

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE ENERGIA**

**Avaliação comparativa da sustentabilidade da produção
de biocombustível de aviação a partir do
hidroprocessamento dos óleos de dendê e soja nas
condições brasileiras.**

Maria Cecilia Vásquez Carrillo

Itajubá, 25 de Junho de 2018

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE ENERGIA**

Maria Cecilia Vásquez Carrillo

**Avaliação comparativa da sustentabilidade da produção
de biocombustível de aviação a partir do
hidroprocessamento dos óleos de dendê e soja nas
condições brasileiras.**

**Dissertação submetida ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia de
Energia como parte dos requisitos para
obtenção do Título de Mestre em
Ciências em Engenharia de Energia.**

**Área de concentração: Energia,
Sociedade e Meio Ambiente.**

**Orientador: Prof. Dr. Electo Eduardo
Silva Lora**

**Co-Orientador: Dr. Mateus Henrique
Rocha**

Itajubá, 25 de Junho de 2018

VÁSQUEZ CARRILLO, Maria Cecilia

V335a Avaliação comparativa da sustentabilidade da produção de biocombustível de aviação a partir do hidrocessamento dos óleos de dendê e soja nas condições brasileiras. / Maria Cecilia VÁSQUEZ CARRILLO; orientador ELECTO SILVA LORA; co orientador MATEUS ROCHA. – Itajubá-UNIFEI, 2018.

160 p.

Dissertação (Mestrado - Mestrado em Engenharia de Energia) - Universidade Federal de Itajubá, 2018.

1. Análise do ciclo de vida. 2. Biocombustíveis. 3. Aviação. 4. Hidrotratamento. 5. Óleos vegetais. I. SILVA LORA, ELECTO, orient. II. ROCHA, MATEUS, co-orient. III. Avaliação comparativa da sustentabilidade da produção de biocombustível de aviação a partir do hidrocessamento dos óleos de dendê e soja nas condições brasileiras.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE ENERGIA**

Maria Cecilia Vásquez Carrillo

**Avaliação comparativa da sustentabilidade da produção
de biocombustível de aviação a partir do
hidroprocessamento dos óleos de dendê e soja nas
condições brasileiras.**

**Dissertação aprovada por banca
examinadora em 25 de Junho de 2018,
conferindo ao autor o título de Mestre em
Ciências em Engenharia de Energia.**

**Banca Examinadora:
Prof. Dr. Electo Eduardo Silva Lora
Prof. Dr. Maria Luiza Grillo Renó
Prof. Dr. Regina Mambelli Barros
Prof. Dr. Flavio Dias Mayer**

Itajubá, 25 de Junho de 2018

*“There is a driving force more powerful than steam,
electricity and nuclear power: THE WILL”*

ALBERT EINSTEIN

RESUMO

VÁSQUEZ, M.C. (2017). Avaliação comparativa da sustentabilidade da produção de biocombustível Jet a partir do hidroprocessamento do óleo de dendê e da soja nas condições brasileiras. Itajubá, 159p. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Energia; Área de concentração: Energia, Sociedade e Meio Ambiente. Universidade Federal de Itajubá.

O objetivo do presente trabalho foi realizar uma avaliação comparativa da sustentabilidade da produção de biocombustível de aviação no Brasil, mediante o hidrotreamento do óleo de dendê e soja, com o intuito de contribuir ao desenvolvimento da cadeia produtiva de biocombustível de aviação no país. A metodologia de Análise do Ciclo de Vida (ACV) foi empregada para realizar essa avaliação desde a produção de matérias primas até o uso final do biocombustível, referida como Well-to-Wake (WtW). A unidade funcional estabelecida foi 1,0 MJ de energia produzida. O software utilizado para estimar os impactos ambientais foi o Simapro v.8.0.3 e o método de avaliação escolhido foi o IMPACT 2002+. A abordagem da análise foi de tipo híbrido, que é uma combinação dos métodos atribucional e consequential, sendo empregado a expansão das fronteiras do sistema para o tratamento dos coprodutos gerados na etapa de extração de óleo e uma alocação em base energética para os coprodutos produzidos na etapa de hidrotreamento. Porém, decidiu-se incluir um cenário de avaliação alternativo consistindo na alocação em base energética de todos os coprodutos gerados no sistema, com o objetivo de examinar o efeito do método de alocação no cálculo dos impactos. Os resultados indicaram reduções e melhorias em comparação ao *Jet* fóssil em 10 das 15 categorias de impacto intermediárias, assim como em 3 das 4 categorias de dano analisadas, sendo o biocombustível de aviação a partir do dendê o que melhor desempenho ambiental apresentou, em relação ao óleo de soja. As etapas de cultivo e de hidrotreamento em ambos cenários tiveram uma contribuição maior na maioria das categorias avaliadas, devido as emissões geradas a partir do uso de produtos petroquímicos e agrotóxicos e de combustíveis nas operações agrícolas, assim como pelas emissões associadas à produção e uso de hidrogênio e vapor no hidrotreamento. O método de tratamento dos coprodutos teve uma influência muito grande nos resultados da análise e nesse sentido o método híbrido gerou resultados de emissões menor que o método de alocação em base energética. O cálculo da eficiência energética foi de 5,58 e 4,25 para o dendê e a soja, respectivamente, demonstrando assim a renovabilidade dos biocombustíveis. Ambos biocombustíveis propostos tem um grande potencial para o estabelecimento de uma indústria de produção sustentável de biocombustíveis de aviação no país.

Palavras-chave: *Hidrotreamento de óleos vegetais, Biocombustível de Aviação, Análise do Ciclo de Vida.*

ABSTRACT

VÁSQUEZ, M.C. (2017). Comparative sustainability assessment of jet biofuel production by hydrotreatment of palm and soybean oil in the Brazilian conditions. Itajubá, 159p. Master's Dissertation in Energy Engineering; Area of concentration: Energy, Society and Environment. Federal University of Itajubá.

The objective of the present work was to perform a comparative sustainability assessment of jet biofuel production in Brazil by hydrotreatment of palm and soybean oil, with the aim to contribute with the development of the jet biofuel production chain in the country. The Life Cycle Assessment (LCA) methodology was chosen to perform the analysis from raw materials production until final use, which is known as Well-to-Wake (WtWa) analysis. The functional unit selected was 1,0 MJ of energy produced. The software utilized to calculate the environmental impacts was Simapro v.8.0.3 and the impact assessment method chosen was the IMPACT 2002+ method. A hybrid LCA approach was proposed, being a combination of the attributional and consequential methods, where both displacement and energy allocation were used for handling co-products in the oil extraction and hydrotreatment phase, respectively. However, an alternative assessment scenario was included in order to examine the effect of co-product allocation on impacts calculation. Results showed reductions and improvements in relation to fossil jet in 10 of 15 midpoint categories, as well as in 3 of 4 damage categories analyzed and in that sense, the aviation biofuel from palm oil was the one with the best environmental performance. Cultivation and hydrotreatment stages in both scenarios were the biggest contributors in most of the categories analyzed, due to emissions derived from usage of petrochemical products, agro-toxics and fuels during agricultural operations, as well as the emissions derived from production and use of hydrogen and steam in hydrotreatment. Co-product allocation had a great influence on results and in this regard, it was noted that the hybrid method yielded lower results than the energy allocation approach. Results of energy efficiency were of 5,58 and 4,25 for aviation biofuel from palm and soybean oil, respectively, demonstrating the renewability of both of them. It was concluded that the two aviation biofuel scenarios proposed have a great potential for the establishment of a sustainable production chain in the country.

Keywords: *Hydrotreatment of vegetable oils, Aviation biofuels, Life Cycle Assessment.*

SUMÁRIO

RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	ix
SIGLAS	xi
CAPÍTULO 1 – APRESENTAÇÃO DO TRABALHO	12
1.1. INTRODUÇÃO	12
1.2. OBJETIVO DA PESQUISA.....	18
1.2.1. Objetivo Geral	18
1.2.2. Objetivos Específicos.....	18
1.3. CONTRIBUIÇÃO E HIPÓTESE DA PESQUISA.....	19
1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	19
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1. COMBUSTÍVEL DE AVIAÇÃO CONVENCIONAL	20
2.2. ROTAS TECNOLÓGICAS APROVADAS PARA A PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEL DE AVIAÇÃO.....	23
2.3. ÉSTERES E ÁCIDOS GRAXOS HIDROPROCESSADOS (HEFA).	29
2.3.1. Parâmetros de operação e seletividade.....	35
2.4. ANÁLISE DO CICLO DE VIDA.....	39
2.4.1. Estudos Precedentes de ACV de <i>biojet</i>	43
CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA	53
3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS AGRÍCOLAS	53
3.1.1. Dendê	53
3.1.2. Soja.....	56
3.2. ANÁLISE DO CICLO DE VIDA.....	58
3.2.1. Objetivo do estudo	58
3.2.2. Escopo do estudo.....	58
3.2.2.1. Unidade funcional e fluxo de referência	58
3.2.2.2. Identificação das fronteiras do estudo.	59
3.2.2.3. Fronteira geográfica do cenário biocombustível de aviação de óleo de dendê.	64
3.2.2.4. Fronteira geográfica cenário do biocombustível de aviação do óleo de soja.	65
3.2.2.5. Coprodutos	66
3.2.2.6. Software e método de avaliação.....	72
3.2.3. Sistema produto e inventario do ciclo de vida	76

3.2.3.1.	Sistema cenário 1: Biojet de óleo de Dendê.....	77
3.2.3.2.	Sistema cenário 2: Biojet de óleo de Soja	91
3.3.	INDICADOR DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	101
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS.....		102
4.1.	INVENTÁRIOS CONSOLIDADOS	102
4.2.	BALANÇO DE CARBONO E INDICADORES ENERGÉTICOS	107
4.2.1.	Cenário biocombustível de aviação a partir do dendê.....	107
4.2.2.	Cenário biocombustível de aviação a partir da soja.	109
4.3.	RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	111
4.4.	CENÁRIO ALTERNATIVO DE AVALIAÇÃO COM ALOCAÇÃO PELO CRITÉRIO ENERGÉTICO.....	120
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES.....		131
REFERENCIAS.....		133
Apêndice A.....		141

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. 1. Estatística dos preços do combustível Jet em R\$ per litro.....	14
Figura 1. 2. Plano de crescimento neutro de carbono no setor da aviação.....	15
Figura 2. 1. Intervalos do número de carbonos e ponto de ebulição dos combustíveis de transporte comercial.....	21
Figura 2. 2. Principais rotas para a obtenção de biocombustíveis Jet.....	23
Figura 2. 3. Rotas tecnológicas aprovadas pela ASTM para a produção de biojet.....	25
Figura 2. 4. Curva de maturidade tecnológica.....	28
Figura 2. 5. Possíveis reações durante a conversão de uma molécula de triglicerídeo mediante hidrogenação catalítica.....	30
Figura 2. 6. Mecanismos no hidrotratamento do óleo de dendê.....	32
Figura 2. 7. Esquema básico de uma planta de hidrotratamento.....	34
Figura 2. 8. Fases da ACV.....	39
Figura 2. 9. Ilustração do modelo consequencial.....	42
Figura 2. 10. Emissões associadas a cada etapa do ciclo de vida dos estudos precedentes.....	49
Figura 3. 1. Etapas do cultivo do dendê.....	55
Figura 3. 2. Fronteira do sistema para o cenário do dendê.....	60
Figura 3. 3. Sistema produto do cenário dendê.....	61
Figura 3. 4. Fronteira do sistema para o cenário da soja.....	62
Figura 3. 5. Sistema produto do cenário da soja.....	63
Figura 3. 6. Mapa de localização do estado do Pará.....	64
Figura 3. 7. Mapa de localização do estado do Paraná.....	65
Figura 3. 8. Esquema geral do método IMPACT 2002+.....	74
Figura 3. 9. Entradas do subsistema cultivo para 23,5 t/ha de dendê.....	78
Figura 3. 10. Entradas subsistema extração óleo de dendê bruto.....	81
Figura 3. 11. Entradas subsistema refino óleo de dendê.....	84
Figura 3. 12. Entradas subsistema hidrotratamento do óleo de dendê.....	87
Figura 3. 13. Rendimentos médios globais da produção de <i>biojet</i>	88
Figura 3. 14. Entradas do subsistema do cultivo dos grãos de soja.....	92
Figura 3. 15. Entradas do subsistema da extração óleo de soja.....	95
Figura 3. 16. Entradas do subsistema refino do óleo de soja.....	97
Figura 4. 1. Consumo de energia (em MJ) por etapas do ciclo de vida da produção de 1 MJ de energia a partir do óleo de dendê.....	108
Figura 4. 2. Consumo de energia (em MJ) por etapas do ciclo de vida da produção de 1 MJ de energia a partir do óleo de soja.....	110
Figura 4. 3. Resultados comparativos das categorias de impacto da avaliação do ciclo de vida, por MJ produzido.....	112
Figura 4. 4. Resultados comparativos das categorias de dano do cenário de dendê e soja e o jet convencional.....	114
Figura 4. 5. Contribuição por etapas dos impactos ambientais do biocombustível de dendê.....	115
Figura 4. 6. Contribuição por etapas dos impactos ambientais do biocombustível de soja.....	115
Figura 4. 7. Resultados da avaliação das categorias de dano do biocombustível de soja e dendê.....	118
Figura 4. 8. Diagrama de sankey da contribuição de cada processo no resultado final da categoria mudanças climáticas. A) Dendê, B) Soja.....	119

Figura 4. 9. Resultados da avaliação alternativa das categorias de dano do cenário de dendê, soja e jet convencional.	123
Figura 4. 10. Contribuição por etapas dos impactos ambientais da avaliação alternativa do biocombustível de dendê.	124
Figura 4. 11. Contribuição por etapas dos impactos ambientais da avaliação alternativa do biocombustível de soja.	125
Figura 4. 12. Resultados da avaliação alternativa das categorias de dano do biocombustível de soja e dendê.	126
Figura 4. 13. Comparativo dos resultados das categorias de dano para o cenário do dendê, obtidas no método híbrido (H) e de alocação energética (A.E).	128
Figura 4. 14. Comparativo dos resultados das categorias de dano para o cenário da soja, obtidas no método híbrido (H) e de alocação energética (A.E).	129

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. 1. Projeção do crescimento de combustíveis líquidos nos Estados Unidos.....	13
Tabela 2. 1. Norma ASTM D1655 - Requisitos do combustível de turbina de aviação.	21
Tabela 2. 2. Índice de Iodo de vários óleos vegetais.....	33
Tabela 2. 3. Propriedades do biocombustível de aviação.....	35
Tabela 2. 4. Resumo dos principais parâmetros de operação de vários experimentos.....	38
Tabela 2. 5. Resumo dos estudos precedentes sobre ACV de HEFA-Jet.....	45
Tabela 3. 1. Produtividade de CFF do dendê.	54
Tabela 3. 2. Composição de ácidos graxos do óleo de dendê e palmiste.....	54
Tabela 3. 3. Composição de ácidos graxos do óleo de Soja (%).....	57
Tabela 3. 4. Aplicações e substituições de diversos óleos vegetais.	67
Tabela 3. 5. Produção e preços dos principais óleos vegetais no Brasil.	68
Tabela 3. 6. Produção e preços de algumas fontes de forragem animal no Brasil.	70
Tabela 3. 7. Fator de alocação coprodutos hidrotreatamento no cenário do dendê.	72
Tabela 3. 8. Fator de alocação coprodutos hidrotreatamento no cenário da soja.....	72
Tabela 3. 9. Categorias de impacto de vários métodos de avaliação do Simapro.....	73
Tabela 3. 10. Principais fontes dos fatores de caracterização, substâncias de referência e unidades de dano usadas no IMPACT 2002+.	75
Tabela 3. 11. Inventário de produção dos cachos de fruto de dendê.....	78
Tabela 3. 12. Inventário do transporte dos cachos para a usina de extração.....	79
Tabela 3. 13. Inventário da extração do óleo de dendê.	81
Tabela 3. 14. Distâncias rodoviárias e fluviais dos portos até a usina refinadora.....	82
Tabela 3. 15. Inventário do transporte do óleo de dendê para a usina de extração.	83
Tabela 3. 16. Inventário do refino do óleo de dendê.....	84
Tabela 3. 17. Inventário do transporte do óleo de dendê refinado para a refinaria Landulpho Alves, Bahia.	86
Tabela 3. 18. Inventário da produção do biojet.....	89
Tabela 3. 19. Inventário do transporte do biojet.....	90
Tabela 3. 20. Inventário da produção dos grãos de soja.....	92
Tabela 3. 21. Inventário do transporte dos grãos.	94
Tabela 3. 22. Inventário da extração do óleo de soja.	96
Tabela 3. 23. Inventário do refino do óleo de soja.....	97
Tabela 3. 24. Inventário do transporte do óleo de soja.....	98
Tabela 3. 25. Inventário da produção do biojet.....	99
Tabela 3. 26. Inventário do transporte do biojet.....	100
Tabela 4. 1. Inventário consolidado da produção de 0,0234 kg de biocombustível para aviação a partir do óleo de dendê.....	102
Tabela 4. 2. Inventário consolidado da produção de 0,0234 kg de biocombustível para aviação a partir do óleo de soja.....	105
Tabela 4. 3. Balanço de CO ₂ para a produção de 1 MJ de energia a partir do óleo de dendê.....	107
Tabela 4. 4. Balanço de CO ₂ para a produção de 1 MJ de energia a partir do óleo de soja.....	110
Tabela 4. 5. Resultados comparativos por categorias de impacto da avaliação do ciclo de vida, por MJ produzido.....	112

Tabela 4. 6. Resultados por categorias de dano da avaliação do ciclo de vida, por MJ de combustível produzido.....	113
Tabela 4. 7. Emissões e créditos atribuídos aos cenários de estudo por MJ de biocombustível produzido.....	120
Tabela 4. 8. Fator de alocação com critério energético no cenário alternativo do dendê.....	121
Tabela 4. 9. Fator de alocação com critério energético no cenário alternativo da soja.....	121
Tabela 4. 10. Resultados gerais por categorias de dano da avaliação do ciclo de vida, por MJ de combustível produzido.....	122
Tabela 4. 11. Resultados gerais por categorias de impacto da avaliação do ciclo de vida, por MJ de combustível produzido.....	122
Tabela A. 1. Inventário da produção de 1 kg de petróleo (Borges, 2004).....	141
Tabela A. 2. Inventário da produção de 1kWh de energia elétrica (Coltro, 2003).....	142
Tabela A. 3. Produção de 1 kg de diesel (Borges, 2004).....	144
Tabela A. 4. Produção de 1kg de gás natural (Ribeiro, 2009).....	145
Tabela A. 5. Produção de 1 kg de óleo combustível (Borges, 2004).....	146
Tabela A. 6. Produção de 1 kg de P ₂ O ₅ (Viana, 2008).....	147
Tabela A. 7. Produção de 1 kg de K ₂ O (Viana, 2008).....	148
Tabela A. 8. Produção de 1 kg de uréia (Ribeiro, 2009).....	150
Tabela A. 9. Produção de 1 kg de H ₃ PO ₄ (Kulay, 2004).....	151
Tabela A. 10. Produção de 1 kg de hidróxido de sódio (Viana, 2008).....	153
Tabela A. 11. Produção de 1 MJ de vapor a partir do diesel.....	155
Tabela A. 12. Produção de 1 MJ de vapor a partir do gás natural.....	156
Tabela A. 13. Produção de 1000 kg de calcário (Queiroz, 2011).....	157
Tabela A. 14. Produção de 1 kg de hexano (Altamirano, 2013).....	159

SIGLAS

ACV	Análise do Ciclo de Vida
ASTM	Sociedade Americana para Testes e Materiais (do inglês, <i>American Society for Testing and Materials</i>).
ATJ	Álcool para combustível de aviação (do inglês, <i>Alcohol to Jet</i>).
CAAFI	Iniciativa de Aviação Comercial para Combustíveis Alternativos (do inglês <i>Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative</i>).
COVNM	Compostos Orgânicos Voláteis não-Metanados (do francês, <i>Composés Organiques Volatils Non Méthaniques</i>).
DCO	Descarbonilação.
DCO ₂	Descarboxilação.
DSHC	Fermentação direta de Açúcares para Hidrocarbonetos (do inglês, <i>Direct Sugars to Hydrocarbons</i>).
FT	Fischer-Tropsch.
GEE	Gases de Efeito Estufa
HDO	Hidrodessoxigenação
HEFA	Ésteres e Ácidos Graxos Hidroprocessados (do inglês, <i>Hydroprocessed Esters and Fatty Acids</i>).
IATA	Associação Internacional de Transporte Aéreo (do inglês, <i>International Air Transport Association</i>).
LUC	Mudanças no uso do solo (do inglês, <i>Land Use Change</i>).

CAPÍTULO 1 – APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

1.1. INTRODUÇÃO

Os biocombustíveis não são obtidos a partir de hidrocarbonetos de origem fóssil; dessa forma, eles podem gerar créditos de carbono. Eles não emitem SO_x , uma vez que a biomassa vegetal contém quantidades muito pequenas de enxofre. Os biocombustíveis também podem ser adequados a várias condições agrícolas, o que torna a sua produção possível em todo o mundo. Além disso, eles geram menores emissões de poluentes durante a combustão em relação aos combustíveis derivados de petróleo (Xiu e Shahbazi, 2012). Apesar das vantagens que os biocombustíveis oferecem, existe uma crescente preocupação pelo fato que poderiam competir com o uso de recursos naturais, tais como solo e água, os quais são usados na produção de alimentos. Também, dado que sua produção depende do tipo de biomassa e solo, assim como das técnicas empregadas, o balanço de dióxido de carbono não é sempre positivo, comprometendo sua sustentabilidade (Hari et al., 2015).

Atualmente, diversas empresas estão pesquisando novas rotas com o objetivo de se encontrar uma solução ideal para a substituição dos combustíveis derivados de petróleo por alternativas renováveis. Não obstante, não há uma tecnologia única estabelecida que se possa alcançar esse objetivo, pois cada uma delas está sendo desenvolvida para se ajustar uma matéria-prima disponível.

Um setor da indústria de transporte que tem reportado um grande compromisso com o desenvolvimento de combustíveis alternativos é o setor da aviação. Atualmente, o setor aeronáutico é responsável por 2% das emissões globais de CO_2 , assim como 12% do consumo mundial de combustível. Apesar de serem valores relativamente baixos, espera-se que o tráfego aéreo seja duplicado em 15 anos a partir de 2012, sendo previsto que no ano 2030 serão transportados um total de 7 bilhões de passageiros, representando uma taxa de crescimento anual de 3,8%. Isto resultará em um aumento total do consumo de energia de 55% até 2050 (10,8 EJ em 2011 para 24,3 EJ em 2050), bem como das emissões de CO_2 (1,8 bilhões de toneladas em 2050) (IATA, 2015).

De acordo com a Administração de Informação Energética dos Estados Unidos (*Energy Information Association - EIA*) o combustível de aviação (*Jet fuel*) prevê a

maior taxa de crescimento em comparação a outros combustíveis líquidos como apresentado na Tabela 1.1. Nesse sentido, o setor de transporte rodoviário pode facilmente substituir o uso de combustíveis fósseis por biocombustíveis ou inclusive por outras fontes alternativas de energia, como por exemplo, a eletricidade. Entretanto, no caso da aviação o mesmo cenário não pode ser repetido. Adicionalmente, a diminuição da disponibilidade de petróleo reduz a qualidade e produtividade do combustível de aviação, uma vez que apenas quatro galões dele são produzidos a partir de um barril estadunidense de petróleo, (EIA, 2017a, 2017b).

Tabela 1. 1. Projeção do crescimento de combustíveis líquidos nos Estados Unidos

Combustíveis Líquidos nos EU e tamanho de mercado do produto (bilhões litros/ano)			
	2015	2050	Taxa de crescimento (%/ano)
Gasolina	534	431	-0,6
Diesel	231	242	0,14
Gas Liquefeito de Petróleo	148	204	1
Outros	117	144	0,7
Combustível de aviação	91	148	1,8
Óleo combustível residual	15	23	1,42
Total	1136	1192	

Fonte: traduzido de (US Energy Information Administration, 2017b)

Outro aspecto importante está relacionado com o preço do combustível de aviação, visto que ele corresponde a 30% do custo operacional total das companhias aéreas (Chiaramonti et al., 2014). Assim, a instabilidade do mercado global do petróleo tem um impacto direto no setor, como pode ser observado na Figura 1.1. Por exemplo, no ano 2008 o preço do combustível de aviação era de R\$1,66/l e caiu para R\$0,77/l no ano 2009; no ano 2013 ele atingiu um preço de R\$1,85/l caindo de novo para R\$1/l no ano 2016.

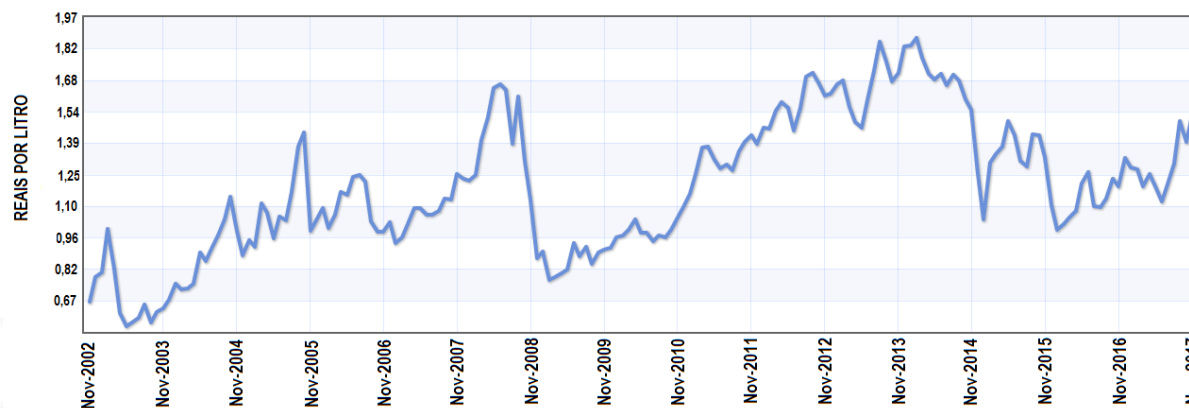


Figura 1. 1. Estatística dos preços do combustível Jet em R\$ por litro

Fonte: (INDEX MUNDI, 2017)

O rápido aumento dos preços do petróleo a partir dos anos 2000 resultou na criação de várias iniciativas, principalmente nos Estados Unidos, para a pesquisa, desenvolvimento e produção de combustíveis a partir de biomassa. Embora as iniciativas estivessem voltadas à produção de biodiesel, as tecnologias e métodos desenvolvidos tiveram um impacto direto na produção de biocombustíveis de aviação. No período de 2008 a 2013, o consórcio de partes interessadas denominado Iniciativa de Combustíveis Alternativos para Aviação Comercial (*Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative - CAAFI*), liderou vários projetos para testar e certificar biocombustíveis de aviação, o que resultou na padronização e certificação de 4 métodos de produção diferentes: (1) Fischer-Tropsch (FT) querosene, (2) Ésteres e Ácidos Graxos Hidroprocessados (HEFA), (3) Fermentação Direta de Açúcares para Hidrocarbonetos (DSHC), e (4) Álcool para Combustível de Aviação (ATJ) (McWilliams, 2017; DOE, 2017).

Iniciativas ambientais também têm sido criadas com o objetivo de reduzir o impacto ambiental da indústria bem como para incentivar a produção de biocombustíveis. A Associação Internacional de Transporte Aéreo (*International Air Transport Association – IATA*), que é uma associação internacional de linhas aéreas cujo objetivo é o apoio das atividades de aviação e a ajuda na formulação de políticas em questões críticas da indústria, estabeleceu no ano 2009 um plano para a redução de emissões no setor da aviação, denominado Crescimento Neutro de Carbono conforme expresso na Figura 1.2, o qual é composto por 3 objetivos:

- 1) Melhorar a eficiência da queima de combustível em 1,5% por ano até o 2020.
- 2) Crescimento neutro das emissões de carbono a partir do 2020.
- 3) Redução líquida das emissões de carbono em 2050 para metade dos níveis do ano 2005.

Trajetória da redução de emissões

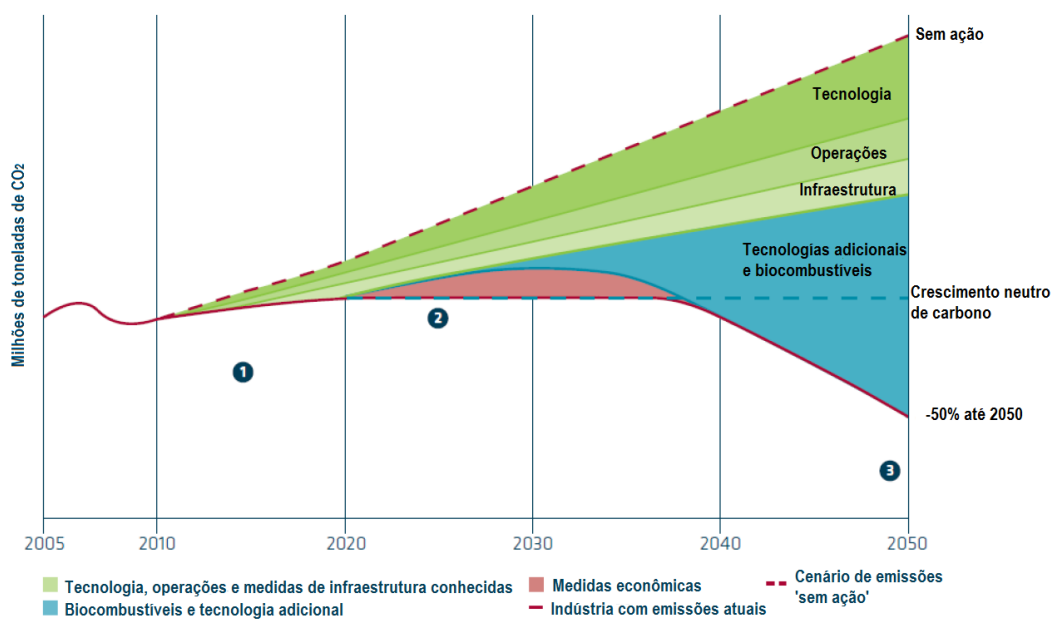


Figura 1. 2. Plano de crescimento neutro de carbono no setor da aviação.

Fonte: traduzido de (IATA, 2015a)

Para se atingir esses objetivos, várias medidas tais como melhorias tecnológicas, operacionais e de infraestrutura precisam ser adotadas pela indústria; porém, a adoção de combustíveis alternativos é fundamental para garantir a consecução das metas estabelecidas. A Administração Federal de Aviação dos Estados Unidos (*Federal Aviation Administration* - FAA) estabeleceu como meta a produção de 3,78 bilhões de litros de combustível de aviação obtidos a partir de fontes renováveis para o ano 2018. Além disso, diversas políticas ambientais tem sido adotadas na Europa, como é o caso da *European Advanced Biofuels Flight Path* que visa a produção de 2 milhões de toneladas de combustíveis derivados de fontes renováveis para o ano de 2020. Outra medida adotada para a redução das emissões foi tomada pelo Conselho para Pesquisa Aeronáutica na Europa, que busca uma redução das emissões de CO₂ por passageiro-quilômetro de 50% até 2020 e de 75% até 2050, em relação aos níveis do ano 2000

(Deane et al., 2015). No ano 2015, 22 companhias aéreas realizaram mais de 2000 vôos no mundo usando biocombustíveis; no entanto, os preços continuam sendo maiores que os combustíveis convencionais, limitando a difusão de sua comercialização (IATA, 2015).

O Brasil é o terceiro maior mercado de voos domésticos no mundo. A taxa de crescimento nas viagens domésticas e internacionais no período de 2004 a 2014 foi de 170%, alcançando 117 milhões de viajantes em 2014, e é esperado um crescimento de 109% a partir desse ano até 2020 (Finn, 2016). Atualmente, o consumo de combustível de aviação é de 7 milhões de metros cúbicos e a projeção para o ano de 2020 é de 11 a 12 milhões de metros cúbicos por ano. Devido aos impostos incluídos no valor de mercado do país, como por exemplo, o Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS), o preço do combustível de aviação é 17% superior à média global, aumentando assim, a sua participação nos custos operacionais das companhias aéreas para 40% (Lang, 2014).

Embora atualmente no país não exista produção comercial de *biojet*, ele está comprometido com as metas de redução de emissões propostas pela indústria, resultando na criação de várias iniciativas. A Aliança Brasileira para Biocombustíveis de Aviação (ABRABA), promove iniciativas públicas e privadas buscando o desenvolvimento e a certificação de biocombustíveis sustentáveis para a aviação. Além disso, estabeleceu-se o projeto Plano de Vôo para Biocombustíveis de Aviação no Brasil, que apresenta os caminhos para estabelecer uma indústria de biocombustíveis, e a Plataforma Brasileira de Bioquerosene, que busca formar uma cadeia de valor integrada para a produção de biocombustível de aviação no país (ABRABA, 2017; Cortez et al., 2013; UBRABIO, 2013). Segundo a União Brasileira do Biodiesel e Bioquerosene (UBRABIO), algumas companhias aéreas tem mostrado seu interesse em comprar biocombustíveis, sempre que haja paridade dos preços com o combustível convencional. A estimativa de investimento para construção de refinarias de biocombustível de aviação está na faixa de R\$1 a R\$5 bilhões, podendo gerar aproximadamente 60 mil empregos diretos no país.

No ano 2010, duas empresas estrangeiras especializadas em biotecnologia com sede no país, a Total® e a Amyris®, encontravam-se trabalhando no desenvolvimento de um biocombustível de aviação obtido a partir da conversão do farneseno, que é um

produto intermediário da fermentação de açúcares. Embora o produto tenha sido testado em vários vôos comerciais no país (durante a RIO+20 em 2012 e na Copa do Mundo em 2014) e de contar com a aprovação da Sociedade Americana para Testes e Materiais (*American Society for Testing and Materials* - ASTM); os planos das empresas para expandir sua capacidade de produção de biocombustível de aviação tem mudado para se focar na produção de saborizantes e fragrâncias, devido ao alto custo de produção e do melhor valor de venda do farneseno para a indústria química (Pereira et al., 2017).

Desse modo, novas rotas de produção estão sendo pesquisadas por várias entidades e universidades, de acordo as matérias primas disponíveis no país. É destacado o hidrocessamento de óleos vegetais, que consiste em vários mecanismos de reação catalítica na presença de hidrogênio com o objetivo de saturar as duplas ligações e de remover o oxigênio presente no óleo (Sau et al., 2005). A tecnologia é certificada pela ASTM e é considerada promissória para o cenário brasileiro devido às grandes vantagens que oferece, se comparada com outras tecnologias. Como exemplo, esta tecnologia pode ser ajustada para o processamento de uma ampla variedade de matérias-primas lipídicas. Além disso ela pode ser integrada em uma refinaria de petróleo convencional existente devido as suas semelhanças com o processo de *upgrading* do petróleo. Nesse caso, o produto pode ser misturado com combustíveis tradicionais e usado em motores convencionais sem qualquer necessidade de modificação. Portanto, o produto obtido pode superar algumas das desvantagens de outros métodos de processamento, resultando em um produto final de melhor qualidade, que atende plenamente aos padrões estabelecidos pela ASTM, tais como: escoamento a frio, ponto de congelamento, estabilidade térmica, etc (Eller et al., 2016).

Os biocombustíveis aeronáuticos tem sido testados de maneira satisfatória em vários vôos comerciais no Brasil, e atualmente a sua viabilidade técnica está sendo estudada por meio de algumas aplicações experimentais, como no caso da Universidade Federal de Minas Gerais onde está se estudando o hidrotreatamento do óleo da macaúba, sendo o interesse atual do governo desse Estado voltado à integração entre as biomassas regionais e a logística necessária para otimizar a sua cadeia de produção (Silva et al., 2016; CODEMIG, 2015).

Assim, visando ao cumprimento das metas de redução estabelecidas pela indústria, torna-se necessário realizar uma avaliação do uso energético e dos potenciais

impactos ambientais da alternativa. A Análise do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia amplamente usada para medir os benefícios ambientais de um produto, a qual leva em consideração as entradas e saídas de energia e materiais durante todo o seu ciclo de vida. Ela permite realizar um comparativo das emissões atribuídas entre os combustíveis convencionais e os obtidos a partir de matérias-primas renováveis (De Kleine et al., 2017). A metodologia tem sido aplicada em estudos prévios sobre sustentabilidade de várias rotas de produção de biocombustíveis de aviação no mundo, com o objetivo de ajudar na tomada de decisões das principais autoridades da indústria aeronáutica (IATA, 2015a). Em relação à HEFA, 10 estudos de avaliação de impactos ambientais foram encontrados no contexto global, porém, nenhum deles está particularizado para as condições brasileiras. A ACV contabiliza aspectos particulares do sistema de produto, principalmente durante a colheita dos dados do inventário dos fluxos de materiais e energia. Por isso é indispensável realizar a avaliação no contexto Brasileiro, que reflete melhor o panorama atual do país.

1.2. OBJETIVO DA PESQUISA

1.2.1. Objetivo Geral

Realizar uma avaliação comparativa do impacto ambiental da produção de biocombustível de aviação a partir dos óleos de dendê e soja nas condições Brasileiras, utilizando a tecnologia de hidrocessamento, por meio da Análise do Ciclo de Vida.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Fundamentar teoricamente a escolha do método de produção do biocombustível de aviação
- Definição da metodologia para a realização da Análise do Ciclo de vida dos sistemas escolhidos.
- Determinar a eficiência energética das rotas tecnológicas assim como a influência de diversos métodos de alocação de coprodutos, sobre os resultados da avaliação.

1.3. CONTRIBUIÇÃO E HIPÓTESE DA PESQUISA

Segundo a CAAFI, é preciso realizar uma avaliação ambiental das novas rotas de produção de biocombustíveis de aviação antes do estabelecimento da cadeia produtiva ou da introdução das matérias primas. Diante da falta de estudos ambientais que subsidiem as iniciativas de produção de biocombustíveis de aviação que estão se desenvolvendo no Brasil, a contribuição do presente trabalho consiste na quantificação do potencial impacto ambiental da produção de biocombustíveis para aviação no Brasil, a partir do hidrotreamento do óleo de dendê e soja mediante a avaliação do ciclo de vida. Durante a realização da análise quantitativa se contribui também com o levantamento dos inventários dos fluxos de materiais e de energia do ciclo de vida do produto, particularizando para as condições Brasileiras.

1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

No Capítulo 1 é apresentada uma introdução ao tema dos biocombustíveis aeronáuticos, assim como algumas considerações iniciais referentes ao tema da dissertação. São explicitados os objetivos que se pretendem alcançar com o desenvolvimento da dissertação.

No Capítulo 2 é realizada uma revisão bibliográfica das rotas de produção de biocombustíveis *jet*, com enfoque na rota de hidrotreamento de óleos vegetais, e da metodologia de ACV. São também apresentados alguns estudos precedentes sobre ACV de biocombustíveis *jet* hidrotreadados.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia desenhada para este trabalho. Nela são descritas as considerações feitas para cada sistema e para a metodologia de ACV. São também apresentados os inventários do ciclo de vida de cada matéria prima.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos em cada um dos cenários propostos, mostrando o impacto ambiental da produção de *biojet* nas condições Brasileiras.

E, por fim, o Capítulo 5 apresenta as principais conclusões do trabalho e também as sugestões para os trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo está dividido em três seções. Na primeira é feita uma revisão das principais rotas de produção de *biojet* com o objetivo de fundamentar a escolha do processo a ser avaliado. Na segunda parte introduzem-se os conceitos básicos da tecnologia HEFA e na terceira é apresentada a metodologia de ACV junto com os trabalhos precedentes à presente dissertação.

2.1. COMBUSTÍVEL DE AVIAÇÃO CONVENCIONAL

O combustível de aviação é uma mistura complexa de hidrocarbonetos de corte C9-C14 e que corresponde à fração de destilação da faixa do querosene (ao redor de 130-235°C) (Figura 2.1). O combustível de aviação convencional é uma mistura de centenas de hidrocarbonetos, consistindo principalmente em parafinas (58,7%), naftenos ou cicloparafinas (21,22%) e aromáticos (13,36%), assim como alguns aditivos. A alta relação hidrogênio/carbono das parafinas aumenta o conteúdo energético (em relação mássica) e melhora o seu desempenho na combustão, porém resultando em propriedades mais pobres de baixa temperatura. As cicloparafinas têm uma relação hidrogênio/carbono menor, porém elas melhoram o ponto de congelamento do combustível, o qual é um parâmetro vital para voos em elevada altitude. Por outro lado, os aromáticos aumentam a massa específica e garantem a volatilidade adequada ao combustível. Todavia, produzem fumaça na combustão e tem um grande potencial carcinogênico e mutagênico, por isso os seus níveis são restritos (20-25%).

A presença de aromáticos é a principal diferença do combustível de aviação convencional em relação aos biocombustíveis, pois os últimos carecem deles na sua composição sendo o principal motivo da restrição a seu uso em certas proporções de mistura, para garantir a compatibilidade do combustível com o motor da aeronave (Zhang et al., 2016).

Derivados de petróleo e típicas faixa de corte																	
Composição	C3-C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20
PEB a 760 mm n-parafina																	
°C		36	96	98	126	151	174	196	216	235	253	270	287	302	316	329	343
GLP	↔																
NAFTA	↔																
GASOLINA	↔																
QUEROSENE	↔																
JET	↔																
DIESEL	↔																

Figura 2. 1. Intervalos do número de carbonos e ponto de ebulição dos combustíveis de transporte comercial.

Fonte: (Salem, 2005)

O principal fator de distinção em relação aos combustíveis tradicionais são as suas propriedades físico-químicas, o devido aos requerimentos técnicos juntamente com as condições operacionais que deve enfrentar, isto é, um avião pode decolar de um deserto abrasador, subir até 9.000 metros e pousar em uma zona úmida. Durante todas essas condições extremas, o combustível não pode congelar, evaporar ou absorver água. Elas são especificadas pela ASTM na norma D1655 (Tabela 2.1) (Kallio et al. 2014; Radich, 2015).

Tabela 2. 1. Norma ASTM D1655 - Requisitos do combustível de turbina de aviação.

Propriedade	Unidade		Jet A-1
COMPOSIÇÃO			
Acidez total	mg KOH/g	Max	0,1
Aromáticos	% vol	Max	26,5%
VOLATILIDADE			
Ponto de fulgor	°C	Min	38
Densidade @ 15°C	kg/m ³	Min	775-840
Ponto de congelamento	°C	Max	-40 Jet A
Viscosidade @ -20°C	mm ² /s	Max	8,0
COMBUSTÃO			
Poder calorífico inferior	MJ/kg	Min	42,8
ESTABILIDADE TÉRMICA			
Estabilidade térmica @ 260°C	mm Hg	max	25

Fonte: (ASTM, 2015)

Alguns tipos de combustíveis de aviação civis mais comuns usados no mundo incluem (IATA, 2015b):

- Jet A-1 definido pelas especificações ASTM D1655 e pela norma DEF STAN 91-91 publicada pelo Ministério da Defesa do Reino Unido. Jet A-1 é o combustível de aviação mais comumente disponível em todo o mundo.
- Jet A definido pelas especificações ASTM D1655 (Jet A) que é usado principalmente nos Estados Unidos. A principal diferença física entre o Jet A-1 e o Jet A é o ponto de congelamento (-47°C e -40°C respectivamente).
- TS-1 definido pelas especificações GOST 10227 aprovada pela Rússia e usado na Comunidade de Estados Independentes (CEI) e algumas partes da Europa Oriental.
- Jet Fuel N° 3 definido pelas especificações GB6537, sendo o combustível predominante usado na China (é equivalente ao Jet A-1).
- QAV-1 definido pelas especificações ASTM D1655 e DEF STAN 91-9. É o combustível usado no Brasil e o órgão regulador é a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).

Segundo a Petrobras, as exigências de qualidade do combustível de aviação são (Petrobras, 2014):

- Proporcionar máxima autonomia de voo.
- Proporcionar queima limpa e completa com mínimo de formação de resíduos.
- Proporcionar partidas fáceis, seguras e com facilidade de reacendimento.
- Escoar em baixas temperaturas e ser estável química e termicamente.
- Não ser corrosivo aos materiais da turbina.
- Apresentar mínima tendência à solubilização de água.
- Ter aspecto límpido indicando ausência de sedimentos.
- Não apresentar água livre para evitar o desenvolvimento de micro-organismos e formação de depósitos que possam obstruir filtros.
- Oferecer segurança no manuseio e estocagem.

2.2. ROTAS TECNOLÓGICAS APROVADAS PARA A PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEL DE AVIAÇÃO

Geralmente, os combustíveis de aviação renováveis são produzidos mediante três rotas: termoquímica, oleoquímica e bioquímica (Figura 2.2). Algumas das alternativas de conversão atuais em desenvolvimento incluem: processamento de biomassa lignocelulósica mediante a reação de síntese Fischer-Tropsch (FT), Liquefação Hidrotérmica (HTL) e Pirólise, hidrotreamento de lípidos/ácidos graxos e hidrotérólise catalítica, fermentação direta de açúcares para hidrocarbonetos (DSHC), bem como outras tecnologias híbridas, como a rota de álcool para combustível de aviação (ATJ) e Reforma em fase líquida (APR) (Karatzos e Van Dik, 2017).

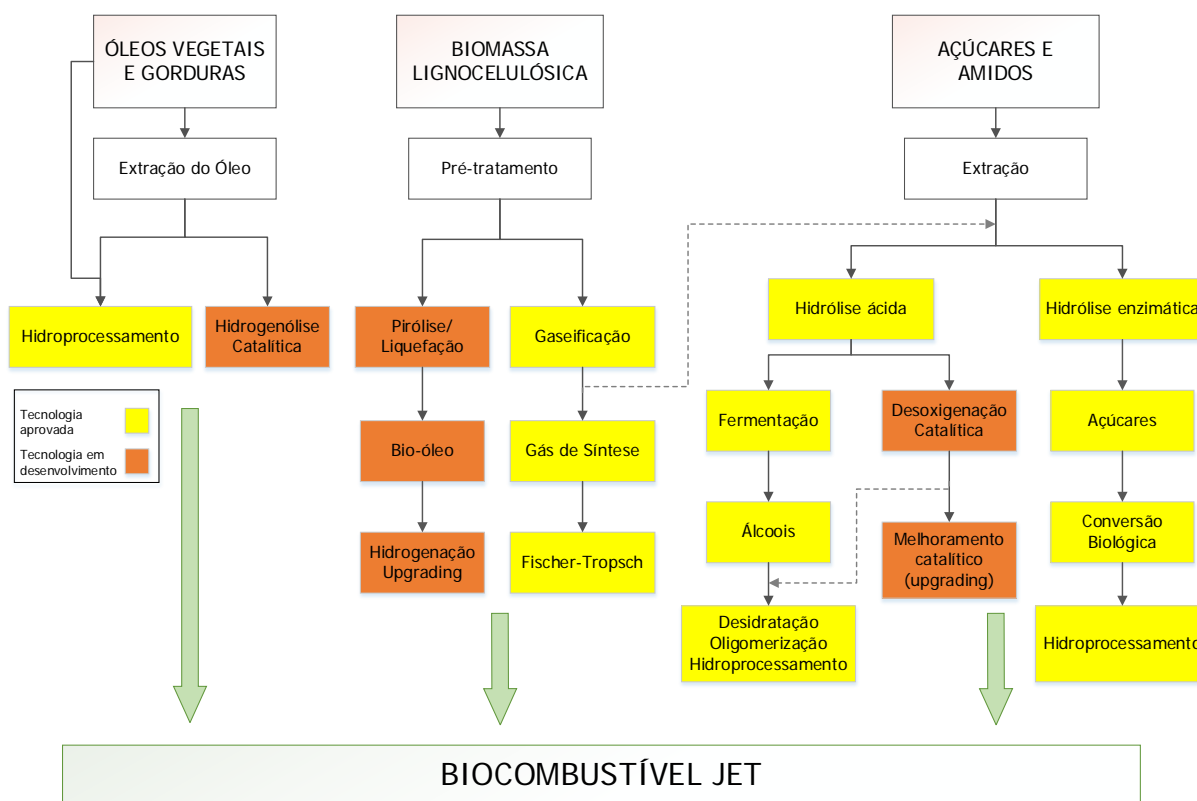


Figura 2. 2. Principais rotas para a obtenção de biocombustíveis Jet.

A autoridade encarregada de estabelecer os requerimentos dos combustíveis aeronáuticos é a ASTM e, como mencionado no Capítulo 1, elas são dadas na norma

ASTM D1655: *Standard Specification for Aviation Turbine Fuels*. O processo de certificação de um novo combustível ou de um componente de mistura para uso na aviação comercial e militar está definido na norma ASTM D4050. Ele pode levar de 1 a 6 anos e é um pré-requisito obrigatório para que o combustível possa ser usado (Wilson et al., 2013).

