



Lucas Pereira Caetano

**Avaliação do Ciclo de Vida Simplificada
para Três Tecnologias do Ciclo Diesel**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Administração de Empresas, do Departamento de Administração da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Marcos Cohen

Rio de Janeiro
abril de 2024



Lucas Pereira Caetano

**Avaliação do Ciclo de Vida Simplificada
para Três Tecnologias do Ciclo Diesel**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Administração de Empresas da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Marcos Cohen

Orientador

PUC-Rio

Prof^a. Renata Peregrino de Brito

PUC - Rio

Prof^a. Patricia Calicchio Berardi

Universidade do Porto

Rio de Janeiro, 16 de abril de 2024

Todos os direitos reservados. A reprodução, total ou parcial do trabalho, é proibida sem a autorização da universidade, do autor e do orientador.

Lucas Pereira Caetano

Graduou-se em 2013 em Engenharia de Produção com foco em Gerência da Produção pelo Departamento de Engenharia Industrial da UFRJ. Cursou Gestão de Operações na Universität Stuttgart em 2011 e, em 2017, obteve a Certificação CFX na 1ª turma de Micromaster em Supply Chain do MITx. Após trabalhar em consultorias, multinacionais e operadores logísticos, se tornou em 2016 um dos sócios do Leggio Group, grupo de consultoria e auditoria focado em Supply Chain, Bens de Consumo, Infraestrutura e Petróleo.

Ficha Catalográfica

Caetano, Lucas Pereira

Avaliação do ciclo de vida simplificada para três tecnologias do ciclo diesel / Lucas Pereira Caetano; orientador: Marcos Cohen. – 2024.

119 f.; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Administração, 2024.

Inclui bibliografia

1. Administração – Teses. 2. ACV. 3. Diesel. 4. Biocombustíveis. 5. Diesel renovável. 6. Biodiesel Éster. I. Cohen, Marcos. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Administração. III. Título.

CDD: 658

Resumo

Caetano, Lucas Pereira; Cohen, Marcelo. **Avaliação do Ciclo de Vida Simplificada para Três Tecnologias do Ciclo Diesel**. Rio de Janeiro, 2024. 119p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Administração de Empresas, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A análise do ciclo de vida (ACV) é uma ferramenta útil para dimensionar e expor os crescentes impactos ambientais, econômicos e sociais causados por produtos e processos industriais, principalmente quando estes possuem uma cadeia de suprimentos complexa, como é o caso dos principais combustíveis do ciclo diesel (diesel A, biodiesel éster e diesel verde). Utilizando diferentes cenários possíveis para a matriz de combustíveis diesel no Brasil como contexto e a ACV simplificada a partir da estrutura metodológica descrita pela ABNT como ferramenta, esse estudo buscará responder qual o combustível do motor diesel que, ao longo do seu ciclo de vida, gera menos emissões de CO₂ na atmosfera, utilizando esse indicador como forma de quantificar os impactos ambientais desses produtos. Uma das principais conclusões é que as duas alternativas renováveis reduzem significativamente as emissões de CO₂, quando comparadas com o diesel de origem fóssil. Isso acontece porque enquanto o combustível fóssil gera emissões de CO₂ na sua etapa de matéria-prima (petróleo), os biocombustíveis capturam CO₂ na etapa equivalente (plantas). Outra conclusão é em relação ao maior impacto de algumas etapas (como consumo e matéria prima) em relação a outras (como produção e transporte). Finalmente, concluiu-se também que a possibilidade de se utilizar o diesel verde sem a necessidade de mistura com o diesel de origem fóssil nos motores à combustão é uma vantagem ambiental desse biocombustível em relação ao biodiesel éster.

Palavras-chave

ACV; diesel; biocombustíveis; diesel renovável; biodiesel éster; HVO; CO₂.

