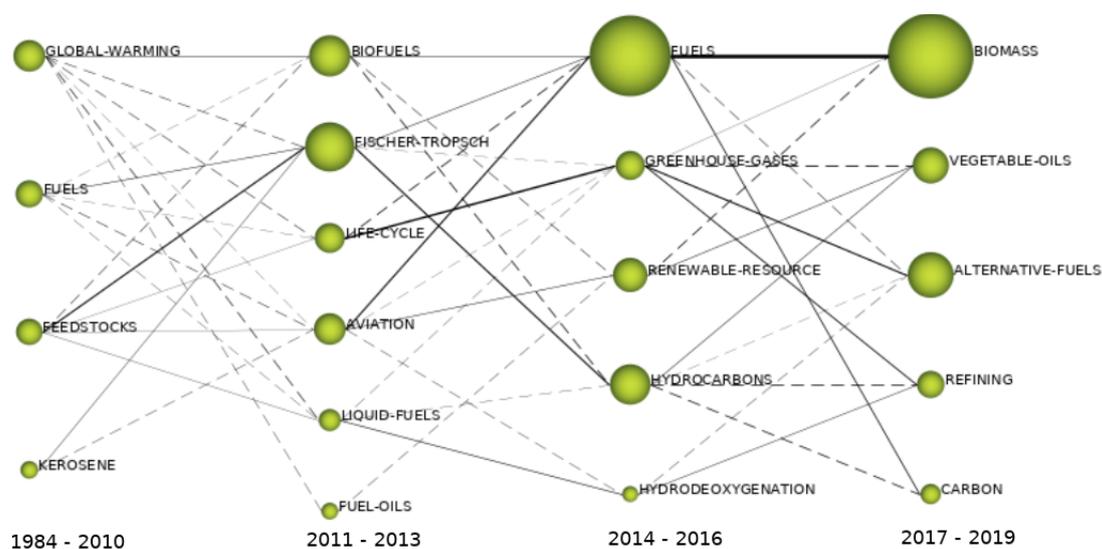


Figura 2.9 – Mapa de evolução.

No segundo período as produções científicas aumentaram, contudo nenhum tema do primeiro período permaneceu nessa migração temática, os *clusters* com maiores produções de documentos foram *BIOFUELS* e *FISCHER-TROPSCH*. Já nos terceiro e quarto períodos a produção científica aumentou consideravelmente, o que é justificado pelo aumento do número de publicações a partir do ano 2011, principalmente nos temas *FUELS* e *BIOMASS*.

Quanto a evolução dos temas, existem rotas específicas interessantes a esse trabalho, uma delas é a evolução do tema *KEROSENE* para *FISCHER-TROPSCH* que por sua vez evoluiu para *FUELS* que de maneira mais sólida evoluiu para *BIOMASS*. O processo químico *Fischer-Tropsch* é responsável pela produção de hidrocarbonetos líquidos, entre eles o querosene e é significativa para a compreensão dos tópicos abordados nesse estudo a evolução desses temas para *fuels* e *biomass* pois representa uma preocupação maior desse campo científico em estabelecer tecnologias de produção de querosene a partir de biomassa.

Outra evolução importante se deu com os temas *FEEDSTOCKS* → *AVIATION* → *RENEWABLE-RESOURCE* → *VEGETABLE-OILS*, no contexto dessa pesquisa essa evolução apresenta a criação de um espaço dentro do setor de aviação para a utilização de matérias-primas como os óleos vegetais, grupo o qual pertence a canola. Dessa maneira podemos observar a ligação entre fontes renováveis, combustíveis e aviação.

Vale ressaltar também a evolução dos seguintes temas *FEEDSTOCKS* → *LIFE-CYCLE* → *GREENHOUSE-GASES* → *ALTERNATIVE-FUELS*, associando esse tema ao contexto da área de pesquisa em questão é compreensível o porquê desse resultado. A análise do ciclo de vida de processos é uma das metodologias utilizadas para a quantificação da emissão de gases de efeito estufa para a atmosfera, conectado ao tema combustível têm-se observado uma intensificação em pesquisa e uso de combustíveis alternativos e tal fato tem como base estudos de ACV desde a produção da matéria-prima até a geração de energia.

Retratando o atual cenário do setor de transporte aéreo temos a evolução dos temas *GLOBAL-WARMING* → *BIOFUELS* → *FUELS* → *BIOMASS*, devido a emissão de gases efeito estufa que contribuem diretamente para o aquecimento global, atualmente esse setor está a procura de uma solução e para isso têm investido recursos em pesquisa e desenvolvimento de combustíveis produzidos a partir de biomassa, assim os biocombustíveis estão conquistando cada vez mais espaço na área de aviação.

Quanto a localização geográfica das publicações, na figura 2.10 são apresentados os países que possuem mais publicações relacionadas ao tema em questão, podemos observar em destaque os Estados Unidos com 211 documentos, seguido da China que possui um número de publicações expressivo comparado aos outros países, com 57 documentos, em terceiro temos o Reino Unido com 19 documentos e o Brasil se encontra em sexto na colocação com 11 documentos publicados, empatado com a Alemanha e Holanda.

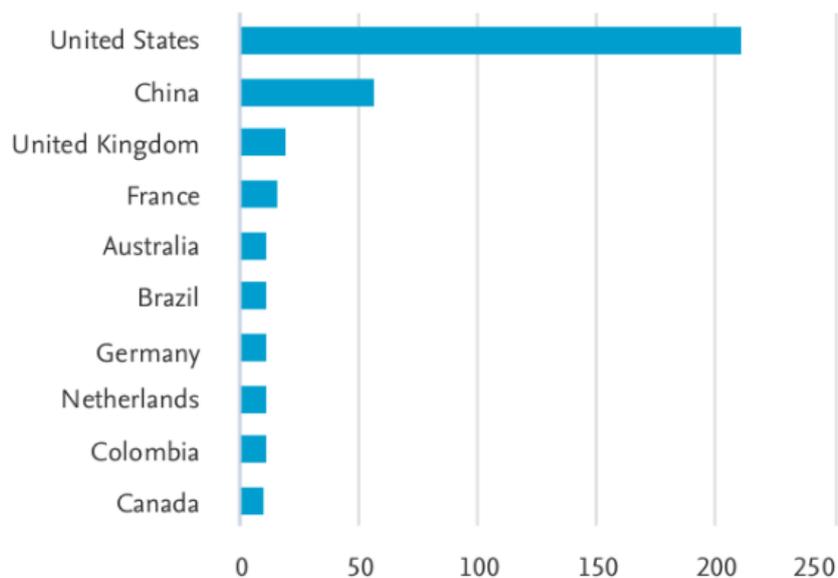


Figura 2.10 – Países com mais publicações relacionadas ao tema.

Além dos países que mais possuem publicações, temos também as instituições que mais publicam sobre o tema em escala mundial, conforme é apresentado na figura 2.11.

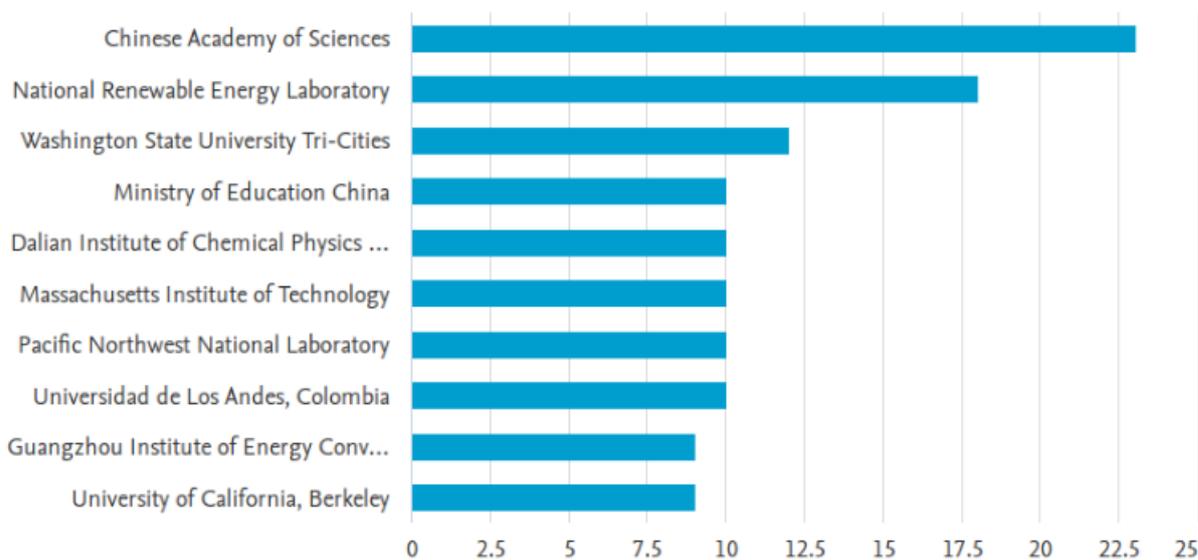


Figura 2.11 – Instituições com mais publicações relacionadas ao tema.

É possível observar que a Chinese Academy of Sciences é a instituição em destaque na produção de pesquisas com 23 documentos publicados, em seguida temos o National Renewable Energy Laboratory com 18 documentos, e uma das principais instituições norte americanas, o Massachusetts Institute of Technology se apresenta na sexta colocação com 10 documentos. Quanto as instituições brasileiras, temos a Universidade Estadual

de Campinas com 3 publicações, seguida da Universidade Federal do Rio de Janeiro e do Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais com duas publicações cada.

3 Estudo de Caso

Esse capítulo é focado na análise de um sistema de produção de bioquerosene de óleo de canola, realizada por meio do estudo de um modelo tecnológico. Que por sua vez, foi elaborado a partir do levantamento de dados da produção do óleo e processamento do biocombustível. Aplicando o conceito de Análise do Ciclo de Vida, foi realizada uma caracterização e quantificação de fluxos energéticos e materiais desse modelo, e suas interfaces com o meio ambiente.

3.1 Objetivos

A Avaliação do Ciclo de Vida tem por objetivo avaliar o desempenho ambiental do bioquerosene produzido a partir de óleo de canola. Para tal foi elaborado um modelo de produção utilizando dados secundários da obtenção do óleo da canola, desde a plantação do grão até o processamento final.

Os dados foram agrupados e organizados em duas fases, a fase agrícola e a fase industrial. A primeira fase abrange as etapas de correção do solo, semeadura, adubação, manejo e colheita. Já a segunda fase abrange o recebimento do grão, armazenagem, prensagem, extração, degomagem do óleo e produção do farelo.

Foi incluído no modelo uma rota específica de conversão para bioquerosene a partir de óleo vegetal e sementes oleaginosas, a HEFA, onde o óleo extraído é submetido a uma etapa de hidrotreatamento a altas temperaturas na presença de hidrogênio e catalisador. E em posse dessas informações, para avaliar com precisão os impactos do ciclo de vida desse biocombustível no ambiente, foram identificados os fluxos elementares de entradas e saídas ao longo do processo de produção.

Após esse mapeamento, o processo de produção do biocombustível foi modelado com o auxílio do *software* openLCA. Onde foram analisados os indicadores de desempenho ambiental e determinadas as etapas que são consideradas pontos críticos que mais contribuem para os impactos ambientais.

3.2 Escopo

3.2.1 Sistema de Produto

O sistema de produto é composto pelas etapas de cultivo e colheita do grão de canola, extração do óleo e processo de conversão do óleo em biocombustível de aviação. A seguir, na figura 3.1, essas etapas estão representadas em um modelo tecnológico genérico do sistema de produção.