Os combustíveis que cumprem com sucesso o processo de aprovação são incluídos na norma ASTM D7566: *Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons*, que descreve os tipos específicos de combustíveis aeronáuticos para uso civil que contêm hidrocarbonetos sintetizados (ASTM, 2017). Algumas outras condições que o novo tipo de biocombustível deve cumprir para entrar no mercado dos combustíveis incluem (Mamedova et al., 2010):

- Ser usado em motores sem necessidade de modificação e sem afetá-lo;
- Ser facilmente integrado à estrutura de mercado atual;
- Ser facilmente misturado com combustíveis fósseis;
- Ser de alta qualidade e ter uma combustão mais limpa.

Na Figura 2.3 são apresentados os quatro processos de produção de biocombustível de aviação que estão atualmente certificados. De acordo com a norma ASTM D7566 esses biocombustíveis só podem ser usados misturados com combustível de aviação convencional para garantir a quantidade mínima de todos os componentes na composição final do combustível e para se assegurar a compatibilidade do combustível com a aeronave e a infraestrutura atual.

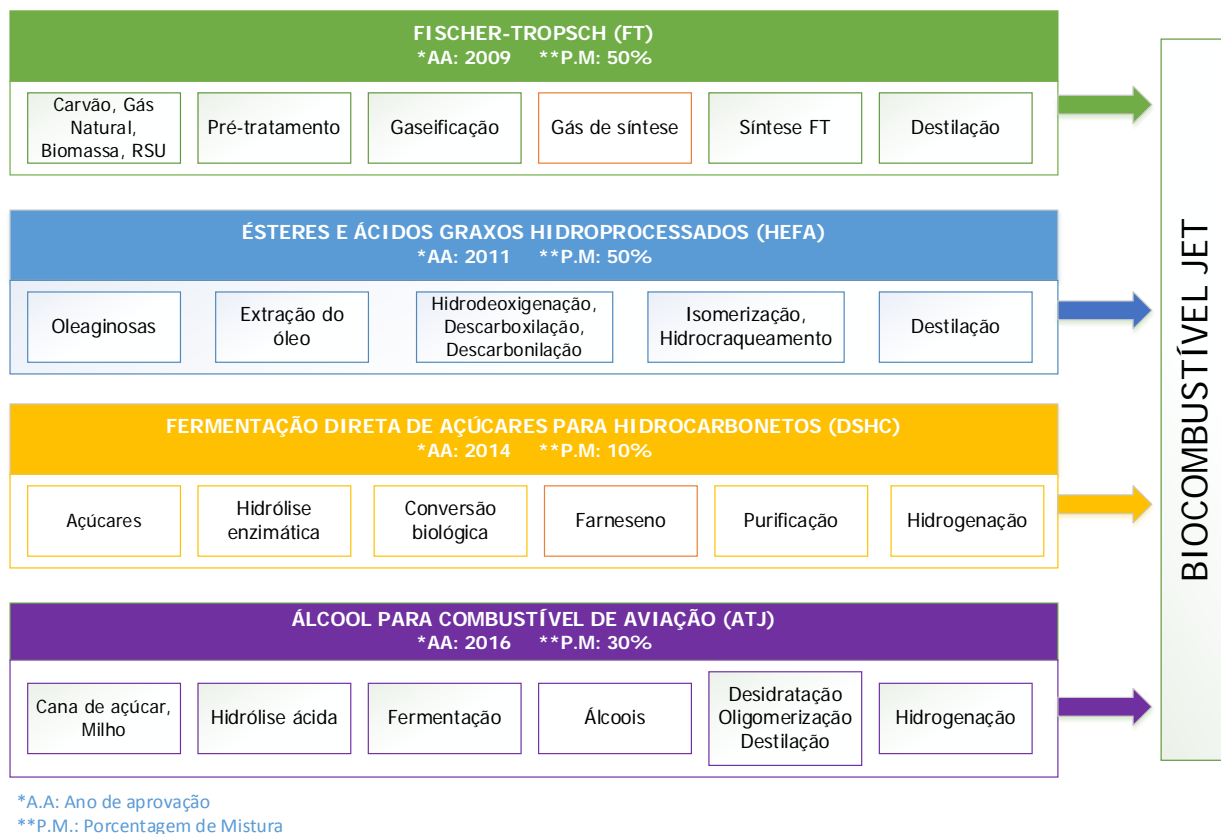


Figura 2. 3. Rotas tecnológicas aprovadas pela ASTM para a produção de *biojet*.

Fonte: Adaptado de (Chuck, 2016).

Na Figura 2.3 podem ser observadas as principais etapas de cada tecnologia assim como o ano da sua aprovação e a porcentagem de mistura máxima permitida. A primeira rota aprovada é a síntese de FT no ano 2009, na qual pode-se usar carvão, gás natural ou biomassa como matéria-prima. Devido ao baixo conteúdo de aromáticos presentes no biocombustível obtido, é necessário que seja misturado com pelo menos 50% de combustível de aviação convencional para seu uso.

A segunda rota a receber aprovação é a HEFA no ano 2011, mediante a conversão de óleos vegetais e gorduras animais. Similarmente à síntese FT, o seu uso está limitado a uma proporção de 50% de mistura devido à carência de aromáticos na composição do biocombustível produzido.

A terceira rota que foi aprovada é a DSHC, que consiste na fermentação de açúcares para produzir farneseno, o qual é depois hidrogenado e convertido em biocombustível aeronáutico. Além da baixa proporção de aromáticos presentes no biocombustível fabricado, a sua distribuição de carbonos é composta unicamente por C15, o que faz com que a proporção de mistura máxima permitida para o seu uso seja de 10%.

A rota mais recente em receber aprovação é a ATJ, baseada na oligomerização de álcoois (como metanol, etanol ou butanol) em combustíveis na faixa de corte do querosene. A proporção de mistura permitida para do biocombustível obtido nesta rota é de 30%.

As bases conceituais e os aspectos técnicos referentes a cada uma delas têm sido relatados em estudos prévios. Li et al. (2016), Hanaoka et al. (2015) e Yan et al. (2013), estudaram a síntese de *biojet* através da reação FT, usando biomassa lenhosa e diferentes tipos de catalisadores. As condições de reação tiveram um impacto direto sobre os rendimentos da produção do *biojet*, que foram de 83,3%, 21,5% e 86%, respectivamente, e o produto final mostrou propriedades similares ao combustível de aviação convencional.

Por outro lado, Wu et al. (2017), Chu et al. (2017) e Eller et al., (2016) relataram a conversão de biocombustível de aviação mediante o hidrocessamento de várias oleaginosas usando diversos catalisadores. Aspectos importantes estudados incluem a composição da matéria-prima, o consumo de hidrogênio, a demanda de energia e a seletividade do processo. Os rendimentos alcançados foram maiores que 60%, em geral. O biocombustível obtido atendeu à maioria dos requerimentos para seu uso em turbinas aeronáuticas.

Referente à rota de Fermentação Direta de Açúcares para Hidrocarbonetos (DSHC), muitas pesquisas estão voltadas para alcançar melhorias na síntese microbiana e na tecnologia do processo. Vale a pena ressaltar os trabalhos de Cuellar e Van Der Wielen (2015) e de Brennan et al. (2015). O primeiro apresenta uma revisão bibliográfica dos recentes avanços na produção microbiana e sua aplicação à produção de diesel e querosene. No segundo trabalho, foi proposta uma modificação na

Saccharomyces Cerevisiae para melhorar a sua tolerância à toxicidade na produção de monoterpenos, para sua posterior conversão em combustível.

Similarmente, são também encontrados na literatura estudos que avaliam a tecnologia ATJ. Yao et al. (2017) e Atsonios et al. (2015) realizaram uma modelagem do processo ATJ a partir de vários tipos de biomassa: milho, cana de açúcar e miscantus no primeiro caso, e biomassa lenhosa no segundo. Foi também efetuado um estudo técnico econômico para cada uma das alternativas. Foi concluído que a cana-de-açúcar é a matéria-prima mais promissora e que apesar de que a viabilidade econômica ainda esteja longe da comercialização, a rota apresenta melhores desempenhos em eficiência térmica comparada com a rota FT.

Assim, a viabilidade técnica de todas as rotas em geral, tem sido demonstrada, e os produtos obtidos tem provado satisfazer os requisitos mínimos para seu uso em diferentes proporções de mistura em motores aeronáuticos.

No que diz respeito ao status atual do desenvolvimento e implantação dessas rotas de conversão, vários trabalhos tem também abordado o assunto. O Nível de Prontidão Tecnológica (*Technology Readiness Level* - TRL) é uma escala métrica desenvolvida pela NASA. É usada como ferramenta para avaliar o nível de maturidade de uma tecnologia e realizar a comparação de diferentes tipos de tecnologias. Fundamentada nessa metodologia, a CAAFI propôs uma escala personalizada, com a finalidade de acompanhar o desenvolvimento, certificação e fornecimento de combustíveis alternativos para o setor aeronáutico (Steiner et al., 2012). Com base na ferramenta acima mencionada bem como nos estudos de De Jong et al. (2015), Diederichs et al. (2016), Mawhood et al. (2012) e Gutiérrez-Antonio et al. (2017), uma curva de maturidade tecnológica é proposta na Figura 2.4.

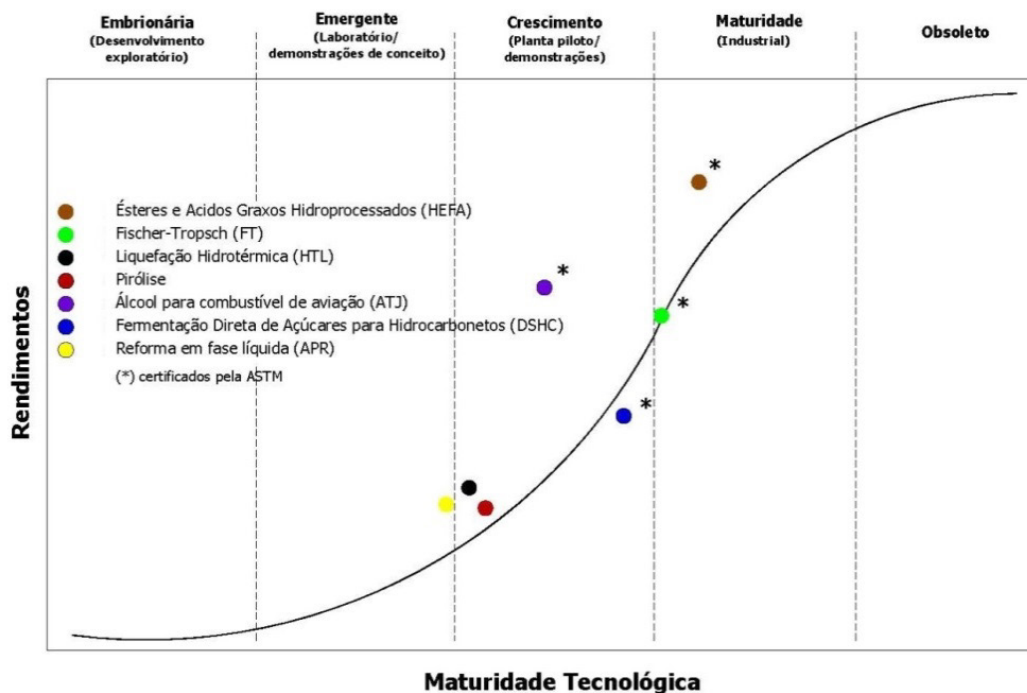


Figura 2. 4. Curva de maturidade tecnológica.

Fonte: (Vásquez et al., 2017).

Da Figura 2.4 verifica-se que HEFA é a tecnologia com maior desenvolvimento, sendo a mais amplamente utilizada na indústria. Com relação às outras rotas, algumas desvantagens que tornam mais lento o desenvolvimento são: dificuldades de logística das matérias primas e na limpeza do gás de síntese, e alto investimento de capital no caso de FT; alto custo de produção, baixos rendimentos e melhores preços de mercado de outros produtos para a indústria química na rota de DSHC; e estágio inicial de desenvolvimento dos processos de conversão de álcoois para Jet, na tecnologia ATJ.

Adicionalmente, a viabilidade financeira de cada tecnologia tem sido avaliada por Pereira et al., (2017), Diederichs et al. (2016) e De Jong et al. (2015). Especificamente, Alves et al. (2016) realizaram um estudo técnico-econômico de todas as rotas nas condições Brasileiras, sendo concluído em todos os estudos que HEFA, é a tecnologia mais promissora em termos econômicos (atingindo o menor preço mínimo de venda de combustível dentre todas as tecnologias, sobre diversas suposições) e é a rota mais favorável no contexto Brasileiro, junto com a DSCH

A tecnologia tem sido usada na maioria de voos demonstrativos (desde 2008) e comerciais (desde 2011) e conta com múltiplas implantações comerciais e acordos para fomentar sua produção. Algumas das culturas oleaginosas atualmente usadas para a produção comercial de HEFA incluem: camelina, girassol, soja, pinhão manso, canola, coco, algodão, entre outros (ETIP, 2017). Além dos óleos vegetais, outras matérias primas para a produção de biocombustíveis jet hidroprocessados incluem lignocelulose, algas, lodo de esgoto, óleo de cozinha usado e gorduras animais (Furimsky, 2013).

A sua capacidade operacional instalada atual é de 4,3 bilhões de litros por ano e os dois principais produtos líquidos obtidos no processo são querosene e diesel, denominados HEFA-Jet e HEFA-Diesel, respectivamente. A principal barreira que o HEFA-Jet enfrenta está relacionada aos custos de produção pois o HEFA-Diesel requer menos insumos para ser produzido e tem um maior preço de venda no mercado (o valor no mercado do diesel é de 1,65 R\$/L e o do Jet A é de 1,51 R\$/L, no ano 2017). Outro aspecto que tem um impacto grande no desenvolvimento comercial da tecnologia são as matérias primas, uma vez que elas representam cerca de 80% dos custos de produção, e na maioria dos casos, o preço dos óleos vegetais é muito maior do que o combustível de aviação convencional refinado (IREA, 2017).

A seguir são descritos os principais conceitos, reações químicas e parâmetros de operação envolvidos na tecnologia para a produção de *biojet*.

2.3. ÉSTERES E ÁCIDOS GRAXOS HIDROPROCESSADOS (HEFA).

O hidroprocessamento inclui vários mecanismos de reação catalítica na presença de hidrogênio (Sau et al., 2005). A primeira reação que acontece em um processo de conversão de óleos vegetais é a hidrogenação (Figura 2.5.a), que consiste em saturar as duplas e triplas ligações presentes na molécula de triglicerídeo através da adição de hidrogênio em um reator com certas condições de temperatura e pressão, na presença de um catalisador (Hughes, 1953).

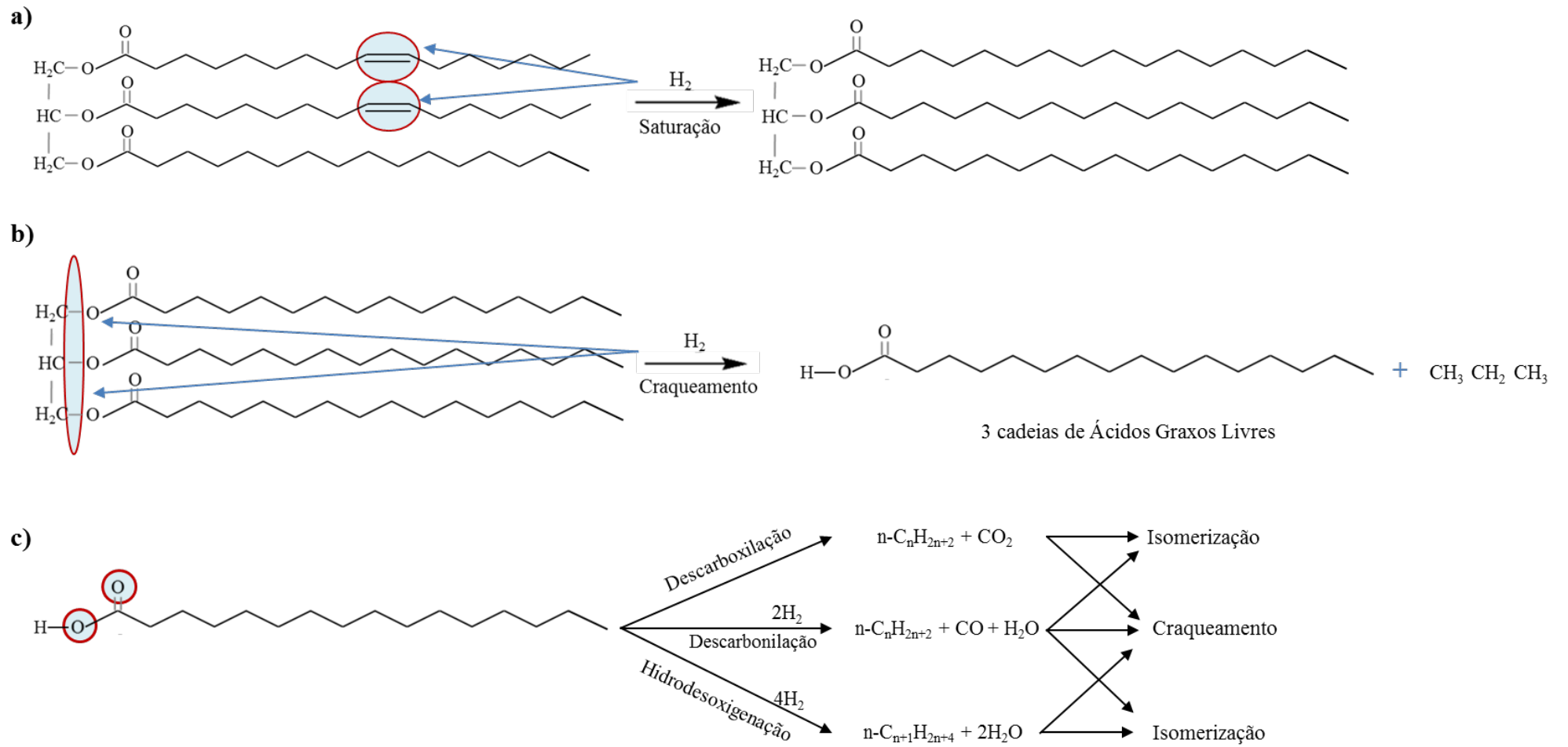


Figura 2. 5. Possíveis reações durante a conversão de uma molécula de triglicerídeo mediante hidrogenação catalítica.

Fonte: Adaptado de Veriansyah et al., 2012.

Como resultado, as cadeias de ácidos graxos presentes no triglicerídeo estarão agora compostas por ligações simples. Depois da saturação, a subsequente adição de hidrogênio produz a quebra da ligação da molécula de glicerol presente, formando propano e três cadeias de ácidos graxos livres (Figura 2.5.b). Em seguida, ocorre o processo de hidrotreamento, no qual três reações (Figura 2.5.c) podem suceder simultaneamente de acordo com a seletividade do processo, com o objetivo de remover o oxigênio presente no grupo ácido carboxílico ($C(=O)OH$) ligado ao ácido graxo livre e produzir alcanos de cadeias lineares (Choudhary e Phillips, 2011).

Na rota de hidrodessoxigenação (HDO), o ácido carboxílico reage com o hidrogênio e produz um hidrocarboneto, com o mesmo número de átomos de carbono presente na cadeia de ácido graxo, e dois moles de água. A rota de descarboxilação (DCO_2) gera um hidrocarboneto, com um átomo de carbono a menos que na cadeia de ácido graxo e um mol de CO_2 . A rota de descarbonilação (DCO) também produz um hidrocarboneto com um átomo de carbono a menos, junto com um mol de CO e um de água. Dependendo da composição dos *n*-alcanos (hidrocarbonetos saturados com cadeias lineares) obtidos, eles vão precisar ser submetidos a um processo de isomerização (alteração da forma de uma molécula), ciclização (produção de uma molécula cíclica) ou craqueamento (quebra da molécula), a fim de melhorar as suas propriedades de combustão, obtendo *iso*-alcanos (hidrocarbonetos saturados com cadeias ramificadas), aromáticos (hidrocarbonetos cíclicos insaturados) e hidrocarbonetos mais leves, respectivamente (Kiatkittipong et al., 2013).

A Figura 2.6 mostra os mecanismos de reação e os produtos líquidos parciais resultantes em cada fase. Observa-se no diagrama que os requerimentos de temperaturas variam em cada etapa, sendo menores no caso da hidrogenação, e maiores durante a isomerização e hidrocraqueamento. Os principais produtos finais do hidrotreamento da maioria dos óleos vegetais incluem produtos líquidos orgânicos, água e gases (H_2 , H_2S , CO, CO_2 , C_3H_8 , CH_4 , e outros hidrocarbonetos mais leves), embora sua distribuição possa diferir de acordo com as condições do processo.

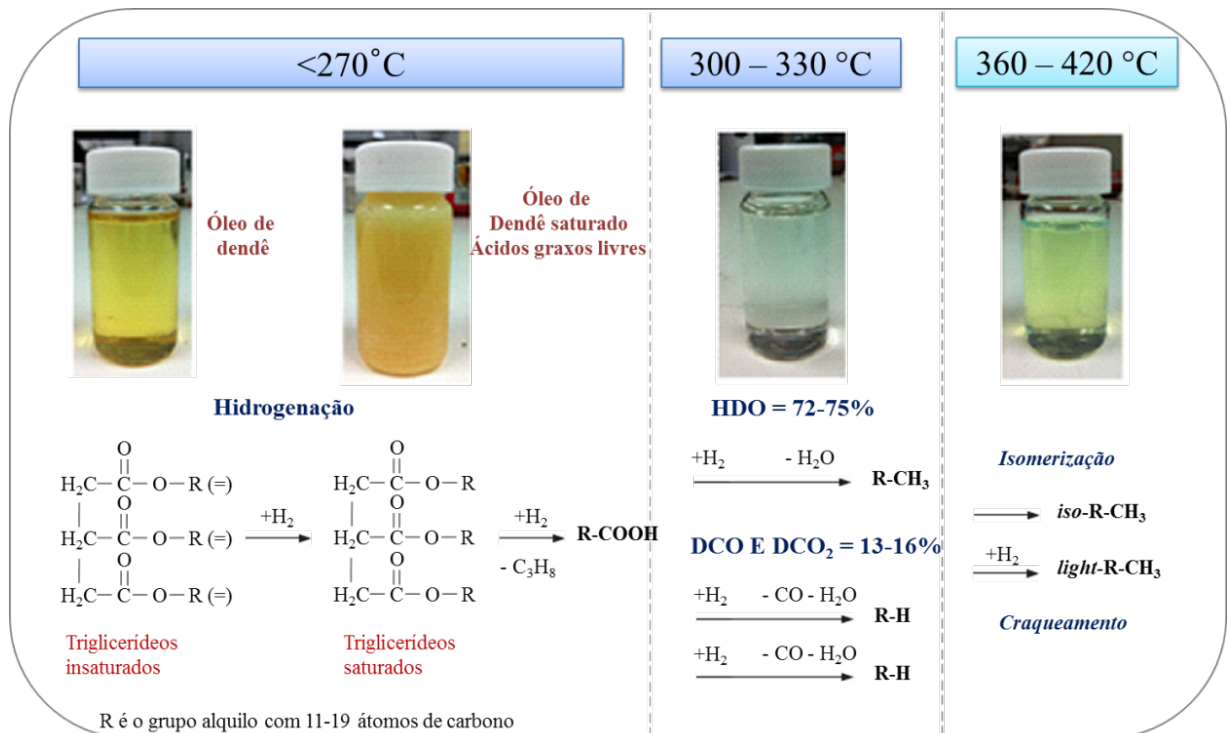
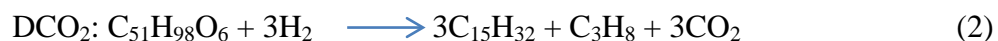
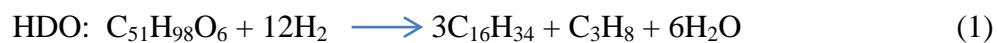


Figura 2. 6. Mecanismos no hidrotreamento do óleo de dendê.

Fonte: Adaptado de (Sripta et al., 2014)

Um fator muito importante neste processo é a demanda de hidrogênio, a qual varia de um óleo vegetal para outro. As reações de HDO, DCO₂ e DCO, apresentadas na Figura 2.6, são exemplificadas nas equações (1) a (3) para um triglicerídeo simples, composto por três moléculas de ácido palmítico (C16:0) (Jęczmionek e Porzycka-Semczuk,2014):



Verifica-se que a reação de HDO é a que demanda mais consumo de hidrogênio, exigindo 12 moles de H₂ por mol de triglicerídeo, em comparação com os 3 e 6 moles requeridos nas reações de DCO₂ e DCO, respectivamente (além disso, consome-se um mol de H₂ adicional por ligação dupla presente no óleo vegetal para a saturação para todos os casos). Porém, o CO e o CO₂ formado nas reações de DCO e DCO₂ podem ser

convertidos em CH_4 através da reação de metanação, de modo que um consumo adicional de hidrogênio seria necessário, tal como mostrado nas equações (4) e (5) (Melero et al., 2012):



Portanto, considerando todo o processo, as rotas DCO_2 e DCO irão demandar três moléculas de hidrogênio a mais do que a rota HDO . Quanto mais saturada a matéria-prima é, mais desejável, pois uma quantidade menor de hidrogênio será necessária durante a hidrogenação. Um indicador para medir a quantidade de insaturações dos óleos é o Índice de Iodo (II). Quanto maior o II de um óleo, maior o número de duplas ligações insaturadas presente, e geralmente o biodiesel é produzido a partir de matérias primas com um $\text{II} \leq 130$ (Zaccheria et al., 2009). Contudo, dependendo do comprimento dos átomos de carbono do produto desejado, a seletividade sobre uma dessas reações será perseguida. A Tabela 2.2 apresenta o II de alguns óleos vegetais.

Tabela 2. 2. Índice de Iodo de vários óleos vegetais.

Óleo vegetal	Índice de Iodo
Canola	110-126
Milho	103-128
Avelã	88-90
Oliva	77-83
Dendê	50-55
Amendoim	80-106
Canola	94-120
Gergelim	105-107
Soja	125-130
Girassol	127-129

Fonte: Adaptado de (Knothe, 2002; Guillén; Ruiz, 2003; Gan et al., 2005).

Atualmente, várias empresas encontram-se desenvolvendo técnicas aplicadas para as diferentes matérias primas. De modo geral, o desenho do processo é bastante similar para cada tecnologia que está sendo atualmente desenvolvida (Figura 2.7). Na primeira etapa, a matéria-prima e o hidrogênio entram no primeiro reator, o qual está

carregado com o catalisador e é alimentado com vapor, sob uma determinada pressão e temperatura, e onde usualmente acontecem as reações de hidrogenação e hidrotreatamento simultaneamente.

Os principais produtos produzidos incluem alcanos, CO, CO₂, água e propano. Em seguida, eles vão para uma unidade de separação, no qual a água é removida da unidade, os produtos mais leves (indesejados) são enviados para a planta de separação de gases, e os alcanos são enviados para um destilador. Na planta de separação de gases uma parte do hidrogênio é recuperada e enviada de novo para o primeiro reator. Os outros produtos são retirados da unidade. A fração mais pesada dos alcanos é enviada para o segundo reator, onde a composição e qualidade final das *n*-parafinas obtidas (principalmente relacionadas as propriedades de escoamento em frio) são ajustadas através e um processo de isomerização, o qual é acompanhado por uma reação de hidrocraqueamento. Por último, os produtos líquidos separados em querosene ou diesel, sendo combustíveis completamente desoxigenados e de alta qualidade (Rathore et al., 2016). O craqueamento excessivo aumenta os rendimentos de produtos mais leves (variando de C1 a C3) e da nafta (C5-C8) os quais tem um valor econômico menor que o corte diesel ou querosene.

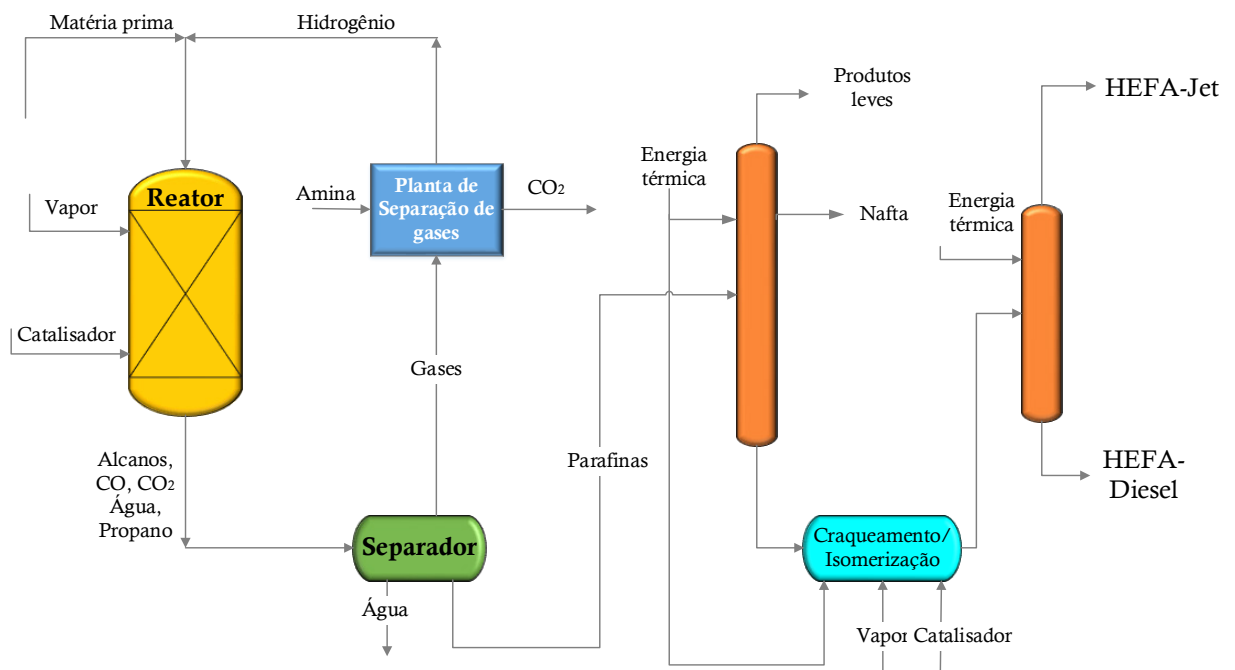


Figura 2. 7. Esquema básico de uma planta de hidrotratamento.

Fonte: Adaptado de (Rathore et al., 2016).

Algumas propriedades finais do combustível obtido têm sido reportadas na literatura (Tabela 2.3), demonstrando que o biocombustível hidrotratado atende aos padrões, proporcionando benefícios quanto a seu desempenho, bem como ignição mais rápida do que o Jet A e sendo adequado com motores atuais (Hilbers et al., 2015).

Tabela 2. 3. Propriedades do biocombustível de aviação.

Propriedade	Unidade	Método ASTM	Jet A	HEFA-Camelina	HEFA-Jatropha
Densidade @ 15°C	kg/m ³	D4052	831	753	749
Poder calorífico inferior	MJ/kg	D4526	43,15	44,1	44,3
Conteúdo de aromáticos	%	D1319	25	0,3	0
Conteúdo de hidrogênio	% (m/m)	D3345	13,96	15,1	15,5
Hidrogênio/carbono			1,952	2,176	2,178
Ponto de congelamento	°C	D2386	-43,5	< -63,5	< -54,5
Ponto de fulgor	°C	D3828	38	42	46,5
Viscosidade @ -20°C	mm ² /s	D445	8,0	3,336	3,663

Fonte: (Lokesh et al., 2015)

Conforme mencionado no Item 2.1, a principal diferença com o combustível Jet A é a ausência de aromáticos na sua composição, o qual diminui a sua densidade, sendo necessário o seu uso em um porcentual de mistura para assegurar a compatibilidade do combustível com o motor da aeronave.

2.3.1. Parâmetros de operação e seletividade

Durante um processo de hidrotratamento, diversas variáveis interligadas influenciam tanto o processo quanto a composição final do produto, em particular: o tipo de catalisador usado, as condições de reação e a matéria-prima selecionada. O desenvolvimento do catalisador apropriado, que favorece a seletividade desejada para operação a temperaturas e pressões reduzidas, evitando a sua desativação, tem sido objeto de muita pesquisa com o intuito de aumentar a viabilidade econômica e sustentabilidade ambiental do processo. Os catalisadores podem ter carácter bifuncional, onde um metal favorece os processos de clivagem heterolítica do H₂ e hidrogenação,

enquanto o outro metal ativa o grupo ácido carboxílico da molécula. Metais nobres como o paládio e a platina junto com metais de transição como níquel, molibdênio e cobalto são os metais ativos mais preferidos (Pritchard et al., 2015).

Os sistemas catalíticos são habitualmente classificados em homogêneos e heterogêneos. Os primeiros se caracterizam por estar na mesma fase (líquida ou gasosa) que os reagentes e produtos. Os segundos, por outro lado, são aqueles nos quais o catalisador encontra-se em uma fase diferente (tipicamente sólida) dos reagentes. Eles são mais usados, porque podem ser facilmente separados e reciclados aumentando a sua vida útil, além disso, apresentam boa estabilidade em ambientes severos de reação e não são corrosivos em unidades de reação padrão.

Dois tipos de catalisadores são comumente reportados em processos de hidrotratamento de óleos vegetais: sulfetados/óxidos metálicos e metálicos nobres suportados. Os sulfetados (por exemplo, Co-MoS₂, Ni-MoS₂) têm sido amplamente pesquisados, devido à sua alta atividade no processo de HDO. A fim de mantê-lo na fase ativa, agentes de sulfetação, como por exemplo, H₂S, tem que ser adicionados ao processo, pois a presença de oxigênio na matéria-prima tende a remover o enxofre dele.

Por outro lado, os metais nobres (como Pd e Pt) suportados têm mostrado mais seletividade para a rota de DCO₂, produzindo principalmente, hidrocarbonetos de número ímpar, em comparação com os primeiros. Apesar do seu custo elevado, oferecem vantagens tais como alta reatividade a temperaturas moderadas e facilidade no dimensionamento e construção do sistema. Nesse sentido, os metais básicos (por exemplo, o Ni) podem ser uma alternativa aos metais nobres devido à sua alta disponibilidade e custo baixo. Porém, eles precisam de mais desenvolvimento para avaliar seu potencial. As zeólitas têm sido também usadas nos processos de hidrotratamento, porém apresentando baixos níveis de produtividade. (Satyarthi et al., 2013).

Um aspecto muito importante do desenho do catalisador é o suporte, o qual é o material sólido da área da superfície ativa que pode melhorar a atividade catalítica e proporcionar estabilidade durante a reação. Os suportes podem ser neutros ou podem conter locais ativos que também participam da reação. Suportes com acidez moderada são preferidos, pois uma alta acidez provoca o craqueamento dos *n*-alcanos formados, reduzindo assim a sua seletividade. No entanto, vários estudos têm mostrado resultados

positivos com a utilização de suportes com acidez moderada em reduzidas temperaturas de reação, já que o rendimento de produtos mais leves poderia dominar a reação em temperaturas elevadas. Alguns autores têm incorporado modificações no suporte para melhorar a duração do catalisador e as suas propriedades de estabilidade. (Galadima; Muraza, 2015).

Outros parâmetros como a temperatura ou a pressão e vazão do hidrogênio, também influenciam o processo em geral. Altas temperaturas favorecem a remoção de oxigênio do produto final. Porém elas favorecem também reações de hidrocrackeamento indesejáveis, aumentando assim o rendimento de produtos mais leves. Adicionalmente, altas pressões propiciam reações de HDO, e também suprimem o craqueamento dos produtos, proporcionando maiores rendimentos de produtos da faixa do diesel (Satyarthi et al., 2013). Vários autores têm dedicado seu trabalho ao estudo dessas interações para otimizar o processo de obtenção dos produtos desejados. Na Tabela 2.4 é apresentada uma revisão dos principais trabalhos dedicados a maximizar a produção de biocombustível de aviação, com o foco nos parâmetros de operação usados.

Pode-se concluir que os ácidos graxos com cadeias de carbono mais longas favorecem as reações de desoxigenação. Dependendo do nível de insaturação, serão necessárias maiores quantidades e pressões de hidrogênio. A temperatura de reação possui uma grande influência sobre as rotas de reação principais, bem como o nível de acidez do catalisador. DCO e DCO₂ são mais dominantes a temperaturas mais elevadas e moderada acidez do catalisador, do que HDO e conseqüentemente, as primeiras são mais propícias para produzir biocombustíveis da faixa do querosene. Catalisadores à base de níquel e paládio são os sistemas mais utilizados. Os primeiros possuem uma boa seletividade para a produção de biocombustíveis de aviação dependendo dos níveis ácidos do suporte.

Tabela 2. 4. Resumo dos principais parâmetros de operação de vários experimentos.

Matéria prima	Condições de reação	Catalisador	Rendimentos de Jet (%)	Ref.
Óleo de Carinata	T= 400°C; P= 92 bar Tempo de residência= 2h.	NiMo	53,70%	(VERMA et al., 2015)
Óleo de Macaúba	T= 300°C; P= 19 bar; Tempo de residência = 5h.	Pd/C	96,00%	(SOUSA et al., 2016)
Óleo de Palmiste	T= 300°C; P= 10 bar; Tempo de residência = 5h.	Pd/C	82,00%	(ZHAO et al., 2015)
Óleo de Pinhão Manso	T= 450°C; P= 60 bar; H ₂ /óleo= 1500 ml/ml.	NiMo/MSP-1	37,50%	(ANAND et al., 2016)
Óleo de Coco	T= 360°C; P= 30 bar; H ₂ /óleo= 600 Nm ³ /m ³ .	Ni-Mo/Al ₂ O ₃	60,00%	(ELLER et al., 2016)
Óleo de Pinhão Manso	T= 350°C; P= 40 bar; Tempo de residência = 5h.	Ni ₂ P/Zr-MCM-41	47,80%	(LUO et al., 2016)
Óleo de Girassol	T= 550°C; H ₂ /óleo=1000 Ncm ³ /cm ³ ;	ZSM-5	30,10%	(CHOI et al., 2015)
Óleo de Rícino	T= 300-360°C; P= 30 bar;	NiAg/SAPO-11 Ni/USY-APTES-MCM-41	88,90% 80,30%	(LIU et al., 2015)
Óleo de Pinhão Manso	T= 410°C; P= 50 bar; H ₂ /óleo= 1500Nl/l;	NiMo/HZSM-5	54,30%	(SINHA et al., 2013)

2.4. ANÁLISE DO CICLO DE VIDA.

A Análise de Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia para avaliar os aspectos ambientais e os potenciais impactos associados a um produto (bem ou serviço) através do seu ciclo de vida, desde a aquisição de matérias primas, produção, uso e disposição final. Os fundamentos e a estrutura da ACV são estabelecidos pelas normas ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006, e são apresentadas na Figura 2.8 (ISO, 2006):

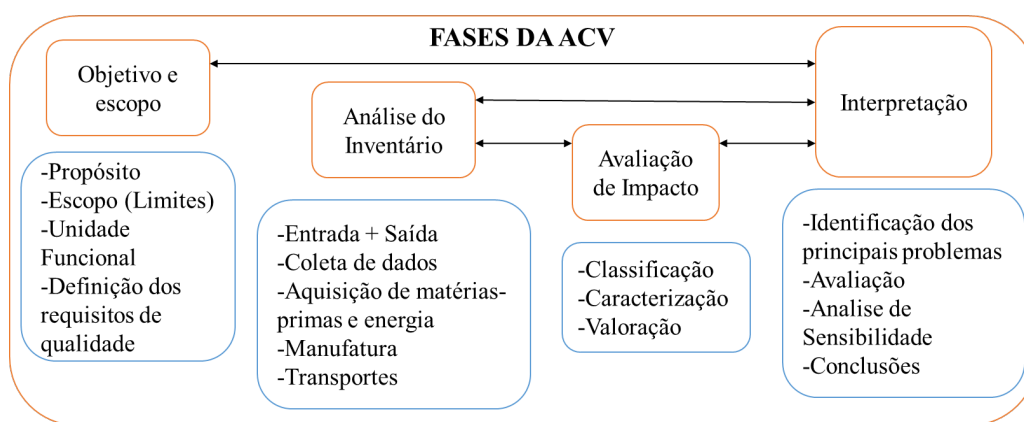


Figura 2. 8. Fases da ACV

Fonte: (ISO, 2006)

De acordo com a Figura 2.8, existem quatro fases em um estudo de ACV:

1. Definição de Objetivo e do Escopo. A norma ISO 14040 define as características dos processos ou produtos a serem estudadas bem como as suas características específicas. O escopo de um estudo de ACV deve apresentar: os limites do sistema, quantos e quais subsistemas incluir, e o nível de detalhes do estudo. Nele, deve-se estabelecer a unidade funcional, que é a medida quantitativa das funções que o produto proporciona, necessária para relacionar as entradas e saídas do sistema do produto.

2. Inventário do Ciclo de Vida. Esta fase envolve a coleta e quantificação de todas as variáveis (matéria-prima, energia, emissões, resíduos sólidos, etc.) de entrada e saída envolvidas no processo. Esses valores, quantificados, devem apresentar relação à

um valor único denominado fluxo de referência, que é calculado a partir da unidade funcional, fundamentado no desempenho do produto para exercer a função definida.

3. Avaliação do Impacto Ambiental. Segundo a norma ISO 14040, nesta etapa estima-se e calcula-se numericamente a importância dos potenciais impactos ambientais associados com os dados relativos a cada fluxo de materiais e energia coletada e classificados na fase do inventário. Para isto, cada impacto quantificado no inventário é organizado e atribuído em uma das diferentes categorias de impacto, as quais são escolhidas pelo autor do trabalho. Algumas categorias de impacto ambiental mais comumente empregadas são: aquecimento global, redução da camada de ozônio, toxicidade humana, depleção dos recursos, etc. Depois se realiza uma caracterização dos dados estabelecidos realizando uma avaliação quantitativa dos impactos ambientais dos itens individuais.

4. Interpretação. O estudo de ACV deve conter ao final uma interpretação e análise criteriosa dos resultados com o objetivo de caracterizar o desempenho ecológico do sistema analisado visando a elaboração de cenários alternativos para o estudo. De acordo com Renó (2011), a fase de interpretação está compreendida em duas etapas: Identificação das questões ambientais mais significativas (das informações provenientes do inventário) e avaliação. Nesta última etapa a confiabilidade dos resultados pode ser verificada através de uma análise de sensibilidade.

Na literatura, são comumente identificados dois tipos de ACV: atribucional e consequential. A ACV atribucional (ou descritiva) descreve os fluxos físicos que são ambientalmente relevantes para um ciclo de vida e os seus subsistemas. É baseada em relações estequiométricas entre as entradas e as saídas, de tal forma que o seus resultados apresentam baixa incerteza. A ACV consequential (ou comparativa) descreve como os fluxos físicos ambientalmente relevantes mudariam em resposta a possíveis decisões. É dependente de modelos econômicos que representam as relações entre entradas, variabilidade de preços, suprimentos e os efeitos dos coprodutos (que são dois ou mais produtos obtidos provenientes da mesma unidade de processo ou do sistema produto) no mercado. Portanto, os seus resultados apresentam altas incertezas.

A principal diferença entre elas é o modo em que as fronteiras são definidas, e o tipo de dados do inventário do ciclo de vida. A ACV atribucional é baseada em dados médios dos fluxos físicos, enquanto a ACV consequential considera dados marginais

(dados que podem ser aproximados como infinitesimal pois representam mudanças muito pequenas) que são relevantes para modelar as consequências (Ekvall et al., 2016).

A escolha do enfoque da ACV é um aspecto muito importante uma vez que ela influencia na definição da metodologia e nos resultados do estudo. É também importante destacar a maneira com que cada método lida com os coprodutos do processo analisado, caso existam. A ACV atribucional utiliza o critério de alocação que consiste na distribuição das emissões totais de um processo com multiprodutos mediante um fator de alocação (Brander et al., 2008). O fator de alocação pode ser baseado segundo:

- O valor mássico: no qual o uso da energia e as emissões do sistema são alocados de acordo com a quantidade produzida de cada coproduto ao final do processo. O método pode ser empregado desde que todos os produtos sejam expressos com unidade em base mássica.
- O valor energético: onde o uso da energia e as emissões do sistema são alocados conforme a energia associada a cada coproduto. É calculado a partir da quantidade produzida de cada um, multiplicado pelo seu conteúdo energético, sendo comumente usado o poder calorífico. É recomendado em processos onde todos os produtos (ou a maioria) têm aplicações energéticas.
- O valor no mercado: no qual o uso da energia e as emissões do sistema são alocados segundo a receita econômica de cada coproduto. Esse valor é calculado multiplicando o rendimento de cada produto pelo seu valor no mercado (Wang et al., 2011).

A ACV consequencial, por sua vez, emprega a expansão dos limites do sistema produto com o objetivo de quantificar os efeitos das mudanças no nível de produção de um produto, incluindo efeitos tanto dentro como fora do ciclo de vida do produto. É assumido que os coprodutos irão deslocar certos produtos convencionais (produto marginal). Dessa forma, as emissões totais do sistema são atribuídas ao produto principal e o efeito desse deslocamento é quantificado e considerado como créditos que são subtraídos do uso de energia e das emissões totais do sistema (Brander et al., 2008). O produto marginal é descrito como aquele que é mais sensível e o que é mais afetado por mudanças na demanda, referentes ao mesmo segmento do mercado do produto principal. Dependendo da situação do mercado, ele pode ser identificado como o

produto mais ou o menos competitivo, sendo considerado o primeiro parâmetro para mercados constantes ou em crescimento e o segundo para mercados decrescentes (ou quando essas mudanças são em curto prazo). Tanto o coproduto do sistema analisado quanto o produto a ser substituído devem fornecer a mesma função, para ser possível de serem comparados (Schmidt e Weidema, 2008).

A Figura 2.9 ilustra o conceito desse método para um processo multifuncional que produz o produto A e o produto B. Somente o produto A é usado no ciclo de vida do sistema analisado. Se houver uma demanda pela função fornecida pelo produto B, a quantidade adicional desse produto irá provavelmente substituir outro que esteja cumprindo essa função no mercado (produto C). Desse modo, as emissões totais são designadas ao produto A e a intensidade das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) do produto C (produto substituído) é atribuída ao produto A como crédito de emissão, com base no rendimento do produto B.

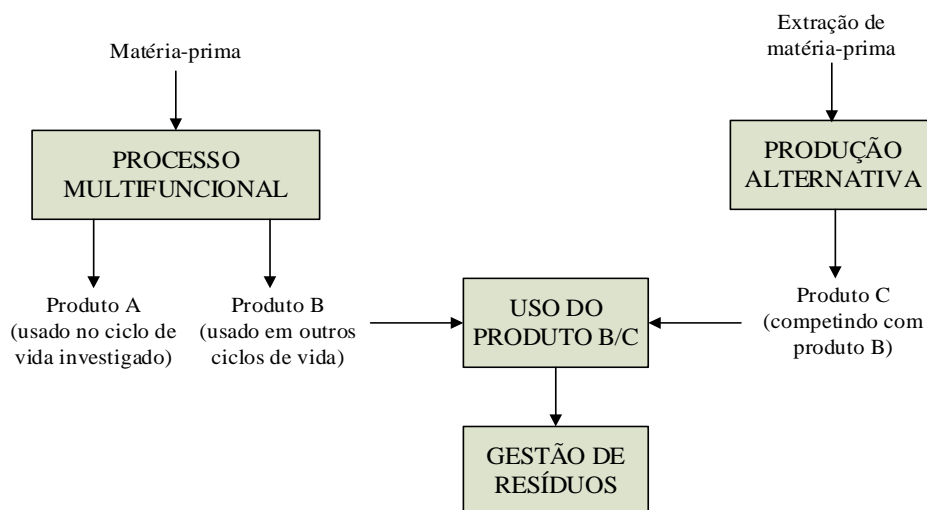


Figura 2. 9. Ilustração do modelo consequencial

Fonte: (Ekvall and Finnveden, 2001).

Por outra parte, a Obrigação de Combustível Renovável de Transporte (*Renewable Transport Fuel Obligation* - RTFO) recomenda que a abordagem para tratar os coprodutos deve ser flexível e que a abordagem mais apropriada deve ser determinada para cada coproduto de maneira individual. Assim, alguns autores vêm propondo o uso de uma análise híbrida para lidar com problemas de multifuncionalidade de alguns sistemas e para também, superar as limitações associadas aos métodos de tratamento de coprodutos. O método híbrido estima as emissões

associadas no sistema mediante a combinação de vários tipos de alocação ou alocação e de expansão do sistema, sendo eles empregados em diferentes estágios do ciclo de vida (Wang et al., 2011). Uma revisão detalhada do método é dada por Crawford et al. (2018) e na seção seguinte é apresentada uma discussão sobre os principais aspectos metodológicos com base nos estudos precedentes a esta dissertação.