Abstract

Caetano, Lucas Pereira; Cohen, Marcelo (Advisor). **Simplified Life Cycle Assessment for Three Diesel Cycle Technologies**. Rio de Janeiro, 2024. 119p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Administração de Empresas, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

LCA (Life Cycle Assessment) is a useful tool for assessing and exposing the growing environmental, economic, and social impacts caused by products and industrial processes, especially when they have a complex supply chain, as is the case with the main fuels of the diesel cycle (diesel A, FAME biodiesel, and HVO). Using different possible scenarios for the diesel fuel matrix in Brazil as context and a simplified LCA methodological structure described by ABNT as a tool, this study aims to answer which diesel engine fuel, over its life cycle, generates fewer CO₂ emissions into the atmosphere, using this indicator to quantify the environmental impacts of these products. One of the main conclusions is that both renewable alternatives significantly reduce CO₂ emissions when compared to fossil-origin diesel. This is because while fossil fuel generates CO₂ emissions in its raw material stage (petroleum), biofuels capture CO₂ in the equivalent stage (plants). Another conclusion relates to the greater impact of some stages (such as consumption and raw material) compared to others (such as production and transportation). Finally, it was also concluded that the possibility of using HVO without the need for blending with fossil-origin diesel in combustion engines is an environmental advantage of this biofuel over FAME biodiesel.

Keywords

LCA; diesel; biofuels; renewable diesel; fame biodiesel; HVO; CO₂.

Sumário

| | |
|--|----|
| 1 Introdução | 13 |
| 1.1. Contexto | 13 |
| 1.2. Objetivo final | 15 |
| 1.3. Objetivos intermediários | 15 |
| 1.4. Delimitação do estudo | 16 |
| 1.5. Relevância do estudo | 17 |
| 2 Referencial teórico | 18 |
| 2.1. Emissões de CO ₂ e o Setor de Transportes | 18 |
| 2.2. Óleo Diesel e Suas Tecnologias Alternativas | 21 |
| 2.2.1. Óleo Diesel Fóssil | 21 |
| 2.2.2. Biodiesel Éster | 29 |
| 2.2.3. Diesel Verde, Diesel Renovável ou HVO | 35 |
| 2.2.4. Desafios dos Biocombustíveis no Brasil e no Mundo | 38 |
| 2.3. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) | 40 |
| 2.3.1. Ciclo de Vida e Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) | 40 |
| 2.3.2. Avaliação do Ciclo de Vida Simplificada | 46 |
| 2.4. Avaliações de Ciclo de Vida de Combustíveis e Biocombustíveis no Brasil | 47 |
| 2.5. Avaliações de Ciclo de Vida de Combustíveis e Biocombustíveis em Outros Países | 50 |
| 3 Método de Pesquisa | 52 |
| 3.1. Definição de Objetivo e Escopo da ACV Simplificada | 53 |
| 3.1.1. Definição de Objetivo da ACV Simplificada | 53 |
| 3.1.2. Definição de Escopo da ACV Simplificada | 54 |
| 4 Apresentação e Análise dos Dados | 67 |
| 4.1. Inventário do Ciclo de Vida (ICV) | 67 |
| 4.1.1. Sistema Óleo Diesel | 67 |
| 4.1.2. Sistema Biodiesel Éster | 77 |
| 4.1.3. Sistema Diesel Verde | 85 |
| 4.1.4. Resumo do Inventário | 92 |
| 4.2. Avaliação dos Impactos do Ciclo de Vida (AICV) | 93 |

| | |
|--|-----|
| 4.2.1. Comparação dos Impactos dentro dos Sistemas de Produto | 93 |
| 4.2.2. Comparação dos Impactos das Etapas dos Ciclos de Vida entre Sistemas de Produto Distintos | 97 |
| 4.2.3. Comparação dos Impactos Totais de Cada Sistema de Produto | 100 |
| 5 Discussão dos Resultados e Conclusões ou Recomendações | 105 |
| 5.1. Interpretação do Ciclo de Vida | 105 |
| 5.2. Recomendações | 107 |
| 5.3. Conclusões Finais | 108 |
| 6 Referências Bibliográficas | 110 |