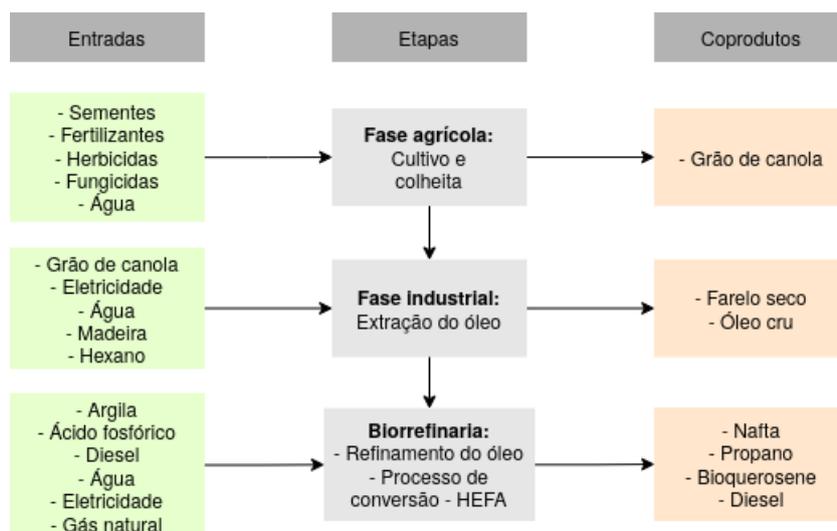


Figura 3.1 – Modelo tecnológico genérico do sistema de produção.

Para a fase agrícola, que engloba o cultivo e colheita do grão de canola, foram analisadas as entradas de insumos para a realização dessa etapa. O processo compreende a correção do solo, a semeadura, a adubação, o manejo fitossanitário e a colheita.

Já a fase industrial, referente a extração do óleo, se inicia com entrada do grão para armazenagem na fábrica até a obtenção dos coprodutos: farelo seco e óleo cru. Para a realização desse processo temos a utilização de fontes de energia como energia elétrica e madeira, também água e o solvente químico hexano.

A etapa final do sistema analisado é o processo de conversão do óleo em biocombustível que ocorre na biorrefinaria. A rota tecnológica mais adequada à esse tipo de matéria prima é a *Oil-to-jet*, com o processo de conversão conhecido como hidroprocessamento de ésteres e ácidos graxos (HEFA), caracterizado também como uma rota tecnológica química.

3.2.2 Fronteira do Sistema de Produto

Os limites do sistema incluem a produção agrícola de canola, passando pela unidade industrial responsável pela extração de óleo vegetal cru e produção de farelo seco, até

a unidade de biorrefinamento para a obtenção do bioquerosene de canola. Dessa forma, esse estudo é caracterizado como uma análise do berço-ao-portão (*cradle-to-gate*), onde os limites do sistema compreendem desde extração da matéria-prima até a fabricação do produto, imediatamente antes do seu uso.

3.2.3 Unidade Funcional

A unidade funcional adotada para esta pesquisa é de 0,164 kg de bioquerosene de canola. Essa unidade serviu como fator para o cálculo dos dados de entrada e saída do sistema dos principais processos unitários abordados.

3.2.4 Procedimentos de Alocação

Analisando a fase industrial e considerando que se trata de um sistema de produção que possui dois coprodutos, o óleo cru e o farelo seco, para os fluxos relacionados aos processos da fase industrial até a extração de óleo, optou-se por uma alocação proporcional às massas destes produtos. Os fluxos associados ao processo de produção do farelo seco, incluindo a secagem e a moagem, foram inteiramente alocados para o produto farelo seco de canola.

Para a etapa de biorrefinamento que possui como coprodutos quatro substâncias, sendo elas a nafta, propano, bioquerosene e diesel, optou-se também por uma alocação proporcional às massas destes produtos.

3.2.5 Metodologia de Avaliação

Foram utilizados dois métodos para avaliação dos indicadores ambientais dos processos analisados neste trabalho, o ILCD 2011 Midpoint+ e o CML-IA baseline.

O método ILCD (*International Reference Life Cycle Data System*) é resultado de um projeto conduzido pelo *Joint Research Center* (JRC) da Comissão Europeia que analisou diversas metodologias de avaliação de impacto do ciclo de vida para alcançar um consenso sobre o método recomendado para cada tema ambiental (GREENDELTA, 2016). Uma lista com métodos pré-selecionados foi obtida e foram definidas recomendações para as categorias (MONTEIRO, 2018).

As categorias consideradas pelo método ILCD 2011 midpoint+ são (European Commission, 2012):

- Mudanças climáticas;
- Depleção da camada de ozônio;

- Formação fotoquímica de ozônio;
- Toxicidade humana (efeitos cancerígenos e não cancerígenos);
- Material particulado;
- Radiação ionizante;
- Oxidação fotoquímica;
- Acidificação;
- Eutrofização (terrestre, marina e de água doce);
- Ecotoxicidade em água doce;
- Ocupação do solo;
- Depleção do recurso da água; e
- Depleção de recursos minerais, fósseis e renováveis.

O método CML-IA foi criado pela Universidade de Leiden na Holanda em 2001 e contém mais de 1.700 fluxos diferentes, é um banco de dados que contém fatores de caracterização para avaliação de impacto do ciclo de vida ([UNIVERSITY, 2022](#)). O método é dividido em *baseline* e *non-baseline*, foi escolhida para análise a *baseline* pois possui as categorias de impacto mais comuns usadas na ACV. A tabela a seguir mostra as categorias que esse método contém ([GREENDELTA, 2016](#)):

- Depleção abiótica;
- Depleção abiótica (combustíveis fósseis);
- Acidificação;
- Eutrofização;
- Ecotoxicidade em água doce;
- Aquecimento global;
- Toxicidade humana;
- Ecotoxicidade marinha;
- Depleção da camada de ozônio;
- Oxidação fotoquímica; e
- Ecotoxicidade terrestre.

3.2.6 Requisitos da Qualidade de Dados

Os processos primários da fase agrícola foram desenhados a partir de dados secundários obtidos por meio da literatura. Os dois trabalhos utilizados como base foram o “*Life Cycle Inventories of Agriculture, Forestry and Animal Husbandry - Brazil*” de [Folegatti-Matsuura e Picoli \(2018\)](#) e o “Levantamento de tecnologias empregadas no cultivo de canola pelos produtores do Rio Grande do Sul, Paraná e Minas Gerais” de [Mori et al. \(2019\)](#). Foram também utilizadas informações publicadas por [Marsaro Junior et al. \(2019\)](#) no trabalho “Caracterização do manejo de insetos-praga da canola adotado por produtores no Rio Grande do Sul e no Paraná”.

Para a fase industrial, os dados foram obtidos diretamente de uma empresa de processamento de óleo de canola em parceria com a Embrapa Agroenergia. A partir das informações cedidas, que contemplavam todas as etapas do processando desde a chegada do grão até a obtenção do óleo cru e farelo seco, foi possível identificar e elaborar os processos primários e seus fluxos de entrada e saída.

Com base nas produções científicas encontradas na literatura foram coletados dados secundários para os processos da etapa de biorrefinaria, que abrange o refino do óleo cru de canola e o processo de conversão desse material em bioquerosene. Foram utilizados como principais referências os trabalhos “*Holistic approach for sustainability enhancing of hydrotreated aviation biofuels, through life cycle assessment: A Brazilian case study*” de [Vásquez et al. \(2019\)](#) e “*A Techno-economic and Environmental Assessment of Hydroprocessed Renewable Distillate Fuels*” de [Pearlson \(2011\)](#).

Em complemento à todas essas informações, foi utilizada a base de dados *Ecoinvent* versão 3.7, que é um banco de dados de Inventário do Ciclo de Vida que suporta diferentes tipos de avaliações de sustentabilidade e permite uma compreensão mais profunda dos impactos ambientais de produtos e serviços. Os conjuntos de dados contêm informações sobre o processo industrial ou agrícola que modelam, medindo os recursos naturais retirados do meio ambiente, as emissões liberadas para a água, solo e ar, os produtos demandados de outros processos e os produtos, co-produtos e resíduos produzidos ([ECOINVENT, 2022](#)).

3.3 Inventário de Ciclo de Vida

Para o desenvolvimento desta pesquisa, foi realizado um estudo de Inventário de Ciclo de Vida (ICV). Fase da ACV que compreende a compilação e a quantificação de entradas e saídas, para um determinado sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida, ou seja, envolve a coleta de dados e os procedimentos de cálculo ([ABNT, 2009a](#)).

A coleta de dados é a etapa em que as entradas de energia e matérias-primas, produtos, coprodutos, resíduos, emissões atmosféricas, as descargas na água e no solo e outros aspectos ambientais serão identificados ([ABNT, 2009a](#)). E os procedimentos de

cálculo visam quantificar as entradas e saídas relevantes da sistema de produção. Além disso, a validação dos dados coletados, correlação dos dados com os processos elementares e o fluxos de referência e a unidade funcional, são itens que devem ser considerados na ICV (ABNT, 2009b).

A coleta de dados para análise da fase agrícola desta produção de grãos foi realizada por meio de consulta a literatura. O principal guia de trabalho desta pesquisa foi o “Levantamento das tecnologias utilizadas no cultivo da canola por produtores do Rio Grande do Sul, Paraná e Minas Gerais” (MORI et al., 2019), publicação da Embrapa Trigo, entidade responsável por uma série de pesquisas envolvendo o cultivo de canola no Brasil. Foram extraídas informações quanto ao manejo, conservação e correção química do solo, semeadura, tratamento de sementes com agrotóxicos, fertilização, manejo fitossanitário, ervas daninhas, insetos-praga e doenças e, finalmente, sobre a colheita.

Para analisar a fase industrial, foram utilizadas informações sobre o processamento do óleo de canola fornecidas diretamente por uma empresa produtora de óleos vegetais para consumo humano. Foram incluídos dados sobre os processos relativos à recepção e armazenagem de grãos, preparação, extração, degomagem do óleo e produção de farelo. Desta forma, foi possível calcular os fluxos de entradas e saídas dos processos primários de ambas as fases agrícola e industrial da produção do óleo cru.

Quanto ao processo de refinamento do óleo cru e a produção do bioquerosene, as informações de inventário foram obtidas a partir da literatura. Com foco na tecnologia de conversão HEFA, a análise foi fundamentada nos trabalhos de Vásquez et al. (2019) e Pearlson (2011).

E com base em Folegatti-Matsuura e Picoli (2018), foram calculadas as emissões para o meio ambiente durante a fase agrícola. Somado a todas as informações coletadas, foi utilizado o *software* openLCA para modelagem de todo o processo produtivo. E aplicando os métodos ILCD 2011 Midpoint+ e CML-IA baseline foram avaliados os indicadores ambientais.

3.3.1 Fase Agrícola

A fase agrícola engloba todo o processo de produção do grão da canola, desde a plantação até a colheita. O primeiro processo é a correção do solo com aplicação de calcário e gesso. Após isso, o solo está pronto para receber as sementes na etapa de semeadura. Posteriormente, ocorre a aplicação de químicos, como fertilizantes, fungicidas, inseticidas e herbicidas, nas etapas de adubação de base e de cobertura.

Com exceção do fertilizante, essas substâncias também são aplicadas nas etapas de manejo fitossanitário e de plantas daninhas, onde também ocorre a entrada de água nos processos principais. E por fim, é realizada a colheita do grão de canola.