2.4.1. Estudos Precedentes de ACV de *biojet*.

A ACV tem sido usada por mais de duas décadas como ferramenta para avaliar a sustentabilidade de novos combustíveis alternativos de transporte. No caso dos biocombustíveis aeronáuticos, ela constitui um componente essencial para a tomada de decisões, sendo inclusive, um fator fundamental de vários instrumentos de política do setor de biocombustíveis. Menciona-se por exemplo, a Diretiva sobre Energia Renovável (na UE) ou do Programa Padrão de Combustível Renovável (nos EUA); assim como de iniciativas globais atuais, em particular o SkyNRG, ITAKA, a CAAFI, etc (De Kleine et al., 2017).

Desse modo, muitas pesquisas estão sendo realizadas tanto para quantificar quanto para comparar o desempenho ambiental das novas rotas de produção de *biojet*. Entre elas, os estudos mais recentes de ACV, cujo foco é a análise dos biocombustíveis *jet* produzidos mediante a rota de hidrotreatamento que foram selecionados para a fundamentação da presente dissertação e os principais aspectos referentes a metodologia usada, como o tipo de análise, a unidade funcional, o método de manejo dos coprodutos as emissões estimadas, etc., são apresentados na Tabela 2.5.

Da revisão da literatura realizada pode se verificar que existe uma predominância geográfica das pesquisas nesse tópico, sendo a grande maioria feita nos Estados Unidos. Vale ressaltar que a tecnologia é relativamente nova e foi desenvolvida principalmente nesse país, pela Honeywell UOP® e na Europa, pela Neste Oil®. As duas empresas são atualmente as produtoras de HEFA-Jet líderes do mercado mundial. Em relação ao Brasil, só um estudo foi achado na literatura, até o momento de escrever a presente dissertação. Bailis & Baka (2010) avaliaram as mudanças das emissões de GEE associadas com a substituição de *jet* convencional por *biojet*, produzido a partir de pinhão manso. Foi assumido que o cultivo da matéria prima foi realizado no Brasil e

depois exportado para os Estados Unidos para sua conversão em biocombustível. As etapas com maiores impactos foram a de cultivo (50%), seguida pelo transporte das sementes e do óleo refinado devido às grandes distâncias (26%) e pelo hidrotreatamento do óleo (27%).

Tabela 2. 5. Resumo dos estudos precedentes sobre ACV de HEFA-Jet.

Autores	País	Tipo de ACV	LUC	Unidade funcional	Software	Categoria de impacto	Método Co-produtos	Matéria prima	Resultados (gCO ₂ eq/unidade funcional)	Emissão Jet convencional (gCO ₂ eq/MJ)
De Jong et al. (2017)	US	Atribucional e Consequencial	Não	1MJ	GREET	-	EA SA	Pinhão manso Camelina OCU	55 (EA) ; 21 (SA) 47 (EA) ; 44 (SA) 28 (EA) ; 28 (SA)	
Ukaew et al. (2015)	US	Consequencial	Sim	1MJ	SimaPro 7.3	IPCC	SA	Canola	46 * 4 - 31 ** 51 - 70 ***	
Li; Mupondwa (2014)	CAN	Consequencial	Não	1MJ	SimaPro 7.2	Impact 2002+	SA	Camelina	3.06 - 31.01	
Seber et al. (2014)	US	Atribucional	Não	1MJ	GREET e SimaPro 7.3.3	-	EA MVA	Gordura animal OCU	25.7 - 83.9 16.8 - 21.4	87.5
Cox et al. (2014)	AUS	Atribucional e Consequencial	Não	100MJ combustível usado	SimaPro 7.3.3	-	EA SA	Microalgas Pongamia Pinnata Melaço cana	22 (EA) ; 80 (SA) 47 (EA) ; 47 (SA) 38 (EA) ; 27 (SA)	
Fan et al. (2013)	US	Atribucional e Consequencial	Não	1MJ	SimaPro 7.2	IPCC 2007 GWP 100a V1.01	EA MVA SA	Pennycress (Thlaspi arvense L.)	32.7 (EA) ; 44.9 (MVA) -18.3 (SA)	
Shonnard; Williams; Kalnes (2010)	US	Atribucional	Não	1MJ	SimaPro 7.1	IPCC 2007 GWP 100a V1.01	EA	Camelina	24	
Bailis; Baka (2010)	BR / US	Atribucional e Consequencial	Sim	1GJ	SimaPro	-	EA MA SA	Pinhão manso	40 (EA) ; 33 (EA) 40 (SA)1 ; -134 (SA)2	88
Han et al. (2013)	US	Atribucional	Não	1MJ	GREET	-	EA	Soja Dendê Camelina Canola Pinhão manso	39,6 34,04 46 54,28 54,28	92

LUC: Mudanças no uso do solo

EA: Alocação em base energética

MA: Alocação em base mássica

MVA: Alocação em base económica

SA: Expansão do Sistema

OCU: Óleo de cozinha usado

* Linha base

** Melhor prática agrícola (alta cobertura do solo / plantio direto)

*** Pior prática agrícola (baixa cobertura /preparo do solo)

A despeito da produção de HEFA-Jet não ser comercial no Brasil, o país tem o potencial para produzi-lo e encontra-se trabalhando para o estabelecimento desta indústria; portanto, o presente trabalho considera a realização de todas as etapas do ciclo de vida, do *biojet* no território brasileiro.

Com relação à unidade funcional, todos os estudos adotaram uma unidade funcional de energia, sendo na maioria dos casos 1 MJ de energia produzida; o SimaPro® foi o software mais utilizado, e só três autores reportaram o uso do GREET®. O IPCC foi o método de avaliação mais empregado, o qual avalia unicamente a categoria de mudanças climáticas.

Uma questão complexa da metodologia, objeto de muitos debates na área, relaciona-se com as mudanças no uso da terra (*Land Use Change - LUC*), as quais podem-se classificar como diretas (dLUC), quando o estoque do carbono acima e abaixo do solo sofre alterações como resultado das modificações dentro das fronteiras do sistema; e indiretas (iLUC), quando essas alterações acontecem fora das fronteiras do sistema como consequência das atividades levadas a cabo dentro delas. Pode se observar que somente dois trabalhos incorporaram os impactos do LUC na metodologia usada. Ukaew et al. (2015) estudaram a produção de *biojet* a partir de canola, dando foco nos impactos no carbono no solo produzidos ao incorporar um sistema de rotação de culturas trigo-canola, e o seu efeito sobre as emissões totais de CO₂ em múltiplos locais dos EUA. Vinte e sete cenários de práticas de gestão agrícola foram considerados para avaliar as alterações no carbono no solo, baseados no tipo de manejo do solo (plantio direto ou preparo do solo) e no nível de cobertura do solo com resíduos vegetais (alta, média ou baixa proporção). As emissões de GEE, atribuídas ao LUC variaram de -16 a -43 g CO₂ eq/MJ no melhor cenário (alta cobertura do solo / plantio direto); de -4 a -12 g CO₂ eq no cenário mais provável (alta cobertura do solo / preparo do solo reduzido); e de 11 a 31 g CO₂ eq no pior cenário (baixa cobertura do solo / preparo do solo). Os resultados do LUC tiveram um grande impacto nas emissões totais do ciclo de vida, como visto na Tabela 2.5, para cada cenário anterior. Segundo os autores, uma limitação do estudo é referente à falta de um método mais consistente para a realização do cálculo das mudanças do carbono no solo. Os autores realizaram uma modificação no método de avaliação IPCC *Tier 1* (o qual avalia as mudanças climáticas usando fatores de emissão padrão fornecidos pelo próprio Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas), porém ainda consideraram que não abordava completamente

variáveis importantes como o tipo de cultura, o tipo de solo, a entrada de nutrientes, os rendimentos dos cultivos, etc. e, portanto, os resultados poderiam conter altas incertezas. Essa assertiva é corroborada pelas afirmações encontradas em outros estudos sobre a inclusão do LUC no ACV, como por exemplo, em Canals et al. (2006). Os autores que sugeriram o uso de ferramentas alternativas para modelar os impactos ambientais associados ao LUC, dada a dificuldade de incluir alguns aspectos relacionados, na estrutura da ACV.

Por outro lado, Bailis & Baka (2010) estimaram o impacto no dLUC do cultivo do pinhão manso, mediante o estabelecimento de 3 cenários de solos: naturais, degradados e usados. Foi estimado que o cultivo do pinhão manso em solos naturais poderia resultar em uma perda de carbono no solo, incrementando as emissões GEE totais em 193% em comparação com o *Jet* convencional. No entanto, seu cultivo em qualquer dos outros dois cenários, resultaria em um ganho do estoque do carbono no solo, representando uma redução de 83% das emissões totais em comparação com o JC (nos dois cenários foi adotada uma alocação de produtos em base energética e um rendimento médio do cultivo). Os autores concluíram que os resultados do dLUC são muito dependentes do cenários propostos assim como manejo dos coprodutos e diferentes metodologias de análise. Os autores também questionaram o nível de precisão dos fatores do método IPCC, já que, por exemplo, o critério de solo 'marginal', que é alvo do cultivo do pinhão manso, traz consigo muitos significados diferentes que podem resultar em uma ampla gama de mudanças no carbono no solo.

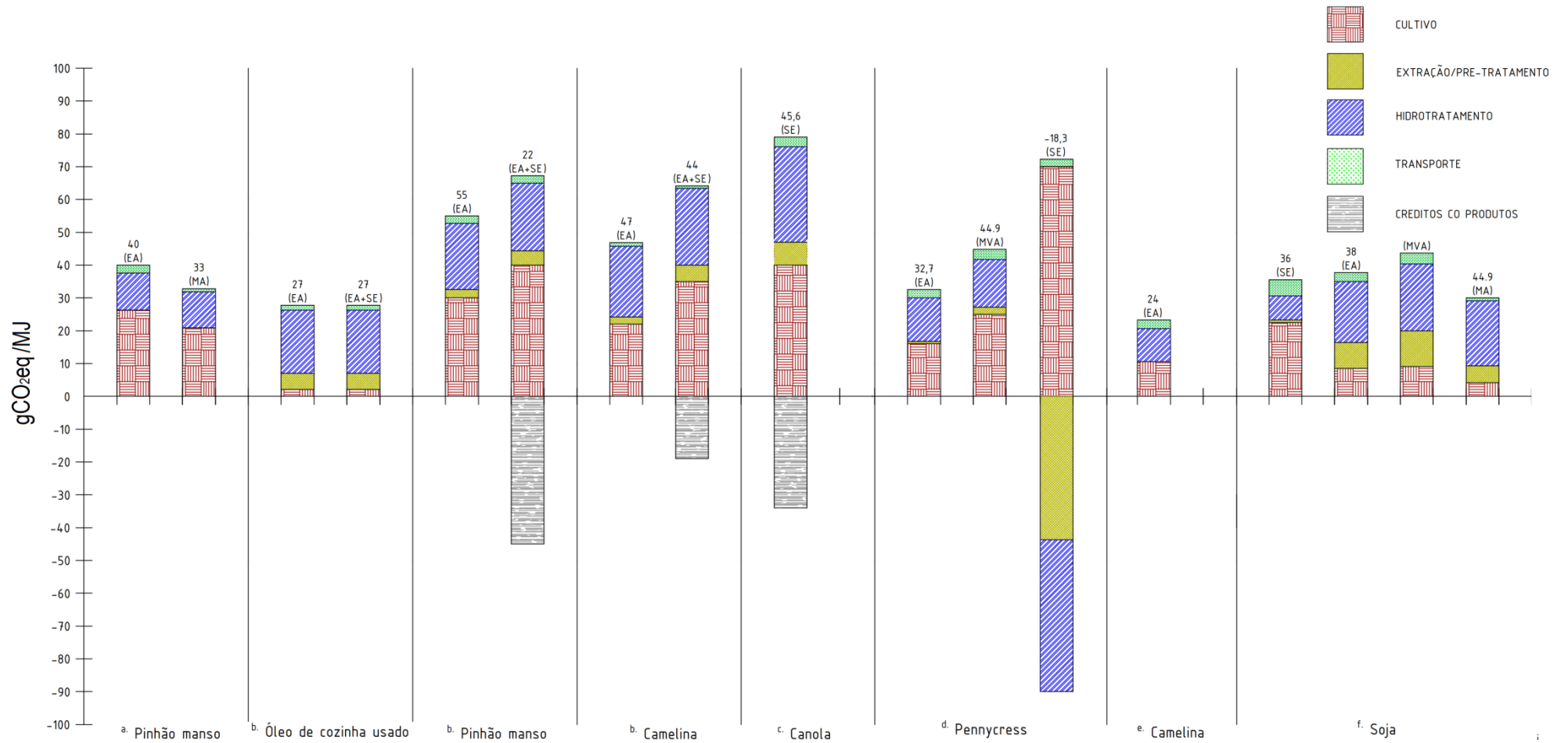
Apesar da importância da quantificação dos potenciais impactos associados ao dLUC e iLUC, existem muitas limitações metodológicas para a sua adesão na ACV, além do fato que os resultados são muito dependentes do contexto e das suposições adotadas o que adiciona um grau considerável de incertezas nos resultados finais. Essas são algumas das razões pelas quais os outros autores decidiram evitar a inclusão deste aspecto nas suas pesquisas.

Quanto ao assunto relacionado no contexto Brasileiro, vale ressaltar que o país é um dos maiores produtores e exportadores de várias matérias-primas do mundo graças às características favoráveis e à disponibilidade de terras para fins agrícolas (553 Mha), bem como à natureza dinâmica da agricultura Brasileira caracterizada pelo forte crescimento produtivo. Alguns autores como Cortez et al. (2015), Cantarella et al.

(2015) e Chuck (2016) têm abordado essa questão, afirmando que o país tem uma combinação única de fatores positivos, assim como os recursos necessários para suportar a expansão da produção de biocombustíveis sem comprometer a produção de alimentos nem o uso de áreas protegidas. Portanto, os impactos associados ao LUC são menos relevantes do que em outros países e podem ser enfrentados tomando as precauções adequadas. Desse modo, os impactos relacionados com o dLUC e iLUC estão por fora das fronteiras da presente dissertação e não são incluídas no presente estudo.

Embora as semelhanças das metodologias propostas, os resultados variaram muito de um autor para outro, inclusive quando considerada a mesma matéria prima. Isto é devido aos diversos dados de entrada adotados em cada estudo, baseados nas suposições feitas principalmente em relação às fronteiras estabelecidas, ao manejo dos coprodutos e as cadeias produtivas próprias de cada região. A Figura 2.10 apresenta um comparativo das emissões em g de CO₂ eq estimadas em cada estudo, enfatizando na contribuição de cada etapa do ciclo de vida no resultado total. Para fins comparativos, as etapas foram agrupadas em: cultivo, extração, hidrotratamento e transporte. As emissões totais para cada cenário são indicadas na parte superior junto ao método de alocação empregado: alocação energética (EA), alocação mássica (MA), alocação econômica (MVA), expansão do sistema (SE) ou método híbrido (EA+SE). Em relação à etapa de combustão, o CO₂ liberado nessa fase é considerado neutro e não é contabilizado no ciclo de vida, uma vez que a biomassa sequestra CO₂ durante seu crescimento e, portanto, as emissões associadas não incrementam as suas concentrações na atmosfera (USEPA, 2007).

As barras situadas no eixo positivo do gráfico representam as emissões líquidas de CO₂ equivalente a cada etapa do ciclo de vida, enquanto as barras situadas no eixo negativo representam os créditos de emissão atribuídos pela substituição de outros produtos pelos coprodutos de cada sistema. Na parte inferior é especificada a matéria prima e a fonte bibliográfica.



Baka (2010);

^d Fan et al. (2013);^b De Jong et al. (2017)^e Shonnard et al. (2010);^c Ukaew et al. (2015)^f Han et al. (2013)**Figura 2. 10. Emissões associadas a cada etapa do ciclo de vida dos estudos precedentes.**

É possível verificar as grandes variações produto do enfoque adotado em relação ao manejo dos coprodutos. Observou-se também que não existe um consenso sobre qual método de tratamento de coprodutos produz resultados mais precisos e confiáveis em uma ACV de biocombustíveis. Nesse sentido, a ISO 14014 recomenda os seguintes passos para lidar com esse assunto: (1) sempre que for possível, a alocação das cargas ambientais associadas ao sistema estudado deve ser evitada, dividindo o processo multifuncional em subprocessos e coletando os dados relacionados a eles, ou expandido o sistema produto para incluir as funções adicionais relacionadas aos coprodutos; (2) quando a alocação não pode ser evitada, as cargas ambientais do sistema devem ser alocadas de acordo com uma relação física que reflete a forma como as entradas e saídas são alteradas por mudanças quantitativas nos produtos ou funções fornecidas pelo sistema; (3) quando tal relação física não pode ser estabelecida, a alocação deve refletir outras relações entre as entradas e saídas do sistema, como o valor econômico.

Alguns autores usaram várias abordagens metodológicas referentes a este tópico para estudar o seu impacto nos resultados. Fan et al. (2013) investigaram as emissões de GEE, a demanda acumulada de energia e a demanda de energia fóssil da produção de *biojet* a partir do Pennycress (*Thlaspi arvense* L.) nos Estados Unidos; o estudo tratou os coprodutos mediante SE, EA e MVA. A MVA apresentou maiores emissões (44,9 gCO₂eq) relativamente à EA (32,7 gCO₂eq) pois na etapa de cultivo, o óleo de pennycress tem um maior valor no mercado e, portanto, a maioria das emissões foram alocadas a ele. O método de expansão do sistema obteve resultados mais favoráveis (-18,3 gCO₂eq). Nele foi assumido que os coprodutos gerados na fase de extração do óleo (torta de pennycress) e do hidrotratamento (nafta e GLP) iriam deslocar outros produtos no mercado, sendo o farelo de soja (para uso como alimento em animais) no primeiro caso, e a nafta e o propano de origem fóssil no segundo. Os créditos resultantes desse deslocamento (-42 kg/kg CO₂eq e -49,5 kg/kg de CO₂eq respectivamente, para cada etapa) são representados pela barra referente a esse estudo no eixo negativo da Figura 2.10.

Han et al. (2013) realizaram uma ACV de várias alternativas de produção de *biojet*. Cinco matérias primas foram analisadas na rota de hidroprocessamento: soja, dendê, canola, pinhão manso e camelina; porém os impactos de diferentes métodos de manejo de coprodutos foram investigados para o caso da soja apenas. Apesar da

diferença da contribuição de cada etapa nas emissões totais, os resultados de cada método estiveram muito próximos.

A questão é uma das mais controversas no desenvolvimento da metodologia da ACV e enquanto alguns autores alegam que o método de alocação é mais preferível, já que a expansão do sistema pode conduzir a resultados com grandes incertezas devido às múltiplas suposições que ele exige (Cox et al., 2014; De Jong et al., 2017; Han et al., 2013; Seber et al., 2014). Outros autores argumentam que o conhecimento incerto atual é usado para avaliar as consequências futuras sendo essa incerteza estimada e controlada e, portanto o método de expansão do sistema é mais abrangente e preciso em relação à alocação, isto pois o último envolve uma participação mais ou menos arbitrária dos coprodutos sem a medida em que uma alteração na quantidade deles terá um efeito na saída funcional do processo (Ekvall et al., 2016b; Weidema, 2003; Weidema e Schmidt, 2010).

Assim, com o objetivo de abordar as limitações inerentes a essa questão, vários trabalhos vem promovendo o uso de ACV's híbridos, que consistem na combinação de dois diferentes métodos de alocação, como visto no trabalho de De Jong et al. (2017). Os autores compararam as emissões de GEE de várias matérias primas e estudaram o impacto de diferentes métodos de tratamento de seus coprodutos. No trabalho, dois cenários foram propostos, o primeiro consistiu em realizar alocação dos coprodutos em base energética unicamente, e o segundo foi um método híbrido que integrou o método de alocação por energia (para os coprodutos combustíveis) e de expansão do sistema (para os coprodutos não combustíveis). Os resultados mostraram diferenças significativas entre os dois cenários, principalmente nas etapas que produzem maior quantidade de coprodutos. De modo geral, o método híbrido mostrou menores emissões de GEE que o método de alocação, devido a substituição em alguns casos de coprodutos no lugar de produtos com uma intensidade de emissão maior que a do sistema. O cultivo da matéria prima teve a maior contribuição nas emissões de GEE totais (devido ao alto uso de fertilizantes) seguida do uso do hidrogênio e do processo de conversão, respectivamente.

Huo et al. (2009) realizaram uma ACV da produção de diesel renovável a partir do óleo de soja. No trabalho foram examinados 5 tipos de tratamento de coprodutos: expansão das fronteiras do sistema, alocação por energia, alocação por valor no

mercado e duas abordagens híbridas (para realizar um comparativo entre elas). Nas últimas foi empregado o método de expansão das fronteiras para os coprodutos da etapa de extração do óleo (farelo de soja), juntamente com o método de alocação por energia para os coprodutos da etapa do hidrotreamento. Os autores concluíram que o método híbrido mostrou ser o mais razoável para o tratamento dos coprodutos e também, o preferido para sistemas comparativos complexos. Foi também observado que ambos os métodos renderam resultados muito próximos, indicando que a incerteza associada estaria em um intervalo aceitável.

Conforme visto anteriormente, decidiu-se adotar para o presente trabalho uma abordagem híbrida para o tratamento dos coprodutos, conformado pela expansão das fronteiras do sistema e a alocação em base energética. Isto pois ele tem mostrado ter a vantagem de tratar os coprodutos de uma maneira mais equitativa, assim como uma maior precisão nos resultados em relação aos outros métodos convencionais.

Por outro lado, evidencia-se na Figura 2.10 que a etapa de cultivo é uma das principais contribuintes das emissões de GEE na maioria dos estudos. A localização geográfica juntamente com os sistemas agrícolas usados tem relevância significativa no estudo ambiental e econômico da produção de *biojet*. Por conseguinte, é necessário efetuar essa pesquisa no cenário Brasileiro.

De acordo com a revisão feita neste capítulo, foi possível observar que, das tecnologias potenciais para a produção de *biojet*, HEFA é a mais madura e também é considerada promissora no contexto Brasileiro. A sua viabilidade técnica tem sido provada em estudos experimentais, resultando em um biocombustível que atende aos requerimentos da norma ASTM D7566, porém apresentando diversos rendimentos de acordo com as condições de reação e as matérias-primas usadas. Além disso, diversos estudos vem sendo desenvolvidos para avaliar a sua sustentabilidade, mediante a aplicação da metodologia de ACV. No que diz respeito ao Brasil, só foi encontrado um artigo que considerava a produção da matéria prima no território, não obstante o seu processamento foi assumido a ser realizado em outro país.

Portanto, este trabalho pretende realizar uma avaliação comparativa do impacto ambiental da produção de *biojet* mediante a rota do hidrotreamento nas condições Brasileiras e a seguir é apresentada a metodologia proposta para a realização da pesquisa.

CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA

Este trabalho objetiva realizar uma análise de ciclo de vida comparativa da produção de biocombustível de aviação a partir de duas opções de matérias-primas: o dendê, cultivado no Pará, e a soja, cultivada no Paraná. Estas matérias-primas foram escolhidas porque, além das suas diferenças nos sistemas produtivos e na sua composição de ácidos graxos, elas são consideradas altamente potenciais para a produção de biocombustíveis de aviação no Brasil. Isto pois a soja é amplamente cultivada com uma tecnologia agrícola bem conhecida; tem elevados rendimentos (aproximadamente 3300 kg/ha) e custos competitivos. Enquanto o dendê, ele é considerado um cultivo com potencial de ganhar participação mais significativa na indústria de biocombustíveis graças aos seus altos rendimentos (25-30 t/ha).

A seguir é apresentada a caracterização dos sistemas agrícolas de cada matéria prima e em seguida descrita a estrutura metodológica da análise ambiental para cada caso de estudo.

3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS AGRÍCOLAS

3.1.1. Dendê

O dendê é uma palmeira de origem africana com até 15 m de altura, de ciclo perene e com produção contínua ao longo do ano. As condições adequadas para o seu desenvolvimento incluem precipitações ao redor de 2.000 mm/ano, temperatura média anual de 24-28°C, déficit hídrico igual ou inferior a 200 mm/ano, insolação superior a 1.800 horas/ano e umidade relativa do ar na faixa de 70 a 95%. A sua vida útil é de 25 anos e seu rendimento é de cerca de 25 a 30 toneladas de cachos de fruto por hectare.

A partir dos Cachos de Fruto Fresco (CFF) pode se obter os seguintes produtos: óleo de dendê ou palma (ao redor de 20 a 21%, extraído da polpa); óleo de palmiste ou palmístico (aproximadamente 1,7%, extraído da amêndoa), torta de palmiste (ao redor de 3,5%), cachos de fruto vazio (em torno de 22 a 23%), fibras (aproximadamente 12 a 15%), cascas (cerca de 5 a 7%) e efluente líquido (*Palm Oil Mill Effluent* - POME). Os cachos e fibras podem ser usados como combustível na caldeira para geração de vapor,

representando um potencial de 1100 MJ por tonelada, sendo uma parte deste vapor utilizado no processo de extração e o excedente, usado para produzir energia elétrica, tornando assim a indústria de extração autossuficiente em termos energéticos (Yáñez et al., 2009). A produtividade de CCF ao longo da sua vida produtiva é apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3. 1. Produtividade de CFF do dendê.

Idade (anos)	tCFF/ha
1	0
2	0
3	3
4	5
5	10
6	15
7	20
>8	25

Fonte: (AGROPALMA, 2015)

Tanto o óleo de dendê quanto o óleo de palmiste podem ser usados para produzir biocombustíveis e a composição de ácidos graxos de cada um deles é dada na Tabela 3.2.

Tabela 3. 2. Composição de ácidos graxos do óleo de dendê e palmiste.

Óleo	C12:0	C14:0	C16:0	C16:1	C18:0	C18:1	C18:2	C18:3	C20 C20:1 C22:0 C22:1	
	C10 C8 C6 C4	Láurico	Mirístico	Palmítico	Palmitoleico	Estearico	Oleico	Linoleico		Linolênico
Palma (%)	0,1	0,4	1,0	42,7	0,2	4,7	39,7	10,0	0,3	0,8
Palmiste (%)	6,9	44,3	15,1	10,9	0,1	2,5	16,8	3,0	0,1	0,3

O cultivo do dendê pode ser dividido em três etapas: produção de sementes, pré-plantio e plantio definitivo (Figura 3.1). Após a aquisição e pré-germinação das sementes, elas são levadas para o pré-viveiro, permanecendo ali por cerca de três a quatro meses até que as mudas tenham de quatro a cinco folhas lanceoladas. Nessa etapa, as mudas são produzidas mediante a utilização de sacos plásticos preenchidos com solo, de preferência terriço, podendo ou não ser necessária a aplicação de

defensivos, dependendo da ocorrência de pragas e doenças. Se a fertilidade natural do solo usado for boa, a adubação não será necessária nessa etapa; porém, se as mudas tiverem falta de vigor, fertilizantes foliares devem ser aplicados para correção de eventuais deficiências nutricionais (EMBRAPA, 2010).

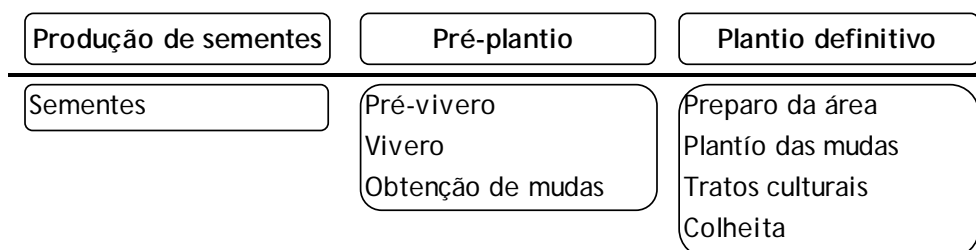


Figura 3. 1. Etapas do cultivo do dendê.

Fonte: Adaptado de (de Oliveira, 2009).

Em seguida, são encaminhadas para o viveiro onde ficam por seis a oito meses. A irrigação no viveiro pode ser feita manualmente ou mediante equipamentos, sendo a última a forma mais usada. As ervas daninhas podem ser controladas com herbicidas e a adubação é feita considerando o tipo de solo. Normalmente, o solo é suplementado com misturas balanceadas de macronutrientes (nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre) e micronutrientes (boro e cobre), com aplicações programadas de fertilizantes.

Logo após, o terreno é preparado e as mudas são levadas para a etapa do plantio. No Brasil, realiza-se a semeadura de uma leguminosa, geralmente a *Pueraria javanica*, que controla a erosão, combate as pragas, reduz a compactação do solo e melhora a fertilização nitrogenada. O plantio é realizado no início do período chuvoso (EMBRAPA, 2010).

Alguns dos principais tratos culturais são: adubação, coroamento, despalma, controle de pragas e doenças e colheita, sendo o coroamento químico (uso de herbicidas), adubação (N-P-K) e o transporte os que têm uma contribuição negativa maior ao meio ambiente, devido ao uso de energia fóssil (de Oliveira, 2009).

A fase de colheita inicia-se aos 2,5 anos após o plantio, é realizada manualmente e ocorre durante todo o ano. Os cachos colhidos são transportados até a usina de

beneficiamento mediante carretas basculantes acopladas a tratores. Os cachos são processados para diversos fins.

Atualmente, Brasil é o duodécimo produtor mundial de óleo de dendê com uma estimativa de produção para o ano 2017 de 410,000 toneladas (Global Palm Oil Production, 2017). O maior produtor de dendê no país é o estado de Pará, o qual possui 95% da produção nacional, seguido dos estados de Amazonas e da Bahia, os três com uma produtividade média no ano 2015 de 16,41t/ha, 5,3 t/ha e 3,8 t/ha, respectivamente (IBGE, 2015).

A maior empresa produtora de cachos de fruto de dendê no país é Agropalma, localizada no Estado do Pará, contando com 39 mil hectares de plantações de dendê e uma produtividade média de 23.500 kgCFF/ha/ano. A empresa também opera cinco indústrias de extração, as quais processam 900 mil toneladas métricas de CFF por ano e duas refinarias, uma no Pará e outra em São Paulo.

3.1.2. Soja

A soja (*Glycine max*) é uma oleaginosa de ciclo anual, com altura menor que 75 cm que se adapta muito bem em uma ampla faixa de clima. O ciclo da planta varia entre 70 a 200 dias, a temperatura ideal para o crescimento da cultura está entre 20°C e 30°C e a necessidade total de água varia entre 450 a 800 mm/ciclo, dependendo de certas variáveis como as condições climáticas ou o manejo da cultura, entre outros. Do grão de soja obtêm-se dois produtos: o óleo e o farelo de soja, cada um com um teor no grão de 20% e 80%, respectivamente. O Brasil é o segundo maior produtor mundial de soja, com uma produção de 113.923 milhões de toneladas em uma área plantada de 33.890 milhões de hectares (na safra 2016/2017). O cultivo da soja pode ser feito mediante o sistema de monocultura ou o sistema de rotação de culturas (onde várias espécies vegetais são alternadas em uma mesma área agrícola), e o método de produção agrícola mais comum é o sistema de plantio direto, com uso intensivo de fertilizantes, agroquímicos e maquinaria agrícola (Milazzo et al., 2013).

No sistema de plantio direto, faz-se necessário corrigir a acidez do solo o qual é feito mediante a aplicação de um corretivo, geralmente calcário, que também promove maiores produtividades. Em relação ao consumo de nutrientes, o nitrogênio é o

composto mais requerido pela cultura, o qual é obtido mediante fertilizantes nitrogenados ou pela fixação biológica, sendo a última a principal fonte de consecução.

Segundo Sugawara (2012), a produção agrícola da soja começa pela obtenção de sementes, as quais são submetidas a um processo de inoculação e aplicação de fungicidas. Em seguida, acontece a semeadura direta a qual é acompanhada da calagem do solo e da aplicação de fertilizantes minerais. Após, a soja atinge o status de maturação, é realizada a colheita de forma mecanizada. Os grãos são levados para a unidade de beneficiamento onde acontecem processos de secagem, remoção de resíduos e classificação, e são logo levados para serem armazenados.

A composição de ácidos graxos da soja é apresentada na Tabela 3.3. Verifica-se que a soja é composta principalmente por ácidos graxos insaturados, com duas duplas ligações na sua cadeia, ao contrário do óleo de dendê que é composto principalmente por ácidos graxos saturados e monoinsaturados, o qual pode ter uma influência na seletividade e no consumo de hidrogênio do processo.

Tabela 3. 3. Composição de ácidos graxos do óleo de Soja (%)

Óleo	C12:0	C14:0	C16:0	C16:1	C18:0	C18:1	C18:2	C18:3	C20 C20:1 C22:0 C22:1
	C10 C8 C6 C4	Láurico	Mirístico	Palmítico	Palmitoleico	Estearico	Oleico	Linoleico	
Soja			10		4	23	53	7,8	

A soja é uma das culturas mais destacadas no Brasil. A sua área plantada expandiu-se 49% nas últimas três décadas, principalmente na região centro-oeste. A produtividade média nacional se encontra na faixa de 2500 e 3000 kg/ha, e as plantações de soja estão localizadas principalmente na região centro e sul do país, sendo Mato Grosso, Paraná e Rio Grande do Sul as maiores regiões produtoras de grãos, respectivamente.

No Paraná, a área plantada com a oleaginosa na safra 2016/2017 totaliza 5255,1 hectares (16% da área total nacional) e o rendimento médio nos últimos 10 anos é de 3.069,4 kg/ha. As condições climáticas e o uso de tecnologias são responsáveis pela boa produtividade da região.

3.2. ANÁLISE DO CICLO DE VIDA

3.2.1. Objetivo do estudo

O objetivo do estudo é realizar uma análise comparativa das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) e dos impactos ambientais do ciclo de vida da produção de combustíveis alternativos de aviação, obtidos a partir do hidrotreatamento do óleo de dendê e do óleo de soja, fabricados no Brasil, levando em consideração as características da cadeia produtiva própria do país durante todo o ciclo de vida do produto. O público alvo do presente trabalho são as agências governamentais e não governamentais, universidades e outras partes interessadas, que estão atualmente trabalhando em iniciativas para impulsionar a produção de biocombustíveis aeronáuticos no país. Alguns deles incluem a UBRABIO, EMBRAER, BOEING, ABRAPA, FAPESP, GOL, UFRJ, UNICAMP, IFNMG (Instituto Federal do Norte de Minas Gerais) e o governo do Brasil, entre outros, visando a realizar uma contribuição para a tomada de decisões.

3.2.2. Escopo do estudo

O enfoque da análise do ciclo de vida desta dissertação é de tipo híbrido, consistindo no tratamento dos coprodutos mediante a combinação dos métodos de alocação e de expansão das fronteiras do sistema. A seguir são definidos os parâmetros do escopo do estudo, tais como unidade funcional, identificação das fronteiras, metodologia da avaliação dos impactos, entre outros.

3.2.2.1. Unidade funcional e fluxo de referência

A unidade funcional é uma descrição quantificada do desempenho do sistema produto, para uso como unidade de referência para a qual todos os outros dados na avaliação são normalizados. A unidade funcional estabelecida, para fins comparativos, no presente trabalho é 1,0 MJ de energia produzida.

O fluxo de referência é a quantidade de produto necessária para que o sistema produto cumpra o desempenho descrito pela unidade funcional. Como visto na revisão bibliográfica, o biocombustível de aviação hidrotreatado atende às especificações

estabelecidas pela norma ASTM. Tem sido reportado na literatura um poder calorífico igual (e em alguns casos inclusive superior) ao do combustível de aviação convencional. Portanto, pode-se adotar o PCI do jet convencional dado na norma ASTM D7566 de 42,8 MJ/kg sendo assim, necessários 0,0234 kg de *biojet* para a geração de 1 MJ de energia.

3.2.2.2. Identificação das fronteiras do estudo.

De acordo com o relatório da força aérea dos Estados Unidos: ‘Estrutura e orientação para estimar as emissões de GEE dos combustíveis aeronáuticos’, a avaliação ambiental deve considerar o ciclo de vida inteiro do biocombustível, isto é, do berço até o túmulo. No setor aeronáutico essa abordagem é denominada Well-to-Wake (WTW). O primeiro passo consiste em definir a cadeia de produção primária dos sistemas a serem analisados. Para ambos cenários objetos do presente estudo, sete estágios do ciclo de vida foram considerados, a seguir:

- Cultivo das matérias-primas.
- Transporte das matérias primas até a usina de extração e refino do óleo.
- Extração e refino do óleo.
- Transporte do óleo refinado até a refinaria.
- Produção do *biojet* (hidrotratamento).
- Transporte do *biojet* até o aeroporto.

Nas Figuras 3.2 a 3.5 são representadas as fronteiras e o sistema produto para o cenário do dendê e da soja, respectivamente. Não fazem parte do escopo do estudo, os impactos associados ao uso do solo, devido aos fatores mencionados no item 2.4.1, e à construção dos equipamentos agrícolas e instalações de processamento industrial, devido a seu impacto mínimo. Os inventários da eletricidade, fertilizantes, diesel e calcário foram compilados de várias referências bibliográficas que refletem o cenário Brasileiro. Outras entradas de materiais e energia foram selecionadas das bases de dados do Simapro®.

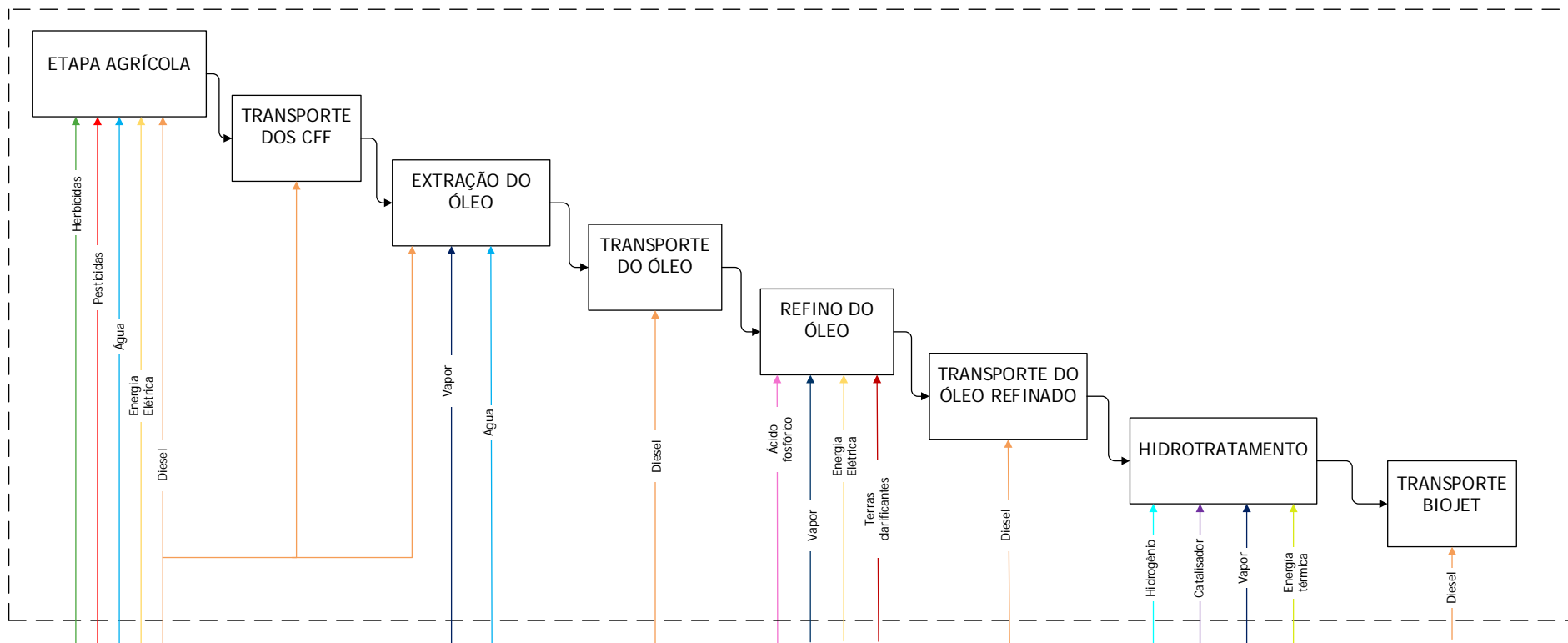


Figura 3. 2. Fronteira do sistema para o cenário do dendê.

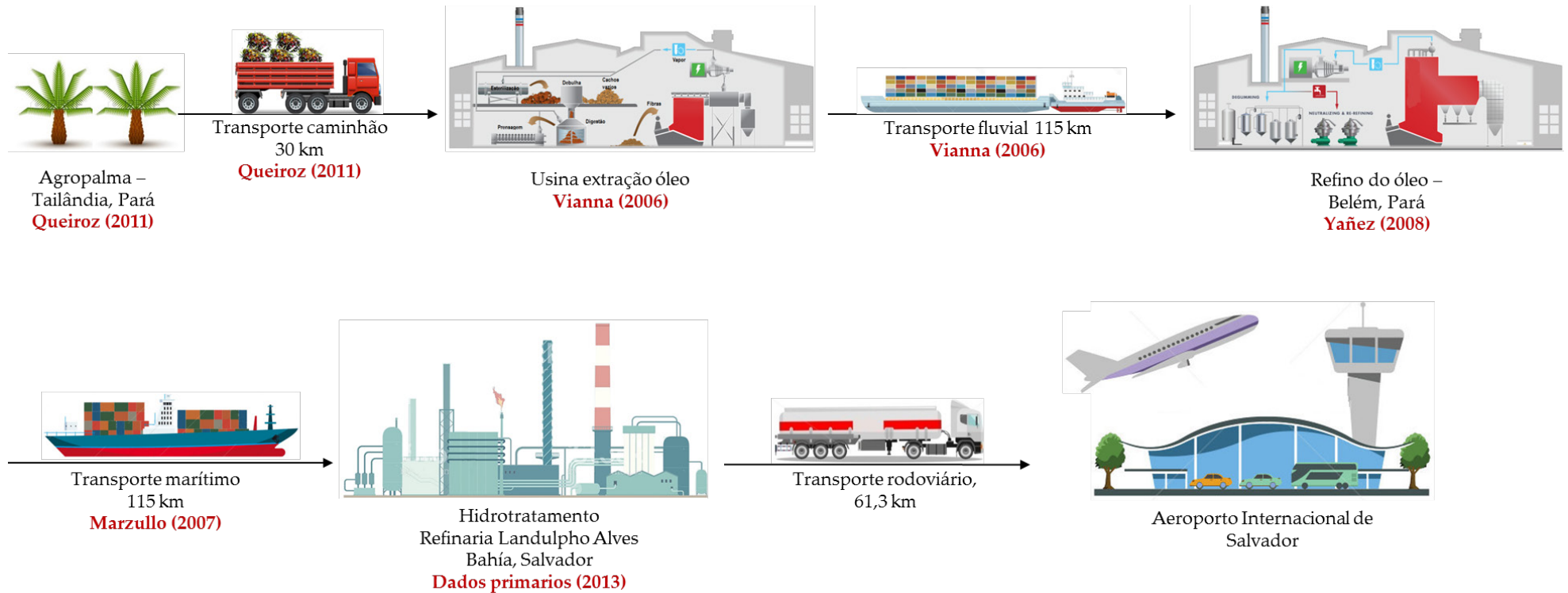


Figura 3. 3. Sistema produto do cenário dendê.

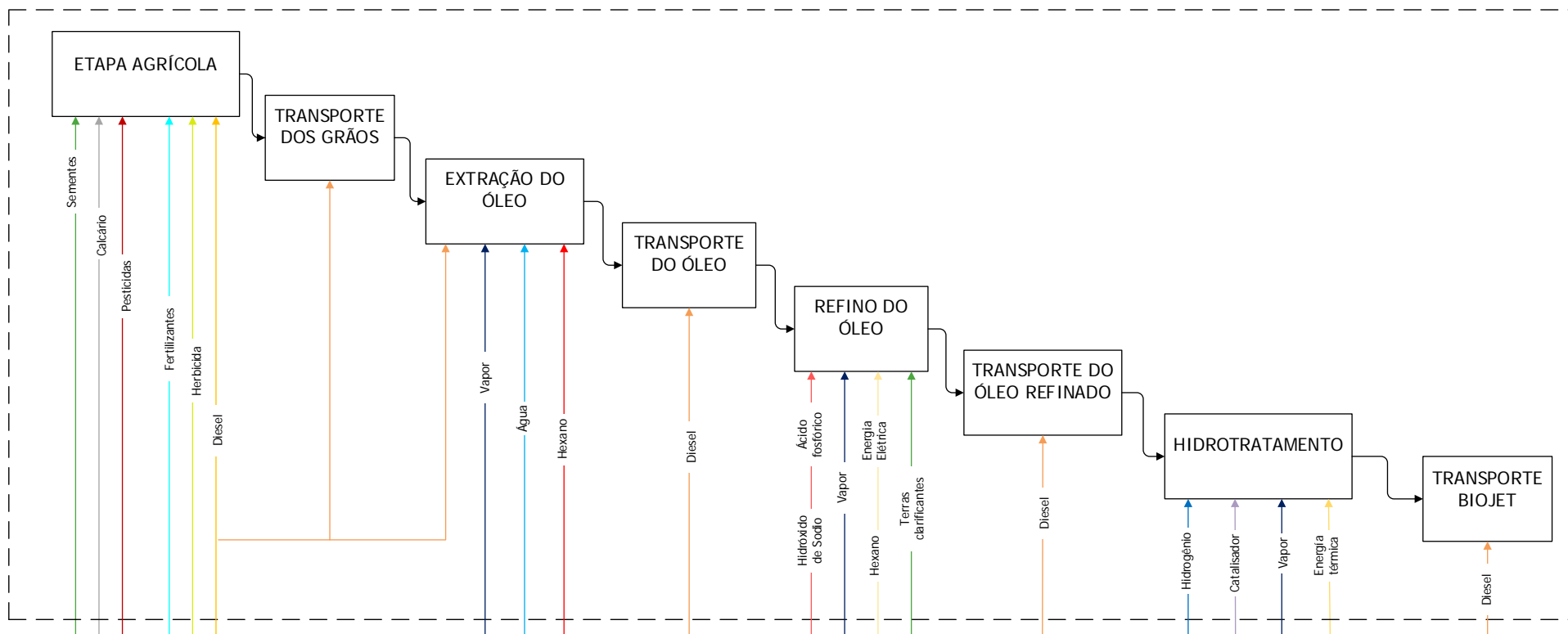


Figura 3. 4. Fronteira do sistema para o cenário da soja.

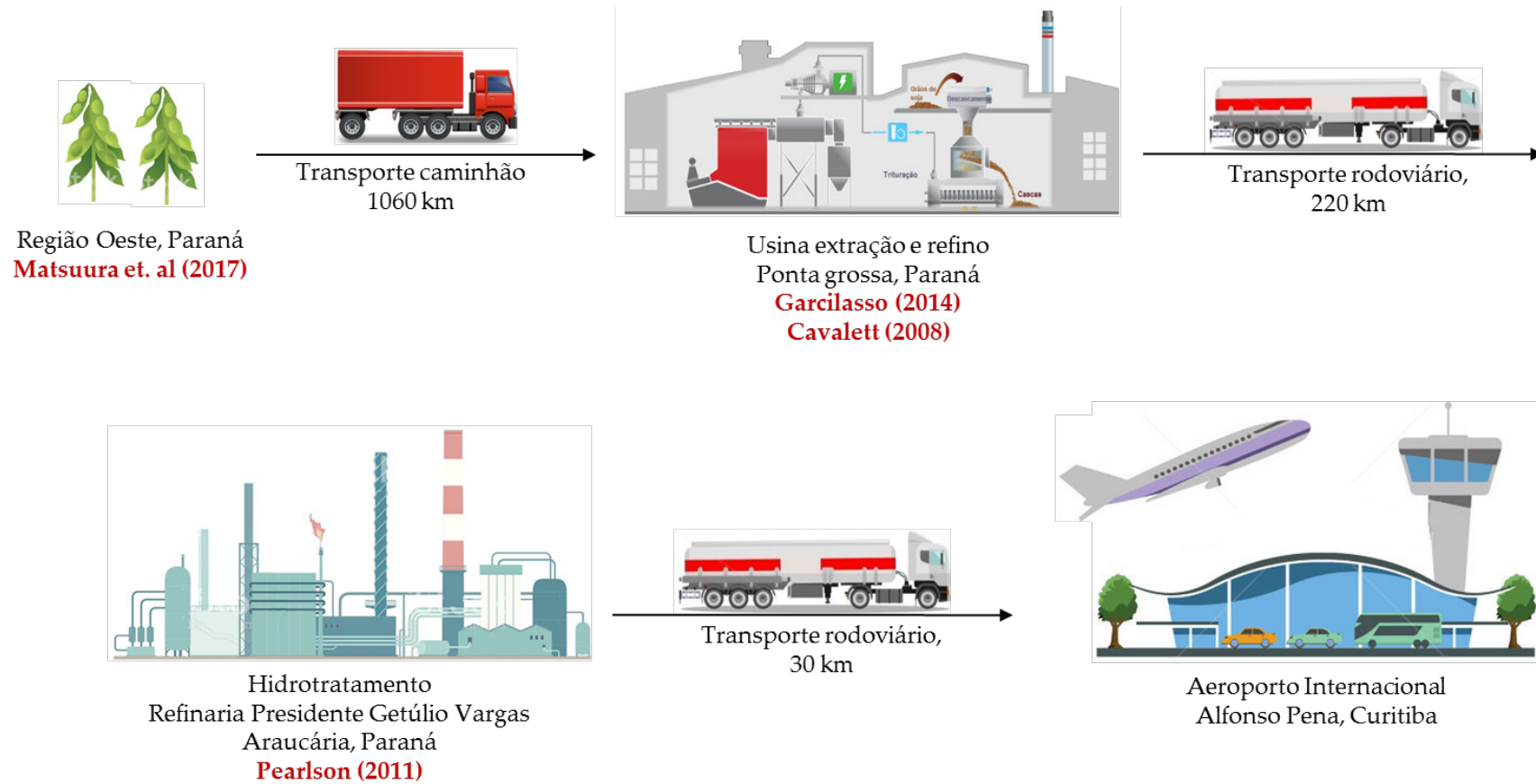


Figura 3. 5. Sistema produto do cenário da soja.