Lista de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1: Distribuição proporcional das emissões de CO ₂ nos setores de Energia e Processos Industriais em 2021 de acordo com os subsetores, combustíveis/produtos e atividades | 19 |
| Figura 2: Emissões de CO ₂ per capita nos setores de energia ou provenientes de combustíveis fósseis | 21 |
| Figura 3: Representação da Cadeia Produtiva do Diesel Convencional | 25 |
| Figura 4: Intensidade de Carbono no Refino | 26 |
| Figura 5: Principais Aspectos dos Ciclos de Produção e Distribuição | 28 |
| Figura 6: Fluxos inter-regionais de petróleo em 2022 | 29 |
| Figura 7: Diferentes rotas de combustíveis a partir de óleos vegetais | 30 |
| Figura 8: Representação da Cadeia Produtiva do Biodiesel | 35 |
| Figura 9: Exemplo de Avaliação do Ciclo de Vida de um Carro | 42 |
| Figura 10: Representação Linear de um Sistema de Ciclo de Vida | 45 |
| Figura 11: Agrupamento das 50 principais palavras-chave com maior frequência de aparição por critério de similaridade, e rede de conexões entre temas para o período de 1993-2015 | 48 |
| Figura 12: Fluxo Principal do Sistema do Óleo Diesel | 56 |
| Figura 13: Fluxo Principal do Sistema do Biodiesel Éster | 57 |
| Figura 14: Fluxo Principal do Sistema do Diesel Verde | 58 |
| Figura 15: Explicativo dos fluxos disponíveis publicamente e dos fluxos estimados pelo modelo de otimização | 73 |
| Figura 16: Mapa com fluxos logísticos por modal | 74 |
| Figura 17: Diagrama de entradas e saídas nas etapas do ciclo de vida do biodiesel éster | 79 |
| Figura 18: Diagrama de entradas e saídas nas etapas do ciclo de vida do diesel verde | 87 |
| Figura 19: Diagrama explicativo do aumento de distância percorrida no transporte de óleo de soja e diesel verde | 91 |

Lista de gráficos

| | |
|--|-----|
| Gráfico 1: Matérias primas para a produção do biodiesel éster na Europa | 31 |
| Gráfico 2: Matérias primas para a produção do biodiesel éster nos EUA | 32 |
| Gráfico 3: Composição de Matéria Prima na Produção de Biodiesel no Brasil | 33 |
| Gráfico 4: Estimativa de aumento de capacidade de refino de diesel verde no mundo | 36 |
| Gráfico 5: Evolução do consume global de biocombustíveis no setor de transportes (em Mtoe) | 37 |
| Gráfico 6: Uso de matérias-primas por rota de produção de biocombustíveis | 38 |
| Gráfico 7: Demanda de combustíveis por cenário | 60 |
| Gráfico 8: Fatores de Emissão de CO ₂ por m ³ *km de combustível transportado | 75 |
| Gráfico 9: Emissões de CO ₂ no ciclo de vida do óleo diesel fóssil por unidade funcional (m ³) | 94 |
| Gráfico 10: Emissões de CO ₂ no ciclo de vida do biodiesel éster por unidade funcional (m ³) e saldo final após descontar a captura de CO ₂ | 95 |
| Gráfico 11: Emissões de CO ₂ no ciclo de vida do diesel verde por unidade funcional (m ³) | 96 |
| Gráfico 12: Saldo de emissões de CO ₂ nas etapas Well-to-Tank | 98 |
| Gráfico 13: Saldo de emissões de CO ₂ nas etapas Tank-to-Wheel | 99 |
| Gráfico 14: Saldo de Emissões de CO ₂ nas etapas Well-to-Wheel | 100 |
| Gráfico 15: Emissões por Cenário e por Categoria de Etapa | 102 |
| Gráfico 16: Emissões Totais por Cenário | 102 |