O processo secundário que é comum à todos os processos primários é denominado

de operações agrícolas. Que por sua vez inclui o consumo de diesel e maquinário agrícola para cada uma das atividades. No fluxograma apresentado na figura 3.2 são destacados os processos primários e secundários que compõem essa fase.

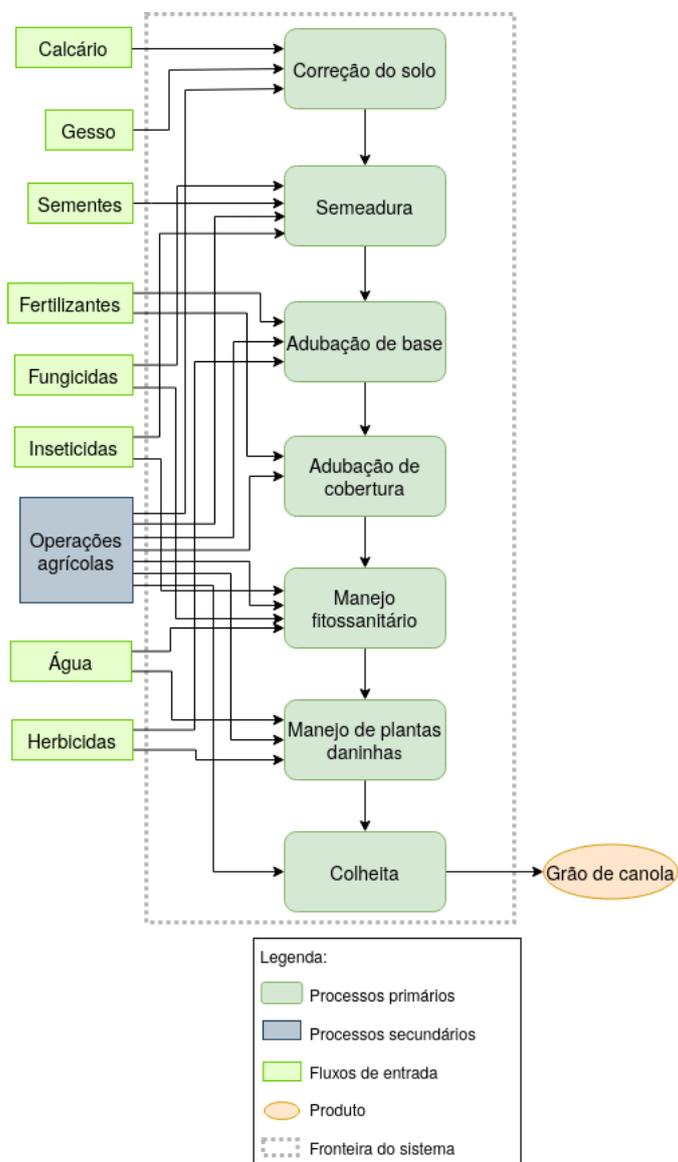


Figura 3.2 – Fase agrícola.

Foi considerada a produtividade média de 1.371 kg/ha, valor referente à produtividade média nacional, com base nas produções dos estados do Rio Grande do Sul e Paraná, segundo o “Acompanhamento da Safra Brasileira 2019/2020 - Primeiro levantamento” publicado pela CONAB (CONAB, 2019).

Para o inventário da produção do grão de canola foi considerado como produto final 1 kg de grãos de canola, com teor médio de umidade de 16%. A cobertura temporal para o processo é de 09/07/2019 a 30/09/2020 e cobertura tecnológica é considerada corrente, consistindo em cultivo como segunda safra, em plantio direto.

Foram consideradas algumas premissas estabelecidas nos inventários brasileiros

recentemente publicados por [Folegatti-Matsuura e Picoli \(2018\)](#) para produção de grãos e disponibilizados na base de dados Ecoinvent e também no SICV Brasil (Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida).

Outra consideração foi a abordagem de compartilhamento de alguns insumos, como por exemplo, a quantidade e aplicação do calcário/gesso em função da ocupação do solo, com base em recomendação de [Nemecek et al. \(2019\)](#). Esta abordagem leva em consideração o tempo de ocupação do solo pelas culturas e também pelo pousio, para cálculo dos insumos, sendo que o período de pousio é atribuído ao primeiro cultivo e não à safrinha ([CARDOSO et al., 2021](#)).

Na Tabela 3 apresentada a seguir estão organizados os fluxos de entradas consideradas para a fase agrícola com suas respectivas unidades e quantidades.

Tabela 3 – Fluxos de Entrada da Fase Agrícola para a produção de 1 kg de grão de canola.

Fluxos de Entrada	Unidade	Quantidade
Application of plant protection product, by field sprayer	ha	0,00292
Carbon dioxide, in air	kg	1,260036761
Combine harvesting	ha	0,00073
Energy, gross calorific value, in biomass	MJ	24,000246
Fertilising, by broadcaster	ha	0,00073
Glyphosate	kg	0,000700218
Gypsum, mineral	kg	0,012798
Inorganic phosphorus fertiliser, as P2O5	kg	0,03246
Inorganic potassium fertiliser, as K2O	kg	0,0278993
Lime	kg	0,17597
Limestone and gypsum application, by spreader	ha	8,02E-05
Occupation, annual crop, non-irrigated, intensive	m2*a	2,407
Packaging, for fertilisers	kg	0,4348
Packaging, for pesticides	kg	0,001218
Pesticide, unspecified	kg	5,47E-06
Pesticide, unspecified	kg	7E-05
Pesticide, unspecified	kg	2,18813E-07
Pesticide, unspecified	kg	1,4E-05
Planting with starter fertiliser, by no till planter	ha	0,000729
Rape seed, for sowing	kg	0,0021
Transformation, from annual crop, non-irrigated	m2	7,294
Transformation, to annual crop, non-irrigated	m2	7,294
Urea	kg	0,088003
Water, unspecified natural origin	m3	0,0005835

Para a consolidação e caracterização dos fluxos de entrada e saída da fase agrícola, foram levantados valores a partir da literatura como citado anteriormente, e foram também analisados processos de sistemas de produtos existentes na base de dados Ecoinvent para a produção de grãos, como por exemplo de soja.

Dessa forma foi possível associar o que tinha sido calculado com alguns fluxos já existentes e quando não disponível na base, os fluxos foram criados para que o sistema de

produto analisado fosse o mais completo possível.

Os fluxos de saída estão organizados e apresentados na Tabela 4, com suas respectivas unidades e quantidades.

Tabela 4 – Fluxos de Saída da Fase Agrícola.

Fluxos	Unidade	Quantidade
Ammonia	kg	0,007373398
Cadmium	kg	6,48427E-07
Cadmium, ion	kg	6,48427E-11
Canola grain	kg	1
Carbon dioxide, fossil	kg	0,815252804
Chromium	kg	8,11927E-06
Chromium, ion	kg	8,11927E-10
Clethodim	kg	7E-05
Copper	kg	7,11693E-06
Copper, ion	kg	7,11693E-10
Diflubenzuron	kg	1,4E-05
Dinitrogen monoxide	kg	0,002459574
Fipronil	kg	2,18813E-07
Glyphosate	kg	0,000700218
Lambda-cyhalothrin	kg	5,47E-06
Lead	kg	1,56115E-09
Lead	kg	1,56115E-05
Nickel	kg	8,15886E-06
Nickel, ion	kg	8,15886E-10
Nitrate	kg	0,133333541
Nitrogen oxides	kg	0,000517
Phosphorus	kg	3,4E-05
Water	m3	0,00058
Zinc	kg	3,41969E-05
Zinc, ion	kg	3,41969E-09

3.3.2 Fase Industrial

O levantamento foi realizado em uma indústria de processamento de óleo localizada no estado do Rio Grande do Sul do Brasil. A empresa é responsável pelo processamento de quase totalidade da produção nacional de canola, em média 40 mil toneladas, em estreita parceria com a ABRASCANOLA, Associação Brasileira dos Produtores de Canola (CARDOSO et al., 2021).

O objetivo principal era a obtenção de dados sobre a produção de óleo bruto e farelo seco de canola. O óleo bruto, que após ser submetido ao processo de degomagem e refino, tem potencial para atender a indústria de alimentos ou pode ser utilizado para produção de biocombustível, já o farelo pode atender a demanda por proteína.

Na figura 3.3 são apresentados os processos primários e secundários, as entradas e saídas e a fronteira do sistema analisado para a obtenção do farelo seco e óleo bruto como

produtos do processamento da canola.

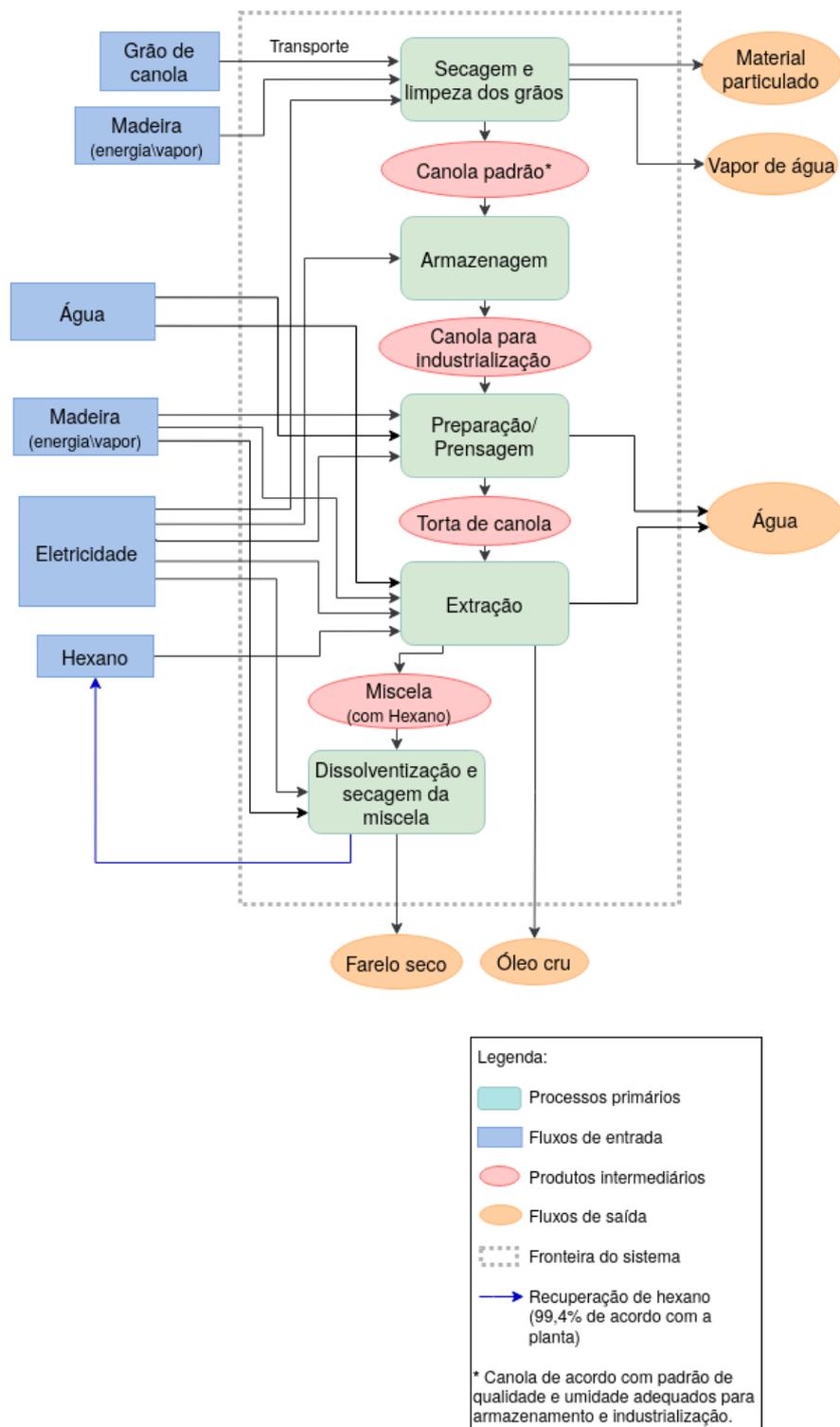


Figura 3.3 – Fase industrial

Os dados foram coletados em 2019 e de acordo com a empresa, para cada tonelada de canola foram produzidos 340 kg de óleo bruto e 600 kg de farelo seco (CARDOSO et al., 2021). O rendimento da produção de óleo foi considerado baixo, quando comparado a

média dos grãos colhidos no Brasil que apresentam em torno de 38% de óleo (TOMM et al., 2009).