3.2.2.3. Fronteira geográfica do cenário biocombustível de aviação de óleo de dendê.

O Pará foi escolhido como objeto de pesquisa no cenário do biocombustível de aviação de dendê porque ele é o maior estado produtor de óleo de dendê no Brasil, representando um 90% da produção nacional. O estado tem uma área de 1.247.954,6 km² e é dividido em 144 municípios (Figura 3.6). O relevo é predominantemente plano e baixo e a vegetação é maioritariamente composta por floresta amazônica. O clima é equatorial com chuvas constantes, sendo a temperatura média anual de 26°C. O território possui mais de 20 mil quilômetros de rios, como o Amazonas, o que lhe proporciona facilidade de navegação fluvial (Carvalho, 2015).

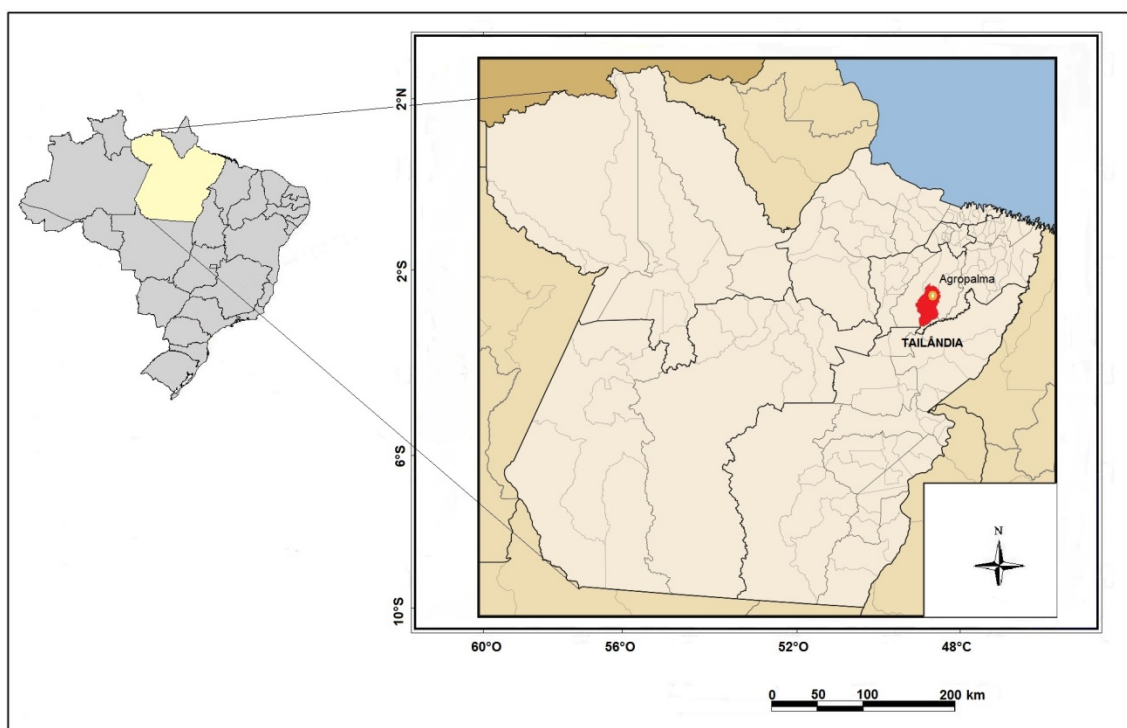


Figura 3. 6. Mapa de localização do estado do Pará.

Atualmente, 33 municípios produzem óleo de dendê os quais estão localizados na mesorregião do nordeste paraense, sendo Tailândia e Moju os principais produtores. O terreno é caracterizado por planícies de inundação e floresta densa, com platôs e terraços, superfície predominantemente sedimentar, temperatura anual de 25°C e umidade em torno de 85% e chuvas regulares.

No município de Tailândia encontra-se localizado um dos complexos industriais da Agropalma, que conforma o estudo de caso proposto neste trabalho no que concerne à fase agrícola do dendê. Além da Agropalma, outras empresas produtoras de óleo de dendê incluem a Marborges, Biopalma, Petrobras combustível, Yossan, Dentaua, Palmasa, Guanfeng Group, entre outras.

3.2.2.4. Fronteira geográfica cenário do biocombustível de aviação do óleo de soja.

A região caso de estudo escolhida para o cenário da soja é o Paraná (Figura 3.7), que é o segundo maior produtor, representando ao redor de 18% da produção nacional.

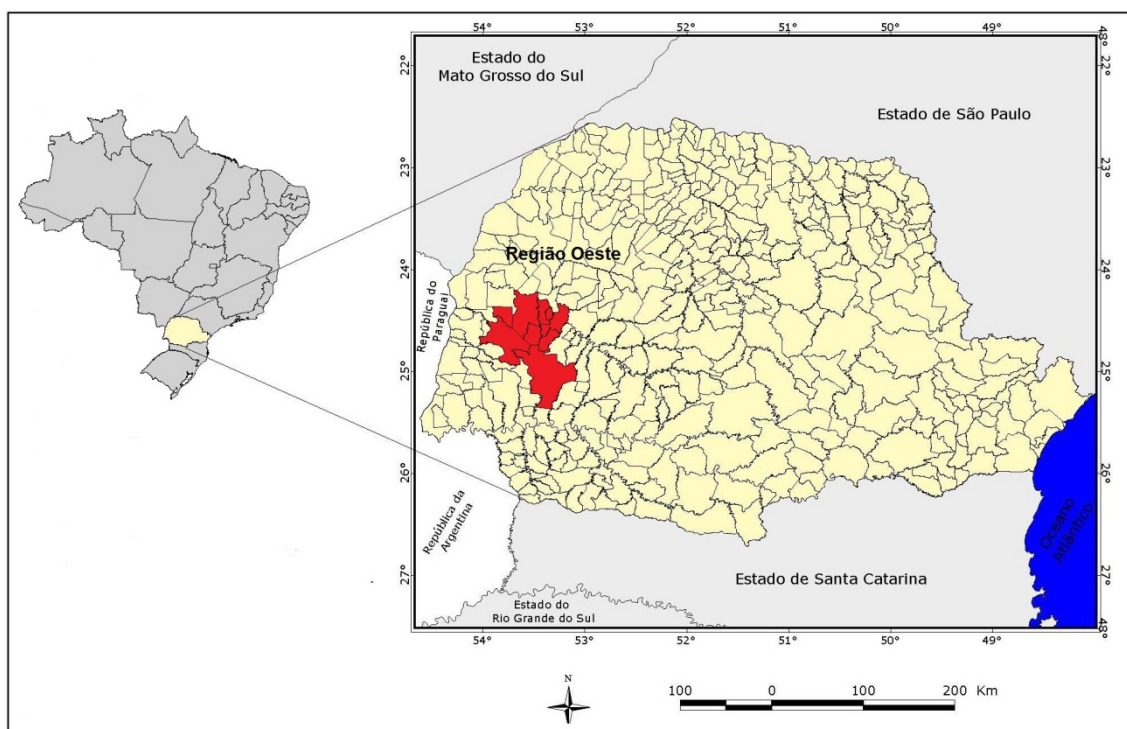


Figura 3. 7. Mapa de localização do estado do Paraná.

As suas altas temperaturas no verão, junto com o elevado índice pluviométrico faz com que o território seja muito favorável para a produção de soja. A região oeste do território compreende a maior área destinada para o cultivo da oleaginosa junto com um grande complexo logístico para a sua comercialização (Rizato, 2015). A região apresenta variedade de solos que facilitam o cultivo da planta. Na zona oeste, existe o predomínio de Latossolos, Nitossolos e Neossolos Litóicos os quais são propícios para

essa cultura. O clima é subtropical úmido e o regime pluviométrico é satisfatório durante todo o ano, apresentando alto nível de umidade nos meses de desenvolvimento da safra de soja, o que contribui no aumento da produtividade. A vegetação apresenta uma elevada biodiversidade, sendo a Floresta Ombrófila e a Floresta Estacional Semidecidual as mais predominantes na região em estudo.

3.2.2.5. Coprodutos

Os coprodutos do sistema, para ambos cenários propostos no trabalho, são gerados em duas etapas do ciclo de vida: na extração do óleo e no hidrotreatamento.

No cenário do dendê, os coprodutos obtidos são: óleo de palmiste e torta de palmiste (na etapa de extração do óleo), assim como nafta e propano (na etapa do hidrotreatamento). Já no cenário da soja, são obtidos: farelo de soja (na etapa de extração do óleo), bem como diesel, nafta e propano (na etapa do hidrotreatamento).

Conforme mencionado no item 2.4.1, o presente trabalho irá aplicar uma abordagem híbrida para o seu tratamento. É proposta a aplicação do método de expansão das fronteiras para os coprodutos gerados na primeira fase, devido à dificuldade do uso de um único fator de alocação, em virtude das diferentes aplicações que cada coproduto tem (lembrando que, em relação ao método de alocação, a norma ISO 14044 indica que a alocação econômica deve ser usada como último recurso, quando os outros métodos resultam inadequados), e a alocação em base energética para os coprodutos gerados na segunda fase, já que todos eles são produtos energéticos.

- **Abordagem de tratamento do óleo de palmiste.**

A determinação dos produtos marginais que irão ser substituídos pelo óleo de palmiste foi feita tomando como referência o trabalho de Schmidt e Weidema (2008). Como mencionado no item 2.4, o produto marginal é aquele que é mais competitivo com base em estatísticas sobre volumes de produção e preços e para sua identificação, deve-se levar em consideração que ele deve estar dentro de um segmento de mercado relevante. Dessa maneira, é primeiramente apresentado, na Tabela 3.4, as aplicações de

alguns dos principais óleos vegetais, as quais variam de acordo com a composição de ácidos graxos que cada um possui. Vale ressaltar que, além das aplicações alimentares do óleo de palmiste apresentadas na Tabela 3.4, e que são o foco da análise do presente trabalho, ele pode ser também usado na indústria para fabricação de sabonetes.

Tabela 3. 4. Aplicações e substituições de diversos óleos vegetais.

Uso	Óleos de sementes (Soja, canola, girassol)	Óleo de dendê	Óleos láuricos (kernel e coco)
Gorduras sólidas			
Margarinas, gorduras hidrogenadas	X	X	X
<i>Shortenings</i>	X	X	
Gorduras de confeitaria	X	X	
Gordura para fritura		X	
Gordura para sorvete	X	X	X
Gordura líquida			
Óleo para fritura	X	X	
Óleo para saladas	X	X	

Fonte: (Schmidt e Weidema, 2008)

De acordo com a Tabela 3.4, as principais aplicações dos óleos vegetais podem ser atendidas por vários deles, enquanto algumas outras só podem ser satisfeitas por uma minoria. O principal substituto do óleo de palmiste é o óleo de coco devido a sua composição e aplicações similares. Porém, segundo Schmidt e Weidema (2008), em função do óleo de coco ser considerado com pouca capacidade de reagir facilmente às mudanças na demanda do mercado (já que é um cultivo de pequenos agricultores e também porque leva de 5 a 7 anos para amadurecer), o substituto do óleo de palmiste deve ser identificado entre os óleos principais (soja, canola, girassol e dendê) que compartilham aplicações com ele, como no caso das margarinas. Conforme as informações do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), no Brasil a produção de óleos vegetais é dominada pelo óleo de soja, seguido pelo óleo de dendê e o de algodão (Tabela 3.5). Dessa maneira, e em concordância com estudos prévios (Uusitalo et al., 2014), é assumido neste trabalho que o potencial produto que o óleo de palmiste poderá substituir é o óleo de soja, já que é o óleo mais competitivo no Brasil e porque eles pertencem a um segmento de mercado similar.

Tabela 3. 5. Produção e preços dos principais óleos vegetais no Brasil.

Óleos vegetais	2013		2014		2015		2016		2017	
	Produção (mil toneladas)	Preço (R\$/t)	Produção (mil toneladas)	Preço (R\$/t)	Produção (mil toneladas)	Preço (R\$/t)	Produção (mil toneladas)	Preço (R\$/t)	Produção (mil toneladas)	Preço (R\$/t)
Óleo de soja	7070	2269	7760	2135	7630	2510	7850	2814	8060	2698
Óleo de dendê	370	1848	400	1926	405	2049	400	2433	410	2278
Óleo de palmiste	42	1944	45	2629	46	2986	46	4460	46	4078
Óleo de girassol	88	2408	58	2121	27	2817	40	2939	44	2537
Óleo de algodão	384	4295	336	4289	280	5165	320	5685	352	5876
Óleo de amendoim	43	3801	53	3095	57	4436	58	5210	60	4732

Fonte: Adaptado do USDA

Por conseguinte, assumindo um poder calorífico para os óleos de palmiste e soja de 36 MJ/kg e 37,2 MJ, respectivamente, tem-se que 1 kg de óleo de palmiste irá substituir 0,96 kg de óleo de soja. Considerando que 0,00302 kg de óleo de palmiste são gerados, cerca de 0,0029 kg de óleo de soja serão substituídos por cada MJ de biocombustível de aviação produzido.

- **Abordagem de tratamento do farelo de soja e a torta de palmiste.**

Em relação à torta de palmiste e o farelo de soja, ambos são principalmente usados como forragem animal e para a definição dos produtos substitutos foi tomado como referência o trabalho do Wong (2008), que estudou várias alternativas potenciais em base de equivalência proteica, para os dois coprodutos. Os resultados que o autor obteve variaram muito em relação às diferentes alternativas adotadas. Isto é, os substitutos com um teor proteico muito menor que o do coproduto estudado resultaram em uma superestimação de créditos produzindo emissões líquidas negativas (devido à alta taxa de deslocamento), enquanto os substitutos com teor proteico similar produziram resultados mais adequados, sendo os últimos considerados como mais apropriados para ser substituídos. Por conseguinte, os produtos substitutos do farelo de soja e da torta de palmiste serão estabelecidos de acordo aos conteúdos proteicos de cada um, e a seguir são apresentados na Tabela 3.6 os dados da produção de algumas fontes de forragem animal no Brasil assim como seu teor proteico.

Tabela 3. 6. Produção e preços de algumas fontes de forragem animal no Brasil.

Forragem	Produção (mil toneladas)					Teor proteico (%)
	2013	2014	2015	2016	2017	
Farelo de soja	28540	31300	30750	31660	32500	48%
Milho	80000	85000	67000	98500	95000	9%
Trigo	5300	6000	5540	6730	4900	14%
Farelo de algodão	1130	990	830	995	1115	49%
Farelo de palmiste	53	56	58	58	58	14,4%
Cevada	361	305	263	317	300	12%

Fonte: Adaptado do USDA

Para o caso da torta de palmiste, o trigo será assumido como o produto substituto já que ele tem um teor proteico similar à torta de palmiste e, portanto é o mais conveniente para estimar a relação de substituição. Sabendo que o teor proteico da torta de palmiste e do trigo é de 14,4% e 14%, respectivamente, tem-se que 1 kg de farelo de palmiste irá substituir 1,02 kg de trigo. Dado que 0,00705 kg de óleo de palmiste são produzidos por MJ de biocombustível de aviação, cerca de 0,00725 kg de trigo serão substituídos por cada MJ de biocombustível de aviação produzido.

Para o caso do farelo de soja, além do conteúdo proteico, deve-se também analisar a intensidade do uso de energia e de emissões de cada alternativa, já que devido a uma grande quantidade de farelo de soja ser produzida durante a extração do óleo (com um rendimento aproximado de 80% e 20%, respectivamente), os créditos de emissão poderiam resultar muito grandes tendo um alto impacto nos resultados da análise. Dessa maneira, vários autores têm chegado à conclusão que o substituto mais apropriado do farelo de soja é o grão de soja. Assim, dado o teor proteico do farelo de soja e dos grãos de soja de 48% e 40%, respectivamente, 1 kg de farelo de soja irá substituir 1,2 kg de grãos de soja. Como 0,203 kg de farelo de soja são produzidos por MJ de biocombustível de aviação, cerca de 0,2436 kg de grãos de soja serão substituídos por MJ de biocombustível de aviação produzido.

- **Alocação dos coprodutos do hidrotreamento**

Para realizar a alocação em base energética dos coprodutos gerados no hidrotreamento, foi considerado o poder calorífico inferior (PCI) de cada um deles e a quantidade produzida em cada cenário. Na Tabela 3.7 e 3.8 é mostrado o fator de alocação adotado para o cenário do dendê e da soja, respectivamente.

Tabela 3. 7. Fator de alocação coprodutos hidrotreatamento no cenário do dendê.

Alocação energética	Quantidade produzida (kg)	Poder calorífico (MJ/kg)	Fator de alocação (%)
<i>Hidrotreatamento</i>			
<i>Biojet</i>	2,34E-02	42,8	73,6
Nafta	6,99E-03	45,1	23,2
Propano	8,64E-04	50,3	3,19

Tabela 3. 8. Fator de alocação coprodutos hidrotreatamento no cenário da soja.

Alocação energética	Quantidade produzida (kg)	Poder calorífico (MJ/kg)	Fator de alocação (%)
<i>Hidrotreatamento</i>			
<i>Biojet</i>	2,34E-02	42,8	57,4
Diesel	1,10E-02	44,8	28,3
Nafta	3,31E-03	45,1	8,56
Propano	2,00E-03	50,3	5,74

3.2.2.6. Software e método de avaliação

A modelagem e avaliação ambiental do ciclo de vida foi feita com o auxílio do software SimaPro® versão 8.0.3. Levando em consideração que a escolha do método de avaliação de impactos deve atender às preocupações ambientais identificadas no objetivo e no escopo do estudo, a seguir são apresentadas na Tabela 3.9 as categorias de impacto (que representam as questões ambientais de interesse para as quais os resultados da avaliação podem ser atribuídos) dos métodos de avaliação mais utilizados do Simapro como base para a seleção do método usado no trabalho (mais informações sobre cada método são encontradas em Frischknecht et al. (2007)).

Observa-se na Tabela 3.9 que os principais métodos de avaliação têm sido desenvolvidos na Europa, cada um abordando diferentes categorias de impacto. Vale mencionar que existem outros métodos de categoria única, os quais cobrem apenas um aspecto ambiental, por exemplo, o método IPCC que avalia a mudança climática ou o método de Demanda Acumulada de Energia (*Cummulative Energy Demand* - CED).

Tabela 3. 9. Categorias de impacto de vários métodos de avaliação do Simapro.

Método de avaliação	CML-IA	Eco-Indicador 99	Impact 2002+	EDIP 2003	ReCiPe
Desenvolvido por	Centro de Gestão Ambiental da Universidade de Leiden, Holanda.	Pré Consultants, Holanda.	Instituto Federal Suíço de Tecnologia de Lausanne, Suíça.	Instituto de desenvolvimento de produtos, Universidade técnica de Dinamarca, Dinamarca.	Universidade de Radboud, Universidade de Leiden e Pré Consultants, Holanda.
Impactos	Aquecimento global	Aquecimento global	Aquecimento global	Aquecimento global	Aquecimento global
	Depleção da camada de ozônio	Depleção de camada de ozônio	Depleção da camada de ozônio	Depleção da camada de ozônio	Depleção da camada de ozônio
	Ecotoxicidade terrestre	Ecotoxicidade	Ecotoxicidade terrestre	Ecotoxicidade terrestre	Ecotoxicidade terrestre
	Ecotoxicidade aquática	Acidificação/Eutrofização	Ecotoxicidade aquática	Eutrofização terrestre	Ecotoxicidade aquática
	Ecotoxicidade marinha	Uso de recursos fósseis	Eutrofização aquática	Eutrofização aquática	Ecotoxicidade marinha
	Toxicidade humana	Carcinogênicos	Toxicidade humana	Toxicidade humana	Toxicidade humana
	Depleção de recursos abióticos	Efeitos respiratórios (inorgânicos)	Efeitos respiratórios (inorgânicos)	Potencial de formação de ozônio	Radiação ionizante
	Acidificação	Uso de recursos minerais	Acidez terrestre	Acidificação	Acidificação terrestre
	Oxidação foto-química	Uso do solo	Uso do solo	Uso de recursos	Uso do solo
	Eutrofização	Radiação	Radiação ionizante	Resíduos perigosos	Transformação da terra
		Efeitos respiratórios (orgânicos)	Efeitos respiratórios (orgânicos)	Resíduos radioativos	Eutrofização aquática
			Energia não renovável	Escória/Cinzas	Eutrofização marinha
			Extração de minerais		Formação de oxidantes fotoquímicos
			Acidificação aquática		Formação de matéria particulada
					Esgotamento de recursos fósseis

Fonte: (Pré consultants, 2016)

Para o presente trabalho decidiu-se selecionar o método de avaliação IMPACT 2002+, já que as suas categorias de impacto (por exemplo, aquecimento global, uso de recursos, toxicidade humana, depleção da camada de ozônio, entre outros) estão alinhados com os interesses de avaliação do presente estudo. Também porque ele tem uma abordagem combinada, ligando todos os tipos de resultados do inventário do ciclo de vida através de 14 categorias intermediárias de impacto ou *'midpoint'*, apresentadas na Tabela 3.9 (as quais restringem a modelagem quantitativa a estágios iniciais na cadeia de causa-efeito), e quatro de dano ou *'damage'*, que são: saúde humana, qualidade do ecossistema, mudança climática e recursos (as quais objetivam modelar a cadeia causa-efeito até o ponto final ou o dano) (Jolliet et al., 2003). O conceito geral da metodologia é apresentado na Figura 3.8.

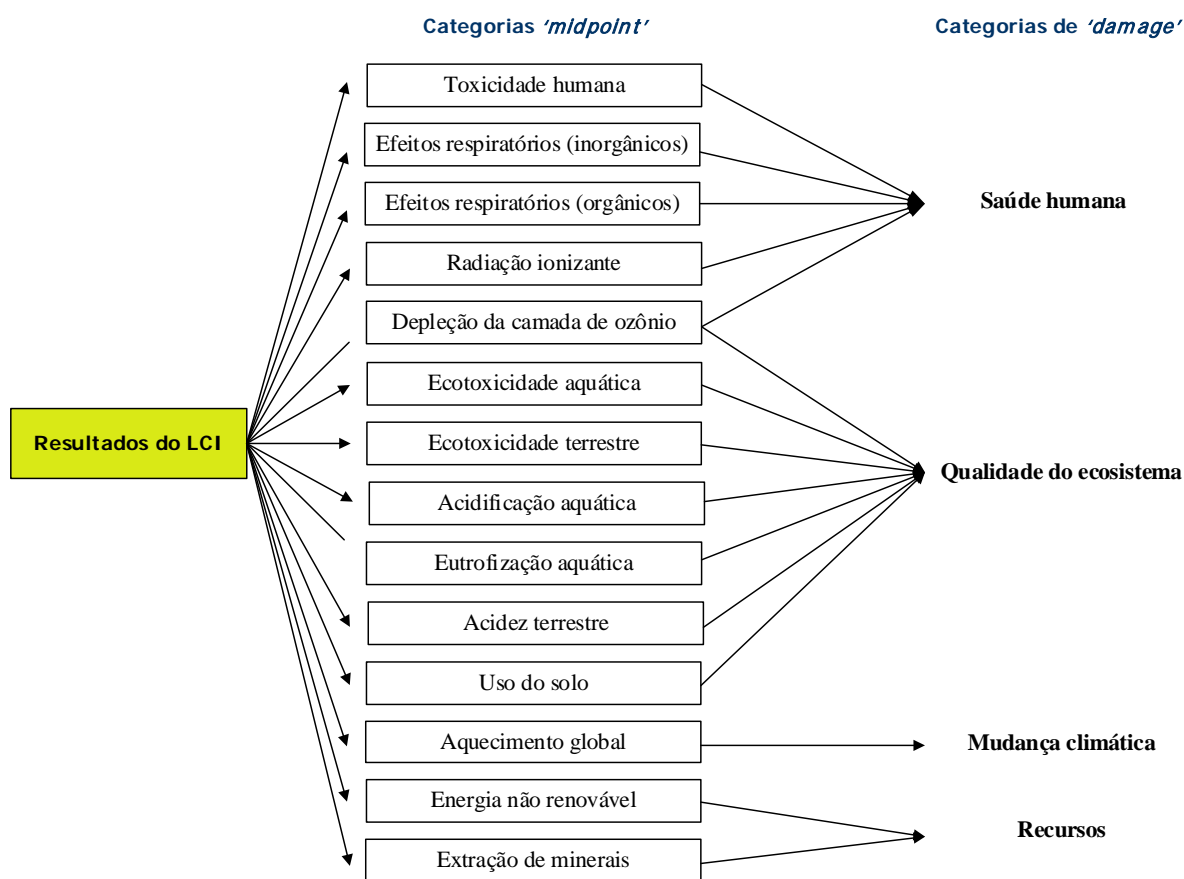


Figura 3. 8. Esquema geral do método IMPACT 2002+

Fonte: (Jolliet et al., 2003).

Como visto na Figura 3.8, as categorias de impacto intermediárias são agrupadas de acordo aos fluxos elementares e intervenções ambientais em categorias de dano, que representam mudanças finais da qualidade do meio ambiente. A pontuação dos fatores de caracterização ‘*midpoint*’ é expressa em kg-equivalentes de uma substância de referência ‘*x*’, que equivale ao impacto do poluente considerado no estudo da categoria. Por exemplo, a categoria de toxicidade humana é medida em kg_{eq} de cloroetileno no ar, fornecendo uma estimativa do risco tóxico cumulativo e potenciais impactos associados à emissão de diversos milhares de substâncias químicas para o meio ambiente em comparação com a emissão de 1 kg de cloroetileno (se a substância for por exemplo hidrocarbonetos de corte C10-C15, a equivalência do seu impacto seria 0,0015 vezes a do cloroetileno) (Pré consultants, 2016). Na Tabela 3.10, são apresentadas as substâncias de referência e as unidades de dano usadas no método escolhido.

Tabela 3. 10. Principais fontes dos fatores de caracterização, substâncias de referência e unidades de dano usadas no IMPACT 2002+.

Categoria “<i>midpoint</i>”	Substância “<i>midpoint</i>” de referência	Categoria de “<i>damage</i>”	Unidade do dano
Toxicidade humana	kg _{eq} cloroetileno no ar	Saúde humana	DALY
Efeitos respiratórios (inorg)	kg _{eq} PM2.5 no ar		
Efeitos respiratórios (org)	Bq _{eq} carbono-14 no ar		
Radiação ionizante	kg _{eq} CFC-11 no ar		
Depleção da camada de ozônio	kg _{eq} etileno no ar	Qualidade do ecossistema	PDF*m ² *yr
Ecotoxicidade aquática	kg _{eq} trietilenoglicol na água		
Ecotoxicidade terrestre	kg _{eq} trietilenoglicol no solo		
Acidez terrestre	kg _{eq} SO ₂ no ar		
Acidificação aquática	kg _{eq} SO ₂ no ar		
Eutrofização aquática	kgPO ₄ ³⁻ na água		
Uso do solo	m ² _{eq} terra cultivável orgânica por ano	Mudança climática	kg _{eq} CO ₂ no ar
Aquecimento global	kg _{eq} CO ₂ no ar		
Energia não renovável	MJ totais primários não renováveis ou kg _{eq} óleo cru (860 kg/m ³)	Recursos	MJ
Extração de minerais	MJ energia adicional ou kg _{eq} ferro		

Fonte: (Jolliet et al., 2003)

Como se observa na Tabela 3.10, cada categoria intermediária considera um indicador diferente baseado em uma substância de referência, enquanto as categorias de dano são expressas em DALY, PDF*m²*yr, kg_{eq} CO₂ no ar e MJ, as quais são descritas a seguir (Humbert et al., 2012):

- DALY (“*Disability Adjusted Life Years*” ou anos de vida perdidos ajustados por incapacidade): caracteriza a gravidade da doença, representando a mortalidade (anos de vida perdidos por morte prematura) e a morbidade (o tempo de vida com indisposição parcial devido a uma doença, por exemplo, no hospital). Uma pontuação de 3 DALYs implica a perda de três anos de vida em relação à população total.
- PDF (“*Potentially Disappeared Fraction*” ou fração de espécies potencialmente afetadas): é a unidade para “medir” os impactos nos ecossistemas. Representa a fração de espécies potencialmente desaparecidas em 1 m² de superfície terrestre durante um ano.
- kg_{eq} CO₂ no ar: representa a concentração de CO₂ que causaria o mesmo nível de força radioativa como um dado tipo e concentração de gás de efeito estufa.
- MJ: é a unidade de medida da quantidade de energia necessária no futuro, para repor o recurso que foi extraído.

Mais informações sobre o método tais como os fatores de caracterização e as características de avaliação, estão disponíveis em Humbert et al. (2012).

3.2.3. Sistema produto e inventario do ciclo de vida

Nesta seção são apresentadas as considerações adotadas no ciclo de vida dos cenários propostos. Os fluxos de materiais e energia das entradas necessárias para os estágios da cadeia produtiva mencionados no item 3.2.2.2, são também descritos a seguir.

3.2.3.1. Sistema cenário 1: Biojet de óleo de Dendê

O primeiro cenário avaliado neste estudo consiste na produção de *biojet* a partir do óleo de dendê. Assume-se que o cultivo do dendê é realizado pela empresa Agropalma, em terras anexas a sua fábrica localizada na Tailândia, no Pará. Os cachos do dendê são transportados por caminhões até a usina de extração de óleo localizada a 30 km de distância, e depois da extração o óleo bruto segue por vias fluviais até a refinaria localizada em Belém, Pará. O óleo refinado é levado para a refinaria Landulpho Alves na Bahía, por meio de transporte marítimo, onde é processado para *biojet* e depois levado via rodoviária para o Aeroporto Internacional de Salvador.

- **Etapa Agrícola do Dendê:** Como mencionado anteriormente, as principais fases da etapa agrícola são a produção de sementes, o pré-plantio e o plantio definitivo. As informações sobre as entradas da fase agrícola do dendê foram obtidas de Queiroz (2011), que obteve os dados a partir de visitas e reuniões técnicas realizadas na empresa Agropalma. Foi considerada uma produtividade de 23,5 t/ha, segundo dados da Agropalma, sem a existência de coprodutos. A colheita é realizada de 10 em 10 dias a partir do terceiro ano após o plantio definitivo. O transporte dos CFF até a caixa de coleta (com capacidade de 16 toneladas) é feita mediante um trator e o seu posterior transporte até a usina de extração é feito por caminhões. Na entrada é considerado o diesel consumido nos transportes requeridos no cultivo, assim como o uso de fertilizantes e defensivos agrícolas, porém não são considerados os aspectos associados ao transporte deles.

É estimado que a absorção de carbono do cultivo no período de 25 anos é de 61,88 toneladas de carbono por hectare, sendo a média anual de 2480 kg o qual corresponde a 9,096 kg de CO₂ absorvido por hectare por ano. Os fluxos e o inventário das entradas para a produção de 0,202 kg de CFF (quantidade necessária para atender o a unidade funcional) associados a essa etapa são apresentados na Figura 3.9 e na Tabela 3.11, respectivamente.

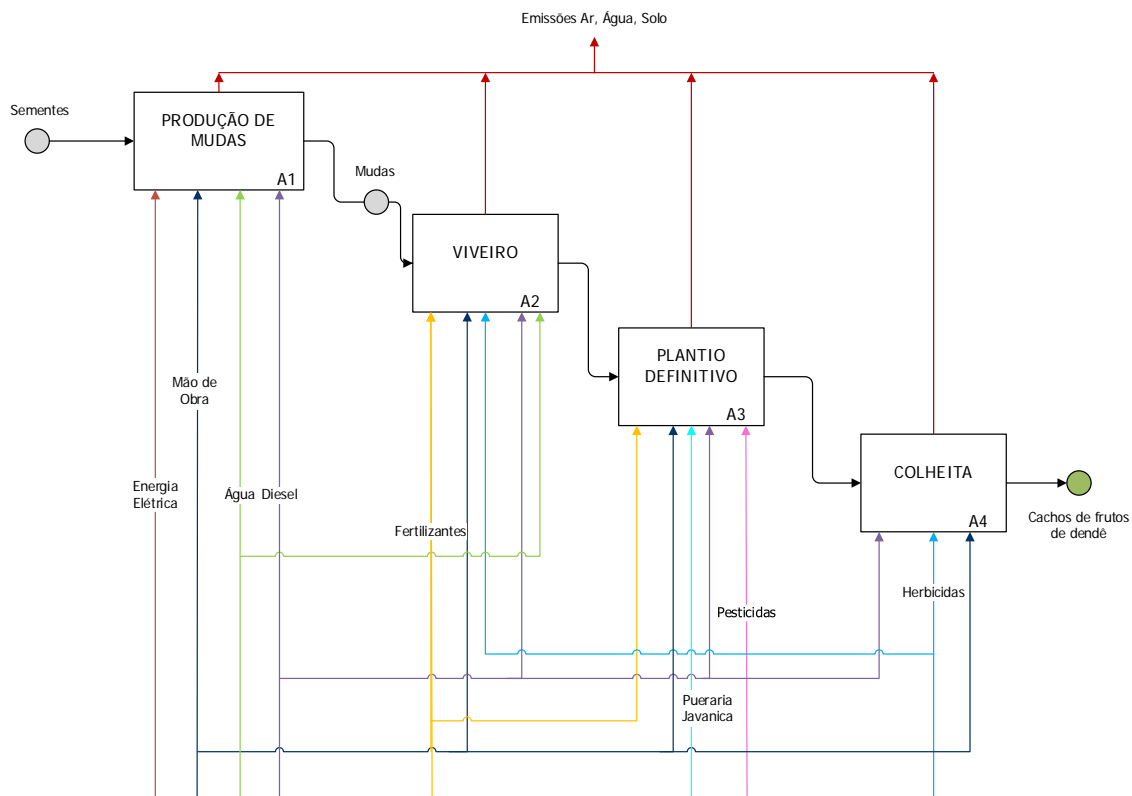


Figura 3. 9. Entradas do subsistema cultivo para 23,5 t/ha de dendê

Tabela 3. 11. Inventário de produção dos cachos de fruto de dendê.

Entradas	Unidade	Produção 23,5 t/ha (Queiroz, 2011)	Quantidade para produção de 1 MJ de energia (unidade funcional)
N	kg	83,3	$7,16 \times 10^{-04}$
P ₂ O ₅	kg	83,3	$7,16 \times 10^{-04}$
K ₂ O	kg	192	$1,65 \times 10^{-03}$
Magnésio	kg	16,7	$1,44 \times 10^{-04}$
Pueraria Javanica	kg	3,00	$2,58 \times 10^{-05}$
Herbicida (glifosato)	kg	5,43	$4,67 \times 10^{-05}$
Diesel	kg	21,8	$1,88 \times 10^{-04}$
CO ₂	kg	9090	9090
Saídas	Unidade	Produção 23,5 t/ha (Queiroz, 2011)	Produção 0,202 kg (Quantidade para unidade funcional de 1MJ)
Fruto dendê	kg	23500	0,202
<i>Emissões atmosféricas</i>			
CO ₂	kg	133	$1,14 \times 10^{-03}$

Tabela 3.11 - continuação

N ₂ O	kg	1,04	$8,94 \times 10^{-06}$
Amônia	kg	12,5	$1,07 \times 10^{-04}$
NO _x	kg	0,219	$1,88 \times 10^{-06}$
Herbicida (Glifosato)	kg	0,271	$2,33 \times 10^{-06}$
<i>Efluentes líquidos</i>			
N	kg	8,33	$7,16 \times 10^{-05}$
Potássio	kg	8,33	$7,16 \times 10^{-05}$
Herbicida (Glifosato)	kg	1,09	$9,37 \times 10^{-05}$
<i>Efluentes para o solo</i>			
Herbicida (glifosato)	kg	4,07	$3,50 \times 10^{-05}$

- **Transporte para a usina de extração:** Segundo Queiroz (2011), o transporte dos cachos de frutos é do tipo rodoviário, feito em caminhões com capacidade de 15000 kg e a distância média entre o cultivo e a usina é de 30 km. O inventário desse transporte foi modelado a partir do banco de dados da PRÉ-CONSULTANTS e é apresentado na Tabela 3.12.

Tabela 3. 12. Inventário do transporte dos cachos para a usina de extração.

Entradas	Unidade	Transporte 23,5 t (Queiroz, 2011)	Transporte de 1 MJ de energia (unidade funcional)
Diesel	kg	14,3	$1,23 \times 10^{-04}$
Saídas	Unidade	Produção 23,5 t/ha (Queiroz, 2011)	Produção 0,202 kg (Quantidade para unidade funcional de 1MJ)
<i>Emissões atmosféricas</i>			
CO ₂	kg	45,6	$3,92 \times 10^{-04}$
CO	kg	0,193	$1,66 \times 10^{-06}$
NO _x	kg	0,538	$4,62 \times 10^{-06}$
N ₂ O	kg	$1,15 \times 10^{-03}$	$9,89 \times 10^{-09}$
Material particulado	kg	0,0247	$2,12 \times 10^{-07}$
COVNM	kg	0,0513	$4,41 \times 10^{-07}$
CH ₄	kg	$2,55 \times 10^{-03}$	$2,19 \times 10^{-08}$
SO _x	kg	0,0725	$6,23 \times 10^{-07}$

- **Extração do óleo:** A extração do óleo deve ser feita em até 24 horas (no máximo 48 horas) após a colheita para preservar a qualidade do óleo, devido ao teor de ácidos graxos presente nele. O processo de extração do óleo (Figura 3.10) é iniciado com a esterilização dos cachos, mediante a adição de vapor (proveniente da caldeira) por aproximadamente 60 minutos a pressão de 2,5-3 atm, para ajudar a soltar os frutos do cacho e para desativar as enzimas que causam a degradação do óleo em ácidos graxos livres. Os cachos esterilizados são levados para o debulhador, onde os frutos são separados dos cachos. Os frutos são enviados para o digestor e os cachos são transformados em adubo orgânico. No digestor, os frutos são amassados sobre vapor aquecido mediante um processo mecânico de agitação, e a massa que sai dele segue para a prensagem, onde é extraído o óleo cru, em uma taxa de aproximadamente 20%, e é produzida torta. Neste ponto, o óleo de dendê cru é composto por uma mistura de óleo, água e restos de fruto, e passa por uma peneira vibratória para remover o máximo de sólidos possível. Logo o óleo de dendê é clarificado e enviado a um purificador centrífugo para remover os sólidos remanescentes e é depois transferido a um secador a vácuo para retirar a umidade. Por último, o óleo é bombeado para tanques de armazenagem antes de ser enviado para a indústria.

Por outro lado, a torta é desfibrada produzindo fibras (54% do volume da torta) e nozes. As fibras são destinadas à caldeira e as nozes são trituradas para separar as cascas das amêndoas. As cascas são levadas para a caldeira e as amêndoas são trituradas e prensadas para obter o óleo e a torta de palmiste, os quais são coprodutos do processo.

Segundo Vianna (2006), em relação aos consumos de vapor e energia nessa etapa, a indústria de extração do óleo é autossuficiente energeticamente, já que 70% das fibras e cascas geradas no processo são queimadas na caldeira para geração de vapor (1101,13 MJ por tonelada), dos quais 54 MJ são usados no processo e o excedente (1047 kcal por tonelada) é destinado para acionar turbo-geradores para a produção de energia elétrica. O inventário desta etapa foi obtido de Vianna (2006) para a produção de 30 kg de óleo, sendo adaptado para 0,0403 kg que é a quantidade necessária para atender a unidade funcional do trabalho, conforme apresentado na Tabela 3.13.

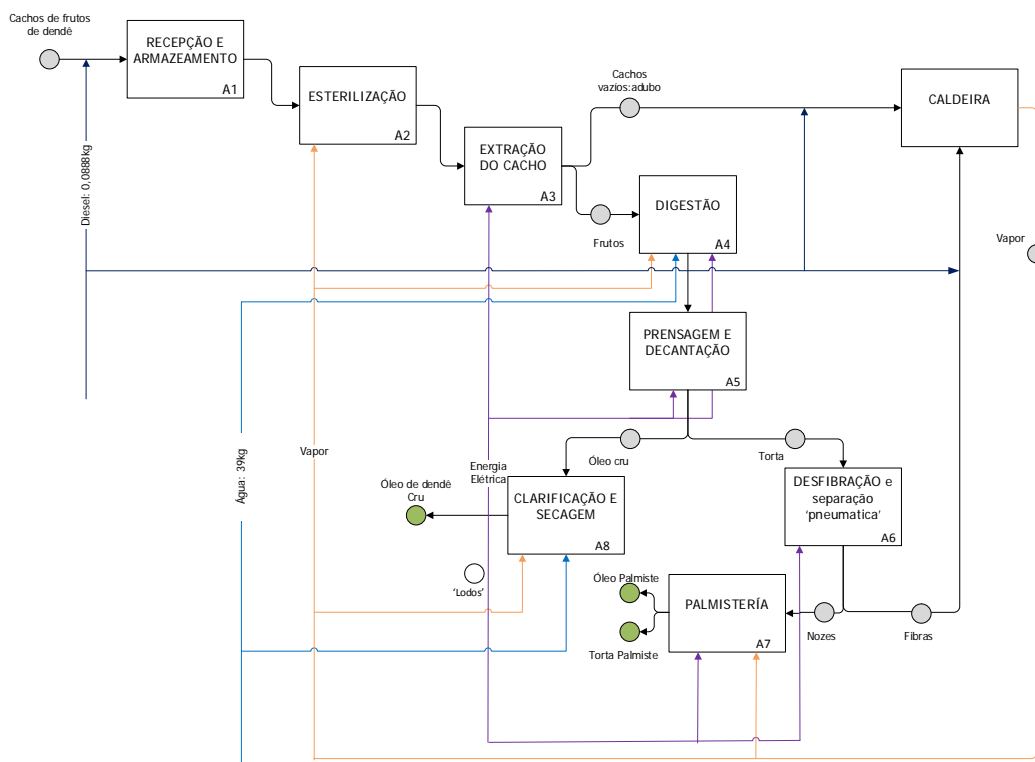


Figura 3. 10. Entradas subsistema extração óleo de dendê bruto.

Tabela 3. 13. Inventário da extração do óleo de dendê.

Entradas	Unidade	Produção 30 kg óleo dendê (Vianna, 2006)	Quantidade para produção de 1 MJ de energia (unidade funcional)
Cachos de frutos	kg	150	0,202
Água	kg	39,0	0,0524
Diesel	kg	0,0888	$1,19 \times 10^{-04}$
Saídas	Unidade	Produção 30 kg óleo dendê (Vianna, 2006)	Quantidade para produção 1 MJ de energia (unidade funcional)
Óleo de dendê	kg	30	$4,03 \times 10^{-02}$
Óleo de palmiste	kg	2,25	$3,02 \times 10^{-03}$
Torta de palmiste	kg	5,25	$7,05 \times 10^{-03}$
Energia	MJ	157	0,211
<i>Emissões atmosféricas</i>			
CO	kg	$4,88 \times 10^{-05}$	$6,56 \times 10^{-08}$
Material particulado	kg	$1,84 \times 10^{-04}$	$2,47 \times 10^{-07}$

Tabela 3.13 - continuação

SO _x	kg	1,48×10 ⁻⁰³	1,99×10 ⁻⁰⁶
CO ₂	kg	3,01×10 ⁻⁰¹	4,04×10 ⁻⁰⁴
NO ₂	kg	5,77×10 ⁻⁰⁴	7,75×10 ⁻⁰⁷
Hidrocarbonetos	kg	2,66×10 ⁻⁰⁵	3,57×10 ⁻⁰⁸
<i>Efluentes líquidos</i>		0,632	
DBO	kg	0,632	8,49×10 ⁻⁰⁴
DQO	kg	0,955	1,28×10 ⁻⁰³
Sólidos em suspensão	kg	0,434	5,83×10 ⁻⁰⁴
Sólidos totais	kg	1,78	2,39×10 ⁻⁰³
Sólidos sedimentares	kg	0,387	5,20×10 ⁻⁰⁴
Compostos de nitrogênio	kg	0,0749	1,01×10 ⁻⁰⁴
Matéria graxa	kg	0,173	2,32×10 ⁻⁰⁴

- **Transporte para a refinaria:** Após a extração, o óleo cru é transportado para a Companhia Refinadora da Amazônia localizada em Belém por via fluvial. Segundo Vianna (2006), 75% da quantidade do óleo é proveniente do porto e Acará e o 25% restante vem do porto de Moju. As distâncias rodoviárias e fluviais dos portos até a usina refinadora de óleo são mostradas na Tabela 3.14 e em seguida a Tabela 3.15 apresenta o inventário desta etapa.

Tabela 3. 14. Distâncias rodoviárias e fluviais dos portos até a usina refinadora.

Rota	Tipo de transporte	Distância (km)
Usina extração - porto Acará	Rodoviário	22
Usina extração - porto Moju	Rodoviário	32
Porto Acará - Porto de Belém	Fluvial	95
Porto Moju - Porto de Belém	Fluvial	80

Tabela 3. 15. Inventário do transporte do óleo de dendê para a usina de extração.

Entradas	Unidade	Transporte 30 kg óleo (Vianna, 2006)	Transporte de 1 MJ de energia (unidade funcional)
Diesel	kg	0,0452	$6,07 \times 10^{-05}$
Saídas	Unidade	Transporte 30 kg óleo (Vianna, 2006)	Transporte de 1 MJ de energia (unidade funcional)
<i>Emissões atmosféricas</i>			
CO ₂	kg	0,144	$1,93 \times 10^{-04}$
CO	kg	$7,29 \times 10^{-04}$	$9,79 \times 10^{-07}$
SO ₂	kg	$2,33 \times 10^{-04}$	$3,13 \times 10^{-07}$
NO _x	kg	$2,91 \times 10^{-03}$	$3,91 \times 10^{-06}$
N ₂ O	kg	$2,11 \times 10^{-06}$	$2,83 \times 10^{-09}$
Material particulado	kg	$3,78 \times 10^{-05}$	$5,08 \times 10^{-08}$
COVNM	kg	$3,11 \times 10^{-04}$	$4,18 \times 10^{-07}$
CH ₄	kg	$5,59 \times 10^{-05}$	$7,51 \times 10^{-08}$
CxHy	kg	$1,09 \times 10^{-04}$	$1,46 \times 10^{-07}$

- Refino do óleo:** Antes do processo de hidrotreatamento, o óleo vegetal deve cumprir com as especificações de qualidade exigidas (principalmente os níveis de acidez) para garantir o bom desempenho da unidade industrial. O refino do óleo pode ser feito mediante um processo químico ou físico. O refino químico remove os ácidos graxos livres e outras impurezas presentes no óleo mediante a adição de um reagente alcalino (comumente hidróxido de sódio), enquanto o refino físico os elimina através da destilação à vácuo com injeção de vapor d'água. Devido ao alto teor de ácidos graxos livres presentes no óleo de dendê, o refino físico torna-se mais viável e vantajoso, sendo mais comumente usado para essa matéria-prima. O método envolve três etapas: pré-tratamento, branqueamento e desacidificação-desodorização (Figura 3.11). No pré-tratamento, o óleo cru é aquecido e misturado com ácido fosfórico para remover os fosfolipídeos presentes. Na etapa de branqueamento, são adicionados adsorventes para eliminar substâncias diversas e por último, na etapa de desacidificação-desodorização, o óleo passa por um processo de destilação a vapor (superaquecido a $T = 240^{\circ}\text{C}$ e $P = 3\text{bar}$), no qual os ácidos graxos livres, e outros compostos de volatilidade similar, são destilados.