Lista de tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1: Contribuição dos GEEs para a Efeito Estufa | 19 |
| Tabela 2: Representatividade de cada modal no transporte de cargas e passageiros por país | 20 |
| Tabela 3: Emissões gasosas, líquidas e sólidas a partir de um motor diesel | 22 |
| Tabela 4: Cronograma de implementação das normas do PROCONVE para veículos pesados no Brasil | 24 |
| Tabela 5: Quantidade e contribuição de gases de efeito estufa em ACV do óleo diesel fóssil e da mistura B5 | 49 |
| Tabela 6: Tabela resumo das fontes para cada etapa do ciclo de vida | 63 |
| Tabela 7: Emissões Fugitivas de na Extração do Petróleo em 2020 | 68 |
| Tabela 8: Produção de petróleo no Brasil e no resto do mundo em 2020 | 68 |
| Tabela 9: Indicadores de emissões fugitivas no Brasil e no resto do mundo | 69 |
| Tabela 10: Densidades e <i>share</i> histórico por tipo de petróleo no refino nacional em 2020 | 69 |
| Tabela 11: Volume total de petróleo refinado e de derivados produzidos em 2020 | 70 |
| Tabela 12: Dados de produção de petróleo e emissão proveniente do seu transporte no mundo em 2020 | 71 |
| Tabela 13: Estimativas de movimentação (em m ³ km) por óleo diesel fóssil e por modal para o ano de 2020 | 74 |
| Tabela 14: Estimativas de emissões (em kgCO ₂) por óleo diesel fóssil para o ano de 2020 | 76 |
| Tabela 15: Resumo do inventário de emissões de CO ₂ nas etapas do ciclo de vida do biodiesel éster entre a plantação da soja e a produção do biocombustível | 80 |
| Tabela 16: Resumo do inventário de emissões de CO ₂ na etapa de produção óleo de soja no ciclo de vida do biodiesel éster | 81 |
| Tabela 17: Resumo do inventário de emissões de CO ₂ na etapa de produção do biodiesel no seu ciclo de vida | 82 |
| Tabela 18: Estimativas de movimentação (em m ³ km) do biodiesel éster por modal para o ano de 2020 | 84 |
| Tabela 19: Estimativas de emissões (em kgCO ₂) do biodiesel éster por modal para o ano de 2020 | 84 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 20: Dados de produção total de hidrogênio e respectiva emissão de CO ₂ em 2019 | 89 |
| Tabela 21: Tabela resumo da captura e das emissões de CO ₂ por produto e etapa do ciclo de vida | 93 |
| Tabela 22: Emissões de CO ₂ no ciclo de vida do óleo diesel fóssil por unidade funcional (m ³) | 94 |
| Tabela 23: Emissões de CO ₂ no ciclo de vida do biodiesel éster por unidade funcional (m ³) | 95 |
| Tabela 24: Emissões de CO ₂ no ciclo de vida do biodiesel éster por unidade funcional (m ³) | 96 |
| Tabela 25: Resumo da demanda de combustível por cenário e por produto (em milhões de m ³) | 101 |

Agradecimentos

Ao meu orientador, Prof. Marcos Cohen, pela orientação, incentivo e paciência ao longo de todo o processo de pesquisa.

À Profa. Renata Abreu, cujas aulas e comentários sempre me desafiaram a ir além das minhas expectativas iniciais.

À Profa. Patrícia Berardi, que trouxe um olhar externo revigorante para a minha banca e cujos comentários foram de grande valia.

Aos professores e coordenadores Alessandra Costa e Luís Pessoa, que, além de brilhantes em seus respectivos campos, coordenaram o curso com atenção às necessidades do corpo discente, mesmo em um ambiente desafiador como o período pós-pandêmico.

Aos meus pais, que sempre priorizaram a educação dos filhos, muitas vezes à frente de seu próprio lazer ou estabilidade financeira.

Ao meu irmão Breno, que mesmo sendo mais novo, é um dos meus maiores exemplos de perseverança, disciplina e dedicação.

À Nathalia, que não só me incentivou a me inscrever no mestrado, mas também me apoiou em todas as etapas, especialmente na reta final, quando a pesquisa competia diariamente com nossos momentos de convivência.

Aos meus amigos e familiares, que foram compreensivos com a minha presença limitada em eventos e comemorações nos últimos dois anos.

Aos meus sócios e colegas de trabalho, que se desdobraram para garantir que minha ausência não afetasse os prazos e a qualidade das entregas diárias.

Aos meus companheiros de turma, que me ensinaram tanto quando os professores, além de terem tornado as aulas noturnas e trabalhos de fim de semana mais divertidos e menos cansativos.

À Gisele Notari, Teresa Campos e Fabio Etienne pelo suporte e paciência ao me lembrarem dos prazos e obrigações.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

1

Introdução

1.1

Contexto

O esgotamento das reservas de petróleo, o crescimento da industrialização e as preocupações ambientais são os principais responsáveis pelo aumento do interesse global na produção de biocombustíveis sustentáveis para substituírem os combustíveis fósseis (KARGBO *et al.*, 2021). A questão climática está acelerando o processo de busca por fontes renováveis, e a atividade humana têm sido a maior causadora do aquecimento global (IPCC, 2023).