As tecnologias que são utilizadas na produção de óleo vegetal não possuem uma variação significativa entre fontes de matérias-primas oleaginosas. Consistem basicamente no processo de prensagem dos grãos acompanhado de extração pelo uso de solvente. Contudo, a empresa analisada nesse caso faz uso da tecnologia corrente, porém foi constatado que trata-se de infraestrutura como mais de 20 anos, o que pode representar baixa eficiência para alguns dos processos empregados (CARDOSO et al., 2021).

A seguir são detalhadas cada uma das etapas que foram identificadas no processo de extração de obtenção do óleo e farelo. Todas essas informações foram organizadas e publicadas no “*Inventário de Ciclo de Vida da produção de canola e bioprodutos na Região Sul do Brasil: Uma contribuição ao SICV Brasil*” de (CARDOSO et al., 2021).

Transporte:

Foi considerada a distância média de 200 km para transporte dos grãos entre a região de produção e a unidade de beneficiamento. No banco de dados do Ecoinvent foi selecionado o caminhão Lorry 16-32 metric ton, Euro 3/ROW U para cálculo do fluxo.

Recebimento e limpeza dos grãos:

Nesta etapa os grãos são recebidos na usina em condições de campo (umidade e presença de impurezas), havendo gasto de energia elétrica para funcionamento de esteiras de transporte para o interior da usina. A limpeza dos grãos, visando a padronização para processamento, também requer energia elétrica. Nessa etapa é gerado material particulado, quantificado pela empresa parceira em 60 kg/ton de grãos.

Secagem:

O processo de secagem é realizado para que os grãos atinjam a umidade ideal para processamento. Os grãos são recebidos na usina com umidade média de 16% e são secos até atingir 8% de umidade, para serem armazenados e processados.

Nesta etapa é gerado vapor d’água expresso em litros de água, que é emitido para o ar, sendo calculado por meio da seguinte fórmula:

$$TGS \times \frac{UGs - UGc}{UGc - 1} \quad (3.1)$$

Onde:

- TGS é a taxa de grãos secos e representa a fração artificialmente seca, considerada 100%;
- UGs representa o teor de umidade dos grãos após secagem para armazenamento e processamento (8%);

- UGc representa o teor de umidade no grão recebido na usina (16%).

O resultado é a emissão de 0,09 litros de água/kg de canola.

Armazenagem:

Os grãos, de acordo com padrões de umidade e qualidade, são transportados por elevadores e esteiras, e armazenados em galpões com aeradores e exautores, operações que demandam energia elétrica.

Extração do óleo - prensagem:

Os grãos são transportados por elevadores e esteiras até as prensas mecânicas que realizam o processo. Segundo informações da usina, os grãos de canola são processados com casca, que consiste em uma particularidade quando comparado ao processamento da soja. Nesta etapa há consumo de energia elétrica e biomassa, sendo que o produto dessa etapa é a torta da canola, além de parte do óleo bruto extraído.

Extração do óleo - solvente:

Nesta etapa, além do consumo de energia elétrica e também de biomassa, há o uso de solvente (hexano). A partir do processo de dissolventização, o solvente é separado da micela e reutilizado, com pequena perda.

No entanto, dada a característica volátil deste material, assume-se que a mesma quantidade de solvente que entra no sistema é emitida como saída. Obtém-se nessa etapa o óleo bruto, sendo gerada a torta dissolvenizada que será processada para produção do farelo.

Produção do farelo:

O farelo dissolventizado é seco e moído, consumindo energia elétrica e vapor a partir de biomassa.

Devido ao fato do processo industrial possuir dois produtos finais, o óleo cru e o farelo seco, foi realizado o processo de alocação conforme foi descrito anteriormente. Dessa forma, os fluxos foram organizados em dois processos distintos, cada um considerando um produto.

Nas Tabelas 5 e 6 é possível observar os fluxos de entrada e saída do processo de produção do farelo seco na fase industrial.

Tabela 5 – Fluxos de Entrada da Fase Industrial - Farelo Seco.

Fluxos	Unidade	Quantidade
Canola grain	kg	1
Electricity, medium voltage	kWh	0,0501
Heat, central or small-scale, other than natural gas	MJ	4,65276
Hexane	kg	0,001554168
Water, cooling, unspecified natural origin	m3	0,00045936
Water, unspecified natural origin	m3	0,00019

Tabela 6 – Fluxos de Saída da Fase Industrial - Farelo Seco.

Fluxos	Unidade	Quantidade
BOD5, Biological Oxygen Demand	kg	1,45E-06
Canola meal	kg	0,6
COD, Chemical Oxygen Demand	kg	7,25618E-06
DOC, Dissolved Organic Carbon	kg	2,68747E-06
Hexane	kg	0,001554168
Nitrogen	kg	1,6E-07
Phosphorus	kg	4,53E-08
Suspended solids, unspecified	kg	0,0383
TOC, Total Organic Carbon	kg	2,68747E-06
Water	m3	0,0002615
Water	m3	0,000389244

Quanto ao óleo cru, nas Tabelas 7 e 8 estão organizados os fluxos de entrada e saída do processo de produção, respectivamente.

Tabela 7 – Fluxos de Entrada da Fase Industrial - Óleo Cru.

Fluxos	Unidade	Quantidade
Canola grain	kg	1
Electricity, medium voltage	kWh	0,0177181
Heat, central or small-scale, other than natural gas	MJ	2,04642
Hexane	kg	0,000881832
Water, cooling, unspecified natural origin	m3	0,00026064
Water, unspecified natural origin	m3	0,00011

Tabela 8 – Fluxos de Saída da Fase Industrial - Óleo Cru.

Fluxos	Unidade	Quantidade
BOD5, Biological Oxygen Demand	kg	8,23E-07
Canola oil, crude	kg	0,34
COD, Chemical Oxygen Demand	kg	4,12E-06
DOC, Dissolved Organic Carbon	kg	1,52487E-06
Hexane	kg	0,000881832
Nitrogen	kg	9,1E-08
Phosphorus	kg	2,57E-08
Suspended solids, unspecified	kg	0,0217
TOC, Total Organic Carbon	kg	1,52487E-06
Water	m3	0,00022
Water	m3	0,000148387
Water	m3	3,44762E-05

3.3.3 Processo de Conversão - HEFA

O processo de conversão aplicado para a transformação do óleo cru em bioquerosene foi o hidrocessamento de ésteres e ácidos graxos, mais conhecido como HEFA. Essa rota tecnológica é um dos caminhos de curto prazo mais promissores para a produção

de combustível *drop-in* (ZEMANEK; CHAMPAGNE; MABEE, 2020), característica que garante a compatibilidade com a infraestrutura existente e a fungibilidade com o combustível fóssil de aviação (VÁSQUEZ; SILVA; CASTILLO, 2017).

O hidroprocessamento é um processo comum em refinarias de petróleo convencionais. O processo de hidrogenação catalítica produz líquidos de hidrocarbonetos saturados de hidrogênio, de cadeia linear e ricos em parafina. Para atender às especificações do combustível de aviação, o combustível deve ter boas propriedades de fluxo a frio e um alto ponto de fulgor. Portanto, hidroisomerização e reações de craqueamento são necessárias. Os produtos são querosene parafínico sintético (SPK), diesel, frações de propano e nafta (CARVALHO et al., 2019; GUELL et al., 2012).

Para esse processo foram consideradas duas etapas, o refinamento do óleo cru e a conversão do óleo já refinado em bioquerosene. Na figura 3.4 são apresentados os processos primários, secundários e produtos dessas duas etapas.

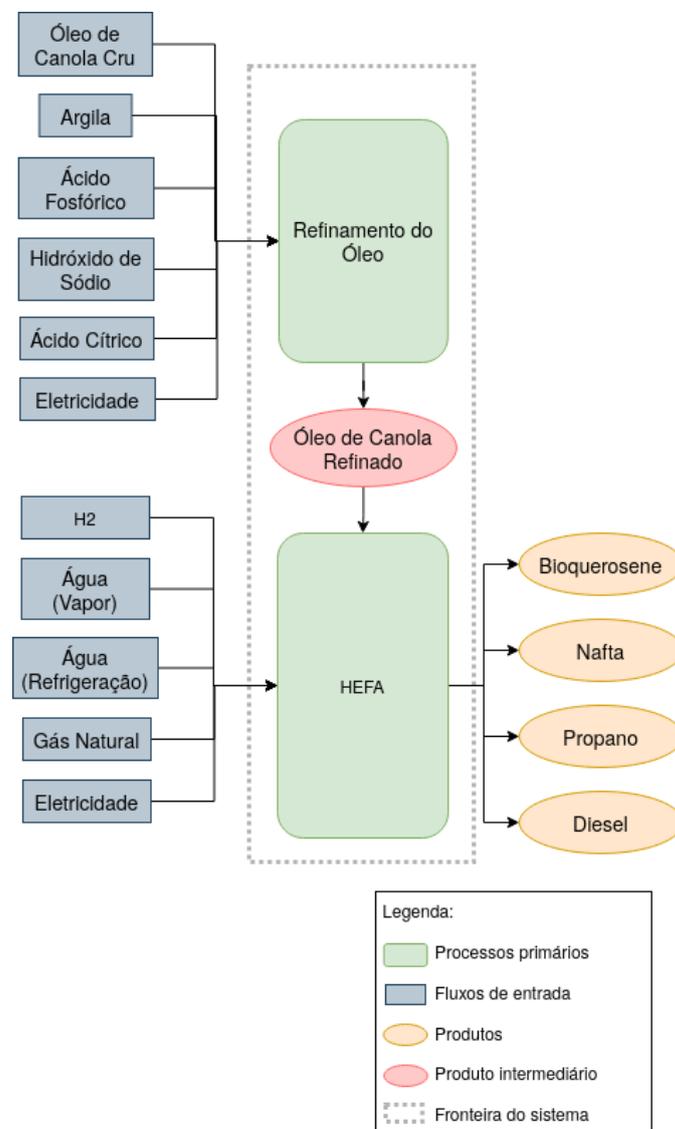


Figura 3.4 – Refinamento e processamento do óleo de canola.

Os dados utilizados como fluxos de entradas e saídas da etapa de refinamento do óleo cru são apresentados nas Tabelas 9 e 10. Essas informações foram obtidas a partir a literatura, utilizando como principais referências [Vásquez et al. \(2019\)](#) e [Pearlson \(2011\)](#).