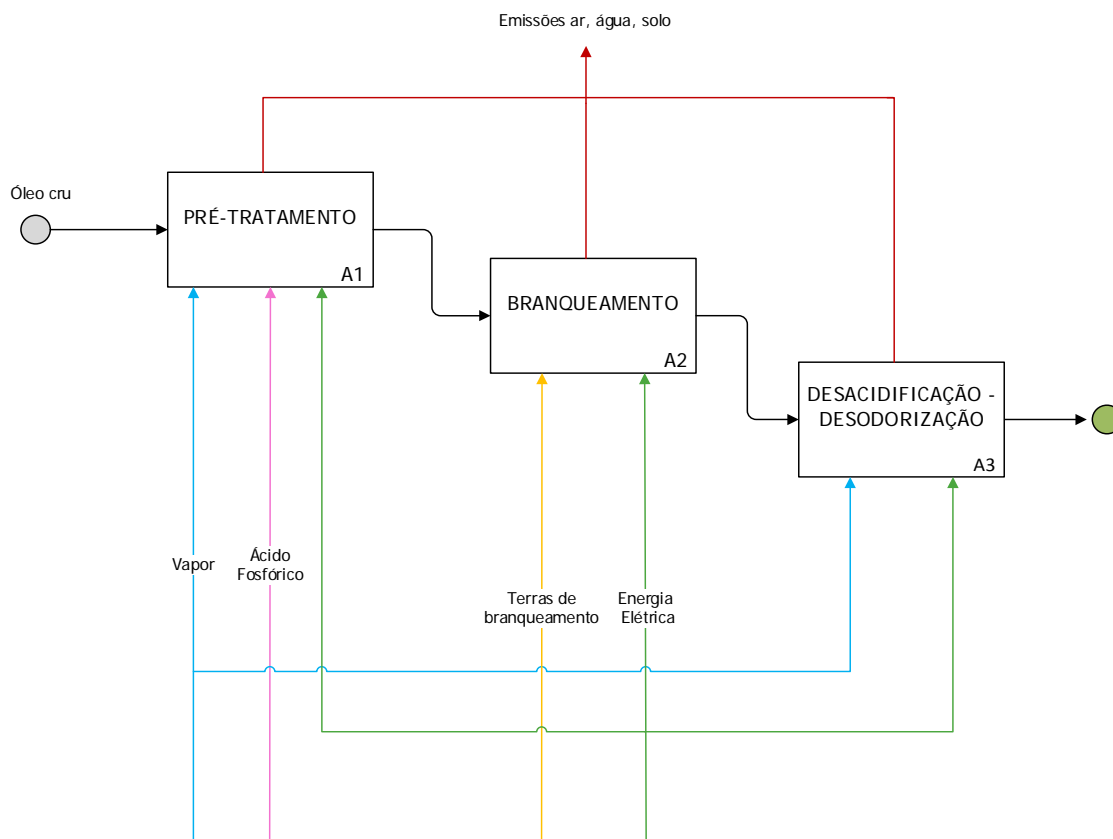


Figura 3. 11. Entradas subsistema refino óleo de dendê.

Conforme mencionado no item anterior, o óleo é refinado na Companhia Refinadora da Amazônia, que tem uma capacidade para processar 320 toneladas de óleo bruto por dia. O inventário desta etapa foi obtido de Yañez (2008), e é apresentado a seguir na Tabela 3.16.

Tabela 3. 16. Inventário do refino do óleo de dendê.

Entradas	Unidade	Refino 1 kg óleo dendê (Yañez, 2008)	Quantidade para produção de 1 MJ de energia (unidade funcional)
Óleo de dendê	kg	1,06	0,0403
Terras adsorventes	kg	$7,45 \times 10^{-03}$	$2,82 \times 10^{-04}$
Ácido fosfórico	kg	$5,32 \times 10^{-04}$	$2,02 \times 10^{-05}$
Diesel	kg	$4,63 \times 10^{-03}$	$1,76 \times 10^{-04}$
Vapor	kg	0,688	0,0261
Eletricidade	kWh	0,0249	$9,43 \times 10^{-04}$

Tabela 3.16 – continuação

Saídas	Unidade	Refino 1 kg óleo dendê (Yáñez, 2008)	Quantidade para produção 1 MJ de energia (unidade funcional)
Óleo de dendê refinado	kg	1	0,0379
<i>Emissões atmosféricas</i>			
CO	kg	$1,73 \times 10^{-06}$	$6,56 \times 10^{-08}$
Material particulado	kg	$6,53 \times 10^{-06}$	$2,47 \times 10^{-07}$
SO _x	kg	$5,25 \times 10^{-05}$	$1,99 \times 10^{-06}$
CO ₂	kg	0,0107	$4,05 \times 10^{-04}$
NO _x	kg	$2,05 \times 10^{-05}$	$7,77 \times 10^{-07}$

- **Transporte para a refinaria Landulpho Alves, Bahia:** Assumiu-se nesta etapa que o transporte do óleo refinado para a refinaria é feito por navios de capacidade entre 70.000 e 100.000 toneladas, considerando-se uma distância marítima entre o porto de Belém, Pará, e o porto Aratu, Bahia, de 2832 km. Adicionalmente, o óleo é transportado por caminhões de 28 toneladas do porto até a refinaria, cuja distância média é de 25,9 km, com um consumo de 0,043 kg de diesel por tonelada-quilômetro (tkm) transportada. As entradas referentes à etapa do transporte foram obtidas de Marzullo (2007), que utilizou a base de dados IDEMAT 2001 do SimaPro® para estimar os impactos ambientais do transporte marítimo do petróleo importado no Brasil. Considerando que o valor médio para a massa específica do petróleo é de $920 \text{ kg/m}^3 - 870 \text{ kg/m}^3$ e que a massa específica do óleo de dendê refinado está em torno de $916,2 \text{ kg/m}^3$, os dados apresentados por Marzullo (2007) foram adotados para o estudo de caso como segue:

Tabela 3. 17. Inventário do transporte do óleo de dendê refinado para a refinaria Landulpho Alves, Bahia.

Entradas	Unidade	Transporte 1 tkm de petróleo importado (Marzullo, 2007)	Transporte de 1 MJ de energia (unidade funcional)
Óleo combustível	kg	$7,35 \times 10^{-03}$	$7,89 \times 10^{-04}$
Diesel	kg	$6,30 \times 10^{-04}$	$1,52 \times 10^{-04}$
Saídas	Unidade	Transporte 1 tkm de petróleo importado (Marzullo, 2007)	Transporte de 1 MJ de energia (unidade funcional)
<i>Emissões atmosféricas</i>			
CO ₂	kg	0,0232	$2,76 \times 10^{-03}$
CO	kg	$7,00 \times 10^{-05}$	$8,65 \times 10^{-06}$
SO ₂	kg	$3,70 \times 10^{-04}$	$4,01 \times 10^{-05}$
NO _x	kg	$4,40 \times 10^{-04}$	$5,04 \times 10^{-05}$
N ₂ O	kg	-	$6,78 \times 10^{-09}$
Material particulado	kg	-	$1,46 \times 10^{-07}$
CH ₄	kg	-	$1,50 \times 10^{-08}$
C _x H _y	kg	$4,00 \times 10^{-05}$	$4,03 \times 10^{-05}$

- **Hidrotratamento:** Para a etapa do hidroprocessamento do óleo de dendê foram obtidos dados reais a partir um experimento piloto realizado por uma empresa petrolífera da Colômbia¹. O diagrama do processo junto com os principais fluxos são apresentados na Figura 3.12. A primeira fase do experimento consistiu em uma análise da matéria-prima onde foi determinado o perfil de ácidos graxos bem como a composição de glicerídeos. Ambos os óleos foram compostos principalmente por triglicerídeos e o conteúdo de matéria insaponificável foi bastante baixo, atendendo às especificações de qualidade.

¹ Comunicação pessoal do engenheiro Edgar Yañez, em novembro do ano 2016, recebida por correio eletrônico.

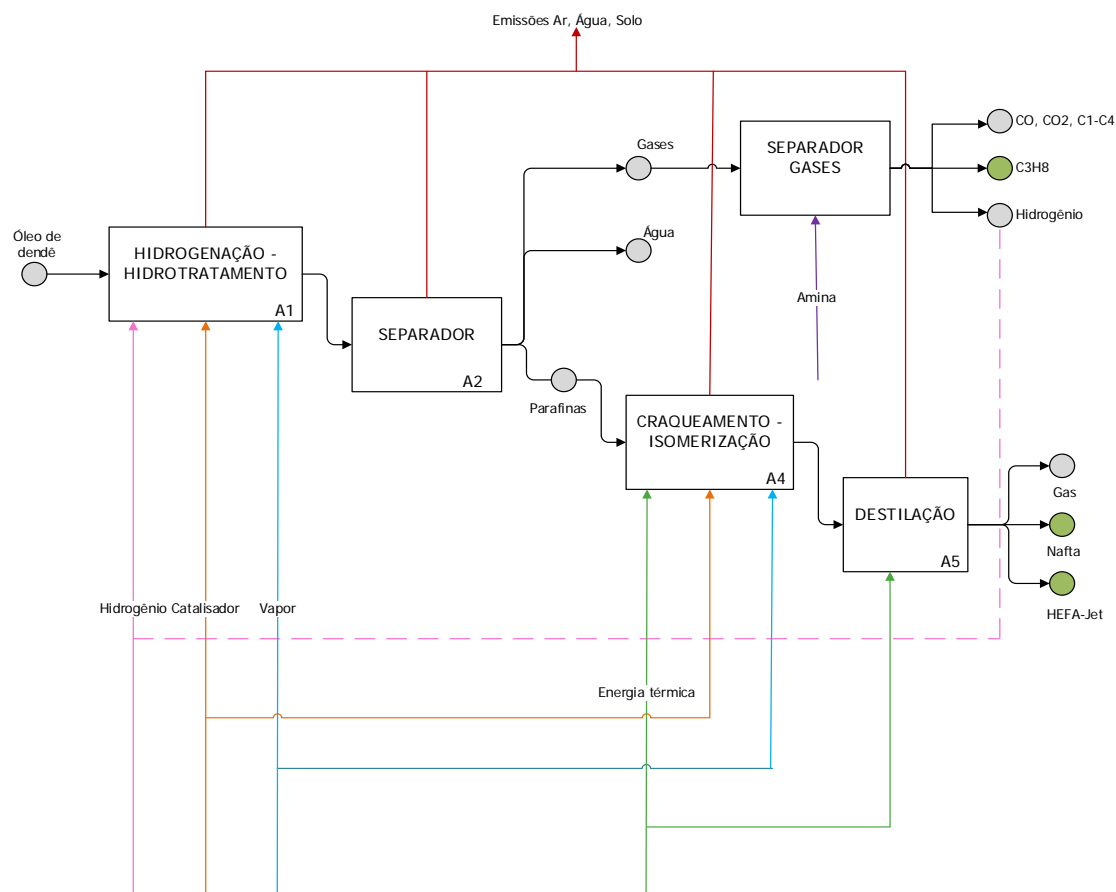


Figura 3. 12. Entradas subsistema hidrotreatamento do óleo de dendê.

A segunda fase compreendeu as reações de hidrogenação e hidrotreatamento. Duas corridas foram realizadas num reator de leito fixo preenchido com 100 cm^3 do catalisador “HDT-HRB-618”. O catalisador foi ativado previamente por sulfatação in situ a 350°C e 50 bar durante 12 horas, adicionando 2% em massa de Dissulfureto de Dimetil (DMDS). Após a sulfatação, as condições de operação foram ajustadas para $T=300^\circ\text{C}$, $P= 50\text{bar}$ e $\text{H}_2/\text{óleo}= 700\text{NL/L}$. Depois da reação, os produtos foram separados mediante separadores ‘*hot high pressure*’. A fase gasosa foi enviada para uma planta de tratamento de gases com aminas, onde uma parte do hidrogênio foi recuperada e enviada de volta para o reator. A fase líquida foi separada por decantação em água e parafinas, e as últimas são enviadas para o segundo reator de hidrocrackeamento e isomerização, que é a terceira etapa do teste.

Similarmente, a corrida foi realizada num reator de leito fixo preenchido com catalisador “HDI-HDB-649”. A fim de otimizar a conversão de parafinas para iso-

parafinas nessa última fase, a temperatura foi ajustada para $T = 345^{\circ}\text{C}$. O nível de isomerização nos efluentes de saída foi de 80% e o rendimento de hidrocarbonetos no corte querosene (C9-C14) foi de 62,3%. Os rendimentos globais e o inventário do processo são apresentados na Figura 3.13 e na Tabela 3.18, respectivamente:

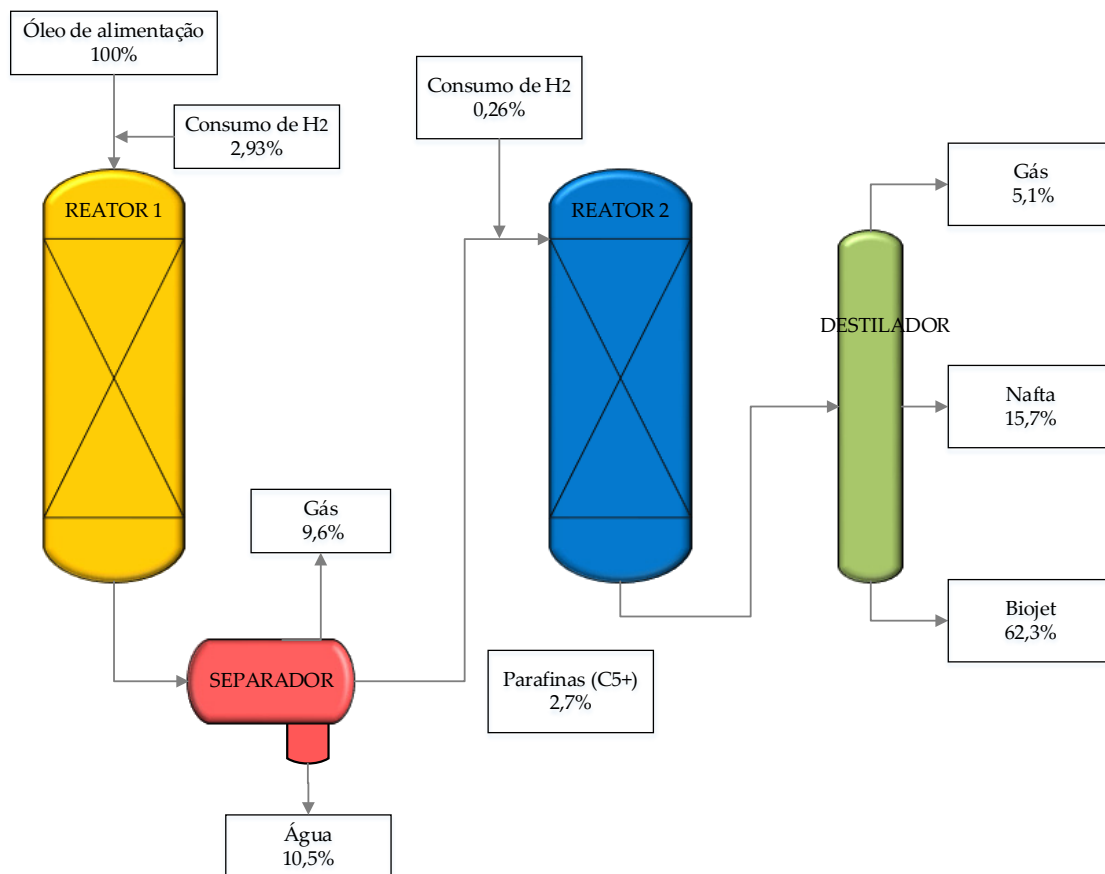


Figura 3. 13. Rendimentos médios globais da produção de *biojet*.

Tabela 3. 18. Inventário da produção do *biojet*.

Entradas	Unidade	Produção 7498 kg <i>biojet</i> (Dados experimentais)	Quantidade para produção 1 MJ de energia (unidade funcional)
Óleo de dendê refinado		$1,21 \times 10^{-04}$	0,0379
Hidrogênio	kg	376	$1,17 \times 10^{-03}$
Amina	kg	14200	0,0445
Vapor		250	$7,80 \times 10^{-04}$
Eletricidade	kWh	105	$3,28 \times 10^{-03}$
Catalisador (NiMo)	cm ³	100	$3,12 \times 10^{-04}$
Água de refrigeração	m ³	20,0	$6,24 \times 10^{-05}$
Gás natural	Gcal	1,7	$5,31 \times 10^{-06}$
Saídas	Unidade	Produção 7498 kg <i>biojet</i> (Dados experimentais)	Quantidade para produção 1 MJ de energia (unidade funcional)
Biojet	kg	7498	0,0234
Nafta	kg	2240	$6,99 \times 10^{-03}$
Propano	kg	221,6	$6,92 \times 10^{-04}$
Amina	kg	14947	$4,66 \times 10^{-02}$
Água residual	kg	1220	$3,81 \times 10^{-03}$
Gases	kg	831	$2,59 \times 10^{-03}$
<i>Emissões atmosféricas</i>			
H ₂	kg	83,1	$2,59 \times 10^{-04}$
CO ₂	kg	377	$1,18 \times 10^{-03}$
H ₂ S	kg	1,108	$3,46 \times 10^{-06}$
CH ₄	kg	5,54	$1,73 \times 10^{-05}$
CxHy	kg	303,6	$9,47 \times 10^{-04}$

- **Transporte para o Aeroporto Internacional de Salvador:** para esta etapa foi considerado que o óleo é transportado por caminhões com capacidade de 28 toneladas numa distância média da refinaria até o aeroporto de 61,3 km. As entradas referentes são apresentadas na Tabela 3.19.

Tabela 3. 19. Inventário do transporte do *biojet*.

Entradas	Unidade	Transporte de 1 MJ de energia (unidade funcional)
Diesel	kg	$1,23 \times 10^{-04}$
Saídas	Unidade	
<i>Emissões atmosféricas</i>		
CO ₂	kg	$3,94 \times 10^{-04}$
CO	kg	$1,67 \times 10^{-06}$
CH ₄	kg	$2,20 \times 10^{-08}$
NO _x	kg	$4,64 \times 10^{-06}$
N ₂ O	kg	$9,91 \times 10^{-09}$
CxHy	kg	$4,43 \times 10^{-07}$
Material particulado	kg	$2,13 \times 10^{-07}$
SO ₂	kg	$6,25 \times 10^{-07}$

- **Combustão na turbina da aeronave:** Em concordância com a Agência de Proteção Ambiental da Califórnia, Estados Unidos e a ao Programa Padrão de Combustível Renovável, o CO₂ liberado nessa fase é considerado neutro e não é contabilizado no ciclo de vida, uma vez que a biomassa sequestra CO₂ durante seu crescimento e, portanto, as emissões associadas não incrementam as suas concentrações na atmosfera (CEPA, 2009; USEPA, 2007).

3.2.3.2.Sistema cenário 2: Biojet de óleo de Soja

O segundo cenário considerado neste estudo é a produção de *biojet* a partir do óleo de soja. Para este caso, o cultivo do grão de soja foi assumido que ocorre na região oeste do estado de Paraná, compreendida pelos municípios de Maripá, Toledo, Cascavel, Assis Chateaubriand, Tupãssi, Cafelândia, Nova Aurora, Iracema do Oeste e Jesuítas, dos quais se obteve uma média da sua produção. Após a colheita do grão, ele é levado para a usina de extração localizada em Ponta Grossa, onde o óleo é produzido e refinado. Para o cálculo do transporte foi adotada uma distância média entre os municípios estudados até a unidade de beneficiamento. O óleo refinado é levado para a Refinaria Presidente Getúlio Vargas, localizada a 220 km de distância, para a sua conversão em biocombustível. O biocombustível é por fim levado via rodoviária para o Aeroporto Internacional Alfonso Pena em Curitiba.

- **Etapa agrícola da soja:** As informações referentes ao inventário do ciclo de vida desta etapa foram tomadas de Matsuura et al. (2017) e apresentadas na Tabela 3.20, para uma produtividade de 3300 kg/ha. A Figura 3.14 mostra as principais entradas do processo. Antes da semeadura, a semente de soja é submetida ao tratamento com fungicidas e inoculante, e geralmente é semeada entre meados de outubro e dezembro. O sistema de plantio direto requer um preparo mínimo do solo, sendo apenas feita a aplicação de cal para redução da sua acidez, seguida da aplicação de agrotóxicos e fertilizantes. Após o plantio da soja, a seguinte etapa consiste no trato agrícola, mediante a utilização de herbicidas, fungicidas, pesticidas e fertilizantes, para evitar doenças ou pragas e melhorar a eficiência durante a colheita, que é a última etapa da produção agrícola. Conforme reportado por Nemecek e Kagi (2007), a absorção de carbono e a absorção cultivo é de 0,43 kg C por kg de grão.

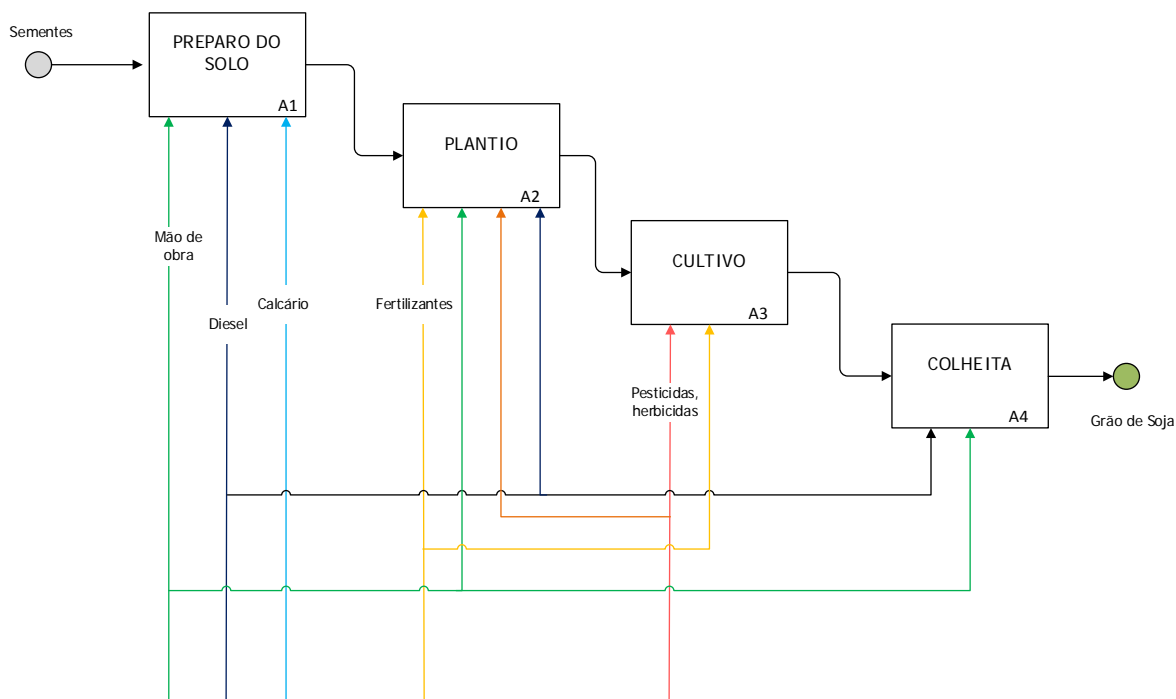


Figura 3. 14. Entradas do subsistema do cultivo dos grãos de soja.

Tabela 3. 20. Inventário da produção dos grãos de soja.

Entradas	Unidade	Produção 1kg de grãos (Matsuura et al., 2017)	Quantidade para produção 1 MJ de energia (unidade funcional)
Sementes	kg	0,0152	$3,86 \times 10^{-03}$
CO ₂	kg	1,57	1,57
Lima	kg	0,117E-01	0,0298
Nitrogênio	kg	$1,52 \times 10^{-03}$	$3,85 \times 10^{-04}$
Fosfato	kg	0,0152	$3,86 \times 10^{-03}$
Potássio	kg	0,0409	0,0104
Pesticida	kg	$6,24 \times 10^{-04}$	$1,58 \times 10^{-04}$
Herbicida	kg	$6,80 \times 10^{-04}$	$1,73 \times 10^{-04}$
Cobalto	kg	$6,06 \times 10^{-07}$	$1,54 \times 10^{-07}$
Molibdênio	kg	$6,06 \times 10^{-06}$	$1,54 \times 10^{-06}$
2,4-dichlorophenol	kg	$2,44 \times 10^{-04}$	$6,20 \times 10^{-05}$
Água	kg	0,424	0,108
Transporte (trator)	tkm	$1,44 \times 10^{-04}$	$3,65 \times 10^{-05}$
Aplicação de produto por pulverizador de campo	ha	$2,12 \times 10^{-03}$	$5,39 \times 10^{-04}$
Fertilização por trator	ha	$6,06 \times 10^{-04}$	$1,54 \times 10^{-04}$
Colheita	ha	$3,03 \times 10^{-04}$	$7,70 \times 10^{-05}$

Tabela 3.20 – continuação

Plantadeira plantio direto	ha	$3,03 \times 10^{-04}$	$7,70 \times 10^{-05}$
Secagem	l	0,0412	0,0105
Saídas	Unidade	Produção 1kg de grãos (Matsuura et al., 2017)	Quantidade para produção 1 MJ de energia (unidade funcional)
Grãos de Soja	kg	1	0,254
<i>Emissões atmosféricas</i>			
CO ₂	kg	0,0559	0,0142
NO _x	kg	$1,40 \times 10^{-04}$	$3,55 \times 10^{-05}$
Amônia	kg	$1,71 \times 10^{-04}$	$4,35 \times 10^{-05}$
N ₂ O	kg	$6,65 \times 10^{-04}$	$1,69 \times 10^{-04}$
Água	m ³	$2,58 \times 10^{-04}$	$6,56 \times 10^{-05}$
<i>Efluentes líquidos</i>			
Nitrato (NO ₃)	kg	0,0470	0,0119
Fósforo	kg	$8,57 \times 10^{-05}$	$2,18 \times 10^{-05}$
Cádmio	kg	$3,19 \times 10^{-11}$	$8,10 \times 10^{-12}$
Cromo, ion	kg	$4,51 \times 10^{-10}$	$1,15 \times 10^{-10}$
Cobalto	kg	$6,06 \times 10^{-11}$	$1,54 \times 10^{-11}$
Molibdênio	kg	$1,61 \times 10^{-10}$	$4,09 \times 10^{-11}$
Chumbo	kg	$3,66 \times 10^{-10}$	$9,30 \times 10^{-11}$
<i>Efluentes para o solo</i>			
Cádmio	kg	$3,19 \times 10^{-07}$	$8,10 \times 10^{-08}$
Cromo	kg	$4,51 \times 10^{-06}$	$1,15 \times 10^{-06}$
Chumbo	kg	$3,66 \times 10^{-06}$	$9,30 \times 10^{-07}$
Carbendazim	kg	$7,58 \times 10^{-05}$	$1,93 \times 10^{-05}$
Teflubenzuron	kg	$3,64 \times 10^{-06}$	$9,25 \times 10^{-07}$
Azoxystrobin	kg	$1,82 \times 10^{-05}$	$4,62 \times 10^{-06}$
Thiamethoxam	kg	$1,28 \times 10^{-05}$	$3,25 \times 10^{-06}$
Lambda-cyhalothrin	kg	$9,64 \times 10^{-06}$	$2,45 \times 10^{-06}$
Acephate	kg	$1,82 \times 10^{-04}$	$4,62 \times 10^{-05}$
Cyproconazole	kg	$1,45 \times 10^{-05}$	$3,68 \times 10^{-06}$
Picoxystrobin	kg	$1,82 \times 10^{-05}$	$4,62 \times 10^{-06}$
Óleo mineral	kg	$2,59 \times 10^{-04}$	$6,58 \times 10^{-05}$
Fipronil	kg	$7,58 \times 10^{-06}$	$1,93 \times 10^{-06}$
Pyraclostrobin (prop)	kg	$7,58 \times 10^{-07}$	$1,93 \times 10^{-07}$
Thiophanat-methyl	kg	$6,82 \times 10^{-06}$	$1,73 \times 10^{-06}$
Glyphosate	kg	$6,80 \times 10^{-04}$	$1,73 \times 10^{-04}$
Pesticides, unspecified	kg	$1,48 \times 10^{-05}$	$3,76 \times 10^{-06}$
Cobalto	kg	$6,06 \times 10^{-07}$	$1,54 \times 10^{-07}$
Molibdênio	kg	$1,61 \times 10^{-06}$	$4,09 \times 10^{-07}$
2,4 D	kg	$2,44 \times 10^{-04}$	$6,20 \times 10^{-05}$

- **Transporte dos grãos:** Para o transporte dos grãos desde o plantio até a usina extratora e de refino foi calculada uma distância média de 490 km entre os municípios da área de estudo e a unidade localizada em Ponta Grossa. Foi considerado o uso de caminhões com capacidade de 28 toneladas, com consumo de 0,043 kg de diesel por cada tkm percorrido, e o retorno do mesmo vazio à origem.

Tabela 3. 21. Inventário do transporte dos grãos.

Entradas	Unidade	Transporte de 1 MJ de energia (unidade funcional)
Diesel	kg	0,0116
Saídas	Unidade	
<i>Emissões atmosféricas</i>		
CO ₂	kg	$1,59 \times 10^{-03}$
CO	kg	$6,72 \times 10^{-06}$
CH ₄	kg	$8,86 \times 10^{-08}$
NO _x	kg	$1,87 \times 10^{-05}$
N ₂ O	kg	$4,00 \times 10^{-08}$
CxHy	kg	$1,79 \times 10^{-06}$
Material particulado	kg	$8,61 \times 10^{-07}$
SO ₂	kg	$2,52 \times 10^{-06}$

- **Extração do Óleo:** Após a chegada dos grãos na usina de extração, o primeiro passo consiste numa pré-limpeza para retirar as impurezas presentes na matéria prima (Figura 3.15). Os grãos limpos são logo descascados em batedoras ou facas giratórias separando-se a polpa das cascas. As cascas são normalmente adicionadas ao farelo na composição de ração animal, e a polpa é aquecida para 55-60°C e depois triturada, laminada e cozida (105°C) para facilitar a extração do óleo. A extração do óleo pode ser feita mediante um processo misto, onde o óleo é prensado e depois submetido à ação do solvente, ou pode ser feita diretamente mediante o uso de solvente (hexano). Dois produtos são extraídos nesse processo, o farelo de soja e uma solução de óleo e solvente conhecida como ‘miscela’. O farelo obtido é submetido à moagem e é depois armazenado e a miscela é filtrada e destilada, onde o óleo é separado do solvente (EMBRAPA, 2001).

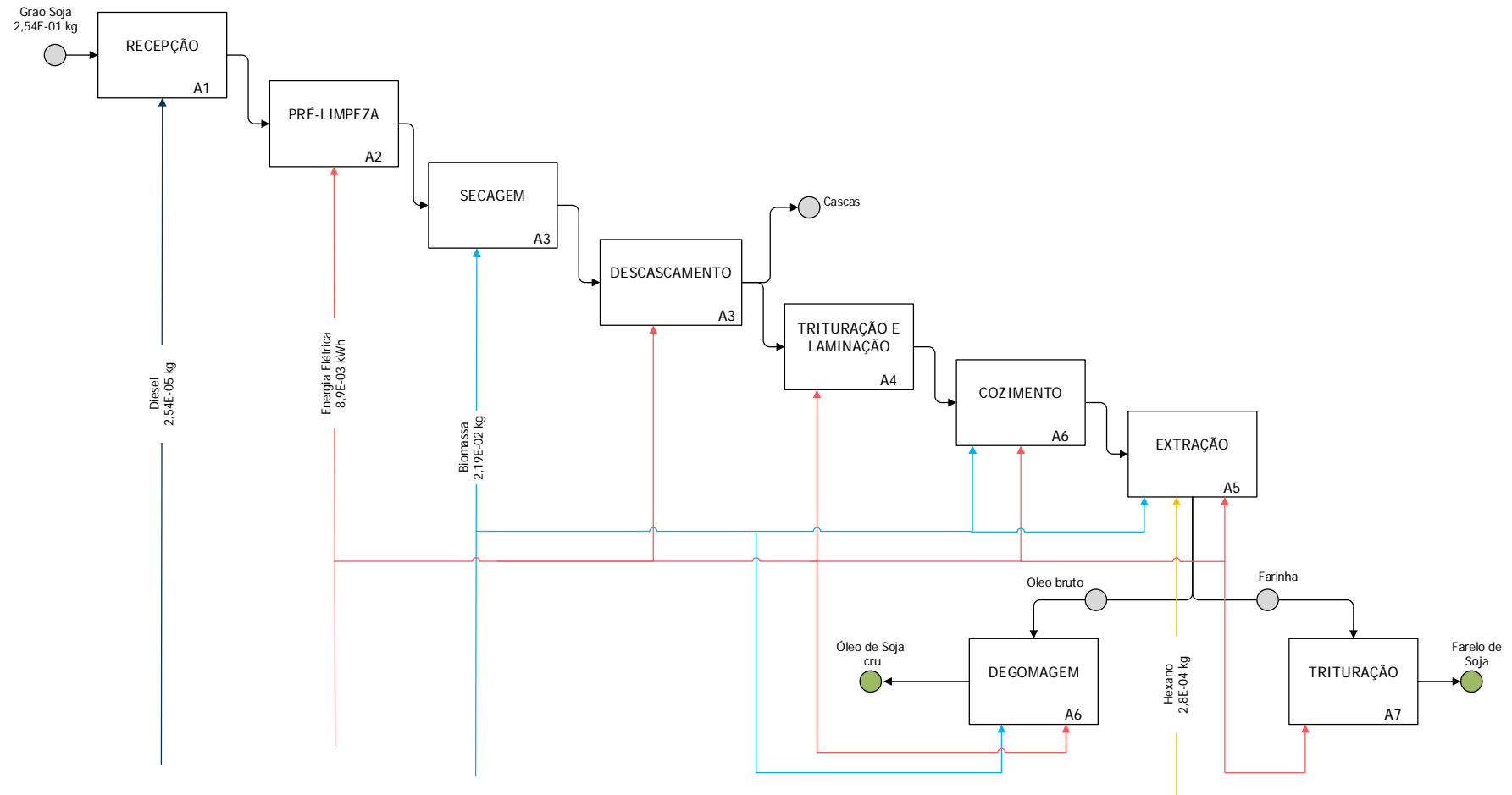


Figura 3. 15. Entradas do subsistema da extração óleo de soja.

O inventário referente a esta etapa foi adotado de Garcilasso (2014), quem usou dados primários de uma unidade extratora de Ponta Grossa, Paraná. A capacidade instalada é de 3.500 toneladas de óleo por dia, tendo uma produção real de 3.000 toneladas por dia. O rendimento da extração do óleo é de aproximadamente 19,2%. A tecnologia de extração da unidade é química com a utilização de hexano.

Tabela 3. 22. Inventário da extração do óleo de soja.

Entradas	Unidade	Produção 192 kg de óleo de soja (Garcilasso, 2014)	Quantidade para produção 1 MJ de energia (unidade funcional)
Soja (grãos)	kg	100	0,254
Hexano	kg	1,10	$2,80 \times 10^{-04}$
Água	kg	450	0,114
Biomassa (produção vapor)	kg	86,0	0,0219
Diesel	kg	0,1	$2,54 \times 10^{-05}$
Eletricidade	kWh	35,0	$8,90 \times 10^{-03}$
Saídas	Unidade	Produção 192 kg de óleo de soja (Garcilasso, 2014)	Quantidade para produção 1 MJ de energia (unidade funcional)
Óleo de soja	kg	192	0,0488
Farelo de soja	kg	800	0,203
<i>Emissões atmosféricas</i>			
Material particulado	kg	0,284	$7,22 \times 10^{-05}$
NO _x	kg	0,710	$2,80 \times 10^{-04}$
Hexano	kg	1,1	$1,8 \times 10^{-04}$
<i>Efluentes líquidos</i>			
Efluente líquido	kg	300	0,0763

- **Refino do Óleo:** Antes do processo de hidrotreamento, o óleo vegetal deve cumprir com as especificações de qualidade exigidas (principalmente os níveis de acidez) para garantir o bom desempenho da unidade industrial. As principais etapas do refino do óleo de soja são mostradas na Figura 3.16. No processo de degomagem, ácido fosfórico é adicionado ao óleo à temperatura de 60-65°C para remover os fosfatídeos presentes nele mediante filtração ou centrifugação. A

seguinte etapa é de neutralização, onde o hidróxido de sódio é adicionado ao óleo, degomado e aquecido para 90°C, para remover os ácidos graxos livres e outras impurezas por centrifugação. O óleo neutralizado é seguidamente lavado e levado para um processo de branqueamento, e por último ele é desodorizado. Os dados do inventário desta etapa foram tomados de Cavalett (2008).

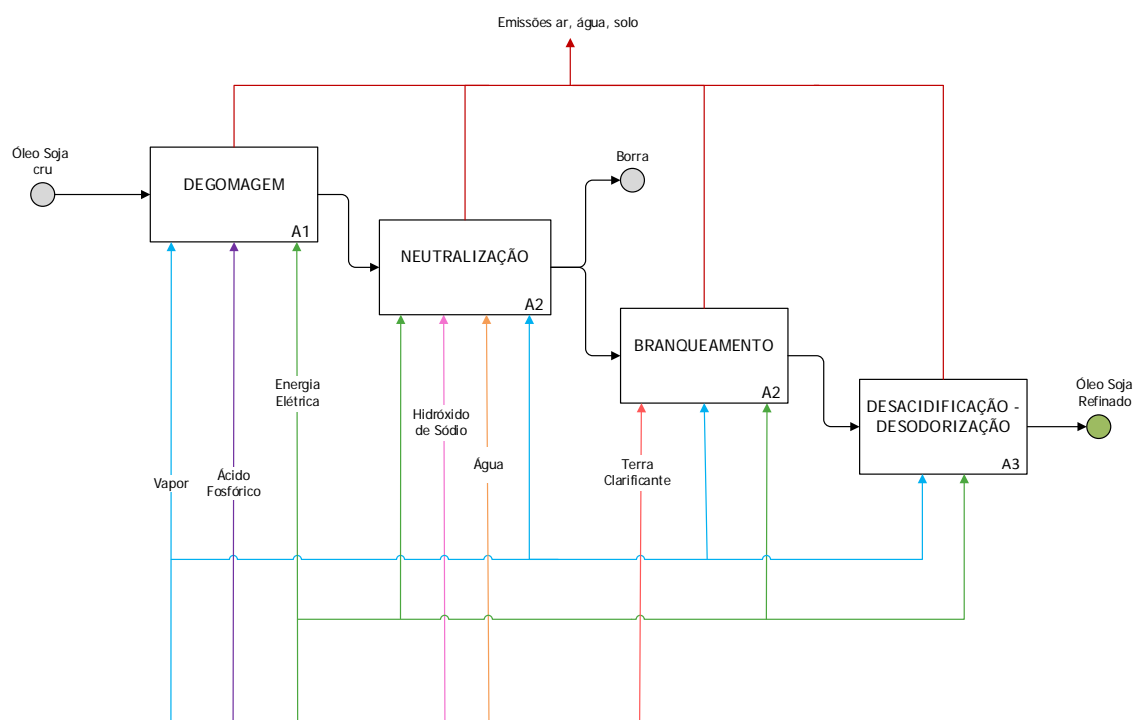


Figura 3. 16. Entradas do subsistema refino do óleo de soja.

Tabela 3. 23. Inventário do refino do óleo de soja.

Entradas	Unidade	Produção 1 kg de óleo de soja refinado (Cavalett, 2008)	Quantidade para produção 1 MJ de energia (unidade funcional)
Óleo de soja	kg	1,03	0,0488
Diesel	kg	$3,60 \times 10^{-03}$	$1,71 \times 10^{-04}$
Ácido fosfórico	kg	$5,00 \times 10^{-04}$	$2,43 \times 10^{-05}$
Hidróxido de Sódio	kg	$4,48 \times 10^{-03}$	$2,17 \times 10^{-04}$
Terras clarificantes	kg	$3,50 \times 10^{-03}$	$1,69 \times 10^{-04}$
Eletricidade	kJ	0,0126	2,19
Água	kg	0,84	0,0396
Ácido cítrico	kg	$6,14 \times 10^{-06}$	$2,91 \times 10^{-07}$

Tabela 3.23 – continuação

Saídas	Unidade	Produção 1 kg de óleo de soja refinado (Cavalett, 2008)	Quantidade para produção 1 MJ de energia (unidade funcional)
Óleo de soja refinado	kg	1	0,0474
<i>Emissões atmosféricas</i>			
CO ₂	kg	0,0127	$6,00 \times 10^{-04}$
NO _x	kg	$3,27 \times 10^{-06}$	$1,55 \times 10^{-07}$
SO ₂	kg	$1,06 \times 10^{-06}$	$5,04 \times 10^{-08}$
CO	kg	$2,79 \times 10^{-06}$	$1,32 \times 10^{-07}$
VOC	kg	$1,10 \times 10^{-07}$	$5,21 \times 10^{-09}$
CH ₄	kg	$1,36 \times 10^{-08}$	$6,44 \times 10^{-10}$
Material particulado	kg	$5,40 \times 10^{-07}$	$2,56 \times 10^{-08}$
H ₂ O	kg	$2,07 \times 10^{-03}$	$9,80 \times 10^{-05}$
<i>Efluentes líquidos</i>			
Efluentes	kg	0,835	0,0396
Produtos químicos	kg	$4,64 \times 10^{-04}$	$2,20 \times 10^{-05}$

- **Transporte do óleo de soja refinado até a refinaria de petróleo:** Assumiu-se nesta etapa que o transporte do óleo refinado para a refinaria é feito por caminhões de capacidade entre 16 a 32 toneladas, considerando-se uma distância média entre a unidade extratora e a refinaria Presidente Getúlio Vargas de 111 km, e o retorno do caminhão vazio até a origem.

Tabela 3. 24. Inventário do transporte do óleo de soja.

Entradas	Unidade	Transporte de 1 MJ de energia (unidade funcional)
Diesel	kg	$4,45 \times 10^{-04}$
Saídas	Unidade	Transporte de 1 MJ de energia (unidade funcional)
<i>Emissões atmosféricas</i>		
CO ₂	kg	$6,10 \times 10^{-05}$
CO	kg	$2,58 \times 10^{-07}$
CH ₄	kg	$3,40 \times 10^{-09}$

Tabela 3.24 – continuação

NO _x	kg	$7,19 \times 10^{-07}$
N ₂ O	kg	$1,54 \times 10^{-09}$
CxHy	kg	$6,86 \times 10^{-08}$
Material particulado	kg	$3,31 \times 10^{-08}$
SO ₂	kg	$9,69 \times 10^{-08}$

- Hidrotratamento do óleo de soja:** Como mencionado anteriormente, os dados desta fase foram adotados de Pearlson (2011), quem realizou uma simulação do processo do hidrotratamento do óleo de soja com auxílio do software Aspen Plus®. O desenho do processo é bastante similar ao do cenário do dendê, consistindo em dois reatores, um para cada reação (hidrogenação/hidrotratamento e isomerização/craqueamento), um separador, uma planta de recuperação de gases e de produção de hidrogênio e de vapor. Os produtos da primeira reação incluíram água, CO₂, CH₃ e alcanos de cadeias de carbono com comprimentos de C9-C20. Já no segundo reator, os principais produtos foram *biojet*, diesel, nafta e gases mais leves. O rendimento da produção do *biojet* esteve na ordem de 49,4%, como pode se observar no inventário a seguir.

Tabela 3. 25. Inventário da produção do *biojet*.

Entradas	Unidade	Produção 22,4 kg <i>biojet</i> (Pearlson, 2011)	Quantidade para produção 1 MJ de energia (unidade funcional)
Óleo de soja refinado	kg	100	0,104
Hidrogênio	kg	4,00	$4,18 \times 10^{-03}$
Vapor	kg	0,34	$3,55 \times 10^{-04}$
Gás natural	kg	0,0771	$8,05 \times 10^{-05}$
Água de refrigeração	kg	3,650	$3,82 \times 10^{-03}$
Eletricidade	kWh	0,0200	$2,09 \times 10^{-05}$
Saídas	Unidade	Produção 22,4 kg <i>biojet</i> (Pearlson, 2011)	Quantidade para produção 1 MJ de energia (unidade funcional)
<i>Biojet</i>	kg	49,4	0,0234
Nafta	kg	7,00	$3,31 \times 10^{-03}$
Propano	kg	4,2	$2,00 \times 10^{-03}$
Diesel	kg	23,3	$1,10 \times 10^{-02}$

Tabela 3.25 - continuação

<i>Emissões atmosféricas</i>			
CO ₂	kg	5,610	114
<i>Efluentes líquidos</i>			
Água residual	kg	8,7	0,02

- **Transporte do *biojet* até o aeroporto:** Por fim, o *biojet* é transportado via rodoviária desde a refinaria até o Aeroporto Internacional Alfonso Pena em Curitiba, considerando uma distância média de 30 km. Em concordância com o proposto no anterior cenário, as emissões atribuídas à fase de combustão não serão contabilizadas no ciclo de vida, uma vez que a biomassa sequestra CO₂ durante seu crescimento e, portanto, é considerado neutro.

Tabela 3. 26. Inventário do transporte do *biojet*.

Entradas	Unidade	Transporte de 1 MJ de energia (unidade funcional)
Diesel	kg	$3,02 \times 10^{-05}$
Saídas	Unidade	
<i>Emissões atmosféricas</i>		
CO ₂	kg	$4,14 \times 10^{-06}$
CO	kg	$1,75 \times 10^{-08}$
CH ₄	kg	$2,31 \times 10^{-10}$
NO _x	kg	$4,88 \times 10^{-08}$
N ₂ O	kg	$1,04 \times 10^{-10}$
CxHy	kg	$4,66 \times 10^{-09}$
Material particulado	kg	$2,25 \times 10^{-09}$
SO ₂	kg	$6,58 \times 10^{-09}$

3.3. INDICADOR DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Para a realização do cálculo de eficiência energética de ambos biocombustíveis, será empregado o método de avaliação Demanda de Energia Acumulada (*Cummulative Energy Demand* – CED), o qual leva em consideração os requerimentos totais de energia de entrada/saída durante o ciclo de vida do sistema produto. Assim, e com base nos consumos de energia apresentados nos inventários dos itens 3.2.3.1 e 3.2.3.2, será determinado o indicador de relação de energia fóssil (FER) o qual é definido pela razão entre a energia final do produto em relação à energia fóssil requerida para produzir o produto (equação 3.1). Como dito no item 3.2.2.1, foi adotado um poder calorífico de 42,8 MJ/kg.

$$FER_{dendê} = \frac{\text{Energia do biocombustível } (E_b)}{\text{Energia fóssil de entrada } (E_f)} \quad (3.1)$$

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS

No presente capítulo são apresentados os resultados da avaliação do ciclo de vida dos dois cenários estudados. Primeiramente são mostrados os inventários consolidados de cada cenário e em seguida, os resultados mediante gráficos e tabelas, assim como a sua respectiva discussão.

Com o intuito de conhecer as possíveis melhorias ambientais dos cenários propostos, são incluídos os impactos associados à produção e uso do Jet convencional, para fins comparativos. As informações referentes a esse combustível fóssil foram tomadas da base de dados do Simapro®. De maneira contrária aos biocombustíveis, o uso do *Jet* convencional é contabilizado na avaliação. Isto, pois as emissões geradas durante a sua combustão contribuem no aumento da concentração de GEE na atmosfera, favorecendo as mudanças climáticas (lembrando que as emissões liberadas na combustão dos biocombustíveis são consideradas neutras, pois o cultivo é considerado que sequestra CO₂ da atmosfera durante a etapa de crescimento).

4.1. INVENTÁRIOS CONSOLIDADOS

Tabela 4. 1. Inventário consolidado da produção de 0,0234 kg de biocombustível para aviação a partir do óleo de dendê.