Tabela 9 – Fluxos de Entrada da Fase de Refinamento.

Fluxos	Unidade	Quantidade
Canola oil, Crude	kg	1024,1
Citric acid	kg	1
Clay	kg	3,57
Electricity, medium voltage	kWh	12,82
Phosphoric acid, industrial grade, without water, in 85% solution state	kg	0,512
Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state	kg	4,57

Tabela 10 – Fluxos de Saída da Fase de Refinamento.

Fluxos	Unidade	Quantidade
Canola oil refined	kg	1000
Carbon dioxide	kg	12,65
Carbon monoxide	kg	0,00279
Methane	kg	1,36E-05
Nitrogen oxides	kg	0,00327
Other emissions to air	kg	835
Particulates	kg	0,00054
Sulfur oxides	kg	0,00106
VOC, volatile organic compounds	kg	0,00011

E nas Tabelas 11 e 12 são apresentados os dados utilizados como fluxos de entradas e saídas da etapa de conversão por hidrocessamento.

Tabela 11 – Fluxos de Entrada da Fase de Conversão - HEFA.

Fluxos	Unidade	Quantidade
Canola oil refined	kg	2024,29
Electricity, medium voltage	MJ	0,4
Heat, central or small-scale, natural gas	MJ	19,28
Hydrogen, gaseous	kg	80,97
Natural gas; 44.1 MJ/kg	MJ	1,56
Water, cooling, unspecified natural origin, BR	m3	0,074

Tabela 12 – Fluxos de Saída da Fase de Conversão - HEFA.

Fluxos	Unidade	Quantidade
Biojet	kg	1000
Carbon dioxide	kg	113,6
Diesel	kg	471,66
Naphtha	kg	141,7
Propane	kg	85,02
Waste water/m3	m3	0,176

3.4 Modelagem no *software* openLCA

O modelo tecnológico do sistema de produção da canola, óleo bruto, farelo seco e bioquerosene foi estabelecido e modelado utilizando o *software* openLCA versão 1.11.0. Este *software* é gratuito, de código aberto e possibilita a modelagem de ciclo de vida, fornece interação com indicadores ambientais, sociais e econômicos, permitindo assim a análise de impactos ambientais de sistemas de produção.

Outra vantagem dessa ferramenta é que ela oferece aos usuários a possibilidade de trabalhar com diferentes bancos de dados. Inicialmente, esse *software* foi projetado para calcular o impacto ambiental de produtos e processos, mas atualmente pode agregar aspectos econômicos. Ele também possui a mais ampla seleção de bancos de dados de ICV e sustentabilidade relevantes e consistentes disponíveis em todo o mundo (ISWARA et al., 2020).

Para a modelagem dos processos foram utilizadas informações do banco de dados ecoinvent 3.7, de onde foram extraídos dados sobre materiais e energia em todas as etapas de produção e processamento do produto. Essa base fornece dados de processos bem documentados e estruturados para diversos produtos e auxilia na visualização dos impactos ambientais (KHANALI et al., 2018).

A seguir, na figura 3.5, é apresentado o sistema de produto modelado no openLCA, incluindo todas as etapas, desde a fase agrícola da canola, passando pelas etapas industrial e de refinamento do óleo até a conversão em bioquerosene.

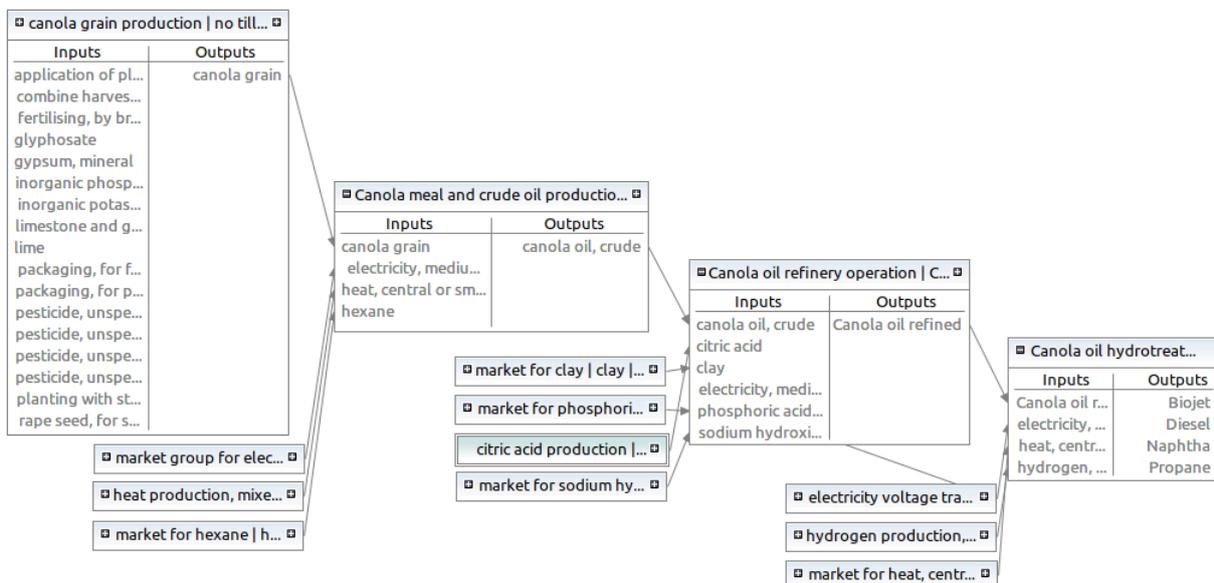


Figura 3.5 – Sistema de produto completo modelado no openLCA.

Primeiramente foi elaborado o processo de produção de canola, utilizando todas as informações do inventário, da literatura e da base de dados. Com isso, temos como

principal produto o *canola grain*, que será um dos fluxos de entrada da etapa seguinte. O segundo processo se trata da produção do farelo e óleo de canola, também com base no seu inventário, literatura e base de dados, foram estabelecidos seus fluxos e realizado o processo de alocação para os dois principais produtos obtidos. Contudo, para a etapa seguinte, somente o produto *canola oil, crude* será utilizado como entrada, dessa forma temos o principal insumo que será submetido ao processo de refino. Como resultado desse processo é obtido o *canola oil refined*, que por sua vez será o fluxo principal do processo de hidrocessamento e serão gerados quatro produtos, *biojet, diesel, naphta* e *propane*.

O modelo representa a consolidação de todos os dados que foram obtidos por meio dos inventários de ciclo de vida apresentados detalhadamente nas seções anteriores. Dessa forma, foi possível desenhar os processos e organizá-los em uma lógica de produção até a obtenção do produto final.

Em resumo, no openLCA foram criados cinco processos que foram denominados como:

- Canola grain production | no tillage | Cutoff, U - BR -South
- Canola meal and crude oil production | mechanical and solvent extraction | Canola meal | Cutoff, U - BR - Southern grid
- Canola meal and crude oil production | mechanical and solvent extraction | Canola oil, crude | Cutoff, U - BR - Southern grid
- Canola oil refinery operation | Canola oil, refined | Cutoff, U - BR - Southern grid
- Canola oil hydrotreatment | Canola biojet | Cutoff, U - BR - Southern grid

Vale ressaltar que os três primeiros foram submetidos ao Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida (SICV Brasil) como produto do projeto realizado em conjunto com a Embrapa Agroenergia. O SICV é um banco de dados criado para abrigar Inventários do Ciclo de Vida de produtos nacionais.

4 Resultados

O desempenho ambiental foi avaliado levando-se em consideração as três principais etapas do sistema de produto: fase agrícola, fase industrial (farelo seco e óleo cru) e processo de conversão, assim como os fluxos de entrada e saída observados e os coprodutos que são obtidos desses processos. E foi com base nessa estrutura que foram gerados os resultados apresentados a seguir, que estão organizados em emissões atmosféricas e indicadores de impactos ambientais

4.1 Emissões Atmosféricas

Foi realizada uma análise das emissões de gases de efeito estufa a partir de fatores de emissão para cada uma das fases do processo de produção descritos no estudo de caso. Na Tabela 13 encontram-se o desempenho das emissões atmosféricas para as fases agrícola e industrial. As emissões da fase agrícola estão identificadas na coluna “Grão” e as emissões da fase industrial estão separadas em “Farelo” e “Óleo”, os dois produtos resultantes dessa fase.

Tabela 13 – Desempenhos das emissões atmosféricas para as fases agrícola e industrial.

	Grão	Farelo	Óleo
CO_2	7,45E-02	7,98E-02	7,68E-02
CO	3,92E-04	4,12E-04	4,01E-04
N_2O	3,08E-06	3,80E-06	3,36E-06
NO_x	2,39E-04	7,52E-04	4,63E-04
SO_2	1,66E-04	1,73E-04	1,69E-04
CH_4	3,11E-04	3,21E-04	3,15E-04

Os gases observados nessa análise são o dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), monóxido de dinitrogênio (N_2O), óxidos de nitrogênio (NO_x), dióxido de enxofre (SO_2) e metano (CH_4). A produção do farelo é o processo que apresenta as maiores emissões de gases. E considerando a fase industrial completa como a soma das emissões do processo de produção do farelo e óleo, temos uma concentração de aproximadamente 68% das emissões totais, enquanto a fase agrícola apresenta um percentual de 32%.

Na figura 4.1 é apresentada uma visualização gráfica do percentual que cada um

dos gases representa nas emissões totais dos três processos. O maior destaque é para as emissões de óxidos de nitrogênio no processo de produção do farelo.

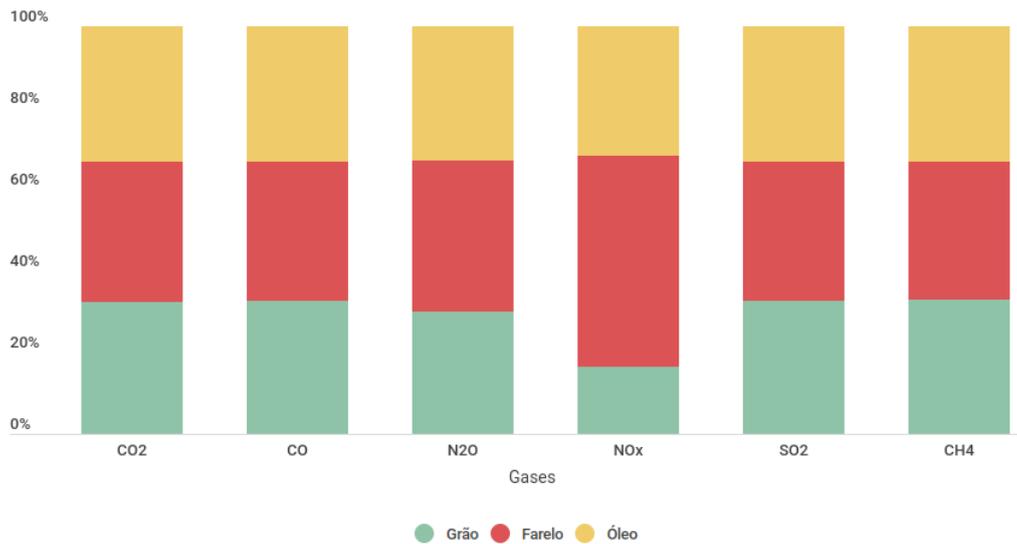


Figura 4.1 – Representação do percentual dos gases nas emissões totais das fases agrícola e industrial.

Por ser um processo que contabiliza a emissão de gases oriundos da queima de diesel devido ao transporte entre a colheita e a indústria, o processo industrial apresenta um alto percentual de emissões em relação a fase agrícola. Outro fator que colabora para essa questão é a utilização de madeira para a etapa de secagem dos grãos de canola e para as etapas de preparação e extração.

Com relação a fase de conversão, a análise foi realizada separadamente considerando a produção de 1.000 kg de bioquerosene. Na Tabela 14 são apresentados os fatores de emissão.

Tabela 14 – Desempenho das emissões atmosféricas para a fase de conversão.

	Conversão
CO_2	81,965
CO	1,471
N_2O	0,014
NO_x	1,680
SO_2	0,773
CH_4	1,139

Nota-se que a emissão de dióxido de carbono prevalece em quantidades muito elevadas em relação aos outros gases. Na figura 4.2 é possível observar a predominância desse gás no total de emissões dessa fase, representando cerca de 94% do total de gases emitidos no processo de produção do bioquerosene.

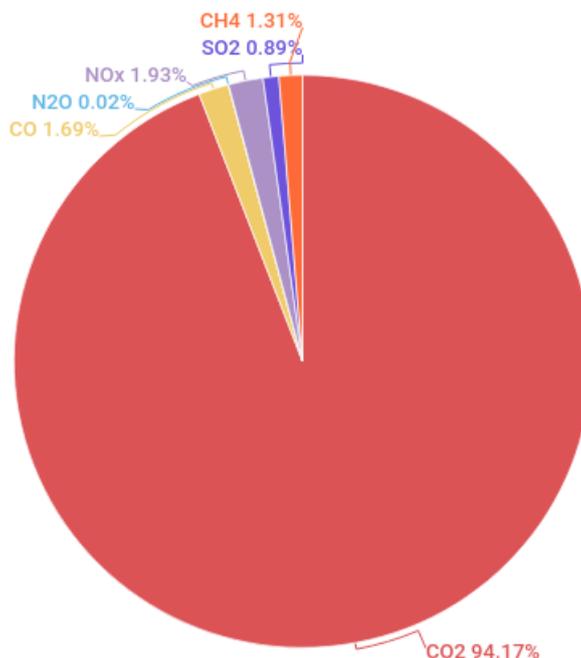


Figura 4.2 – Representação do percentual dos gases nas emissões totais da fase de conversão.

Tal fato deve-se principalmente a utilização de gás natural na etapa de hidrogenação do óleo refinado no processo de conversão HEFA como é demonstrado na figura 3.4 apresentada na sessão anterior. A sua combustão é completa e libera como produtos o CO_2 e vapor de água. Na sequência temos as emissões de NO_x representando 1,93%, CO com 1,69% e CH_4 com 1,31%.

4.2 Indicadores de Impactos Ambientais

Para a análise de impactos ambientais do processo de produção do bioquerosene de canola foram aplicados dois métodos, o ILCD 2011 Midpoint+ e o CML-IA baseline. Ambos possuem diversas categorias de impacto que se complementam para uma análise mais robusta, como por exemplo o aumento do teor de acidez do solo, água e ar (acidificação); mudanças climáticas; aumento dos agentes tóxicos que podem causar danos à biosfera (ecotoxicidade) ou podem causar danos à saúde humana (toxicidade humana); esgotamento de recursos naturais renováveis e não renováveis, entre outros. Foram então analisadas os indicadores dessas categorias de impactos ambientais as fases agrícola (grão), industrial (farelo e óleo) e de conversão.

Na Tabela 15 são apresentados os resultados da AICV das fases que compõem o sistema de produto utilizando o método ILCD 2011 Midpoint+. Cada categoria selecionada é exibida nas linhas e as fases nas colunas. As unidades são definidas conforme a metodologia aplicada.

Tabela 15 – Desempenhos das categorias de impacto para as fases do sistema de produto aplicando o método ILCD 2011 Midpoint+.

Indicador	Grão	Farelo	Óleo	Conversão	Unidade
Acidification	2.63924e-2	2.70888e-2	2.66936e-2	2.69557e-2	molc H+ eq
Climate change	7.86748e-1	9.27279e-1	8.47440e-1	8.95493e-1	kg CO2 eq
Freshwater Ecotoxicity	1.57712e+1	1.65612e+1	1.61110e+1	1.62751e+1	CTUe
Freshwater eutrophication	1.82046e-4	2.08226e-4	1.93470e-4	1.96886e-4	kg P eq
Human toxicity, cancer effects	9.69603e-8	1.06615e-7	1.01176e-7	1.03172e-7	CTUh
Human toxicity, non- cancer effects	2.26014e-6	2.40752e-6	2.32485e-6	2.32757e-6	CTUh
Ionizing radiation E (interim)	1.38168e-7	1.55233e-7	1.45567e-7	2.05082e-7	CTUe
Ionizing radiation HH	2.87054e-2	3.30076e-2	3.05215e-2	3.92515e-2	kBq U235 eq
Land use	2.48230e+1	2.63118e+1	2.54782e+1	2.58054e+1	kg C deficit
Marine Eutrophication	3.17453e-2	3.20193e-2	3.18650e-2	3.19003e-2	kg N eq
Mineral, fossil & ren resource depletion	7.70852e-5	7.79656e-5	7.74692e-5	7.86661e-5	kg Sb eq
Ozone Depletion	5.87283e-8	6.24451e-8	6.03967e-8	8.59033e-8	kg CFC-11 eq
Particulate Matter	1.14996e-3	2.12396e-3	1.57721e-3	1.59595e-3	kg PM2.5 eq
Photochemical Ozone formation	2.49285e-3	4.70107e-3	3.62413e-3	3.76281e-3	kg NMVOC eq
Terrestrial Eutrophication	1.12654e-1	1.15696e-1	1.13983e-1	1.14371e-1	molc N eq
Water Resource depletion	1.96736e-1	2.50123e-1	2.17308e-1	2.29472e-1	m3 water eq

Com base nessas informações é possível observar que as fases que mais contribuem para os impactos são a industrial, especificamente na produção do farelo seco e a conversão do óleo em bioquerosene. Já a fase agrícola é a que apresenta as menores contribuições para as categorias de impacto. E a fase industrial para produção do óleo cru se apresenta logo em seguida como um processo que também tem uma contribuição menor, porém relevante.

Na figura 4.3, onde é apresentada uma visualização gráfica dos resultados dos indicadores relativos das fases do sistema de produto, pode-se verificar também a representatividade dos impactos das fases agrícola e conversão nos indicadores. Para cada indicador, o resultado máximo é definido como 100% e os resultados das outras variantes são exibidas em relação a esse valor.

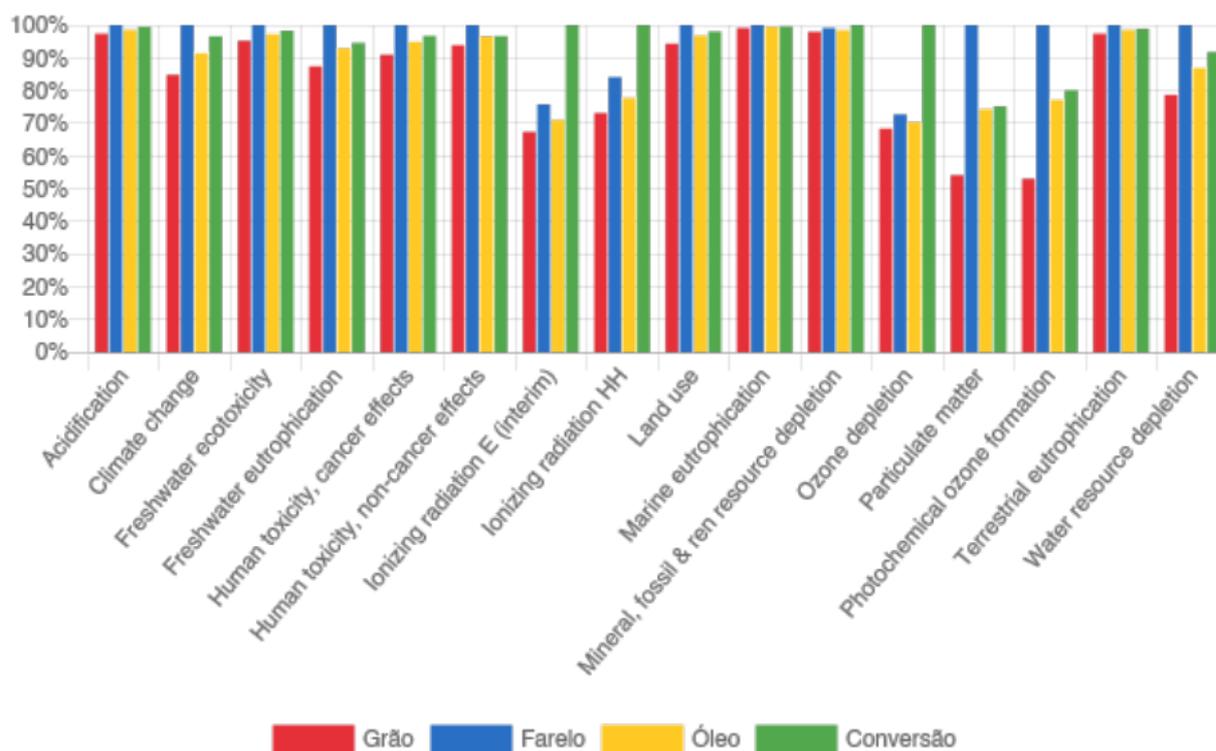


Figura 4.3 – Resultados dos indicadores relativos das fases do sistema de produto aplicando o método ILCD 2011 Midpoint+.

Em relação ao método CML-IA baseline, que apresenta uma outra variedade de categorias de impactos e em menor quantidade que o método anterior, os resultados são apresentados na sequência.

Na visualização gráfica dos indicadores relativos das fases do projeto, figura 4.4, é possível observar que na maioria das categorias de impacto as fases industrial, considerando o farelo e óleo, e a conversão apresentam as maiores contribuições. Com exceção da depleção abiótica e da camada de ozônio, onde a conversão se destaca com maior contribuição nos impactos.

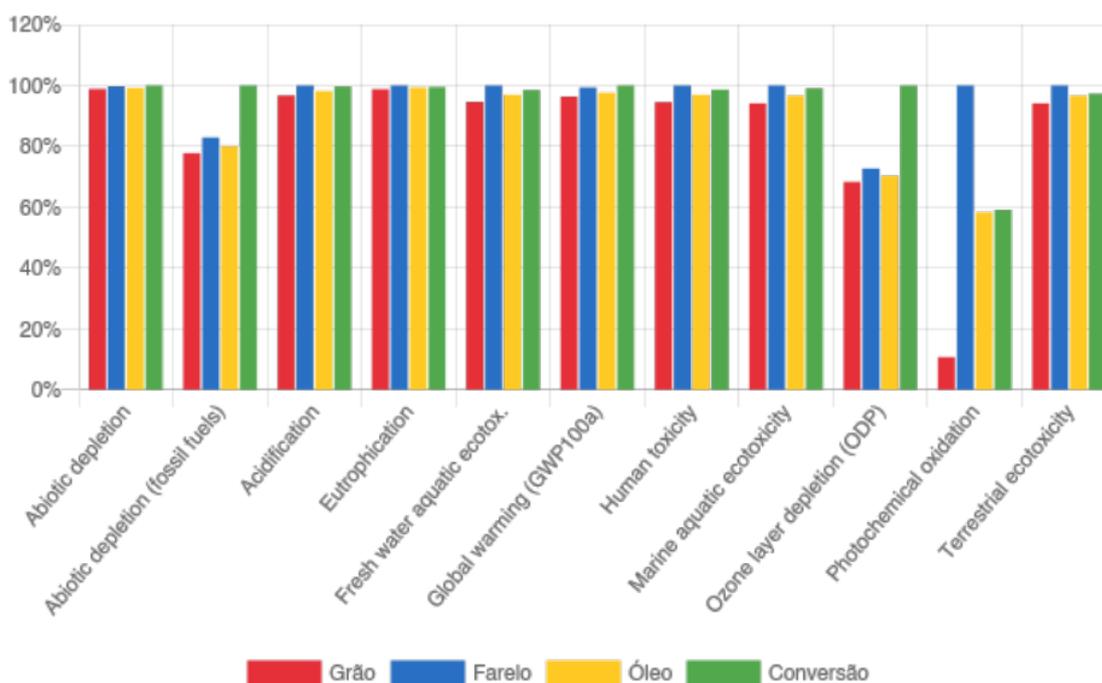


Figura 4.4 – Resultados dos indicadores relativos das fases do sistema de produto aplicando o método CML-IA baseline.