Entradas	Unidade	Produção 1 MJ de energia (unidade funcional)
N	kg	$7,16 \times 10^{-04}$
P ₂ O ₅	kg	$7,16 \times 10^{-04}$
K ₂ O	kg	$1,65 \times 10^{-03}$
Glifosato	kg	$4,67 \times 10^{-05}$
Magnésio	kg	$1,44 \times 10^{-04}$
<i>Pueraria Javanica</i>	kg	$2,58 \times 10^{-05}$
CO ₂ (sequestro)	kg	$9,09 \times 10^{-03}$
Água	kg	0,0524
Diesel	kg	$9,42 \times 10^{-04}$
Cachos de frutos	kg	0,202
Óleo de dendê	kg	0,0403
Terras adsorventes	kg	$2,82 \times 10^{-04}$
Ácido fosfórico	kg	$2,02 \times 10^{-05}$
Vapor	kg	0,0269

Tabela 4.1 - continuação

Eletricidade	kWh	$4,22 \times 10^{-03}$
Óleo combustível	kg	$7,89 \times 10^{-04}$
Óleo de dendê refinado	kg	0,0379
Hidrogênio	kg	$1,17 \times 10^{-03}$
Amina	kg	0,0445
Catalisador (NiMo)	cm ³	$3,12 \times 10^{-04}$
Água de refrigeração	m ³	$6,24 \times 10^{-05}$
Gás natural	Gcal	$5,31 \times 10^{-06}$
Saídas	Unidade	Produção 1 MJ de energia (unidade funcional)
Fruto dendê	kg	0,202
Óleo de dendê	kg	0,0403
Óleo de palmiste	kg	$3,02 \times 10^{-03}$
Torta de palmiste	kg	$7,05 \times 10^{-03}$
Energia	MJ	0,211 ¹
Óleo de dendê refinado	kg	0,0379
<i>Biojet</i>	kg	0,0234
Nafta	kg	$6,99 \times 10^{-03}$
Propano	kg	$8,64 \times 10^{-04}$
Amina	kg	0,0466
Água residual	kg	$3,81 \times 10^{-03}$
Gases	kg	$2,59 \times 10^{-03}$
<i>Emissões atmosféricas</i>		
CO ₂	kg	$5,76 \times 10^{-03}$
N ₂ O	kg	$8,97 \times 10^{-06}$
Glifosato	kg	$2,33 \times 10^{-06}$
Ammonia	kg	$1,07 \times 10^{-04}$
NO _x	kg	$6,62 \times 10^{-05}$
CO	kg	$1,31 \times 10^{-05}$
CH ₄	kg	$1,74 \times 10^{-05}$
Vapor de água	kg	$4,74 \times 10^{-08}$
Material particulado	kg	$1,12 \times 10^{-06}$
C _x H _y	kg	$9,88 \times 10^{-04}$
Metais	kg	$3,66 \times 10^{-12}$
COVNM	kg	$8,59 \times 10^{-07}$
SO _x	kg	$4,60 \times 10^{-06}$
Metil Carptano	kg	$2,02 \times 10^{-12}$
HCl	kg	$1,83 \times 10^{-07}$
H ₂ S	kg	$4,07 \times 10^{-12}$
Radioatividade para o ar	KBq	$2,16 \times 10^{-07}$
NO ₂	kg	$7,75 \times 10^{-07}$
Hidrocarbonetos	kg	$3,57 \times 10^{-08}$
SO ₂	kg	$4,11 \times 10^{-05}$

Tabela 4.1 - continuação

<i>Efluentes líquidos</i>		
N	kg	$7,16 \times 10^{-05}$
Fósforo	kg	$7,16 \times 10^{-05}$
Glifosato	kg	$9,37 \times 10^{-06}$
DBO	kg	$8,49 \times 10^{-04}$
DQO	kg	$1,28 \times 10^{-03}$
Metais pesados	kg	$1,01 \times 10^{-12}$
CxHy	kg	$4,19 \times 10^{-10}$
Efluentes líquidos não especificados	kg	$6,83 \times 10^{-12}$
Água residual	kg	$6,63 \times 10^{-10}$
Óleo não especificado	kg	$3,15 \times 10^{-09}$
Sólidos suspensos totais	kg	$2,23 \times 10^{-08}$
Cl-	kg	$4,75 \times 10^{-09}$
Íons metálicos	kg	$1,79 \times 10^{-12}$
Sólidos dissolvidos totais	kg	$1,10 \times 10^{-12}$
Na+	kg	$3,17 \times 10^{-09}$
Ácidos	kg	$3,76 \times 10^{-15}$
Metais	kg	$2,20 \times 10^{-13}$
Óleos e graxas	kg	$3,08 \times 10^{-12}$
Compostos de enxofre	kg	$9,91 \times 10^{-15}$
Radioatividade para água	KBq	$3,32 \times 10^{-07}$
Sólidos em suspensão	kg	$5,83 \times 10^{-04}$
Sólidos totais	kg	$2,39 \times 10^{-03}$
Sólidos sedimentares	kg	$5,20 \times 10^{-04}$
Compostos de nitrogênio	kg	$1,01 \times 10^{-04}$
Matéria graxa	kg	$2,32 \times 10^{-04}$
<i>Efluentes para o solo</i>		
Glifosato	kg	$3,50 \times 10^{-05}$
Resíduos não especificados	kg	$7,37 \times 10^{-14}$
Resíduos inertes	kg	$8,05 \times 10^{-10}$
Resíduos sólidos oleosos	kg	$5,99 \times 10^{-08}$
Resíduos processuais	kg	$2,37 \times 10^{-07}$
Resíduos no solo	m ³	$2,96 \times 10^{-07}$

Tabela 4. 2. Inventário consolidado da produção de 0,0234 kg de biocombustível para aviação a partir do óleo de soja.

Entradas	Unidade	Quantidade para produção 1 MJ de energia (unidade funcional)
Sementes	kg	$3,86 \times 10^{-03}$
CO ₂	kg	1,37
Lima	kg	0,0298
Nitrogênio	kg	$3,85 \times 10^{-04}$
Fosfato	kg	$3,86 \times 10^{-03}$
Potássio	kg	0,0104
Pesticida	kg	$1,58 \times 10^{-04}$
Herbicida	kg	$1,73 \times 10^{-04}$
Cobalto	kg	$1,54 \times 10^{-07}$
Molibdênio	kg	$1,54 \times 10^{-06}$
2,4-dichlorophenol	kg	$6,20 \times 10^{-05}$
Água	kg	0,222
Transporte, trator e trailer, agrícola	tkm	$3,65 \times 10^{-05}$
Aplicação de fitofarmacêuticos por pulverizador de campo	ha	$5,39 \times 10^{-04}$
Fertilizante, trator	ha	$1,54 \times 10^{-04}$
Colheita	ha	$7,70 \times 10^{-05}$
Secagem do grão	l	0,0105
Plantio (plantio direto)	ha	$7,70 \times 10^{-05}$
Diesel	kg	0,0123
Soja (grãos)	kg	0,254
Hexano	kg	$2,80 \times 10^{-04}$
Biomassa	kg	0,0219
Eletricidade	kWh	$9,51 \times 10^{-03}$
Óleo de soja	kg	0,0488
Lenha	kg	$2,96 \times 10^{-03}$
Ácido fosfórico	kg	$2,37 \times 10^{-05}$
Hidróxido de Sódio	kg	$2,12 \times 10^{-04}$
Terras clarificantes	kg	$1,66 \times 10^{-04}$
Óleo de soja refinado	kg	0,104
Hidrogênio	kg	$4,18 \times 10^{-03}$
Vapor	kg	$3,55 \times 10^{-04}$
Gás natural	kg	$8,05 \times 10^{-05}$
Água de refrigeração	kg	$3,82 \times 10^{-03}$
Saídas	Unidade	Quantidade para produção 1 MJ de energia (unidade funcional)
Grãos de Soja	kg	0,254
Óleo de soja	kg	0,0488
Farelo de soja	kg	0,203
Óleo de soja refinado	kg	0,0474
<i>Biojet</i>	kg	0,114
Nafta	kg	0,0161
Propano	kg	$9,67 \times 10^{-03}$
Diesel	kg	0,0537

Tabela 4.2 - continuação

<i>Emissões atmosféricas</i>		
CO ₂	kg	0,0288
NO _x	kg	$2,36 \times 10^{-04}$
Amônia	kg	$4,35 \times 10^{-05}$
N ₂ O	kg	$1,69 \times 10^{-04}$
Água	m ³	$6,56 \times 10^{-05}$
CO	kg	$7,13 \times 10^{-06}$
CH ₄	kg	$9,29 \times 10^{-08}$
CxHy	kg	$1,86 \times 10^{-06}$
Material particulado	kg	$7,31 \times 10^{-05}$
SO ₂	kg	$2,68 \times 10^{-06}$
VOC	kg	$5,21 \times 10^{-09}$
Hexano	kg	$2,80 \times 10^{-04}$
<i>Efluentes líquidos</i>		
Nitrato (NO ₃)	kg	0,0119
Fósforo	kg	$2,18 \times 10^{-05}$
Cádmio	kg	$8,10 \times 10^{-12}$
Cromo, ion	kg	$1,15 \times 10^{-10}$
Cobalto	kg	$1,54 \times 10^{-11}$
Molibdênio	kg	$4,09 \times 10^{-11}$
Chumbo	kg	$9,30 \times 10^{-11}$
Efluente líquido	kg	0,0763
Efluentes	kg	0,0396
Produtos químicos	kg	$2,20 \times 10^{-05}$
Água residual	kg	$4,54 \times 10^{-03}$
<i>Efluentes para o solo</i>		
Cádmio	kg	$8,10 \times 10^{-08}$
Cromo	kg	$1,15 \times 10^{-06}$
Chumbo	kg	$9,30 \times 10^{-07}$
Carbendazim	kg	$1,93 \times 10^{-05}$
Teflubenzuron	kg	$9,25 \times 10^{-07}$
Azoxystrobin	kg	$4,62 \times 10^{-06}$
Thiamethoxam	kg	$3,25 \times 10^{-06}$
Lambda-cyhalothrin	kg	$2,45 \times 10^{-06}$
Acephate	kg	$4,62 \times 10^{-05}$
Cyproconazole	kg	$3,68 \times 10^{-06}$
Picoxystrobin	kg	$4,62 \times 10^{-06}$
Óleo mineral	kg	$6,58 \times 10^{-05}$
Fipronil	kg	$1,93 \times 10^{-06}$
Pyraclostrobin (prop)	kg	$1,93 \times 10^{-07}$
Glyphosate	kg	$1,73 \times 10^{-04}$
Pesticides, unspecified	kg	$3,76 \times 10^{-06}$
Cobalto	kg	$1,54 \times 10^{-07}$
Molibdênio	kg	$4,09 \times 10^{-07}$
2,4 D	kg	$6,20 \times 10^{-05}$
Thiophanat-methyl	kg	$1,73 \times 10^{-06}$

4.2. BALANÇO DE CARBONO E INDICADORES ENERGÉTICOS

4.2.1. Cenário biocombustível de aviação a partir do dendê.

Conforme mencionado no item 3.2.3.1, a plantação de dendê sequestra aproximadamente 41,43 t de carbono por hectare ao longo da vida útil da planta (Vianna, 2006). Com esse dado, realizou-se o cálculo da captura e do balanço de CO₂.

$$Captura\ CO_2 = 41,43 \frac{tC}{ha} * \frac{1000\ kgC}{23,5 \frac{tCFF}{ha.\ ano}} * \frac{1}{25\ ano.\ 1\ tC}$$

$$Captura\ CO_2 = 70,52 \frac{kgC}{tCFF} * \frac{44\ kgCO_2}{12\ kgC}$$

$$Captura\ CO_2 = 258,57 \frac{kgCO_2}{tCFF}$$

A tabela 4.3 apresenta o cálculo do balanço de CO₂ para a produção de 1 MJ de energia a partir do óleo de dendê.

Tabela 4. 3. Balanço de CO₂ para a produção de 1 MJ de energia a partir do óleo de dendê.

Etapas do ciclo de vida	CO₂ absorvido	CO₂ emitido
Cultivo	-0,0519	0,0031
Transporte Cultivo-Extração		0,00032
Extração		-0,00054
Transporte Extração-Refino		0,00016
Refino		0,00206
Transporte Refino-Hidrotratamento		0,00213
Hidrotratamento		0,00133
Transporte		0,0001
Balanço (CO₂ absorvido+CO₂ emitido) = -0,0432kg		

Segundo os valores apresentados na tabela 4.3, observa-se que para a produção de 1 MJ de energia, o dendzeiro sequestra 0,0519 kg CO₂ na etapa de cultivo. Por outro lado, as emissões totais das etapas do sistema produto contabilizaram 0,00866 kg CO₂. Assim, todas as emissões de CO₂ fóssil liberadas no ciclo de vida do biocombustível podem ser absorvidas pela planta, restando ainda um sequestro de 0,0432 kg CO₂.

A seguir, é apresentado na Figura 4.1 o consumo de energia por etapas do ciclo de vida da produção do biocombustível a partir do óleo de dendê e, na sequência, o cálculo de eficiência energética do sistema. A equação 3.1 é usada para calcular o indicador de eficiência energética FER que é a relação entre a energia final do biocombustível e a quantidade de energia fóssil de entrada requerida para produzir o biocombustível.

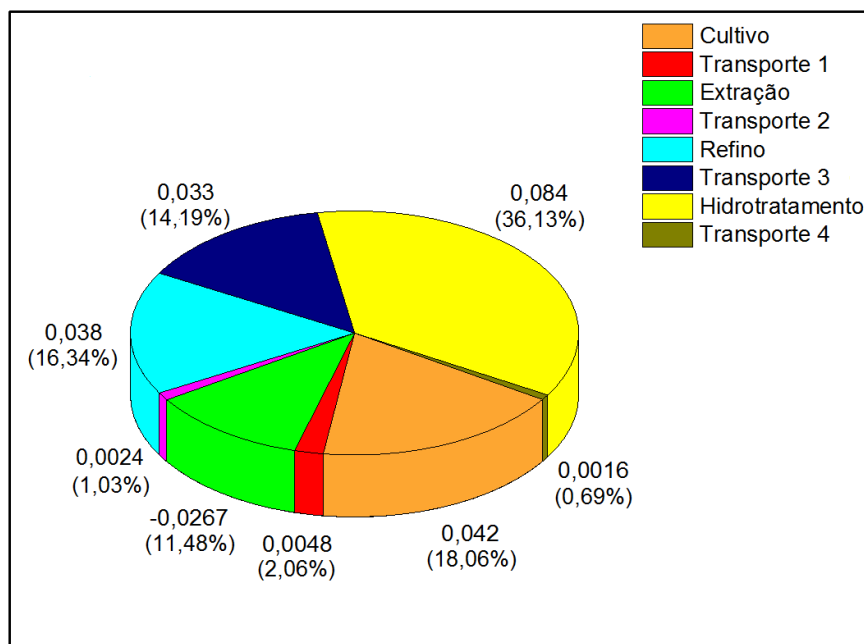


Figura 4. 1. Consumo de energia (em MJ) por etapas do ciclo de vida da produção de 1 MJ de energia a partir do óleo de dendê.

Conforme visto na Figura 4.1, as etapas que apresentaram maior consumo de energia foram: o hidrotratamento, pelo consumo de energia fóssil na produção de vapor e energia elétrica, assim como de hidrogênio; o cultivo, pelo uso de combustíveis fósseis para a produção dos fertilizantes, agrotóxicos, herbicidas, e nas atividades agrícolas; o refino do óleo, pelos requerimentos de energia fóssil durante a produção dos combustíveis e demais produtos químicos requeridos (H₃PO₄); e o transporte até a

refinaria pelo grande consumo de combustíveis fósseis, devido à grande distância percorrida. O valor negativo da extração (-0,0267) é devido aos créditos (subtraídos do uso de energia do sistema) pela substituição dos coprodutos por outros produtos no mercado.

Eficiência energética do sistema produto (Equação 3.1):

$$FER_{dende} = \frac{\text{Energia do biocombustível } (E_b)}{\text{Energia fóssil de entrada } (E_f)}$$

$$FER_{dende} = \frac{1MJ}{0,179MJ}$$

$$FER_{dende} = 5,58$$

O cálculo de eficiência energética forneceu um resultado positivo de 5,58, indicando assim a renovabilidade do biocombustível. O valor encontra-se na faixa dos resultados previamente reportados na literatura conforme visto em Rocha et al. (2014).

4.2.2. Cenário biocombustível de aviação a partir da soja.

O cálculo do sequestro de CO₂ no cenário de biocombustível de aviação a partir da soja mostrado a continuação, foi realizado tomando como base o valor de captura de 0,42 kg de C por kg de grão de soja, assim como reportado no item 3.2.3.2:

$$\text{Captura } CO_2 = 0,42 \frac{kgC}{kg \text{ grão}} * \frac{44 kgCO_2}{12 kgC}$$

$$\text{Captura } CO_2 = 1,57 \frac{kgCO_2}{kg \text{ grão}}$$

A tabela 4.4 apresenta o cálculo do balanço de CO₂ para a produção de 1 MJ de energia a partir do óleo de soja.

Tabela 4. 4. Balanço de CO₂ para a produção de 1 MJ de energia a partir do óleo de soja.

Etapas do ciclo de vida	CO ₂ absorvido	CO ₂ emitido
Cultivo	-0,34533	0,04318
Transporte Cultivo-Extração		0,00508
Extração		-0,04062
Refino		0,00049
Transporte Refino-Hidrotratamento		0,000219
Hidrotratamento		0,00154
Transporte		5,07E-05
Balanço (CO₂ absorvido+CO₂ emitido) = -0,335kg		

Tal como visto na tabela 4.4, observa-se que para a produção de 1 MJ de energia, o cultivo de soja sequestra 0,34533 kg CO₂. Por outro lado, as emissões totais das etapas do sistema produto contabilizaram 0,00994 kg CO₂, constatando-se que todas as emissões de CO₂ fóssil liberadas no ciclo de vida do biocombustível podem ser absorvidas pela planta, restando ainda um sequestro de 0,335 kg CO₂.

De maneira similar, é apresentado na Figura 4.2 o consumo de energia por etapas do ciclo de vida da produção do biocombustível a partir do óleo de soja e em seguida o cálculo de eficiência energética do sistema, usando a equação 3.1.

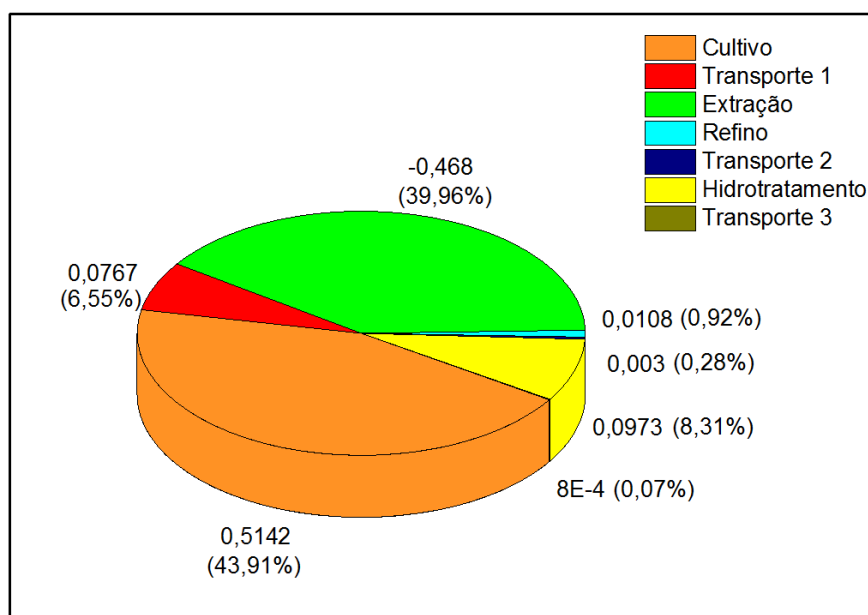


Figura 4. 2. Consumo de energia (em MJ) por etapas do ciclo de vida da produção de 1 MJ de energia a partir do óleo de soja.

Eficiência energética do sistema produto:

$$FER_{soja} = \frac{\text{Energia do biocombustível } (E_b)}{\text{Energia fóssil de entrada } (E_f)} \quad (3.1)$$

$$FER_{soja} = \frac{1MJ}{0,235MJ}$$

$$FER_{soja} = 4,25$$

De acordo com a Figura 4.2, as etapas que apresentaram maior consumo de energia foram: o cultivo, pelo uso de diesel nas atividades agrícolas e de energia fóssil para a produção dos fertilizantes, agrotóxicos e herbicidas; o hidrotratamento pelo consumo de energia fóssil na produção de vapor e energia elétrica, assim como de hidrogênio; e o transporte do cultivo até a usina de extração pelo consumo de diesel, devido à grande distância percorrida. Similarmente ao cenário anterior, a extração representou um valor negativo (-0,468 MJ) devido aos créditos pela substituição dos coprodutos por outros produtos no mercado. O cálculo de eficiência energética forneceu um resultado positivo de 4,25, demonstrando a renovabilidade do biocombustível. De maneira similar, o valor encontra-se na faixa dos resultados reportados em Rocha et al. (2014).

4.3. RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

A seguir são apresentados os resultados obtidos da análise híbrida proposta. Porém, inclui-se um cenário de avaliação alternativo, conforme explicado mais adiante, onde os coprodutos são tratados mediante alocação em base energética, com o objetivo de examinar o efeito nos resultados. Como mencionado na seção 3.2.2.6 o software utilizado foi o Simapro® e método de avaliação usado foi o IMPACT 2002+. Os resultados são relativos às sete etapas consideradas na análise WTW: cultivo, transporte das matérias-primas para a usina de extração, extração do óleo, transporte do óleo cru para refino, refino do óleo, transporte do óleo refinado até a refinaria, produção do biocombustível de aviação e transporte do biocombustível até o aeroporto. Na Tabela 4.5 e na Figura 4.3 são apresentados os resultados dos impactos das categorias intermediárias de cada caso de estudo, assim como os resultados referentes ao ciclo de vida do Jet convencional.

Tabela 4. 5. Resultados comparativos por categorias de impacto da avaliação do ciclo de vida, por MJ produzido.

Categoria de dano	Unidade	Biojet Soja	Biojet Dendê	Jet Convencional
Cancerígenos	kgC2H3Cl eq	$2,82 \times 10^{-04}$	$-1,35 \times 10^{-05}$	$4,11 \times 10^{-04}$
Não cancerígenos	kgC2H3Cl eq	$2,55 \times 10^{-04}$	$-1,91 \times 10^{-03}$	$6,38 \times 10^{-05}$
Efeitos respiratórios (inorgânicos)	kgPM2.5 eq	$3,32 \times 10^{-05}$	$3,53 \times 10^{-05}$	$1,16 \times 10^{-05}$
Radiação Ionizante	BqC-14 eq	$8,95 \times 10^{-03}$	$4,00 \times 10^{-03}$	0,444
Depleção da camada de ozônio	kgCFC-11 eq	$1,64 \times 10^{-10}$	$9,04 \times 10^{-11}$	$5,70 \times 10^{-09}$
Efeitos respiratórios (orgânicos)	kgC2H4 eq	$8,01 \times 10^{-05}$	$1,73 \times 10^{-06}$	$3,46 \times 10^{-05}$
Ecotoxicidade aquática	kgTEGágua	0,218	-6,64	0,776
Ecotoxicidade terrestre	kgTEGsolo	0,299	-5,63	0,176
Acidez terrestre	kgSO2 eq	$1,22 \times 10^{-03}$	$1,23 \times 10^{-03}$	$2,45 \times 10^{-04}$
Uso do solo	m ² org.arável	$5,23 \times 10^{-04}$	$-3,15 \times 10^{-03}$	$3,64 \times 10^{-05}$
Acidificação aquática	kgSO2 eq	$1,74 \times 10^{-04}$	$2,09 \times 10^{-04}$	$7,94 \times 10^{-05}$
Eutrofização aquática	kgPO4P-lim	$3,15 \times 10^{-06}$	$2,78 \times 10^{-05}$	$1,87 \times 10^{-06}$
Aquecimento global	kgCO2 eq	0,0180	$1,64 \times 10^{-03}$	0,0848
Energia não renovável	MJ primário	0,236	0,179	1,33
Extração de minerais	MJ excedente	$9,60 \times 10^{-05}$	$2,50 \times 10^{-05}$	$1,10 \times 10^{-04}$

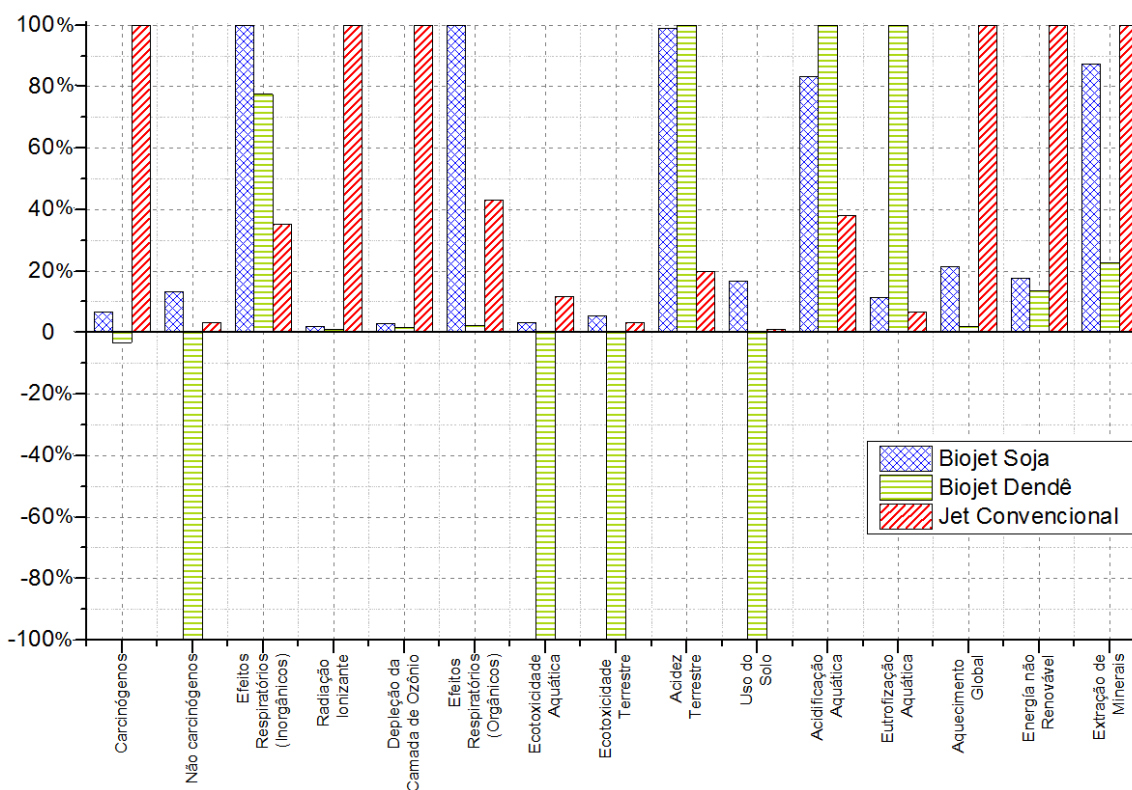


Figura 4. 3. Resultados comparativos das categorias de impacto da avaliação do ciclo de vida, por MJ produzido.

De acordo com os impactos das categorias intermediárias mostrados na Tabela 4.5 e Figura 4.3, pode-se ver que os biocombustíveis apresentam reduções e melhorias em relação ao Jet convencional em 10 das 15 categorias de impacto analisadas. Os resultados negativos observados no cenário do dendê, são devidos aos créditos de emissão atribuídos pela substituição dos coprodutos por outros produtos no mercado, já que a intensidade de carbono dessa substituição foi maior do que a intensidade do sistema produto. As categorias nas quais os biocombustíveis apresentaram um impacto maior que o combustível fóssil foram: efeitos respiratórios orgânicos e inorgânicos, acidez terrestre, acidificação aquática e eutrofização aquática. No caso da soja, isto é resultado das emissões de NO_x, hexano, SO₂, partículas e compostos orgânicos voláteis (COV) exceto metano para o ar, bem como de fósforo, fosfato e DQO (demanda química de oxigênio), geradas principalmente nas etapas de cultivo, extração de óleo, assim como pelos transportes e produção de hidrogênio.

No caso do dendê, as emissões para o ar de NO_x, COV exceto metano, amônia, CH₄ e SO₂, como de DQO, fosfato e fósforo para a água, geradas nas etapas de cultivo, transporte, refino e produção de hidrogênio foram as mais impactantes nessas categorias. As categorias intermediárias são agrupadas em categorias de dano, tal como mostrado na tabela 4.6 e na Figura 4.4.

Tabela 4. 6. Resultados por categorias de dano da avaliação do ciclo de vida, por MJ de combustível produzido.

Categoria de dano	Unidade	Biojet Soja	Biojet Dendê	Jet Convencional
Saúde Humana	DALY	$2,43 \times 10^{-08}$	$1,27 \times 10^{-08}$	$9,65 \times 10^{-09}$
Qualidade do Ecossistema	PDF*m ² *yr	0,0042	-0,047	0,0017
Mudanças Climáticas	kgCO ₂ eq	0,018	0,002	0,085
Recursos	MJ primário	0,236	0,179	1,327

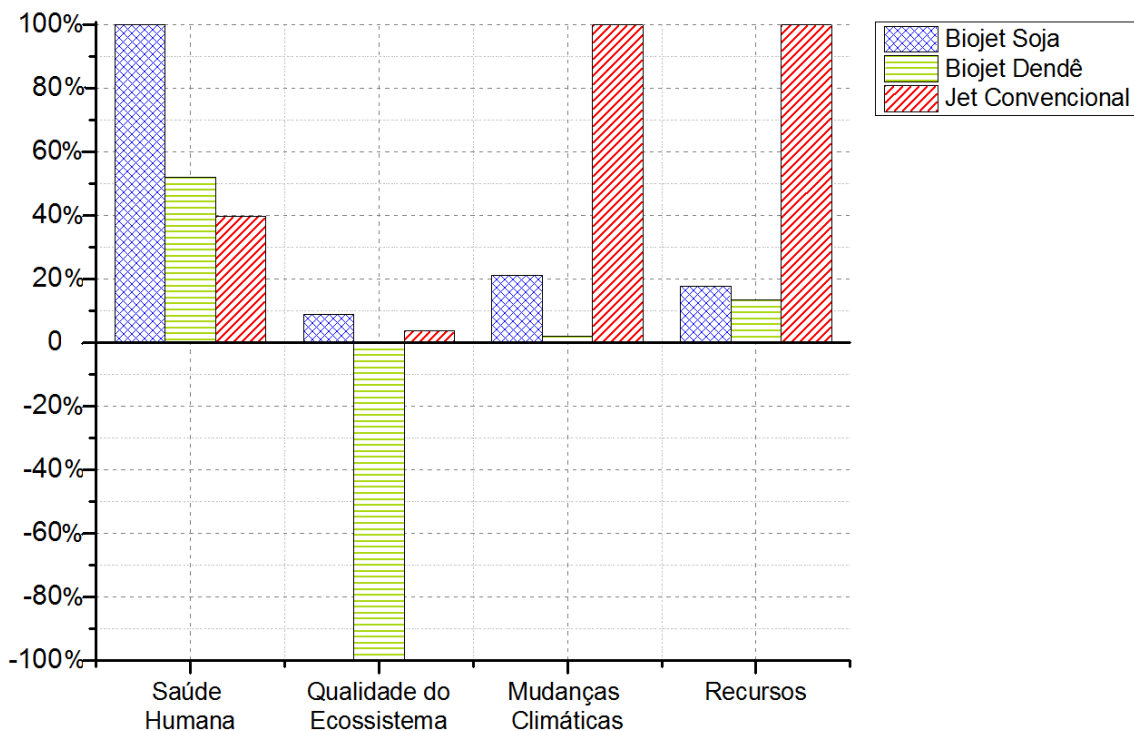


Figura 4. 4. Resultados comparativos das categorias de dano do cenário de dendê e soja e o jet convencional.

Conforme observado na Tabela 4.6 e na Figura 4.4, as reduções mais significativas dos biocombustíveis em comparação com o *Jet* convencional são ilustradas pelas categorias de mudanças climáticas e de uso de recursos, sendo atingida na primeira categoria uma redução de 78,6% e 98%, pelo biocombustível de soja e dendê, respectivamente, e na segunda categoria de 82,22% e 86,5%, na mesma ordem.

No entanto, para as categorias de saúde humana e qualidade do ecossistema, os biocombustíveis apresentaram aumentos em relação ao *Jet* convencional, sendo eles de 60% e 5% no cenário da soja, respectivamente, e de 12,41% no cenário do dendê (na categoria de saúde humana).

A seguir são apresentados nas Figuras 4.5 e 4.6 os impactos ambientais de acordo com a contribuição de cada etapa para os dois cenários de estudo.

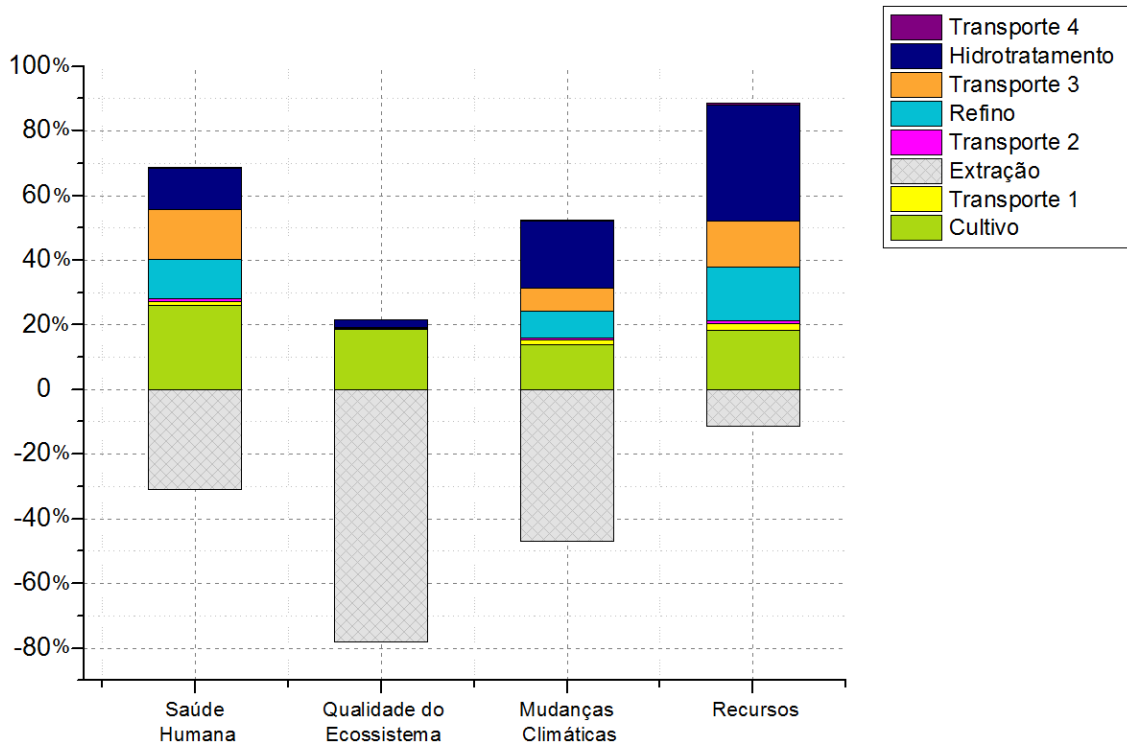


Figura 4. 5. Contribuição por etapas dos impactos ambientais do biocombustível de dendê.

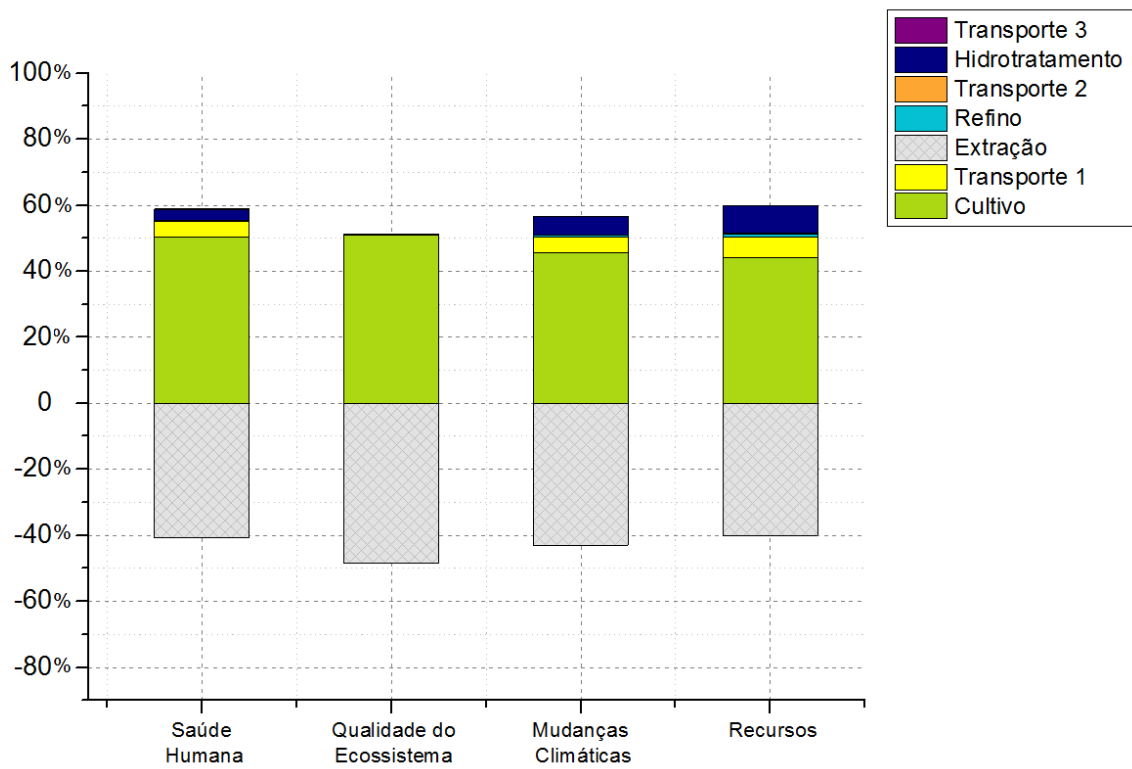


Figura 4. 6. Contribuição por etapas dos impactos ambientais do biocombustível de soja.

Com base nas Figuras 4.5 e 4.6 analisa-se a contribuição de cada etapa nos impactos ambientais. No que diz respeito à categoria de mudanças climáticas, o impacto é contabilizado de acordo às emissões de GEE (CO₂, N₂O, CH₄ e CO) derivadas principalmente, do uso de combustíveis fósseis. As etapas com maior potencial de aquecimento global no cenário da soja foram o cultivo do grão, devido à utilização de diesel (aproximadamente 28,6 l/ha) nas operações agrícolas de colheita, secagem, plantação, uso de fertilizantes, etc.; o hidrotreatamento, pelas emissões geradas na produção de hidrogênio a partir da reforma catalítica do gás natural (sendo produzidos 4,24 kg de CO₂, 3,45 g de CO e 0,141 kg de CH₄ per kg de hidrogênio); e o transporte do cultivo à extração, pela grande distância percorrida (485 km). Já no cenário do dendê, o hidrotreatamento foi a etapa que mais emissões de GEE gerou, devido a produção e demanda de hidrogênio (com o mesmo fator de emissão do que o cenário da soja); seguido pelo cultivo, devido ao uso de combustíveis fósseis e produtos petroquímicos nas operações agrícolas; e pelo transporte em barco do óleo refinado até a refinaria, pela grande distância percorrida (2832 km). No caso do *Jet* convencional 86% das emissões de GEE provêm do seu uso e o restante corresponde à fase de produção.

Em relação à categoria de uso de recursos, vale lembrar que ela é caracterizada pelas categorias de impacto: extração de minerais e consumo de energia não renovável, e traduz a quantidade de energia extraída ou requerida para extrair o recurso. Nesse sentido, o *Jet* convencional teve o maior impacto ao ser um derivado do petróleo e também pelos requerimentos de gás natural e carvão nas atividades da refinaria. No cenário da soja e o dendê, os processos que mais contribuem na avaliação são o uso de petróleo na produção de combustíveis e produtos petroquímicos (principalmente para a etapa de cultivo), assim como o uso de hidrogênio no hidrotreatamento.

O biocombustível de soja, por outro lado, teve o maior impacto na categoria de dano saúde humana, com um valor de $2,43 \times 10^{-8}$ DALY. A categoria contabiliza o impacto toxicológico cumulativo e as possíveis efeitos à saúde humana associadas à liberação de substâncias carcinogênicas e partículas. A etapa do cultivo do grão foi responsável por 63,3% dos impactos, devido às emissões geradas pelo uso extensivo de produtos químicos e combustíveis nas operações agrícolas; seguida pelo transporte do cultivo à usina de extração (20%), devido às grandes distâncias percorridas; e pela produção de hidrogênio (17%) para o hidrotreatamento. A emissão de substâncias como

óxidos de nitrogênio, particulados e dióxido de enxofre para o ar, assim como de molibdênio e zinco para o solo, nessas etapas foram as principais contribuintes nessa avaliação (contabilizadas nas categorias de impacto de toxicidade humana, efeitos respiratórios, radiação ionizante e depleção da camada de ozônio na tabela 4.5).

O biocombustível de dendê obteve o segundo maior impacto nessa categoria, com um resultado de $1,27 \times 10^{-8}$ DALY. Nesse caso, a etapa do cultivo teve 53% de participação na avaliação dessa categoria; seguida pelo transporte do óleo refinado até a refinaria; pelo hidrotreatamento, devido à demanda e produção de vapor e hidrogênio; e pelo transporte do óleo refinado até a refinaria (24,3%). As principais substâncias que caracterizam a categoria são NO_x , NH_3 , SO_2 , partículas e SO.

Com relação à categoria de qualidade do ecossistema, novamente o cenário da soja teve o maior impacto, com um resultado de $0,0042 \text{ PDF} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{yr}$. Assim, as atividades referentes à etapa de cultivo do grão, tais como aplicação de pesticidas, colheita, secagem, uso e aplicação de fertilizantes, etc., foram as principais fontes de poluentes do solo, como zinco, cromo, carbendazim, glifosato, chumbo, entre outros, com um alto potencial de dano em espécies devido aos impactos ambientais provocados, medidos nos índices de ecotoxicidade e acidificação (aquática e terrestre), eutrofização e uso do solo (Tabela 4.5).

O cenário do dendê, pelo contrário, obteve um resultado negativo nessa categoria de $-0,047 \text{ PDF} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{yr}$. Esse valor é devido aos créditos de emissão ganhos pela substituição dos coprodutos, principalmente pela substituição do óleo de soja, já que como supracitado o seu cultivo tem maior intensidade de emissões, em particular para o solo. Portanto, as emissões evitadas associadas à não produção deles praticamente compensam as emissões totais do cenário estudado.

O *Jet* convencional, em contrapartida, obteve um impacto relativamente menor nessas duas categorias uma vez que, contrário dos biocombustíveis, ele não precisa do uso de fertilizantes nem agrotóxicos para ser produzido. Também como observado nos resultados, os poluentes derivados do uso desses produtos tais como zinco, cromo, carbendazim, chumbo e glifosato, assim como pelo uso do solo, representam a maior contribuição nessas categorias. No entanto, os principais poluentes que contribuíram nos resultados foram provenientes da produção do combustível, sendo os óxidos nitrosos, dióxido de enxofre, partículas, arsênio e bário aqueles com maior potencial e

risco tóxico para a saúde humana e o alumínio, óxidos nitrosos, zinco e níquel os maiores degradadores da qualidade do ecossistema.

A seguir, é mostrado na Figura 4.7 o comparativo entre os resultados dos impactos ambientais para o cenário da soja e do dendê.

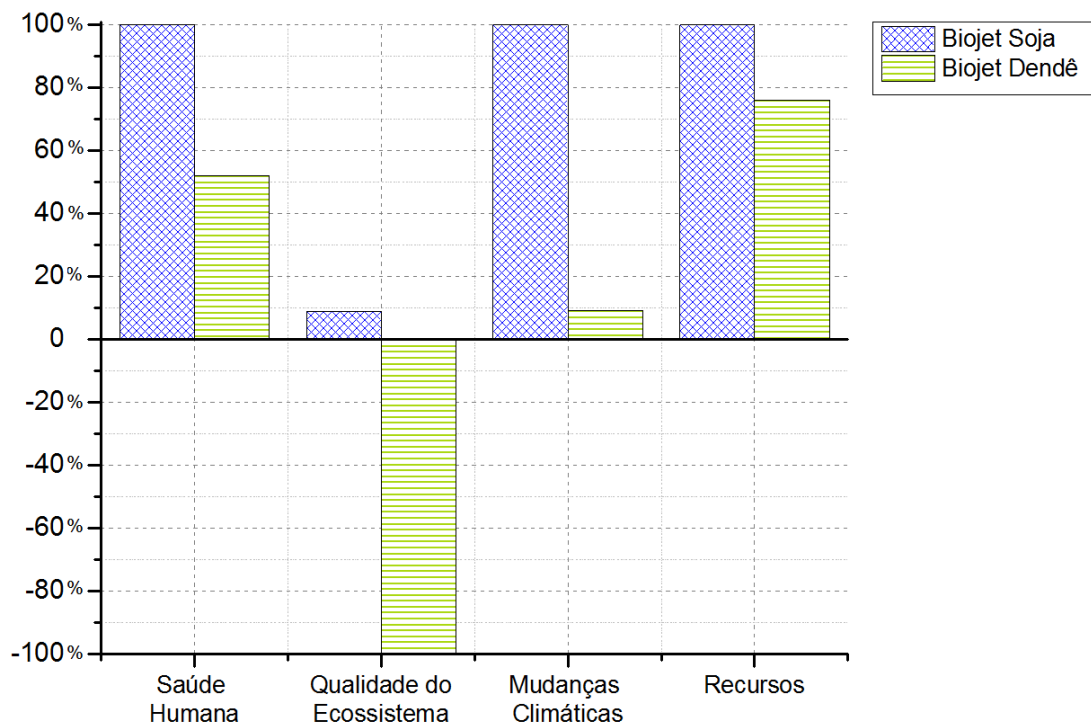


Figura 4. 7. Resultados da avaliação das categorias de dano do biocombustível de soja e dendê.

Pode-se verificar que o biocombustível de soja apresentou um potencial de impacto maior em todas as categorias em referência ao biocombustível de dendê. A principal causa disso está nos créditos de emissão atribuídos à substituição dos coprodutos nos dois cenários, sendo eles mais significativos no cenário do dendê. Isto pois os produtos substituídos (óleo e farelo de soja) possuem uma intensidade de carbono superior a do sistema produto resultando em um alto crédito atribuído, sendo esse crédito ganho mais relevante nas categorias de qualidade do ecossistema e mudanças climáticas. Como o objetivo de ilustrar esta influência, é apresentado na Figura 4.8 o fluxograma de rede da contribuição dos processos na categoria de mudanças climáticas para a produção de 1 MJ de energia em ambos cenários.

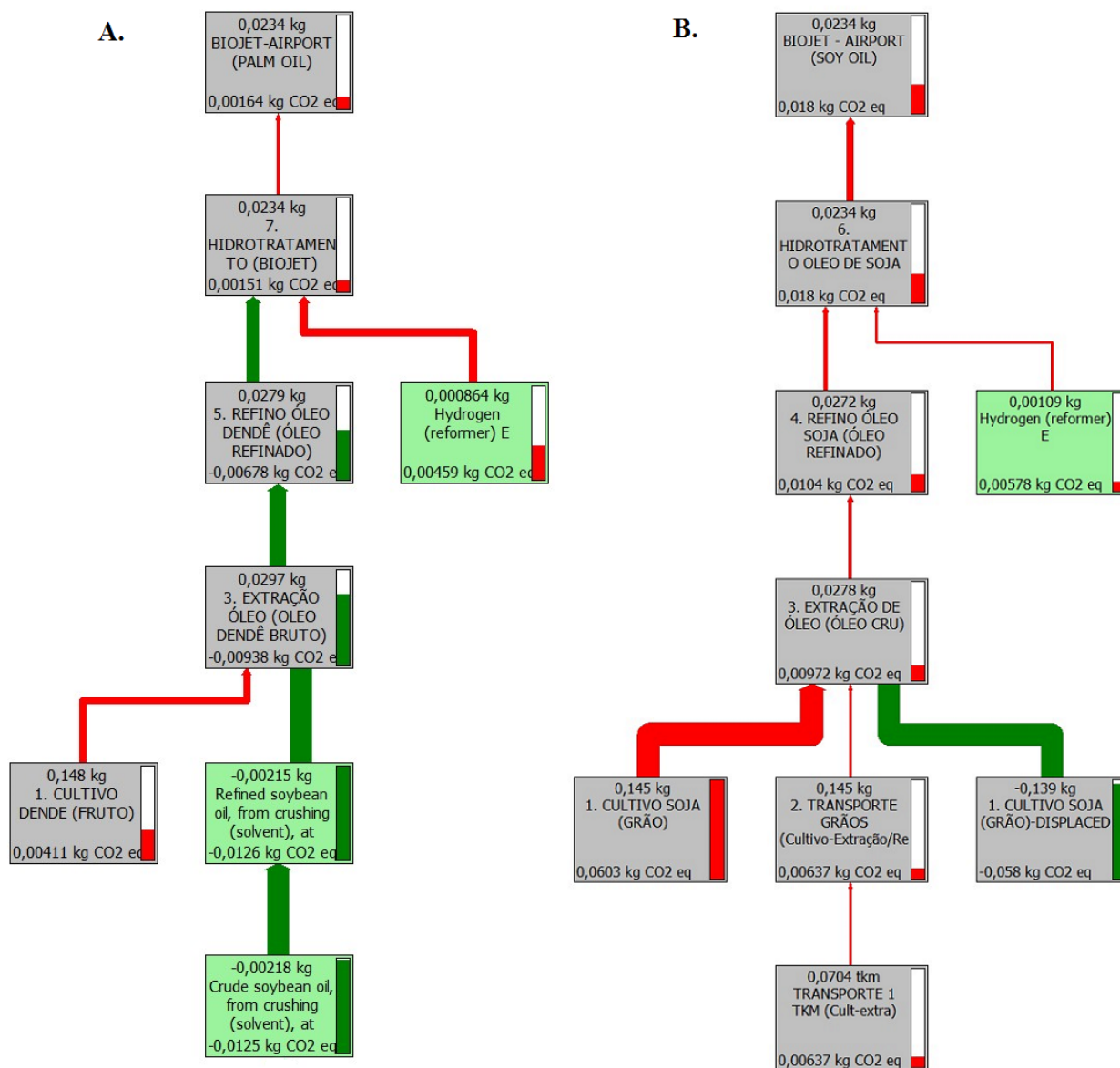


Figura 4. 8. Diagrama de sankey da contribuição de cada processo no resultado final da categoria mudanças climáticas. A) Dendê, B) Soja.