Na Tabela 16 são apresentados os resultados do AICV das fases do sistema de produto utilizando o método CML-IA baseline.

Tabela 16 – Desempenhos das categorias de impacto para as fases do sistema de produto aplicando o método CML-IA baseline.

Indicador	Grão	Farelo	Óleo	Conversão	Unidade
Abiotic depletion	8.55122e-5	8.62134e-5	8.58173e-5	8.64777e-5	kg Sb eq
Abiotic depletion (fossil fuels)	7.46753e+0	7.96137e+0	7.68278e+0	9.59677e+0	MJ
Acidification	1.48266e-2	1.53246e-2	1.50414e-2	1.52638e-2	kg SO2 eq
Eutrophication	1.76254e-2	1.78373e-2	1.77179e-2	1.77508e-2	kg PO4— eq
Fresh water aquatic ecotox	3.53315e-1	3.73359e-1	3.61916e-1	3.67863e-1	kg 1,4-DB eq
Global warming (GWP100a)	1.97928e+0	2.04100e+0	2.00559e+0	2.05449e+0	kg CO2 eq
Human toxicity	6.30009e-1	6.66029e-1	6.45662e-1	6.57201e-1	kg 1,4-DB eq
Marine aquatic ecotoxicity	6.27465e+2	6.66548e+2	6.44257e+2	6.60289e+2	kg 1,4-DB eq
Ozone layer depletion (ODP)	5.87415e-8	6.24605e-8	6.04108e-8	8.59179e-8	kg CFC-11 eq
Photochemical oxidation	1.23351e-4	1.14637e-3	6.68907e-4	6.77828e-4	kg C2H4 eq
Terrestrial ecotoxicity	5.97124e-3	6.34477e-3	6.13222e-3	6.17461e-3	kg 1,4-DB eq

Outro ponto de destaque é como a fase de conversão se apresenta como a mais influente para a categoria de depleção da camada de ozônio, assim como foi comprovado no método anterior e na análise de emissões atmosféricas. É notável também que nesse método, a fase que menos apresenta contribuições para as categorias de impacto é a fase agrícola, com destaque para a oxidação fotoquímica, categoria que menos impacta.

Dessa forma, a fase industrial, principalmente no que diz respeito a produção do farelo seco, e a fase de conversão possuem as maiores contribuições para os indicadores de impactos ao meio ambiente. É possível associar essa fato ao uso de madeira em parte da fase industrial, que por sua vez contabiliza um processo de obtenção que por si só geram uma série de impactos. Já na fase de conversão, os maiores impactos são associados ao uso de gás natural, resultando em emissões de dióxido de carbono em quantidades consideráveis para a atmosfera e ao uso de hidrogênio (H_2) para o processo de hidrogenação catalítica.

Os resultados quando comparados à outros estudos semelhantes apresentam consistência, como por exemplo o “*Full Chain Life Cycle Assessment of Greenhouse Gases and Energy Demand for Canola-Derived Jet Fuel in North Dakota, United States*” de [Ukaew et al. \(2016\)](#), também aponta que os estágios-chave que possuem contribuições relevantes para as emissões de gases de efeito estufa incluem o uso de H_2 , gás natural, eletricidade e combustível diesel. E além disso, apresenta como uma possível solução o que chama de integração do hidrogênio no processo de conversão, ou seja, o uso de coprodutos do HEFA na produção de H_2 para o próprio processo de conversão.

[Vásquez et al. \(2019\)](#), citado anteriormente, também apresenta em seu trabalho que as etapas de transporte, produção de hidrogênio e hidrotreatamento são as que mais favorecem as emissões de gases de efeito estufa para a atmosfera. E ressalta que isso pode ser atribuído a maiores exigências de hidrogênio durante o hidrotreatamento do óleo devido ao conteúdo significativo de ácidos graxos insaturados, dessa forma, esse impacto pode variar a depender da matéria-prima.

5 Conclusão

O tema tratado nesse trabalho possui alta relevância diante de um cenário mundial que atualmente está em busca de diminuir ao máximo as emissões de gases de efeito estufa para a atmosfera em vários âmbitos da economia e atividades comerciais.

As questões relacionadas ao alto custo do combustível fóssil de aviação, fornecimento de energia, segurança energética e emissões da aviação impulsionaram o desenvolvimento de tecnologias de aeronaves e motores ao longo da história do voo. O bioquerosene derivado de biomassa representa uma grande oportunidade para solucionar esses problemas. Muitas tecnologias de conversão que transformam biomassa em combustível de aviação foram desenvolvidas, e algumas delas são comercialmente viáveis, com por exemplo a HEFA utilizada nesta análise.

Durante a pesquisa notou-se que através da combinação de especialistas da indústria de aviação, governo, empresas de biocombustíveis, organizações agrícolas e acadêmicas, juntamente com o incentivo de capital, o progresso está sendo feito em direção a um processo ideal que utiliza as fontes de matéria-prima mais eficazes ambientalmente e processos que originam biocombustíveis cada vez mais compatíveis com a infraestrutura existente atualmente e *drop-in*.

A ACV é uma metodologia largamente aplicada para alcançar o objetivo proposto, como foi possível observar na literatura. E a aplicação dessa ferramenta permitiu, a partir da identificação das principais correntes mássicas e energéticas dos processos unitários de um modelo tecnológico genérico, uma visualização e identificação dentro do sistema de produção dos pontos críticos e que causam os maiores impactos dentro da cadeia.

Com o software openLCA foi possível caracterizar as emissões atmosféricas e, através da metodologia ILCD 2011 Midpoint+ e o CML-IA baseline, obter os indicadores ambientais relativos a essas emissões e apontar as categorias de impacto mais relevantes dentro da atividade.

Nesse sentido, foi observado através das análises das emissões atmosféricas e das categorias de impactos ambientais que a fase industrial, principalmente no que diz respeito a produção do farelo seco, e a fase de conversão possuem as maiores contribuições para os indicadores de impacto. Tal fato foi associado ao uso de madeira em parte da fase industrial, que por sua vez contabiliza um processo de obtenção que por si só geram uma

série de impactos. Já na fase de conversão, os maiores impactos são associados ao uso de gás natural, resultando em emissões de dióxido de carbono e ao uso de hidrogênio para o processo de hidrogenação catalítica.

Como melhorias e sugestão de estudos futuros, vale ressaltar a necessidade de melhoria na produtividade agrícola de matérias-primas já identificadas e continuar na busca de novas, observando principalmente a não competitividade com a indústria alimentícia; otimizar o processo de produção de biomassa com o objetivo de baratear o seu alto custo que pode ser interpretado como um gargalo na produção de bioquerosene; melhorar a eficiência energética de tecnologias de processamento e desenvolver novos processos; estudar as melhores localizações e incentivar implantações de plantas comerciais para as rotas de produção identificadas visando a produção de biocombustíveis de aviação e; estender a competência instalada para testar e certificar biocombustível para aviação para todo o País.

Referências

- ABIOVE. *Capacidade Instalada da Indústria Brasileira de Óleos Vegetais*. 2020. Disponível em: <<https://abiove.org.br/estatisticas/>>. Citado 2 vezes nas páginas xi e 14.
- ABNT. *ABNT ISO 14040 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípio e estrutura*. Rio de Janeiro, 2009. 1–22 p. Citado 9 vezes nas páginas x, 2, 15, 16, 17, 18, 19, 20 e 29.
- ABNT. *ABNT ISO 14044 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações*. Rio de Janeiro, 2009. 1–46 p. Citado 6 vezes nas páginas x, 16, 17, 18, 19 e 30.
- ALAM, A.; DWIVEDI, P. Modeling site suitability and production potential of carinata-based sustainable jet fuel in the southeastern United States. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier Ltd, v. 239, n. 2019, p. 117817, 2019. ISSN 09596526. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117817>>. Citado na página 1.
- ASTM. Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons (D7566-21). *Annual Book of ASTM Standards*, p. 1–16, 2021. Disponível em: <<https://www.astm.org/d7566-21.html>>. Citado na página 6.
- ATAG. *The right flightpath to reduce aviation emissions*. Durban, 2011. 1–6 p. Citado na página 1.
- BARTHET, V. J. *Canola: Overview*. 2. ed. Elsevier Ltd., 2016. v. 1-4. 237–241 p. ISBN 9780123947864. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-394437-5.00029-2>>. Citado na página 11.
- BOEIRA, A. C. S. Síntese e caracterização de bioquerosene com ênfase no desenvolvimento de método analítico para a determinação de elementos-traço por espectrometria de absorção atômica de alta resolução com fonte contínua e chama. 2022. Citado na página 9.
- BRASIL. *LEI Nº 12.490, DE 2011*. 2011. 1–3 p. Disponível em: <<https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=19/09/2011{&}jornal=1{&}pagina=1{&}totalArq>>. Citado na página 5.
- CAAFI. *Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative - Fuel Qualification*. 2022. Disponível em: <http://www.caafi.org/focus{_}areas/fuel{_}qualificatio>. Citado na página 8.
- CANTARELLA, H. et al. Potential feedstock for renewable aviation fuel in Brazil. *Environmental Development*, Elsevier, v. 15, p. 52–63, 2015. ISSN 22114645. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.envdev.2015.05.004>>. Citado na página 6.

CAPAZ, R. S. et al. Environmental trade-offs of renewable jet fuels in Brazil: Beyond the carbon footprint. *Science of the Total Environment*, Elsevier B.V., v. 714, p. 136696, 2020. ISSN 18791026. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136696>>. Citado na página 2.

CARDOSO, A. N. et al. *Inventário de Ciclo de Vida da produção de canola e bioprodutos na Região Sul do Brasil: Uma contribuição ao SICV Brasil*. Brasília, 2021. 80 p. Citado 4 vezes nas páginas 32, 33, 34 e 35.

CARVALHO, F. et al. Potential for biojet production from different biomass feedstocks and consolidated technological routes: a georeferencing and spatial analysis in Brazil. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 13, n. 6, p. 1454–1475, 2019. ISSN 19321031. Citado 3 vezes nas páginas xi, 7 e 38.

COBO, M. J. et al. An approach for detecting, quantifying, and visualizing the evolution of a research field: A practical application to the Fuzzy Sets Theory field. *Journal of Informetrics*, Elsevier Ltd, v. 5, n. 1, p. 146–166, 2011. ISSN 17511577. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.joi.2010.10.002>>. Citado na página 20.

CONAB. *Acompanhamento da Safra Brasileira 2019/2020 - Primeiro levantamento*. Brasília, 2019. v. 7, 1–114 p. Citado na página 31.

CONAB. Acompanhamento da Safra Brasileira. *Boletim da Safra 2021*, v. 9, n. Terceiro levantamento, p. 60, 2022. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/>>. Citado na página 2.

CONAB. *Série Histórica das Safras - Canola*. 2022. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras/itemlist/category/902-canola>>. Citado na página 12.

CONFORTIN, T. C. et al. Oil yields, protein contents, and cost of manufacturing of oil obtained from different hybrids and sowing dates of canola. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Elsevier, v. 7, n. 2, p. 102972, 2019. ISSN 22133437. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.102972>>. Citado na página 2.

DOLIENTE, S. S. et al. Bio-aviation Fuel: A Comprehensive Review and Analysis of the Supply Chain Components. *Frontiers in Energy Research*, v. 8, n. July, p. 1–38, 2020. ISSN 2296598X. Citado 3 vezes nas páginas xi, 5 e 7.

EBRAHIMI, S. et al. Renewable jet fuel supply chain network design: Application of direct monetary incentives. *Applied Energy*, Elsevier Ltd, v. 310, n. January, p. 118569, 2022. ISSN 03062619. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118569>>. Citado na página 5.

ECOINVENT. *Ecoinvent Database*. 2022. Disponível em: <<https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/>>. Citado na página 29.

ESCALANTE, E. S. R. et al. Evaluation of the potential feedstock for biojet fuel production: Focus in the Brazilian context. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 153, n. June 2021, 2022. ISSN 18790690. Citado 3 vezes nas páginas xi, 1 e 7.

European Commission, J. R. C. *Characterisation factors of the ILCD Recommended Life Cycle Impact Assessment methods*. First edit. Luxembourg: Office of the European Union, 2012. 31 p. ISBN 9789279227271. Disponível em: <<http://www.jrc.ec.europa.eu/>>. Citado na página 27.

FOLEGATTI-MATSUURA, M. I. S.; PICOLI, J. F. *Life Cycle Inventories of Agriculture, Forestry and Animal Husbandry - Brazil*. Zürich, 2018. 1–143 p. Citado 3 vezes nas páginas 29, 30 e 32.

GREENDELTA. *LCIA methods: Impact assessment methods in life cycle assessment and their impact categories. Version 1.5.6*. GreenDelta, 2016. 1–23 p. Disponível em: <<https://www.openlca.org/wp-content/uploads/2015/11/LCIA-METHODS-v.1.5.4.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.

GUELL, B. M. et al. *Benchmark of conversion and production technologies for synthetic biofuels for aviation*. 2012. 95 p. Citado na página 38.

GUIDUCCI et al. Tropicalização da Canola (*Brassica napus* L.) e Inserção na Cadeia Produtiva de Óleo Vegetal: Análise de Cenário. In: *58 CONGRESSO SOBER*. Foz do Iguaçu: [s.n.], 2020. p. 1–14. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 15.

GUPTA, R. et al. Life cycle assessment of biodiesel production from rapeseed oil: Influence of process parameters and scale. *Bioresource Technology*, Elsevier Ltd, v. 360, p. 1–13, 2022. ISSN 0960-8524. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127532>>. Citado na página 15.

HARI, T. K. et al. Aviation biofuel from renewable resources: Routes, opportunities and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 42, p. 1234–1244, 2015. ISSN 13640321. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.095>>. Citado na página 2.

ICAO. *Assembly 39th Session*. Montreal, 2016. 1–78 p. Citado na página 1.

IRENA. *Reaching Zero With Renewables BIOJET FUELS*. [S.l.: s.n.], 2021. 96 p. ISBN 9789292603502. Citado na página 8.

ISWARA, A. P. et al. A Comparative Study of Life Cycle Impact Assessment using Different Software Programs. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 506, n. 1, 2020. ISSN 17551315. Citado na página 40.

KHANALI, M. et al. Life cycle assessment of canola edible oil production in Iran: A case study in Isfahan province. *Journal of Cleaner Production*, v. 196, p. 714–725, 2018. ISSN 09596526. Citado na página 40.

LEE, D. S. et al. Aviation and global climate change in the 21st century. *Atmospheric Environment*, Elsevier Ltd, v. 43, n. 22-23, p. 3520–3537, 2009. ISSN 13522310. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.04.024>>. Citado na página 1.

Marsaro Junior, A. L. et al. *Caracterização do manejo de insetos-praga da canola adotado por produtores no Rio Grande do Sul e no Paraná*. Passo Fundo, 2019. 33 p. Citado na página 29.

MME; ANP. *RESOLUÇÃO ANP Nº 856, DE 2021*. 2021. 89–96 p. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-anp-n-856-de-22-de-outubro-de-2021-354349404>>. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 6.

MONTEIRO, A. d. R. D. *Contribuição da Reciclagem Química de Resíduos Plásticos para o Desenvolvimento Sustentável*. 2018. 339 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro. Citado na página 27.

MORI, C. D. et al. *Levantamento de tecnologias empregadas no cultivo de canola pelos produtores do Rio Grande do Sul , Paraná e Minas Gerais*. Passo Fundo, 2019. 1–56 p. Citado 3 vezes nas páginas 11, 29 e 30.

MORI, C. D. et al. *Estimativas de custo operacional de produção de canola, safras 2015 a 2018, no norte do estado do Rio Grande do Sul*. Passo Fundo, 2019. 1–12 p. Citado na página 11.

NEMECEK, T. et al. Methodological guidelines for the life cycle inventory of agricultural products. *World Food LCA Database Methodological*, n. 1, p. 88, 2019. Citado na página 32.

NEULING, U.; KALTSCHMITT, M. Conversion routes for production of biokerosene—status and assessment. *Biomass Conversion and Biorefinery*, v. 5, n. 4, p. 367–385, 2014. ISSN 21906823. Citado na página 7.

OYEKALE, J.; EMAGBETERE, E. A review of conventional and exergetic life cycle assessments of organic Rankine cycle plants exploiting various low-temperature energy resources. *Heliyon*, Elsevier Ltd., v. 8, n. March, p. 12, 2022. ISSN 2405-8440. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09833>>. Citado 3 vezes nas páginas 17, 18 e 20.

PEARLSON, M. N. *A Techno-economic and Environmental Assessment of Hydroprocessed Renewable Distillate Fuels*. 2011. 106 p. Tese (Doutorado) — Massachusetts Institute of Technology. Disponível em: <<http://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/65508/746766700.pdf?sequence=1>>. Citado 3 vezes nas páginas 29, 30 e 39.

PEÑA, C. et al. Using life cycle assessment to achieve a circular economy. *International Journal of Life Cycle Assessment*, Springer Berlin Heidelberg, v. 26, n. 2, p. 215–220, 2021. ISSN 16147502. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11367-020-01856-z>>. Citado na página 15.

SIEVERDING, H. L. et al. Life-cycle assessment of oilseeds for biojet production using localized cold-press extraction. *Journal of Environmental Quality*, v. 45, n. 3, p. 967–976, 2016. ISSN 15372537. Citado na página 2.

SILVEIRA, E. A. et al. Mass and energy allocation method analysis for an oil refinery characterization using multi-scale modeling. *International Journal of Life Cycle Assessment*, The International Journal of Life Cycle Assessment, v. 22, n. 11, p. 1815–1822, 2017. ISSN 16147502. Citado na página 15.

SLAVINSKY, A. V. et al. Setting life cycle assessment (LCA) in a future-oriented context: the combination of qualitative scenarios and LCA in the agri-food sector. *European Journal of Futures Research*, Springer Berlin Heidelberg, 2022. ISSN 2195-2248. Disponível em: <<https://doi.org/10.1186/s40309-022-00203-9>>. Citado na página 16.

SOUZA, L. M. de et al. Assessing the current scenario of the Brazilian biojet market. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier Ltd, v. 98, p. 426–438, 2018. ISSN 18790690. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.039>>. Citado 3 vezes nas páginas 2, 5 e 6.

STAPLES, M. D. et al. Aviation CO2 emissions reductions from the use of alternative jet fuels. *Energy Policy*, Elsevier Ltd, v. 114, n. July 2017, p. 342–354, 2018. ISSN 03014215. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.12.007>>. Citado na página 1.

- TAHERIPOUR, F. et al. Oilseed Cover Crops for Sustainable Aviation Fuels Production and Reduction in Greenhouse Gas Emissions Through Land Use Savings. *Frontiers in Energy Research*, v. 9, n. January, p. 1–10, 2022. Citado na página 15.
- TOMM, G. O. et al. Canola Production in South America. *Enhancing Productivity in a Changing Climate*, v. 52, n. 4, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 11.
- TOMM, G. O. et al. *Panorama atual e indicações para aumento de eficiência da produção de canola no Brasil*. Passo Fundo, 2010. 1–83 p. Citado na página 12.
- TOMM, G. O. et al. Tecnologia para produção de canola no Rio Grande do Sul. *Embrapa trigo*, v. 03, n. 54, p. 32, 2009. ISSN 1809-2985. Disponível em: <www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/863304>. Citado na página 35.
- UKAEW, S. et al. Full Chain Life Cycle Assessment of Greenhouse Gases and Energy Demand for Canola-Derived Jet Fuel in North Dakota, United States. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, v. 4, n. 5, p. 2771–2779, 2016. ISSN 21680485. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 48.
- UNIVERSITY, L. *CML-IA Characterisation Factors*. 2022. Disponível em: <<https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors>>. Citado na página 28.
- VÁSQUEZ, M. C. et al. Holistic approach for sustainability enhancing of hydrotreated aviation biofuels, through life cycle assessment: A Brazilian case study. *Journal of Cleaner Production*, v. 237, n. 2019, 2019. ISSN 09596526. Citado 4 vezes nas páginas 29, 30, 39 e 48.
- VÁSQUEZ, M. C. et al. Hydrotreatment of vegetable oils: A review of the technologies and its developments for jet biofuel production. *Biomass and Bioenergy*, v. 105, p. 197–206, 2017. ISSN 18732909. Citado na página 38.
- WANG, M. et al. Biomass-derived aviation fuels: Challenges and perspective. *Progress in Energy and Combustion Science*, Elsevier Ltd, v. 74, p. 31–49, 2019. ISSN 03601285. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360128518301527>>. Citado na página 1.
- WANG, W. C.; TAO, L. Bio-jet fuel conversion technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 53, p. 801–822, 2016. ISSN 18790690. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.016>>. Citado 3 vezes nas páginas 7, 8 e 9.
- WEI, H. et al. Renewable bio-jet fuel production for aviation: A review. *Fuel*, v. 254, p. 1–16, 2019. ISSN 00162361. Citado na página 1.
- YANG, J. et al. An overview on performance characteristics of bio-jet fuels. *Fuel*, Elsevier, v. 237, p. 916–936, 2019. ISSN 00162361. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.10.079>>. Citado 7 vezes nas páginas x, xi, 5, 7, 8, 9 e 10.
- ZEMANEK, D. et al. Review of life-cycle greenhouse-gas emissions assessments of hydroprocessed renewable fuel (HEFA) from oilseeds. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 14, n. 5, p. 935–949, 2020. ISSN 19321031. Citado na página 38.
- ZHANG, H. et al. Prospects and perspectives foster enhanced research on bio-aviation fuels. *Journal of Environmental Management*, Elsevier Ltd, v. 274, p. 1–7, 2020. ISSN 10958630. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111214>>. Citado na página 15.