A Figura 4.8 mostra o diagrama sankey dos principais fluxos contribuintes na categoria de dano. As emissões totais de todos os processos no cenário do dendê foram de 0,0164 kg CO₂ eq/MJ enquanto os créditos ganhos totalizaram 0,014 kg CO₂ eq/MJ, dando um resultado final de 0,0016 kg CO₂ eq/MJ. Em contrapartida, no cenário da soja a contribuição de todos os processos foi de 0,04 kg CO₂ eq/MJ e o total de créditos atribuídos foram de 0,022 kg CO₂ eq/MJ obtendo-se um resultado final de 0,018 kg de CO₂ eq/MJ. Na tabela 4.7 é apresentado o quantitativo das emissões e créditos atribuídos, das categorias restantes.

Tabela 4. 7. Emissões e créditos atribuídos aos cenários de estudo por MJ de biocombustível produzido.

	Unidade	SOJA		DENDÊ	
		Emissões	Créditos	Emissões	Créditos
Saúde Humana	DALY	$3,90 \times 10^{-08}$	$1,47 \times 10^{-08}$	$2,32 \times 10^{-08}$	$1,06 \times 10^{-08}$
Qualidade do Ecossistema	PDF*m ² *yr	0,032	0,004	0,017	0,064
Mudanças climáticas	kgCO ₂ eq	0,040	0,022	0,016	0,014
Recursos	MJ primário	0,235	$3,46 \times 10^{-05}$	0,209	0,03

É evidente que as suposições feitas em relação ao deslocamento dos coprodutos podem afetar substancialmente os resultados, ocasionando uma super ou subestimação dos créditos gerados. Desta maneira, decidiu-se incluir um cenário de avaliação alternativo, com o objetivo de examinar o efeito nos resultados, ao ser aplicado outro método de manejo de coprodutos. Nele, foi levada em consideração uma alocação energética para os coprodutos gerados, tanto na fase de extração de óleo quanto no hidrotreatamento, conforme apresentado a seguir.

4.4. CENÁRIO ALTERNATIVO DE AVALIAÇÃO COM ALOCAÇÃO PELO CRITÉRIO ENERGÉTICO.

Nesta seção são mostrados os resultados obtidos com a abordagem de alocação energética alternativa. Primeiramente são apresentados na tabela 4.8 e 4.9, os fatores de alocação adotados para o cenário de soja e dendê, respectivamente. O cálculo de alocação foi feito levando em consideração o PCI e a quantidade produzida de cada coproduto gerado na etapa de extração e do hidrotreatamento.

Tabela 4. 8. Fator de alocação com critério energético no cenário alternativo do dendê.

Alocação energética	Poder calorífico (MJ/kg)	Quantidade produzida (kg)	Fator de alocação (%)
<i>Extração do óleo</i>			
Óleo de dendê	36	0,0403	90,5
Óleo de palmiste	36	$3,02 \times 10^{-03}$	6,8
Farelo de palmiste	6,2	$7,05 \times 10^{-03}$	2,7
<i>Hidrotratamento</i>			
<i>Biojet</i>	42,8	0,0234	73,6
Nafta	45,1	$6,99 \times 10^{-03}$	23,2
Propano	50,3	$8,64 \times 10^{-04}$	3,19

Tabela 4. 9. Fator de alocação com critério energético no cenário alternativo da soja.

Alocação energética	Poder calorífico (MJ/kg)	Quantidade produzida (kg)	Fator de alocação (%)
<i>Extração do óleo</i>			
Óleo de soja	37,2	0,0488	47
Farelo de soja	9,88	0,203	53
<i>Hidrotratamento</i>			
<i>Biojet</i>	42,8	0,0234	57,4
Diesel	44,8	0,0110	28,3
Nafta	45,1	$3,31 \times 10^{-03}$	8,56
Propano	50,3	$2,00 \times 10^{-03}$	5,74

Em seguida, são mostrados os resultados obtidos na análise, por MJ de biocombustível produzido. Vale ressaltar que, de maneira similar, foi usado o método de avaliação, IMPACT 2002+ e que os resultados são relativos aos sete estágios considerados na análise WTW: cultivo, transporte das matérias-primas para a usina de extração, extração do óleo, transporte do óleo cru para a refinação, refino do óleo, transporte do óleo refinado até a refinaria, produção do biocombustível de aviação e transporte do biocombustível até o aeroporto.

Nas tabelas 4.10 e 4.11 e na Figura 4.9 são apresentados os resultados gerais de cada caso de estudo, assim como os resultados referentes ao ciclo de vida do Jet convencional.

Tabela 4. 10. Resultados gerais por categorias de dano da avaliação do ciclo de vida, por MJ de combustível produzido.

Categoria de dano	Unidade	Biojet Soja	Biojet Dendê	Jet Convencional
Saúde Humana	DALY	$4,49 \times 10^{-08}$	$2,24 \times 10^{-08}$	$9,65 \times 10^{-09}$
Qualidade do Ecossistema	PDF*m ² *ano	0,0367	0,015	0,002
Mudanças Climáticas	kgCO ₂ eq	0,040	0,015	0,085
Recursos	MJ primário	0,404	0,206	1,327

Tabela 4. 11. Resultados gerais por categorias de impacto da avaliação do ciclo de vida, por MJ de combustível produzido.

Categoria de dano	Unidade	Biojet Soja	Biojet Dendê	Jet Convencional
Toxicidade humana	kgC ₂ H ₃ Cl eq	$8,99 \times 10^{-04}$	$5,41 \times 10^{-05}$	$4,11 \times 10^{-04}$
Efeitos respiratórios (inorgânicos)	kgPM _{2.5} eq	$1,89 \times 10^{-05}$	$3,18 \times 10^{-05}$	$1,16 \times 10^{-05}$
Radiação Ionizante	BqC-14 eq	0,0213	$9,49 \times 10^{-03}$	0,444
Depleção da camada de ozônio	kgCFC-11 eq	$4,60 \times 10^{-10}$	$1,34 \times 10^{-10}$	$5,70 \times 10^{-09}$
Efeitos respiratórios (orgânicos)	kgC ₂ H ₄ eq	$1,42 \times 10^{-05}$	$3,06 \times 10^{-06}$	$3,46 \times 10^{-05}$
Ecotoxicidade aquática	kgTEGágua	0,558	0,369	0,776
Ecotoxicidade terrestre	kgTEGsolo	0,960	0,0993	0,176
Acidez terrestre	kgSO ₂ eq	$5,75 \times 10^{-04}$	$1,83 \times 10^{-03}$	$2,45 \times 10^{-04}$
Uso do solo	m ² org.arável	$1,67 \times 10^{-03}$	0,0113	$3,64 \times 10^{-05}$
Acidificação aquática	kgSO ₂ eq	$9,63 \times 10^{-05}$	$2,87 \times 10^{-04}$	$7,94 \times 10^{-05}$
Eutrofização aquática	kgPO ₄ P-lim	$9,70 \times 10^{-06}$	$2,55 \times 10^{-05}$	$1,87 \times 10^{-06}$
Aquecimento global	kgCO ₂ eq	0,0169	0,0154	0,0848
Energia não renovável	MJ primária	0,191	0,206	1,33
Extração de minerais	MJ excedete	$3,06 \times 10^{-04}$	$2,31 \times 10^{-05}$	$1,10 \times 10^{-04}$

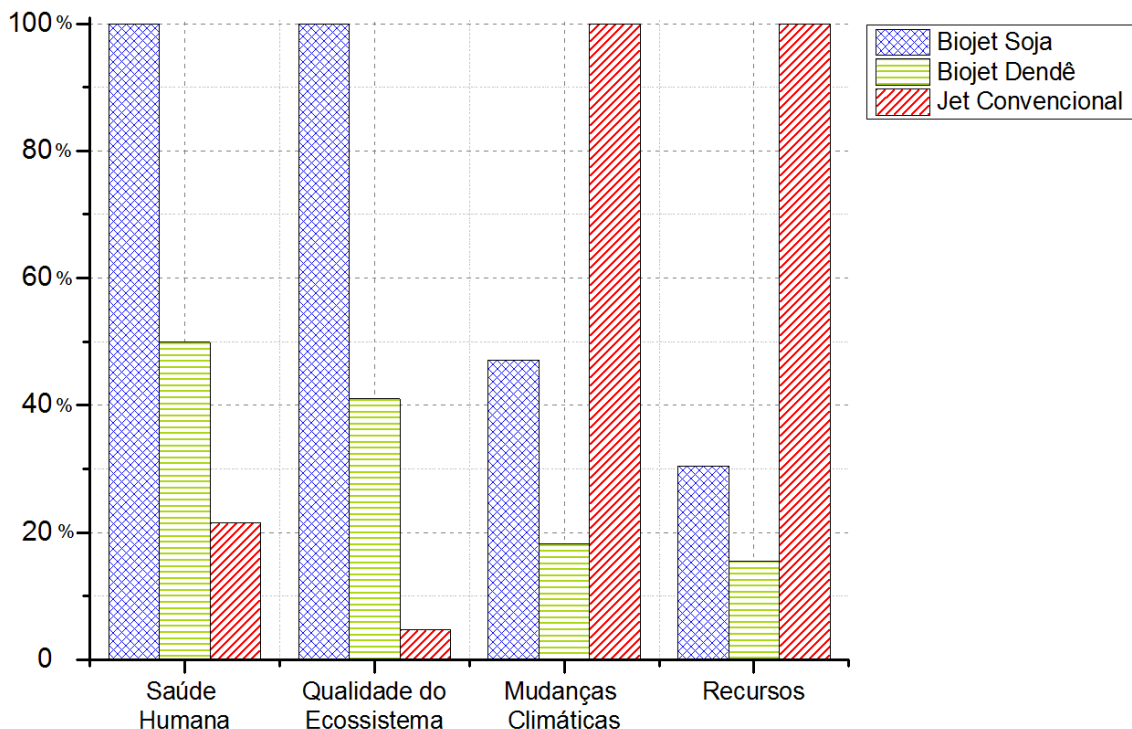


Figura 4.9. Resultados da avaliação alternativa das categorias de dano do cenário de dendê, soja e jet convencional.

Como se observa nas tabelas 4.10 e 4.11, a intensidade dos impactos mudou significativamente principalmente para o caso do biocombustível do dendê, já que nesse cenário ele não tem créditos de emissão atribuídos pela substituição dos coprodutos, e portanto apresenta um potencial de impacto positivo em todas as categorias. A principal razão disto é devida a que 10% das emissões geradas até a etapa de extração foram assignadas ao óleo e torta de palmiste e o 90% restante foi conferido ao óleo de dendê (devido ao seu PCI e ao fato de ser produzido em uma proporção maior que os outros coprodutos). Isto é contrário ao cenário de avaliação anterior, onde os coprodutos tiveram uma grande repercussão ao deslocar produtos marginais com alto potencial de impacto. No caso da soja, o resultado apresentou uma variação menor que no cenário do dendê, já que as emissões geradas até a etapa de extração foram assignadas em 53% e 47% ao farelo e óleo de soja, respectivamente, devido ao alto volume de produção do primeiro em comparação ao segundo. De acordo com a Figura 4.9, e de maneira similar ao cenário de avaliação anterior, as reduções mais significativas dos biocombustíveis em comparação com o Jet convencional são ilustradas pelas categorias de mudanças climáticas e de uso de recursos. Foi atingida na primeira categoria, uma redução de 52%

e 81,85%, pelo biocombustível de soja e dendê (versus o 78,6% e 98% do cenário de avaliação anterior), respectivamente, e na segunda categoria, de 69,54% e 84,47% (versus o 82,22% e 86,5% do cenário de avaliação anterior) na mesma ordem.

Nas Figuras 4.10 e 4.11 a seguir, são ilustradas as novas contribuições de cada etapa na avaliação alternativa, dos cenários de estudo. Vale ressaltar que em referência ao combustível Jet, não se obtiveram mudanças nas contribuições da análise, sendo as mesmas como comentadas no item anterior.

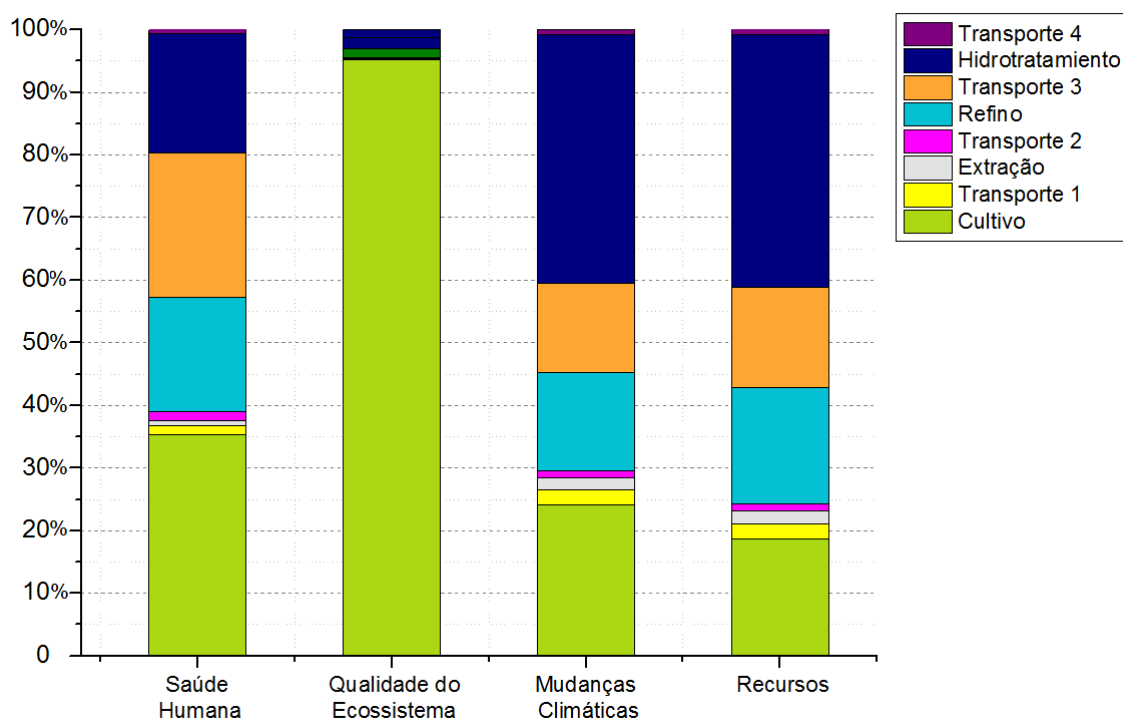


Figura 4. 10. Contribuição por etapas dos impactos ambientais da avaliação alternativa do biocombustível de dendê.

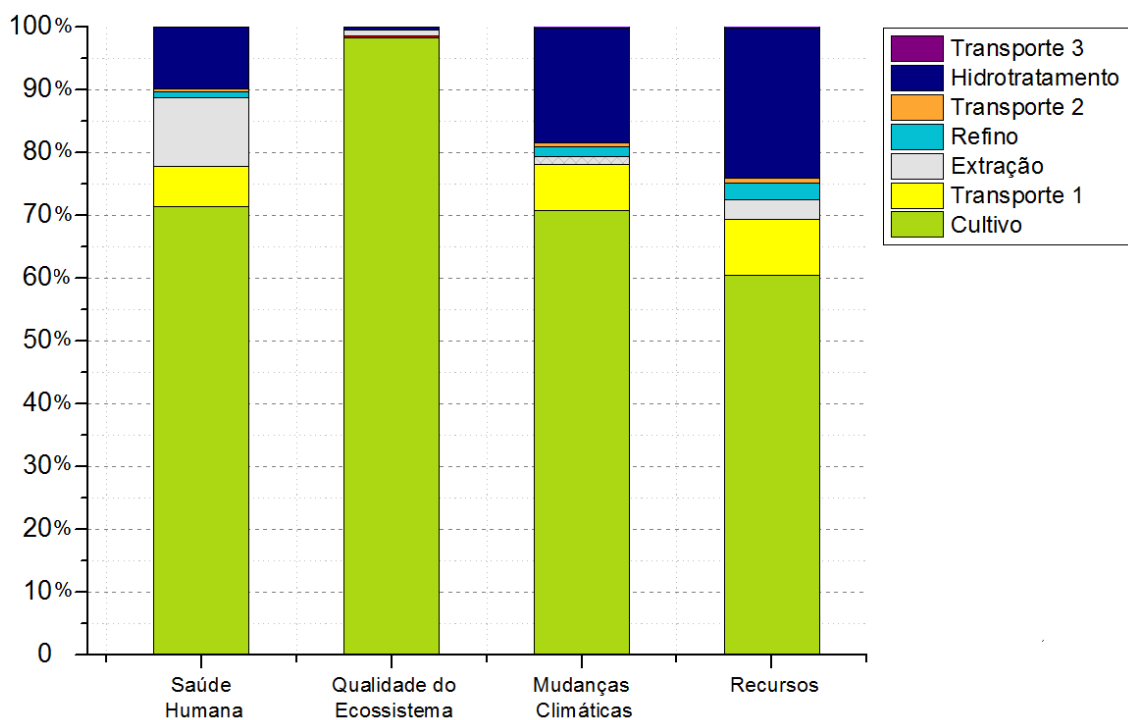


Figura 4. 11. Contribuição por etapas dos impactos ambientais da avaliação alternativa do biocombustível de soja.

De maneira similar, o cultivo continuou sendo a etapa com maior contribuição em quase todas as categorias, conforme visto na Figura 4.10 e 4.11. Na categoria de saúde humana, depois do cultivo, a segunda etapa com maior contribuição foi a de extração de óleo, seguida pelo hidrotratamento e o transporte do cultivo à usina de extração, no cenário da soja. Do mesmo modo, a emissão de substâncias como óxidos de nitrogênio, particulados e dióxido de enxofre para o ar, assim como de molibdênio e zinco para o solo, em essas etapas foram as principais contribuintes nessa avaliação. No caso do dendê, o cultivo foi também a etapa com maior impacto, seguida pelo transporte marítimo, o hidrotratamento e o refino do óleo. As principais substâncias emitidas para o ar contabilizadas na categoria foram óxidos nitrosos, amônia, dióxido de enxofre e partículas.

Em referência à categoria de qualidade do ecossistema, o cultivo contabilizou quase a totalidade das emissões nos dois cenários (98,18% no da soja e 95,18% no do dendê). Isto é devido às emissões para o solo de substâncias como o zinco, cromo, carbendazim e glifosato, assim como também pela ocupação do solo contabilizada pelo Simapro® nos inventários de sementes e atividades de plantação, no cenário da soja,

bem como pela demanda de ureia e magnésio e pelas emissões de amônia e óxidos de nitrogênio ao ar e de glifosato para o solo, no cenário do dendê.

Já na categoria de mudanças climáticas as duas etapas que mais contribuíram nos dois cenários foram as de cultivo e hidrotreatamento. No caso da soja, isto é devido ao uso de combustíveis fósseis nas operações agrícolas e pela produção de hidrogênio para o hidrotreatamento. No cenário do dendê, a produção do hidrogênio representou a maior contribuição, seguido pelas emissões derivadas do uso de combustíveis fósseis nas operações agrícolas e no transporte marítimo da usina de refinação do óleo para a refinaria.

No que concerne à categoria de recursos, de maneira semelhante ao cenário de avaliação anterior, os processos que mais contribuíram em ambos cenários foram o uso de petróleo na produção de combustíveis e produtos petroquímicos (principalmente para a etapa de cultivo), assim como o uso de hidrogênio no hidrotreatamento.

A seguir, a Figura 4.12 representa o comparativo entre os resultados dos impactos ambientais para os cenários de produção de biocombustível para aviação a partir da soja e do dendê.

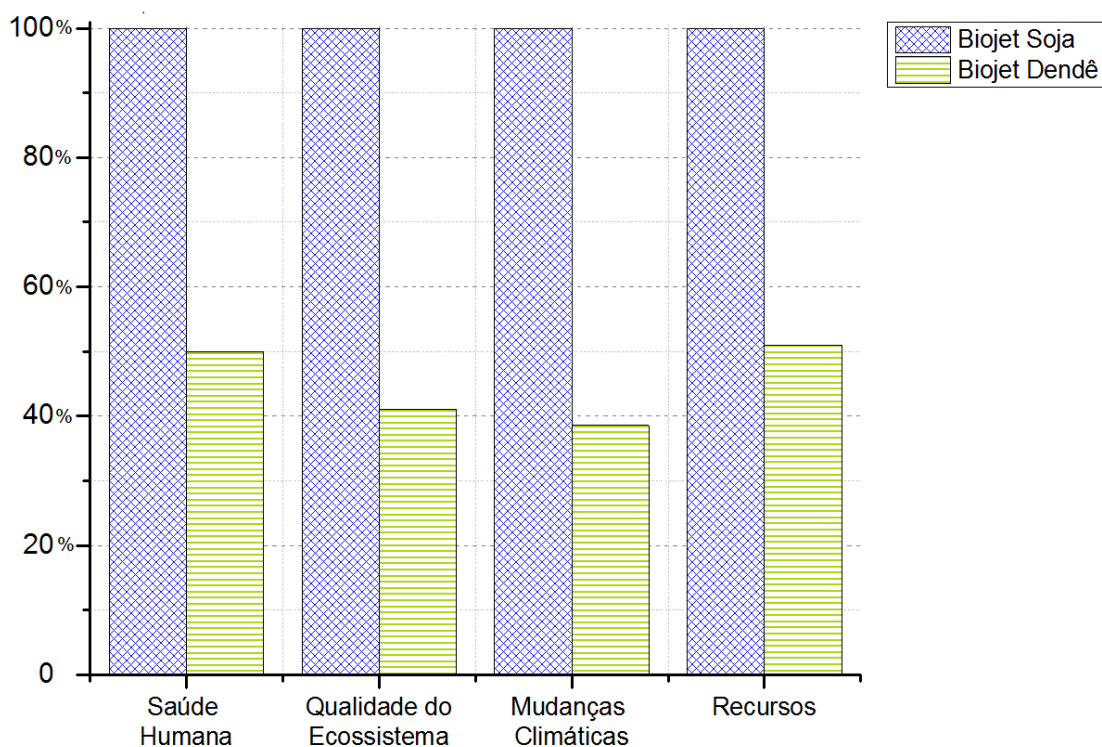


Figura 4. 12. Resultados da avaliação alternativa das categorias de dano do biocombustível de soja e dendê.

Pode-se observar na Figura 4.12, que apesar das mudanças nos resultados, produto da nova atribuição das cargas ambientais, a soja continuou apresentando o impacto ambiental maior, nos dois sistemas estudados. Nesse sentido, o cultivo do grão foi a etapa mais intensiva em emissões devido aos requerimentos de fertilizantes, agrotóxicos, diesel e eletricidade, além do baixo rendimento próprio da cultura (3300kg/ha). No entanto, os dois cenários apresentaram melhoras significativas em relação ao combustível convencional, principalmente nas categorias de mudanças climáticas e uso de recursos. Isto indica o grande potencial para o estabelecimento de uma cadeia produtiva sustentável de biocombustível de aviação a partir de dendê e soja no Brasil.

Por fim, com o objetivo de demonstrar o impacto dos métodos de tratamento de coprodutos sobre os resultados, é apresentado nas Figuras 4.13 e 4.14 um comparativo com os impactos ambientais calculados para o cenário da soja e do dendê, respectivamente, no método híbrido e de alocação energética.

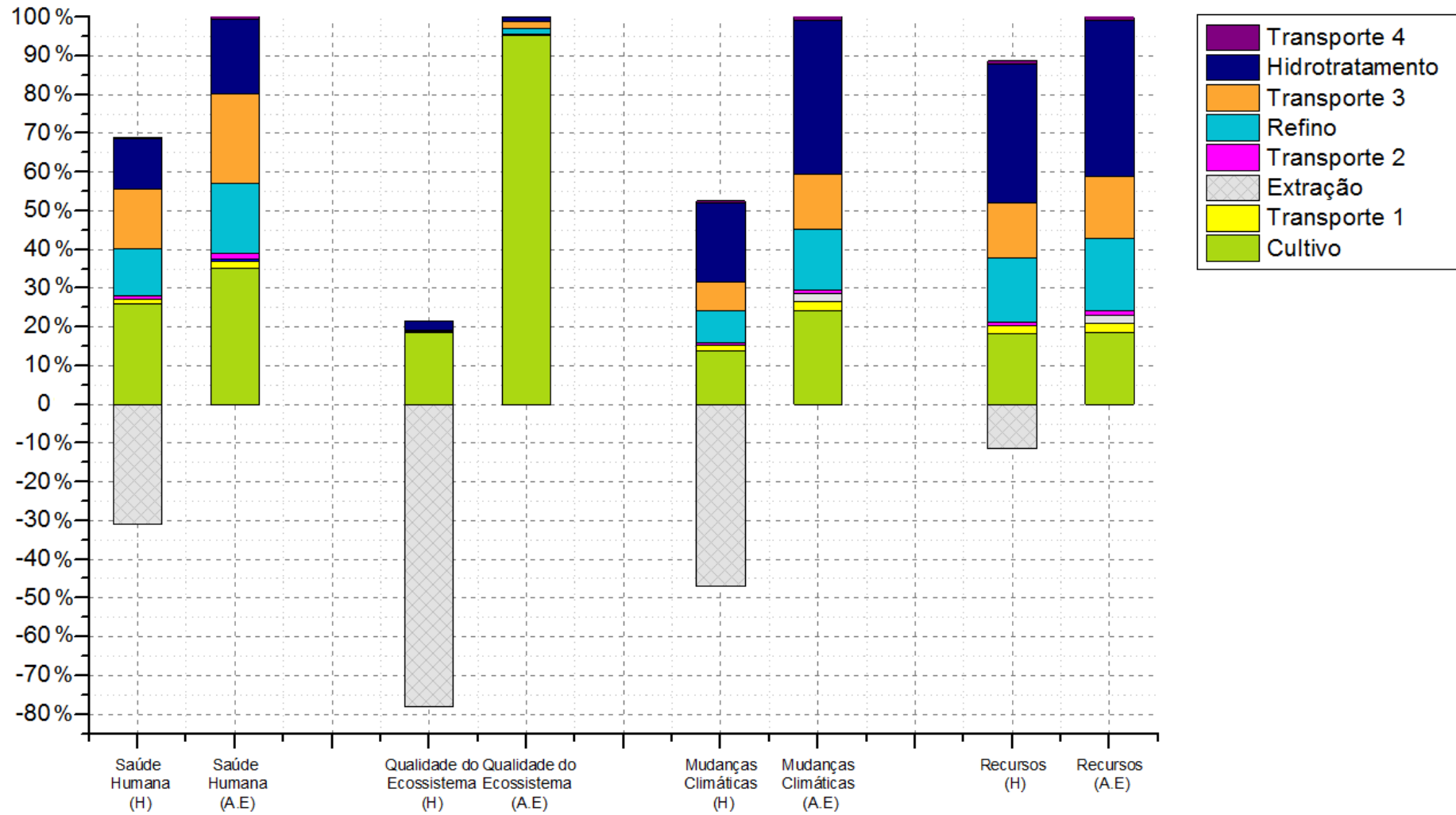


Figura 4. 13. Comparativo dos resultados das categorias de dano para o cenário do dendê, obtidas no método híbrido (H) e de alocação energética (A.E).

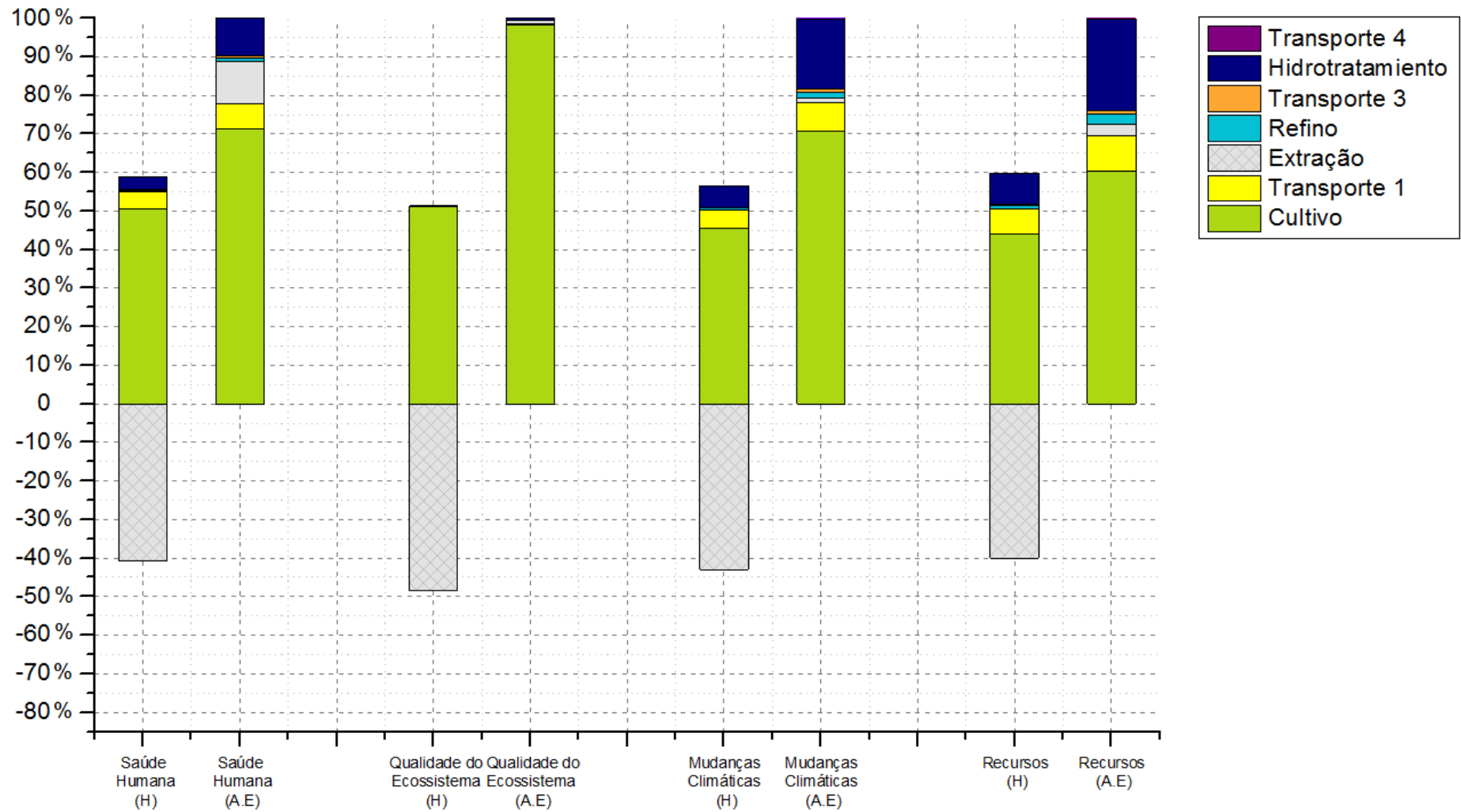


Figura 4. 14. Comparativo dos resultados das categorias de dano para o cenário da soja, obtidas no método híbrido (H) e de alocação energética (A.E).

As Figuras 4.13 e 4.14 mostram o efeito significativo dos métodos de alocação sobre os resultados da análise. Observa-se que o método híbrido tende a gerar resultados de emissões menores que o método de alocação com base energética. Isto é devido ao deslocamento de produtos com intensidade de emissão maior que as do sistema, resultando em alguns casos, em emissões negativas (como visto no cenário do dendê), assim como também, pela quantidade de coproduto produzido.

Em relação ao cenário do dendê (Figura 4.13), as reduções dos resultados obtidos no método híbrido em comparação com o método de alocação energética foram de: 32% na categoria de saúde humana; 78% na categoria de qualidade do ecossistema; 48% na categoria de mudanças climáticas; e de 40% na categoria de recursos. A grande variação de emissões na categoria de qualidade do ecossistema é devida às emissões ao solo evitadas pela substituição dos coprodutos o qual representou um grande crédito nessa categoria. No cenário da soja (Figura 4.14), as reduções dos resultados obtidos no método híbrido em comparação com o método de alocação energética totalizaram: 42% na categoria de saúde humana; 49% na categoria de qualidade do ecossistema; 44% na categoria de mudanças climáticas; e de 40% na categoria de recursos.

Tanto no cenário do dendê quanto no cenário da soja, as etapas de cultivo e do hidrotratamento representaram a maioria das emissões em ambos os cenários de alocação, seguidas pelo transporte e o refino.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES

A partir da avaliação ambiental da produção de biocombustível de aviação a partir do dendê e da soja nas condições brasileiras efetuada no presente trabalho, podem-se estabelecer as seguintes conclusões.

- O biocombustível de aviação a partir do dendê apresentou um impacto ambiental menor do que o biocombustível de aviação a partir da soja em todas as categorias avaliadas, porém os dois cenários apresentaram melhorias ambientais relevantes em comparação ao combustível *Jet* convencional.
- As etapas de cultivo e de hidrotratamento obtiveram uma contribuição maior na maioria das categorias avaliadas. Isto é devido as emissões ao ar (CO_2 , NO_x , partículas, N_2O , S_2O e NH_3) e ao solo (zinco, molibdênio, cromo, carbendazim e glifosato) geradas a partir do uso de produtos petroquímicos e agrotóxicos e de combustíveis nas operações agrícolas, assim como pelas emissões (CO_2 , NO_x , partículas, CH_4 e SO_2) associadas à produção e uso de hidrogênio e vapor no hidrotratamento.
- O método de tratamento dos coprodutos obteve uma influência muito grande nos resultados da análise, em particular no cenário do biocombustível de aviação a partir do dendê, o qual obteve diminuições importantes no resultado final quando foi atribuído créditos de emissão pela substituição de produtos no mercado.
- No cenário de avaliação híbrido, as reduções atingidas nas categorias de mudanças climáticas e recursos pelo biocombustível de aviação de soja e dendê em comparação ao combustível *Jet* convencional foram, respectivamente, de 78,76% e 98,07% na primeira categoria e de 82,22% e de 86,48% na segunda.
- No cenário de avaliação alternativo, as reduções atingidas nas categorias de mudanças climáticas e recursos pelo biocombustível de aviação de soja e dendê em comparação ao combustível *Jet* convencional foram, respectivamente, de 52,89% e 81,85% na primeira categoria e de 69,54% e 84,47% na segunda.

- Ambos biocombustíveis propostos tem um grande potencial para o estabelecimento de uma indústria de produção sustentável de biocombustíveis de aviação no país.

RECOMENDAÇÕES.

A fim de dar continuidade à linha de pesquisa do presente trabalho, recomenda-se os seguintes pontos:

- Realizar uma avaliação da viabilidade econômica de cada caso de estudo.
- Propor cenários alternativos com otimização das linhas de produção ou uso de recursos mais sustentáveis, como por exemplo, a produção de hidrogênio a partir de biomassa, energia eólica, entre outros.

REFERENCIAS.

ABRAPA. **Aliança Brasileira para Biocombustíveis de Aviação**. Disponível em: <<http://www.abraba.com.br/pt-BR/Paginas/home.aspx>>. Acesso em: 24 ago. 2017.

AGROPALMA. **Agropalma relatório de sustentabilidade**. [s.l: s.n.].

ALVES, C. M. et al. Techno-economic assessment of biorefinery technologies for aviation biofuels supply chains in Brazil. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 11, n. 1, p. 67–91, 2016.

ANAND, M. et al. Optimizing renewable oil hydrocracking conditions for aviation bio-kerosene production. **Fuel Processing Technology**, v. 151, p. 50–58, 2016.

ASTM. **Standard Specification for Aviation Turbine Fuels** Standard Specification for Aviation Turbine Fuels. [s.l: s.n.].

ASTM. **Standard Specification for Aviation Certification Turbine Fuel 1** Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons. [s.l: s.n.].

ATSONIOS, K. et al. Alternative thermochemical routes for aviation biofuels via alcohols synthesis: Process modeling, techno-economic assessment and comparison. **Applied Energy**, v. 138, p. 346–366, 2015.

BAILIS, R.; BAKA, J. Greenhouse Gas Emissions and Land Use Change from Jatropha Curcas -Based Jet Fuel in Brazil. **Environmental Science and Technology**, v. 44, n. 22, p. 8684–8691, 2010.

BRANDER, M. et al. Consequential and attributional approaches to LCA: a Guide to policy makers with specific reference to greenhouse gas LCA of biofuels. **Econometrica Press**, v. 44, n. April, p. 1–14, 2008.

BRENNAN, T. C. R. et al. Evolutionary engineering improves tolerance for replacement jet fuels in *Saccharomyces cerevisiae*. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 81, n. 10, p. 3316–3325, 2015.

CALIFORNIA ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Proposed Regulation to Implement the Low Carbon Fuel Standard. Volume I Staff Report: Initial Statement of Reasons**. [s.l: s.n.].

CANALS, L. M. et al. How to Approach Land Use in LCIA Letters to the Editor How to approach land use in LCIA or , how to avoid the Cinderella effect? Comments on Key Elements in a Framework for Land Use Impact Assessment Within LCA,. v. 11, n. 4, p. 219–221, 2006.

CANTARELLA, H. et al. Potential feedstock for renewable aviation fuel in Brazil. **Environmental Development**, v. 15, p. 52–63, 2015.

CARVALHO, C. **A expansão sustentável do cultivo da palma para a produção de biodiesel no Brasil: O caso do estado do Pará**. [s.l: s.n.].

CAVALETT, O. **Análise do Ciclo de Vida da Soja**. [s.l.] Universidade Estadual Campinas, 2008.

CHIARAMONTI, D. et al. Sustainable bio kerosene: Process routes and industrial

demonstration activities in aviation biofuels. **Applied Energy**, v. 136, p. 767–774, 2014.

CHOI, I. H. et al. The direct production of jet-fuel from non-edible oil in a single-step process. **Fuel**, v. 158, p. 98–104, 2015.

CHOUHDARY, T. V.; PHILLIPS, C. B. Renewable fuels via catalytic hydrodeoxygenation. **Applied Catalysis A: General**, v. 397, n. 1–2, p. 1–12, 2011.

CHU, P. L. et al. Process modeling of hydrodeoxygenation to produce renewable jet fuel and other hydrocarbon fuels. **Fuel**, v. 196, p. 298–305, 2017.

CHUCK, C. **Biofuels for Aviation. Feedstocks, Technology and Implementation**. [s.l: s.n.].

CODEMIG. **Bioquerosene é a nova fronteira do desenvolvimento sustentável em Minas Gerais**. Disponível em: <<http://www.codemig.com.br/bioquerosene-e-a-nova-fronteira-do-desenvolvimento-sustentavel-em-minas-gerais/>>. Acesso em: 24 ago. 2017.

CORTEZ, L. A. B. et al. **Plano de voo para biocombustíveis de aviação no Brasil: Plano de ação Fapesp**. [s.l: s.n.].

CORTEZ, L. A. B. et al. Perspectives for sustainable aviation biofuels in Brazil. **International Journal of Aerospace Engineering**, v. 2015, 2015.

COX, K. et al. Environmental life cycle assessment (LCA) of aviation biofuel from microalgae , *Pongamia pinnata*, and sugarcane molasses. **Biofuels Bioproducts & Biorefining**, v. 8, p. 579–593, 2014.

CRAWFORD, R. H. et al. Hybrid life cycle inventory methods – A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 1273–1288, 2018.

CUELLAR, M. C.; VAN DER WIELEN, L. A. M. Recent advances in the microbial production and recovery of apolar molecules. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 33, p. 39–45, 2015.

DE JONG, S. et al. The feasibility of short-term production strategies for renewable jet fuels - a comprehensive techno-economic comparison. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 9, n. 3, p. 778–800, 2015.

DE JONG, S. et al. Life-cycle analysis of greenhouse gas emissions from renewable jet fuel production. **Biotechnology for Biofuels**, v. 10, n. 1, p. 64, 2017.

DE KLEINE, R. et al. Life cycle assessment is the most relevant framework to evaluate biofuel greenhouse gas burdens. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 11, p. 407–416, 2017.

DEANE, P.; O SHEA, R.; Ó GALLACHÓIR, B. Biofuels for Aviation. **Rapid Response Energy Brief**, n. April, 2015.

DE OLIVEIRA, I. **Avaliação energética e ambiental da produção de óleo de dendê para biodiesel na região Sul, Bahia**. [s.l: s.n.].

DIEDERICHS, G. W. et al. Techno-economic comparison of biojet fuel production from lignocellulose, vegetable oil and sugar cane juice. **Bioresource Technology**, v. 216, p. 331–339, 2016.

EKVALL, T. et al. **Attributional and consequential LCA in the ILCD handbook** *International Journal of Life Cycle Assessment*. [s.l: s.n.].

EKVALL, T. et al. Attributional and consequential LCA in the ILCD handbook. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 21, n. 3, p. 293–296, 2016b.

- EKVALL, T.; FINNVEDEN, G. Allocation in ISO 14041--a critical review. **Cleaner Production**, v. 9, n. 3, p. 197–208, 2001.
- ELLER, Z.; VARGA, Z.; HANCSÓK, J. Advanced production process of jet fuel components from technical grade coconut oil with special hydrocracking. **Fuel**, v. 182, p. 713–720, 2016.
- EMBRAPA. **Tecnologia para produção do óleo de soja: descrição das etapas, equipamentos, produtos e subprodutos**. [s.l.: s.n.].
- EMBRAPA. **Zoneamento Agroecológico, Produção e Manejo para a Cultura da Palma de Óleo na Amazônia**. [s.l.: s.n.]. v. 1
- ENERGY, U. S. D. OF. **Alternative Aviation Fuels: Overview of Challenges, Opportunities, and Next Steps**. [s.l.: s.n.].
- ETIP. **Oils crops for production of advanced biofuels**. Disponível em: <http://www.biofuelstp.eu/oil_crops.html>. Acesso em: 30 out. 2016.
- FAN, J. et al. A life cycle assessment of pennycress (*Thlaspi arvense* L.) -derived jet fuel and diesel. **Biomass and Bioenergy**, v. 55, p. 87–100, 2013.
- FINN, M. **2016 Top Markets Report Aircraft Parts. Country Case Study** US Department of Commerce. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <www.trade.gov/industry>.
- FRISCHKNECHT, R. et al. **Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods** Swiss Centre for Life Cycle Inventories. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <http://www.ecoinvent.org/fileadmin/documents/en/03_LCIA-Implementation.pdf>.
- FURIMSKY, E. Hydroprocessing challenges in biofuels production. **Catalysis Today**, v. 217, p. 13–56, 2013.
- GALADIMA, A.; MURAZA, O. Zeolite catalysts in upgrading of bioethanol to fuels range hydrocarbons: A review. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 31, p. 1–14, 2015.
- GAN, H. L. et al. Characterisation of vegetable oils by surface acoustic wave sensing electronic nose. **Food Chemistry**, v. 89, n. 4, p. 507–518, 2005.
- GARCILASSO, V. **Análise entre processos e matérias-primas para a produção de biodiesel**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2014.
- GLOBAL PALM OIL PRODUCTION. **No Title**. Disponível em: <<http://www.globalpalmoilproduction.com/>>. Acesso em: 14 set. 2017.
- GUILLÉN, M. D.; RUIZ, A. Rapid simultaneous determination by proton NMR of unsaturation and composition of acyl groups in vegetable oils. **European Journal of Lipid Science and Technology**, v. 105, n. 11, p. 688–696, 2003.
- GUTIÉRREZ-ANTONIO, C. et al. A review on the production processes of renewable jet fuel. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 79, n. January, p. 709–729, 2017.
- HAN, J. et al. Life-cycle analysis of bio-based aviation fuels. **Bioresource Technology**, v. 150, p. 447–456, 2013.
- HANAOKA, T. et al. Jet fuel synthesis from Fischer-Tropsch product under mild hydrocracking conditions using Pt-loaded catalysts. **Chemical Engineering Journal**, v. 263, p. 178–185, 2015.
- HARI, T. K.; YAAKOB, Z.; BINITHA, N. Aviation biofuel from renewable resources: Routes,

opportunities and challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 1234–1244, 2015.

HILBERS, T. J. et al. Green Diesel from Hydrotreated Vegetable Oil Process Design Study. **Chemical Engineering and Technology**, v. 38, n. 4, p. 651–657, 2015.

HUGHES, J. P. Hydrogenation of fatty oils. **Journal of the American Oil Chemists Society**, v. 30, n. 11, p. 506–515, 1953.

HUMBERT, S. et al. **IMPACT 2002+: User Guide**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://www.pre-sustainability.com/download/DatabaseManualMethods.pdf>>.

HUO, H. et al. Life-Cycle Assessment of Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Soybean-Derived Biodiesel and Renewable Fuels. **Environmental Science & Technology**, v. 43, n. 3, p. 750–756, 2009.

IATA. **Report on Alternative Fuels**. [s.l.: s.n.].

IATA. **IATA Guidance Material for Sustainable Aviation Fuel Management**. [s.l.: s.n.].

IBGE. **Rendimento médio da produção das lavouras permanentes (série encerrada)**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/Tabela/106#resultado>>.

INDEX MUNDI. **Jet Fuel Daily Price**. Disponível em: <<http://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=jet-fuel&months=180>>.

International Air Transport Association. Disponível em: <<http://www.iata.org/pressroom/pr/Pages/2015-11-26-01.aspx>>. Acesso em: 13 out. 2016.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **BIOFUELS FOR AVIATION**. [s.l.: s.n.].

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. **Environmental management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Environmental+management+-+Life+Cycle+assessment+-+Principles+and+framework#0>>.

JĘCZMIONEK, Ł.; PORZYCKA-SEMCZUK, K. Hydrodeoxygenation, decarboxylation and decarbonylation reactions while co-processing vegetable oils over a NiMo hydrotreatment catalyst. Part I: Thermal effects - Theoretical considerations. **Fuel**, v. 131, p. 1–5, 2014.

JOLLIET, O. et al. IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 8, n. 6, p. 324–330, 2003.

KALLIO, P. et al. Renewable jet fuel. n. 26, p. 50–55, 2014.

KARATZOS, S.; VAN DYK, S. Drop-in biofuel production via conventional (lipid/fatty acid) and advanced (biomass) routes. Part I. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, n. 11, p. 344–362, 2017.

KIATKITTIPONG, W. et al. Diesel-like hydrocarbon production from hydroprocessing of relevant refining palm oil. **Fuel Processing Technology**, v. 116, p. 16–26, 2013.

KNOTHE, G. Structure indices in FA chemistry. How relevant is the iodine value? **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 79, n. 9, p. 847–854, 2002.

LANG, A. **The worldwide production of bio-jet fuels**. [s.l.: s.n.].

LI, J. et al. Jet fuel synthesis via Fischer-Tropsch synthesis with varied 1-olefins as additives

using Co/ZrO₂-SiO₂ bimodal catalyst. **Fuel**, v. 171, p. 159–166, 2016.

LI, X.; MUPONDWA, E. Life cycle assessment of camelina oil derived biodiesel and jet fuel in the Canadian Prairies. **Science of the Total Environment**, v. 481, n. 1, p. 17–26, 2014.

LIU, S. et al. Bio-aviation fuel production from hydroprocessing castor oil promoted by the nickel-based bifunctional catalysts. **Bioresource Technology**, v. 183, p. 93–100, 2015.

LOKESH, K. et al. Life cycle greenhouse gas analysis of biojet fuels with a technical investigation into their impact on jet engine performance. **Biomass and Bioenergy**, v. 77, p. 26–44, 2015.

LUO, N. et al. Preparation of Ni₂P/Zr-MCM-41 catalyst and its performance in the hydrodeoxygenation of *Jatropha curcas* oil. **Journal of Fuel Chemistry and Technology**, v. 44, n. 1, p. 76–83, 2016.

MAMEDOVA, T. A. et al. Production of a new generation of diesel fuels by hydrotreating a mixture of petroleum and plant feedstock. **Chemistry and Technology of Fuels and Oils**, v. 46, n. 3, p. 149–153, 2010.

MARZULLO, R. C. M. **Análise de Ecoeficiência dos Óleos Vegetais Oriundos da Soja e Palma , visando a Produção de Biodiesel**. [s.l.: s.n.].

MATSUURA, M. et al. **Life cycle inventories of Brazilian agricultural products: a contribution to the ecoinvent database - ICVAgroBr**. [s.l.: s.n.].

MAWHOOD, R. et al. Production pathways for renewable jet fuel: a review of commercialization status and future prospects. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 6, n. 3, p. 246–256, 2016.

MCWILLIAMS, M. R. Ensuring surety of supply through sustainable aviation fuels. **Air & Space Power Journal**, v. 31, n. 1, p. 81–85, 2017.

MELERO, J. A.; IGLESIAS, J.; GARCIA, A. Biomass as renewable feedstock in standard refinery units. Feasibility, opportunities and challenges. **Energy & Environmental Science**, v. 5, n. 6, p. 7393, 2012.

MILAZZO, M. F. et al. Sustainable soy biodiesel. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 27, p. 806–852, 2013.

NEMECEK, T.; KAGI, T. **Life cycle inventories of Agricultural Production Systems, ecoinvent report No. 15Final report of Ecoinvent V2.0**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <http://www.upe.poli.br/~cardim/PEC/Ecoinvent LCA/ecoinventReports/15_Agriculture.pdf>.

PEARLSON, M. N. **A Techno-economic and environmental assessment of hydroprocessed renewable distillate fuels**. [s.l.: s.n.].

PEREIRA, L.; MACLEAN, H.; SAVILLE, B. Financial analyses of potential biojet fuel production technologies. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 11, p. 665–681, 2017.

PETROBRÁS. **Querosene de Aviação. Informações Técnicas**. [s.l.: s.n.].

PRÉ CONSULTANTS. **SimaPro Database Manual**. [s.l.: s.n.].

PRITCHARD, J. et al. Heterogeneous and homogeneous catalysis for the hydrogenation of carboxylic acid derivatives: history, advances and future directions. **The Royal Society of Chemistry**, v. 3808, n. 44, p. 3808–3833, 2015.

QUEIROZ, A. G. **Biodiesel De Dendê Produzido Na Amazônia**. [s.l.] Universidade Federal

do Pará, 2011.

RADICH, T. **The Flight Paths for Biojet Fuel**. [s.l.: s.n.].

RATHORE, V.; NEWALKAR, B. L.; BADONI, R. P. Processing of vegetable oil for biofuel production through conventional and non-conventional routes. **Energy for Sustainable Development**, v. 31, p. 24–49, 2016.

RENÓ, M. L. G. **Avaliação do Balanço Energético e dos Impactos Ambientais do Processo de Produção de Metanol a partir do Bagaço de Cana-de-açúcar, utilizando a ACV**. [s.l.: s.n.].

RIZATO, M. **O cultivo da soja no oeste do estado do Paraná: contribuição metodológica para a análise espaço-temporal**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista, 2015.

ROCHA, M. H. et al. Life cycle assessment (LCA) for biofuels in Brazilian conditions: A meta-analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 37, p. 435–459, 2014.

SALEM, A. **FUNDAMENTOS DO REFINO DO PETRÓLEO**. [s.l.] Interciencia, 2005.

SATYARTHI, J. K. et al. An overview of catalytic conversion of vegetable oils/fats into middle distillates. **Catalysis Science & Technology**, v. 3, n. 1, p. 70–80, 2013.

SAU, M. et al. Effects of organic nitrogen compounds on hydrotreating and hydrocracking reactions. **Catalysis Today**, v. 109, n. 1–4, p. 112–119, 2005.

SCHMIDT, J. H.; WEIDEMA, B. P. Shift in the Marginal Supply of Vegetable Oil. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 13, n. 3, p. 235–239, 2008.

SEBER, G. et al. Environmental and economic assessment of producing hydroprocessed jet and diesel fuel from waste oils and tallow. **Biomass and Bioenergy**, v. 67, p. 108–118, 2014.

SHONNARD, D.; WILLIAMS, L.; KALNES, T. Camelina-Derived Jet Fuel and Diesel: Sustainable Advanced Biofuels. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, v. 29, n. 30, p. 382–392, 2010.

SILVA, L. N. et al. Biokerosene and green diesel from macauba oils via catalytic deoxygenation over Pd/C. **Fuel**, v. 164, p. 329–338, 2016.

SINHA, A. K. et al. Development of Hydroprocessing Route to Transportation Fuels from Non-Edible Plant-Oils. **Catalysis Surveys from Asia**, v. 17, n. 1, p. 1–13, 2013.

SOUSA, F. P. DE; CARDOSO, C. C.; PASA, V. M. D. Producing hydrocarbons for green diesel and jet fuel formulation from palm kernel fat over Pd / C. **Fuel Processing Technology**, v. 143, p. 35–42, 2016.

SRIFA, A. et al. Production of bio-hydrogenated diesel by catalytic hydrotreating of palm oil over NiMoS₂/Al₂O₃ catalyst. **Bioresource Technology**, v. 158, p. 81–90, 2014.

STEINER, J. J. et al. A Feedstock Readiness Level Tool to Complement the Aviation Industry Fuel Readiness Level Tool. p. 492–503, 2012.

SUGAWARA, E. T. **Comparação dos desempenhos ambientais do b5 etílico de soja e do óleo diesel, por meio da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)**. [s.l.: s.n.].

UBRABIO. **Plataforma Brasileira do Bioquerosene (PBB)**. Disponível em: <http://www.ubrablo.com.br/1891/noticias/plataformabrasileiradobioquerosenepbbempauta_193503/>. Acesso em: 25 ago. 2017.

- UKAEW, S. et al. Estimation of soil carbon change from rotation cropping of rapeseed with wheat in the hydrotreated renewable jet life cycle. v. 20, n. 5, p. 608–622, 2015.
- US ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. **Oil and Petroleum Products**. Disponível em: <https://www.eia.gov/energyexplained/?page=oil_home>. Acesso em: 29 jul. 2017a.
- US ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. **ANALYSIS & PROJECTIONS**. Disponível em: <<https://www.eia.gov/analysis/projection-data.cfm#annualproj>>.
- USEPA. **Regulatory Impact Analysis: Renewable Fuel Standard Program**. [s.l.: s.n.].
- UUSITALO, V. et al. Carbon footprint of renewable diesel from palm oil, jatropha oil and rapeseed oil. **Renewable Energy**, v. 69, p. 103–113, 2014.
- VÁSQUEZ, M. C.; SILVA, E.; CASTILLO, E. 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.
- VERIANSYAH, B. et al. Production of renewable diesel by hydroprocessing of soybean oil: Effect of catalysts. **Fuel**, v. 94, p. 578–585, 2012.
- VERMA, D. et al. Diesel and aviation kerosene with desired aromatics from hydroprocessing of jatropha oil over hydrogenation catalysts supported on hierarchical mesoporous SAPO-11. **Applied Catalysis A: General**, v. 490, n. 1, p. 108–116, 2015.
- VIANNA, F. **Análise de ecoeficiência: Avaliação do desempenho econômico-ambiental do biodiesel e petrodiesel**. [s.l.: s.n.].
- WANG, M.; HUO, H.; ARORA, S. Methods of dealing with co-products of biofuels in life-cycle analysis and consequent results within the U.S. context. **Energy Policy**, v. 39, n. 10, p. 5726–5736, 2011.
- WEIDEMA, B. P. **Market information in life cycle assessment Danish Environmental Protection Agency**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://www.norlca.org/resources/780.pdf>>.
- WEIDEMA, B. P.; SCHMIDT, J. H. Avoiding Allocation in Life Cycle Assessment Revisited. **Journal of Industrial Ecology**, v. 14, n. 2, p. 192–195, 2010.
- WILSON, G. R. et al. Certification of alternative aviation fuels and blend components. **Energy and Fuels**, v. 27, n. 2, p. 962–966, 2013.
- WONG, H. M. **Life-cycle assessment of greenhouse gas emissions from alternative jet fuels**. [s.l.: s.n.].
- WU, X. et al. Production of jet fuel range biofuels by catalytic transformation of triglycerides based oils. **Fuel**, v. 188, p. 205–211, 2017.
- XIU, S.; SHAHBAZI, A. Bio-oil production and upgrading research: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 7, p. 4406–4414, 2012.
- YAN, Q. et al. Catalytic conversion wood syngas to synthetic aviation turbine fuels over a multifunctional catalyst. **Bioresource Technology**, v. 127, p. 281–290, 2013.
- YÁÑEZ, E. **Avaliação do impacto energético e ambiental da cogeração no balanço energético e no ciclo de vida do biodiesel de óleo de palma africana**. [s.l.] Universidade Federal de Itajubá, 2008.
- YÁÑEZ ANGARITA, E. E. et al. The energy balance in the Palm Oil-Derived Methyl Ester

(PME) life cycle for the cases in Brazil and Colombia. **Renewable Energy**, v. 34, n. 12, p. 2905–2913, 2009.

YAO, G. et al. Stochastic techno-economic analysis of alcohol-to-jet fuel production. **Biotechnology for Biofuels**, v. 10, n. 1, p. 18, 2017.

ZACCHERIA, F.; PSARO, R.; RAVASIO, N. Selective hydrogenation of alternative oils: a useful tool for the production of biofuels. **Green Chemistry**, v. 11, n. 4, p. 462, 2009.

ZHANG, C. et al. Recent development in studies of alternative jet fuel combustion: Progress, challenges, and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 54, p. 120–138, 2016.

ZHAO, X. et al. Catalytic cracking of non-edible sunflower oil over ZSM-5 for hydrocarbon bio-jet fuel. **New Biotechnology**, v. 32, n. 2, p. 300–312, 2015.

Apêndice A

INVENTÁRIOS BACKGROUND

Neste apêndice são apresentadas as tabelas dos inventários da produção de várias matérias-primas que representam as condições brasileiras.

Tabela A. 1. Inventário da produção de 1 kg de petróleo (Borges, 2004).

Entradas	Unidade	Produção 1 kg de petróleo (Borges, 2004)
Petróleo	kg	1,03
Gás natural	kg	0,0441
Água	kg	$7,35 \times 10^{-06}$
Bauxita	kg	$3,18 \times 10^{-04}$
Energia não especificada	MJ	2,57
Saídas	Unidade	Produção 1 kg de petróleo (Borges, 2004)
<i>Emissões atmosféricas</i>		
CO ₂	kg	0,228
CO	kg	$2,62 \times 10^{-04}$
C _x H _y - Hidrocarbonetos	kg	$1,56 \times 10^{-03}$
NH ₃	kg	$3,67 \times 10^{-08}$
Metais	kg	$2,17 \times 10^{-07}$
N ₂ O	kg	$8,81 \times 10^{-08}$
NO _x	kg	$3,12 \times 10^{-03}$
SO _x	kg	$4,84 \times 10^{-05}$
H ₂ S	kg	$2,27 \times 10^{-06}$
Material particulado	kg	$1,99 \times 10^{-04}$
COV	kg	$3,77 \times 10^{-06}$
Fuligem	kg	$2,04 \times 10^{-06}$

SO ₂	kg	1,32×10 ⁻⁰³
Aldeído - RCHO	kg	7,34×10 ⁻⁰⁸
CxHy alifáticos insaturados	kg	5,16×10 ⁻⁰⁴
H ₂	kg	6,80×10 ⁻⁰⁶
HCl	kg	7,73×10 ⁻⁰⁶
<i>Efluentes líquidos</i>		
DBO	kg	1,10×10 ⁻⁰⁸
DQO	kg	2,32×10 ⁻⁰⁶
Hidrocarbonetos	kg	4,34×10 ⁻⁰⁷
Íons metálicos	kg	3,98×10 ⁻⁰⁶
Óleos e graxas	kg	1,26×10 ⁻⁰⁷
Sólidos dissolvidos totais	kg	2,33×10 ⁻⁰⁵
Sólidos suspensos totais	kg	1,10×10 ⁻⁰⁸
Cl-	kg	2,17×10 ⁻⁰⁷
Petróleo	kg	3,04×10 ⁻⁰⁵
Fenol	kg	7,73×10 ⁻⁰⁷
<i>Efluentes para o solo</i>		
Resíduos oleosos	kg	3,00×10 ⁻⁰⁴
Resíduos minerais	kg	8,81×10 ⁻⁰⁴
Resíduos sólidos não inertes	kg	2,86×10 ⁻⁰⁶
Escória	kg	7,78×10 ⁻⁰⁶

Tabela A. 2. Inventário da produção de 1kWh de energia elétrica (Coltro, 2003)

Entradas	Unidade	Produção 1 kWh de energia (Coltro, 2003)
Petróleo	kg	4,36×10 ⁻⁰³
Carvão	kg	0,0462
Gás natural	kg	2,74×10 ⁻⁰³
Água	kg	420
Reservas bióticas	kg	0,0175
Urânio	kg	6,48×10 ⁻⁰⁷
Energia não especificada	MJ	5,70×10 ⁻⁰³
Uso do solo	mm ²	900
Saídas	Unidade	Produção 1 kWh de energia (Coltro, 2003)
<i>Emissões atmosféricas</i>		
CO ₂	kg	0,124

CO	kg	$5,38 \times 10^{-04}$
CxHy - Hidrocarbonetos	kg	$2,70 \times 10^{-06}$
Vapor de H ₂ O	kg	0,829
CH ₄	kg	$1,94 \times 10^{-03}$
NH ₃	kg	$2,16 \times 10^{-11}$
Metais	kg	$3,60 \times 10^{-11}$
N ₂ O	kg	$3,96 \times 10^{-05}$
NOX	kg	$2,07 \times 10^{-03}$
COV - exceto metano	kg	$2,62 \times 10^{-05}$
Material particulado	kg	$2,42 \times 10^{-04}$
SO ₂	kg	$4,19 \times 10^{-04}$
HCl	kg	$1,08 \times 10^{-10}$
Radioatividade	kBq	0,0352
<i>Efluentes líquidos</i>		
DBO	kg	$2,52 \times 10^{-07}$
DQO	kg	$4,68 \times 10^{-07}$
Metais pesados	kg	$6,48 \times 10^{-10}$
Hidrocarbonetos	kg	$1,08 \times 10^{-07}$
Ácidos H ⁺	kg	$6,12 \times 10^{-10}$
Óleos e graxas	kg	$5,04 \times 10^{-07}$
Sólidos dissolvidos totais	kg	$1,80 \times 10^{-07}$
Sólidos suspensos totais	kg	$3,60 \times 10^{-07}$
Compostos de enxofre	kg	$1,62 \times 10^{-09}$
Compostos de nitrogênio	kg	$1,62 \times 10^{-08}$
Cl ⁻	kg	$2,16 \times 10^{-10}$
Carbono Orgânico Dissolvido	kg	$1,80 \times 10^{-07}$
Metais	kg	$3,60 \times 10^{-08}$
Radioatividade	kBq	0,0542
<i>Efluentes para o solo</i>		
Resíduos do processo não especificados	kg	0,0385
Resíduo para aterro sanitário	dm ³	0,0481

Tabela A. 3. Produção de 1 kg de diesel (Borges, 2004).

Entradas	Unidade	Produção 1 kg de diesel (Borges, 2004)
Petróleo	kg	1,03
Gás natural	kg	0,0439
Água	kg	$7,34 \times 10^{-03}$
Bauxita	kg	$3,17 \times 10^{-04}$
Energia não especificada	MJ	2,56
Saídas	Unidade	Produção 1 kg de óleo diesel (Borges, 2004)
<i>Emissões atmosféricas</i>		
CO ₂	kg	0,193
CO	kg	$2,75 \times 10^{-04}$
C _x H _y - Hidrocarbonetos	kg	$1,55 \times 10^{-03}$
CH ₄	kg	$3,78 \times 10^{-05}$
NH ₃	kg	$3,42 \times 10^{-08}$
Metais	kg	$2,02 \times 10^{-07}$
N ₂ O	kg	$8,21 \times 10^{-08}$
NO _x	kg	$3,04 \times 10^{-03}$
SO _x	kg	$5,31 \times 10^{-05}$
Metil mercaptana	kg	$1,17 \times 10^{-08}$
H ₂ S	kg	$2,45 \times 10^{-06}$
COV - exceto metano	kg	$9,50 \times 10^{-04}$
Material particulado	kg	$4,84 \times 10^{-06}$
Petróleo	kg	$2,67 \times 10^{-04}$
COV	kg	$3,51 \times 10^{-06}$
Fuligem	kg	$1,90 \times 10^{-06}$
Material particulado suspenso	kg	$2,04 \times 10^{-04}$
SO ₂	kg	$1,24 \times 10^{-03}$
Aldeído - RCHO	kg	$6,85 \times 10^{-08}$
C _x H _y alifáticos insaturados	kg	$5,11 \times 10^{-04}$
H ₂	kg	$6,72 \times 10^{-06}$
HCl	kg	$7,73 \times 10^{-06}$
<i>Efluentes líquidos</i>		
DBO	kg	$1,03 \times 10^{-08}$
DQO	kg	$2,29 \times 10^{-06}$
Hidrocarbonetos	kg	$4,05 \times 10^{-07}$
Íons metálicos	kg	$3,97 \times 10^{-06}$
Óleos e graxas	kg	$7,22 \times 10^{-06}$
Sólidos dissolvidos totais	kg	$2,17 \times 10^{-05}$
Sólidos suspensos totais	kg	$1,03 \times 10^{-08}$
Na ⁺	kg	$1,63 \times 10^{-05}$

Cl-	kg	$2,45 \times 10^{-05}$
Petróleo	kg	$3,03 \times 10^{-05}$
H ₂	kg	$2,46 \times 10^{-05}$
Fenol	kg	$7,73 \times 10^{-07}$
<i>Efluentes para o solo</i>		
Resíduos oleosos	kg	$2,80 \times 10^{-04}$
Resíduos minerais	kg	$8,79 \times 10^{-04}$
Resíduos sólidos não inertes	kg	$2,67 \times 10^{-06}$
Escória	kg	$7,77 \times 10^{-06}$

Tabela A. 4. Produção de 1kg de gás natural (Ribeiro, 2009).

Entradas	Unidade	Produção 1 kg de gás natural (Ribeiro, 2009)
Gás natural	kg	1,03
Água	kg	0,0197
Energia (gás natural)	MJ	$4,34 \times 10^{-03}$
Saídas	Unidade	Produção 1 kg de gás natural (Ribeiro, 2009)
<i>Emissões atmosféricas</i>		
CO ₂	kg	0,0836
CO	kg	$2,82 \times 10^{-07}$
C _x H _y - Hidrocarbonetos	kg	$1,83 \times 10^{-07}$
CH ₄	kg	$1,50 \times 10^{-03}$
NO _x	kg	$2,67 \times 10^{-04}$
SO _x	kg	$9,65 \times 10^{-04}$
H ₂ S	kg	$3,15 \times 10^{-10}$
Material particulado	kg	$1,63 \times 10^{-05}$
<i>Efluentes líquidos</i>		
Compostos de enxofre	kg	$1,63 \times 10^{-07}$
Compostos de nitrogênio	kg	$1,17 \times 10^{-09}$
<i>Efluentes para o solo</i>		
Enxofre	kg	$2,02 \times 10^{-08}$
<i>Emissões energéticas</i>		
Vapor	MJ	$1,08 \times 10^{-03}$

Tabela A. 5. Produção de 1 kg de óleo combustível (Borges, 2004).

Entradas	Unidade	Produção 1 kg de óleo combustível (Borges, 2004)
Petróleo	kg	0,981
Gás natural	kg	0,0417
Água	kg	$6,97 \times 10^{-03}$
Bauxita	kg	$3,01 \times 10^{-04}$
Energia não especificada	MJ	2,43
Uso do solo	mm ²	15,4
Saídas	Unidade	Produção 1 kg de óleo combustível (Borges, 2004)
<i>Emissões atmosféricas</i>		
CO ₂	kg	0,183
CO	kg	$2,61 \times 10^{-04}$
C _x H _y - Hidrocarbonetos	kg	$1,47 \times 10^{-03}$
CH ₄	kg	$3,59 \times 10^{-05}$
NH ₃	kg	$3,25 \times 10^{-08}$
Metais	kg	$1,92 \times 10^{-07}$
N ₂ O	kg	$7,79 \times 10^{-08}$
NO _x	kg	$2,89 \times 10^{-03}$
SO _x	kg	$5,04 \times 10^{-05}$
Metil mercaptana	kg	$1,10 \times 10^{-08}$
H ₂ S	kg	$2,33 \times 10^{-06}$
COV - exceto metano	kg	$9,10 \times 10^{-04}$
Material particulado	kg	$4,59 \times 10^{-06}$
Petróleo	kg	$2,53 \times 10^{-04}$
COV	kg	$3,33 \times 10^{-06}$
Fuligem	kg	$1,81 \times 10^{-06}$
Material particulado suspenso	kg	$1,93 \times 10^{-04}$
SO ₂	kg	$1,18 \times 10^{-03}$
Aldeído - RCHO	kg	$6,50 \times 10^{-08}$
C _x H _y alifáticos insaturados	kg	$4,85 \times 10^{-04}$
H ₂	kg	$6,38 \times 10^{-06}$
HCl	kg	$7,34 \times 10^{-06}$
<i>Efluentes líquidos</i>		
DBO	kg	$9,75 \times 10^{-09}$
DQO	kg	$2,18 \times 10^{-06}$
Hidrocarbonetos	kg	$3,84 \times 10^{-07}$
Íons metálicos	kg	$3,77 \times 10^{-06}$
Óleos e graxas	kg	$6,85 \times 10^{-06}$
Sólidos dissolvidos totais	kg	$2,06 \times 10^{-05}$
Sólidos suspensos totais	kg	$9,75 \times 10^{-09}$

Na+	kg	$1,54 \times 10^{-05}$
Cl-	kg	$2,33 \times 10^{-05}$
Petróleo	kg	$2,88 \times 10^{-05}$
H ₂	kg	$2,33 \times 10^{-05}$
Fenol	kg	$7,34 \times 10^{-07}$
<i>Efluentes para o solo</i>		
Resíduos oleosos	kg	$2,66 \times 10^{-04}$
Resíduos minerais	kg	$8,34 \times 10^{-04}$
Resíduos sólidos não inertes	kg	$2,54 \times 10^{-06}$
Escória	kg	$7,38 \times 10^{-06}$

Tabela A. 6. Produção de 1 kg de P₂O₅ (Viana, 2008).

Entradas	Unidade	Produção 1 kg de P₂O₅ (Viana, 2008)
Petróleo	kg	$4,99 \times 10^{-03}$
Carvão	kg	0,0529
Gás natural	kg	$3,13 \times 10^{-03}$
Água	kg	533
Urânio	kg	$7,24 \times 10^{-07}$
Rocha fosfática bruta	kg	25,5
Enxofre elementar	kg	0,716
Energia não especificada	MJ	6,53
Energia de combustível fóssil	MJ	1,64
Saídas	Unidade	Produção 1 kg de Fósforo (Viana, 2008)
<i>Emissões atmosféricas</i>		
CO ₂	kg	0,284
CO	kg	$7,25 \times 10^{-04}$
C _x H _y - Hidrocarbonetos	kg	$3,43 \times 10^{-04}$
Vapor de H ₂ O	kg	$9,49 \times 10^{-04}$
CH ₄	kg	$2,26 \times 10^{-04}$
NH ₃	kg	$2,47 \times 10^{-11}$
Metais	kg	$4,12 \times 10^{-11}$
N ₂ O	kg	$4,53 \times 10^{-05}$
NO _x	kg	$5,49 \times 10^{-03}$
SO _x	kg	$3,42 \times 10^{-03}$
COV - exceto metano	kg	$3,00 \times 10^{-05}$
Material particulado	kg	$4,77 \times 10^{-04}$

HF	kg	$6,00 \times 10^{-05}$
Radioatividade	kBq	0,0403
<i>Efluentes líquidos</i>		
DBO	kg	$2,88 \times 10^{-07}$
DQO	kg	$5,36 \times 10^{-07}$
Metais pesados	kg	$7,42 \times 10^{-10}$
Hidrocarbonetos	kg	$1,24 \times 10^{-07}$
Ácidos H+	kg	$7,00 \times 10^{-10}$
Óleos e graxas	kg	$5,77 \times 10^{-07}$
Sólidos dissolvidos totais	kg	42,3
Sólidos suspensos totais	kg	$4,12 \times 10^{-07}$
Compostos de enxofre	kg	$1,85 \times 10^{-09}$
Compostos de nitrogênio	kg	$1,85 \times 10^{-08}$
Cl-	kg	$2,47 \times 10^{-10}$
Metais	kg	$4,12 \times 10^{-08}$
Fosfato	kg	0,0109
Radioatividade	kBq	0,0620
<i>Efluentes para o solo</i>		
Resíduos do processo não especificados	kg	0,0441
Catalisador não usado	kg	0,05
Resíduos no solo	dm ³	0,0551
Magnetita	kg	4,18
Lama	kg	3,69
Resíduos não apatíticos	kg	12,6

Tabela A. 7. Produção de 1 kg de K₂O (Viana, 2008).

Entradas	Unidade	Produção 1 kg K ₂ O (Viana, 2008)
Petróleo	kg	0,150
Carvão	kg	$2,02 \times 10^{-04}$
Gás natural	kg	$5,72 \times 10^{-03}$
Combustíveis renováveis	kg	$4,36 \times 10^{-05}$
Água	kg	3,44
Urânio	kg	$4,25 \times 10^{-09}$
Rocha potássica (silvinita)	kg	1,89
Energia não especificada	MJ	0,0251
Energia (gás natural)	MJ	3,76

Saídas	Unidade	Produção 1 kg K ₂ O (Viana, 2008)
<i>Emissões atmosféricas</i>		
CO ₂	kg	0,946
CO	kg	2,03×10 ⁻⁰³
C _x H _y - Hidrocarbonetos	kg	1,06×10 ⁻⁰³
Vapor de H ₂ O	kg	3,43×10 ⁻⁰⁵
CH ₄	kg	1,80×10 ⁻⁰³
NH ₃	kg	9,08×10 ⁻¹⁴
Metais	kg	2,41×10 ⁻¹⁰
N ₂ O	kg	1,66×10 ⁻⁰⁷
NO _x	kg	4,75×10 ⁻⁰³
SO _x	kg	3,63×10 ⁻⁰³
Metil mercaptana	kg	1,34×10 ⁻⁰⁹
H ₂ S	kg	2,81×10 ⁻⁰⁸
COV - exceto metano	kg	1,29×10 ⁻⁰⁴
Material particulado	kg	2,07×10 ⁻⁰³
Radioatividade	kBq	1,48×10 ⁻⁰⁴
<i>Efluentes líquidos</i>		
DBO	kg	2,45×10 ⁻⁰⁵
DQO	kg	3,77×10 ⁻⁰⁵
Metais pesados	kg	6,24×10 ⁻¹⁰
Hidrocarbonetos	kg	2,66×10 ⁻⁰⁷
Ácidos H ⁺	kg	2,57×10 ⁻¹²
Efluentes líquidos não especificados	kg	4,33×10 ⁻⁰⁹
Água residual	kg	4,20×10 ⁻⁰⁷
Íons metálicos	kg	1,21×10 ⁻⁰⁹
Óleos e graxas	kg	2,08×10 ⁻⁰⁶
Sólidos dissolvidos totais	kg	7,57×10 ⁻¹⁰
Sólidos suspensos totais	kg	1,43×10 ⁻⁰⁵
Compostos de enxofre	kg	0,0125
Compostos de nitrogênio	kg	6,00×10 ⁻⁰⁷
Na ⁺	kg	0,0736
Cl ⁻	kg	0,126
Metais	kg	1,51×10 ⁻¹⁰
Potássio (K ⁺)	kg	1,61×10 ⁻⁰³
Cálcio (Ca ²⁺)	kg	2,09×10 ⁻⁰³
Magnésio	kg	0,0121
Radioatividade	kBq	2,28×10 ⁻⁰⁴
<i>Efluentes para o solo</i>		
Resíduos do processo não especificados	kg	1,62×10 ⁻⁰⁴
Resíduos oleosos	kg	3,94×10 ⁻⁰⁵
Resíduos minerais	kg	4,58

Resíduos sólidos não inertes	kg	$5,30 \times 10^{-07}$
Resíduos no solo	dm ³	$2,02 \times 10^{-04}$
<i>Emissões energéticas</i>		
Energia térmica	MJ	$1,25 \times 10^{-04}$

Tabela A. 8. Produção de 1 kg de uréia (Ribeiro, 2009).

Entradas	Unidade	Produção 1 kg de ureia (Ribeiro, 2009)
Petróleo	kg	0,218
Carvão	kg	0,0157
Gás natural	kg	0,301
Combustíveis renováveis	kg	$6,36 \times 10^{-05}$
Água	kg	142
Ar	kg	$3,87 \times 10^{-03}$
Energia elétrica	MJ	1,23
Vapor	MJ	4,79
Energia não especificada	MJ	1,94
Energia (gás natural)	MJ	4,45
Saídas	Unidade	Produção 1 kg de ureia (Ribeiro, 2009)
<i>Emissões atmosféricas</i>		
CO ₂	kg	0,4,
CO	kg	$3,56 \times 10^{-04}$
C _x H _y - Hidrocarbonetos	kg	$1,48 \times 10^{-05}$
Vapor de H ₂ O	kg	$3,27 \times 10^{-04}$
CH ₄	kg	$9,91 \times 10^{-04}$
NH ₃	kg	$7,33 \times 10^{-12}$
Metais	kg	$2,21 \times 10^{-10}$
N ₂ O	kg	$1,35 \times 10^{-05}$
NO _x	kg	$2,38 \times 10^{-03}$
SO _x	kg	$5,48 \times 10^{-04}$
Metil mercaptana	kg	$1,96 \times 10^{-09}$
H ₂ S	kg	$5,67 \times 10^{-06}$
COV - exceto metano	kg	$1,01 \times 10^{-03}$
Material particulado	kg	$1,33 \times 10^{-03}$
<i>Efluentes líquidos</i>		
DBO	kg	$6,96 \times 10^{-06}$

DQO	kg	$4,05 \times 10^{-05}$
Metais pesados	kg	$1,13 \times 10^{-09}$
Hidrocarbonetos	kg	$4,21 \times 10^{-07}$
Ácidos H+	kg	$2,08 \times 10^{-10}$
Efluentes líquidos não especificados	kg	$6,31 \times 10^{-09}$
Água residual	kg	$6,13 \times 10^{-07}$
Íons metálicos	kg	$1,33 \times 10^{-08}$
Óleos e graxas	kg	$3,20 \times 10^{-06}$
Sólidos dissolvidos totais	kg	$6,13 \times 10^{-08}$
Sólidos suspensos totais	kg	$2,09 \times 10^{-05}$
Compostos de enxofre	kg	$4,42 \times 10^{-08}$
Compostos de nitrogênio	kg	$2,24 \times 10^{-04}$
Na+	kg	$3,19 \times 10^{-06}$
Cl-	kg	$4,75 \times 10^{-06}$
<i>Efluentes para o solo</i>		
Resíduos do processo não especificados	kg	0,0131
Resíduos oleosos	kg	$3,41 \times 10^{-05}$
Enxofre	kg	$5,39 \times 10^{-09}$
Catalisador não usado	kg	$1,12 \times 10^{-04}$
<i>Emissões energéticas</i>		
Vapor	MJ	0,811
Energia térmica	MJ	$5,76 \times 10^{-03}$

Tabela A. 9. Produção de 1 kg de H₃PO₄ (Kulay, 2004).

Entradas	Unidade	Produção 1 kg de H ₃ PO ₄ (Kulay, 2004)
Petróleo	kg	$1,92 \times 10^{-04}$
Carvão	kg	$1,93 \times 10^{-04}$
Gás natural	kg	$1,66 \times 10^{-05}$
Combustíveis renováveis	kg	$3,81 \times 10^{-09}$
Água	kg	29,4
Ar	kg	7,22
Urânio	kg	$2,70 \times 10^{-09}$
Rocha fosfática bruta	kg	10,6
Enxofre elementar	kg	0,479
Sal marinho	kg	$1,80 \times 10^{-03}$
Energia elétrica	MJ	0,510
Vapor	MJ	10,3

Energia não especificada	MJ	0,0238
Energia (gás natural)	MJ	0,738
Saídas	Unidade	Produção 1 kg de H₃PO₄ (Kulay, 2004)
<i>Emissões atmosféricas</i>		
CO ₂	kg	0,02
CO	kg	2,69×10 ⁻⁰⁶
CxHy - Hidrocarbonetos	kg	2,56×10 ⁻⁰⁷
Vapor de H ₂ O	kg	3,49×10 ⁻⁰⁶
CH ₄	kg	1,14×10 ⁻⁰⁶
NH ₃	kg	8,98×10 ⁻¹⁴
Metais	kg	3,76×10 ⁻¹²
N ₂ O	kg	1,66×10 ⁻⁰⁷
NO _x	kg	1,14×10 ⁻⁰⁵
SO _x	kg	3,86×10 ⁻⁰³
Metil mercaptana	kg	1,17×10 ⁻¹²
H ₂ S	kg	2,45×10 ⁻¹¹
COV - exceto metano	kg	2,33×10 ⁻⁰⁷
Material particulado	kg	1,64×10 ⁻⁰³
H ₂	kg	9,74×10 ⁻⁰⁸
Cl ₂	kg	2,57×10 ⁻⁰⁸
Diclorometano	kg	3,60×10 ⁻⁰⁸
Fluoretos	kg	2,50×10 ⁻⁰⁴
Radioatividade	kBq	1,46×10 ⁻⁰⁴
<i>Efluentes líquidos</i>		
DBO	kg	3,70×10 ⁻⁰⁴
DQO	kg	3,03×10 ⁻⁰⁶
Metais pesados	kg	3,24×10 ⁻¹²
Hidrocarbonetos	kg	7,48×10 ⁻¹⁰
Ácidos H+	kg	2,55×10 ⁻¹²
Efluentes líquidos não especificados	kg	3,78×10 ⁻¹²
Água residual	kg	3,66×10 ⁻¹⁰
Íons metálicos	kg	1,81×10 ⁻¹¹
Óleos e graxas	kg	2,10×10 ⁻⁰⁹
Sólidos dissolvidos totais	kg	7,50×10 ⁻¹⁰
Sólidos suspensos totais	kg	1,40×10 ⁻⁰⁸
Compostos de enxofre	kg	6,75×10 ⁻¹²
Compostos de nitrogênio	kg	7,10×10 ⁻¹¹
Na+	kg	1,91×10 ⁻⁰⁹
Cl-	kg	8,01×10 ⁻⁰⁹
Metais	kg	1,50×10 ⁻¹⁰
Cálcio (Ca+2)	kg	5,90×10 ⁻⁰⁵
Magnésio	kg	2,50×10 ⁻⁰⁶

Fosfato	kg	$5,70 \times 10^{-08}$
Mercúrio	kg	$2,93 \times 10^{-10}$
Alumínio (Al+3)	kg	$1,60 \times 10^{-06}$
Ferro (Fe+3)	kg	$1,70 \times 10^{-06}$
H ₂ SiF ₆ (Ácido fluorsilícico)	kg	$4,20 \times 10^{-07}$
Radioatividade	kBq	$2,26 \times 10^{-04}$
<i>Efluentes para o solo</i>		
Resíduos do processo não especificados	kg	$1,60 \times 10^{-04}$
Resíduos oleosos	kg	$5,90 \times 10^{-07}$
Enxofre	kg	0,0110
Catalisador não usado	kg	0,0842
Resíduos sólidos não inertes	kg	$7,95 \times 10^{-09}$
Resíduos no solo	dm ³	$2,01 \times 10^{-04}$
Magnetita	kg	$1,34 \times 10^{-03}$
Lama	kg	$1,41 \times 10^{-03}$
Resíduos não apatíticos	kg	$4,51 \times 10^{-03}$
Fosfato	kg	0,0128
Sulfato de cálcio	kg	2,51
SiO ₂	kg	0,0255
Al ₂ O ₃	kg	$2,38 \times 10^{-03}$
Fe ₂ O ₃	kg	$1,19 \times 10^{-03}$
Flúor	kg	0,0245
<i>Emissões energéticas</i>		
Energia térmica	MJ	$1,09 \times 10^{-07}$

Tabela A. 10. Produção de 1 kg de hidróxido de sódio (Viana, 2008).

Entradas	Unidade	Produção 1 kg de hidróxido de sódio (Viana, 2008)
Petróleo	kg	0,0899
Carvão	kg	0,0699
Gás natural	kg	$6,63 \times 10^{-03}$
Combustíveis renováveis	kg	$1,82 \times 10^{-06}$
Água	kg	635
Urânio	kg	$9,82 \times 10^{-07}$
Sal marinho	kg	0,863
Energia não especificada	MJ	8,63

Saídas	Unidade	Produção 1 kg de hidróxido de sódio (Viana, 2008)
<i>Emissões atmosféricas</i>		
CO ₂	kg	0,347
CO	kg	1,06×10 ⁻⁰³
CxHy - Hidrocarbonetos	kg	1,21×10 ⁻⁰⁴
Vapor de H ₂ O	kg	1,27×10 ⁻⁰³
CH ₄	kg	4,53×10 ⁻⁰⁴
NH ₃	kg	3,26×10 ⁻¹¹
Metais	kg	1,78×10 ⁻⁰⁹
N ₂ O	kg	6,06×10 ⁻⁰⁵
NO _x	kg	4,46×10 ⁻⁰³
SO _x	kg	1,99×10 ⁻⁰³
Metil mercaptana	kg	5,60×10 ⁻¹⁰
H ₂ S	kg	1,17×10 ⁻⁰⁸
COV - exceto metano	kg	9,90×10 ⁻⁰⁵
Material particulado	kg	3,89×10 ⁻⁰⁴
H ₂	kg	4,66×10 ⁻⁰⁵
Cl ₂	kg	1,23×10 ⁻⁰⁵
Diclorometano	kg	1,72×10 ⁻⁰⁵
Radioatividade	kBq	0,0531
<i>Efluentes líquidos</i>		
DBO	kg	2,26×10 ⁻⁰⁶
DQO	kg	1,23×10 ⁻⁰⁵
Metais pesados	kg	1,24×10 ⁻⁰⁹
Hidrocarbonetos	kg	3,06×10 ⁻⁰⁷
Ácidos H ⁺	kg	9,25×10 ⁻¹⁰
Efluentes líquidos não especificados	kg	1,81×10 ⁻⁰⁹
Água residual	kg	1,75×10 ⁻⁰⁷
Íons metálicos	kg	8,65×10 ⁻⁰⁹
Óleos e graxas	kg	7,62×10 ⁻⁰⁷
Sólidos dissolvidos totais	kg	2,72×10 ⁻⁰⁷
Sólidos suspensos totais	kg	6,50×10 ⁻⁰⁶
Compostos de enxofre	kg	2,45×10 ⁻⁰⁹
Compostos de nitrogênio	kg	2,62×10 ⁻⁰⁸
Na ⁺	kg	9,15×10 ⁻⁰⁷
Cl ⁻	kg	3,83×10 ⁻⁰⁶
Metais	kg	5,44×10 ⁻⁰⁸
Mercúrio	kg	1,40×10 ⁻⁰⁷
Radioatividade	kBq	0,0821
<i>Efluentes para o solo</i>		
Resíduos do processo não especificados	kg	0,0583

Resíduos oleosos	kg	$2,82 \times 10^{-04}$
Resíduos sólidos não inertes	kg	$3,80 \times 10^{-06}$
Resíduos no solo	dm ³	0,0728
<i>Emissões energéticas</i>		
Energia térmica	MJ	$5,21 \times 10^{-05}$

Tabela A. 11. Produção de 1 MJ de vapor a partir do diesel.

Entradas	Unidade	Produção 1 MJ de vapor a partir do diesel
Petróleo	kg	0,0243
Gás natural	kg	$1,04 \times 10^{-03}$
Água	kg	$1,73 \times 10^{-04}$
Bauxita	kg	$7,48 \times 10^{-06}$
Energia não especificada	MJ	0,0604
Uso do solo	mm ²	0,382
Saídas	Unidade	Produção 1 MJ de vapor a partir do diesel
<i>Emissões atmosféricas</i>		
CO ₂	kg	0,0782
CO	kg	$4,56 \times 10^{-04}$
CxHy - Hidrocarbonetos	kg	$3,66 \times 10^{-05}$
CH ₄	kg	$5,89 \times 10^{-06}$
NH ₃	kg	$8,07 \times 10^{-10}$
Metais	kg	$4,77 \times 10^{-09}$
N ₂ O	kg	$6,00 \times 10^{-06}$
NO _x	kg	$1,74 \times 10^{-03}$
SO _x	kg	$2,01 \times 10^{-04}$
Metil mercaptana	kg	$2,76 \times 10^{-10}$
H ₂ S	kg	$5,78 \times 10^{-08}$
COV - exceto metano	kg	$6,74 \times 10^{-05}$
Material particulado	kg	$1,70 \times 10^{-04}$
Petróleo	kg	$6,30 \times 10^{-06}$
COV	kg	$8,28 \times 10^{-08}$
Fuligem	kg	$4,48 \times 10^{-08}$
Material particulado suspenso	kg	$4,81 \times 10^{-06}$
SO ₂	kg	$2,93 \times 10^{-05}$
Aldeído - RCHO	kg	$1,62 \times 10^{-09}$
CxHy alifáticos insaturados	kg	$1,21 \times 10^{-05}$

H ₂	kg	1,59×10 ⁻⁰⁷
HCl	kg	1,82×10 ⁻⁰⁷
Benzeno	kg	2,00×10 ⁻⁰⁸
Benzopireno	kg	1,00×10 ⁻¹⁰
<i>Efluentes líquidos</i>		
DBO	kg	2,43×10 ⁻¹⁰
DQO	kg	5,40×10 ⁻⁰⁸
Hidrocarbonetos	kg	9,56×10 ⁻⁰⁹
Íons metálicos	kg	9,37×10 ⁻⁰⁸
Óleos e graxas	kg	1,70×10 ⁻⁰⁷
Sólidos dissolvidos totais	kg	5,12×10 ⁻⁰⁷
Sólidos suspensos totais	kg	2,43×10 ⁻¹⁰
Na+	kg	3,85×10 ⁻⁰⁷
Cl-	kg	5,78×10 ⁻⁰⁷
Petróleo	kg	7,15×10 ⁻⁰⁷
H ₂	kg	5,81×10 ⁻⁰⁷
Fenol	kg	1,82×10 ⁻⁰⁸
<i>Efluentes para o solo</i>		
Resíduos oleosos	kg	6,61×10 ⁻⁰⁶
Resíduos minerais	kg	2,07×10 ⁻⁰⁵
Resíduos sólidos não inertes	kg	6,30×10 ⁻⁰⁸
Escória	kg	1,83×10 ⁻⁰⁷
<i>Emissões energéticas</i>		
Energia térmica	MJ	1,07

Tabela A. 12. Produção de 1 MJ de vapor a partir do gás natural.

Entradas	Unidade	Produção 1 MJ de vapor a partir do gás natural
Gás natural	kg	0,0240
Energia elétrica	kg	3,99×10 ⁻⁰³
Saídas	Unidade	Produção 1 MJ de vapor a partir do gás natural
<i>Emissões atmosféricas</i>		
CO ₂	kg	0,0560
CO	kg	2,10×10 ⁻⁰⁶

CH ₄	kg	2,00×10 ⁻⁰⁶
N ₂ O	kg	1,00×10 ⁻⁰⁷
NO _x	kg	1,79×10 ⁻⁰⁵
Material particulado	kg	2,00×10 ⁻⁰⁷
SO ₂	kg	5,50×10 ⁻⁰⁷
Mercúrio	kg	3,00×10 ⁻¹¹
Acetaldeído	kg	1,01×10 ⁻⁰⁹
Ácido acético	kg	1,50×10 ⁻⁰⁷
Benzeno	kg	4,00×10 ⁻⁰⁷
Benzopireno	kg	1,00×10 ⁻¹¹
Butano	kg	7,00×10 ⁻⁰⁷
Dioxinas	kg	3,00×10 ⁻¹⁷
Formaldeído	kg	1,00×10 ⁻⁰⁷
PAH	kg	1,00×10 ⁻⁰⁸
Pentano	kg	1,20×10 ⁻⁰⁶
Propano	kg	2,00×10 ⁻⁰⁷
Ácido propiônico	kg	2,00×10 ⁻⁰⁸
Tolueno	kg	2,00×10 ⁻⁰⁷
<i>Emissões energéticas</i>		
Energia térmica	MJ	1,10

Tabela A. 13. Produção de 1000 kg de calcário (Queiroz, 2011).

Entradas	Unidade	Produção 1000 kg de calcário (Viana, 2008)
Petróleo	kg	1,45
Carvão	kg	0,302
Gás natural	kg	0,0721
Combustíveis renováveis	kg	4,14×10 ⁻⁰⁴
Água	kg	2740
Urânio	kg	4,25×10 ⁻⁰⁶
Rocha metamórfica	kg	1000
Materiais secundários	kg	0,0212
Energia	GJ	0,0373
Energia explosivos	GJ	6,16×10 ⁻⁰⁴
Saídas	Unidade	Produção 1000 kg de calcário (Viana, 2008)
<i>Emissões atmosféricas</i>		
CO ₂	kg	4,61

CO	kg	0,0207
CxHy - Hidrocarbonetos	kg	$4,55 \times 10^{-03}$
Vapor de H ₂ O	kg	$5,72 \times 10^{-03}$
CH ₄	kg	$4,85 \times 10^{-03}$
NH ₃	kg	$1,41 \times 10^{-10}$
Metais	kg	$2,53 \times 10^{-09}$
N ₂ O	kg	$3,57 \times 10^{-04}$
NO _x	kg	0,0610
SO _x	kg	0,0103
Metil mercaptana	kg	$1,28 \times 10^{-08}$
H ₂ S	kg	$2,67 \times 10^{-07}$
COV - exceto metano	kg	$1,40 \times 10^{-03}$
Material particulado	kg	0,165
Radioatividade	kBq	0,230
<i>Efluentes líquidos</i>		
DBO	kg	$4,43 \times 10^{-05}$
DQO	kg	$2,66 \times 10^{-04}$
Íons metálicos	kg	$1,15 \times 10^{-08}$
Hidrocarbonetos	kg	$3,23 \times 10^{-06}$
Ácidos H ⁺	kg	$4,00 \times 10^{-09}$
Óleo não especificado	kg	$1,98 \times 10^{-05}$
Água residual	kg	$3,99 \times 10^{-06}$
Metais pesados não especificados	kg	$1,01 \times 10^{-08}$
Óleos e graxas	kg	$3,30 \times 10^{-06}$
Sólidos dissolvidos totais	kg	$1,18 \times 10^{-06}$
Sólidos suspensos totais	kg	$1,38 \times 10^{-04}$
Compostos de enxofre	kg	$1,06 \times 10^{-08}$
Compostos de nitrogênio	kg	$1,08 \times 10^{-07}$
Na ⁺	kg	$2,08 \times 10^{-05}$
Cloretos	kg	$3,11 \times 10^{-05}$
Metais	kg	$2,35 \times 10^{-07}$
Efluentes líquidos não especificados	kg	$1,01 \times 10^{-08}$
Radioatividade	kBq	0,355
<i>Efluentes para o solo</i>		
Resíduos sólidos não especificados		$4,44 \times 10^{-10}$
Resíduos oleosos	kg	$3,74 \times 10^{-04}$
Resíduos sólidos não inertes	kg	$5,04 \times 10^{-06}$
Resíduos no solo	dm ³	0,315
Resíduos processuais	kg	0,252
<i>Emissões energéticas</i>		
Energia	GJ	$1,19 \times 10^{-06}$

Tabela A. 14. Produção de 1 kg de hexano (Altamirano, 2013).

Entradas	Unidade	Produção 1 kg de hexano (Altamirano, 2013)
Petróleo	kg	1,11
Carvão	kg	$1,06 \times 10^{-04}$
Gás natural	kg	0,0425
Urânio	kg	$1,21 \times 10^{-08}$
Água	kg	2,36
Reservas bióticas	kg	$1,91 \times 10^{-05}$
Materiais secundários	MJ	$3,54 \times 10^{-06}$
Saídas	Unidade	Produção 1 kg de hexano (Altamirano, 2013)
<i>Emissões atmosféricas</i>		
CO ₂	kg	0,402
CO	kg	$3,91 \times 10^{-04}$
C _x H _y - Hidrocarbonetos	kg	$1,57 \times 10^{-05}$
CH ₄	kg	$2,62 \times 10^{-03}$
NH ₃	kg	$2,36 \times 10^{-14}$
N ₂ O	kg	$5,44 \times 10^{-07}$
NO _x	kg	$2,03 \times 10^{-04}$
SO _x	kg	$4,24 \times 10^{-04}$
H ₂ S	kg	$2,09 \times 10^{-07}$
Material particulado	kg	$1,38 \times 10^{-04}$
COV - exceto metano	kg	$9,60 \times 10^{-04}$
HCl	kg	$8,90 \times 10^{-09}$
Metil mercaptano	kg	$1,00 \times 10^{-08}$
Radioatividade para o ar	kBq	$3,84 \times 10^{-05}$
<i>Efluentes líquidos</i>		
DBO	kg	$3,34 \times 10^{-05}$
DQO	kg	$2,06 \times 10^{-04}$
Hidrocarbonetos	kg	$1,98 \times 10^{-06}$
Compostos de nitrogênio	kg	$1,77 \times 10^{-11}$
Óleos e graxas	kg	$5,50 \times 10^{-10}$
Sólidos dissolvidos totais	kg	$1,97 \times 10^{-10}$
Sólidos suspensos totais	kg	$1,06 \times 10^{-04}$
Na ⁺	kg	$1,63 \times 10^{-05}$
Cl ⁻	kg	$2,43 \times 10^{-05}$
Compostos de enxofre	kg	$1,77 \times 10^{-12}$
Radioatividade para a água	kBq	$5,94 \times 10^{-05}$
<i>Efluentes para o solo</i>		
Resíduos oleosos	kg	$2,91 \times 10^{-04}$

Resíduos no solo	kg	$5,27 \times 10^{-05}$
Resíduos processuais	kg	$4,21 \times 10^{-05}$
Resíduos sólidos não inertes	kg	$3,92 \times 10^{-06}$
Resíduos não especificados	kg	$3,48 \times 10^{-10}$