Segundo o relatório do *International Panel on Climate Change* (IPCC, 2023), a temperatura da superfície terrestre aumentou no período 2011-2020 1.1°C em relação ao período de 1850-1900. As emissões de gases de efeito estufa (GEEs) continuam a aumentar, e sua origem se concentra no uso de fontes de energia não renováveis, na agricultura e nos estilos de vida e padrões de consumo e produção de todas as regiões do planeta (IPCC, 2023).

O mesmo IPCC (2023) aponta não só um crescimento acelerado das emissões de GEEs, mas também uma mudança significativa na origem dessas emissões, que em 1950 eram equilibradas entre CO₂ de combustíveis fósseis e indústria, CO₂ do uso da terra, mudanças de uso da terra e florestas, e de outros gases provenientes de atividades humanas (CH₄ e N₂O). Segundo o estudo, o perfil atual aponta para um aumento da relevância dos CO₂ de combustíveis fósseis e indústrias, chegando a dois terços do total de emissões.

Quando comparamos a representatividade nacional do setor de transporte nas emissões de CO₂, que é de aproximadamente 23% (BRASIL, 2021, pág. 602), com a representatividade do setor de transporte nas emissões globais de 15% (IPCC, 2023, pág. 44), é possível verificar que o Brasil está acima da média global, mesmo se posicionando como o segundo maior produtor e consumidor de biocombustíveis no mundo e se beneficiando de uma indústria já bem estabelecida, com mais de 70% da frota com motores *flex* e 30% dos veículos

sendo abastecidos com biocombustíveis (ANP, 2023, pág. 26). Além disso, empresas do setor de óleo & gás estão investindo em torno de 10% dos seus orçamentos de pesquisa em desenvolvimento de projetos que suportam tecnologias verdes, dos quais 23% estão relacionados a biocombustíveis, e programas governamentais como o RenovaBio e o Combustível do Futuro incentivam e aceleram ainda mais a transição da matriz de combustíveis (ANP, 2023, pág. 30).

Entre os ciclos de funcionamento de motores a combustão mais relevantes na matriz nacional estão o Ciclo Otto e o Ciclo Diesel, cujos combustíveis predominantes são a gasolina e o óleo diesel, respectivamente.

O primeiro ciclo (Ciclo Otto) é focado em veículos leves, e existem alternativas mais estabelecidas desde o etanol anidro, que possui mistura de 27% na gasolina C (mistura de gasolina A e etanol anidro) para os motores não *flex*, passando pelo etanol hidratado, que pode ser utilizado sem nenhuma mistura em motores *flex*, e até mesmo a eletricidade pode se tornar em breve uma realidade cada vez mais presente, se houver foco em políticas governamentais e mudanças regulatórias (Glitman *et al.* 2019)

O segundo ciclo (Ciclo Diesel) é o relativo a veículos pesados, direcionados para o transporte de cargas e pessoas, e a alternativa mais ecológica já estabelecida no Brasil é o biodiesel éster, regulamentado em 2005 pela Lei Nº 11.097, que introduz os percentuais mínimos de adição de biodiesel ao óleo diesel de origem fóssil (BRASIL, 2005). Em 2006, foi criado o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB), que estabelece metas progressivas de aumento da mistura do biocombustível no diesel B (mistura de diesel A com biodiesel éster) (ABREU, 2006). Uma segunda alternativa mais ecológica dentro do ciclo diesel é o diesel verde, também conhecido como diesel renovável ou HVO (*Hydrogenated Vegetable Oil*), que possui regulamentação recente pela ANP através da Resolução Nº 842 (ANP, 2021), e ainda está em fase inicial de implementação na matriz brasileira de combustíveis.

Os biocombustíveis, além de estarem vinculados a fontes renováveis, reduzem a emissão de CO₂ no escapamento (BRANCO *et al.*, 2019; PURICELLI *et al.*, 2021) e sequestram CO₂ da atmosfera nas suas etapas de matéria-prima através da fotossíntese (PRUSSI *et al.*, 2020). Entretanto, a maior parte dos estudos dimensiona os ganhos nas etapas de consumo e, em alguns casos, nas

etapas de matéria-prima. Outras etapas do ciclo de vida como a produção e o transporte não são analisadas de forma profunda, apesar de serem atividades correlacionadas com emissões de CO₂ na atmosfera.

Uma ferramenta mais completa para esse tipo de análise é a Avaliação do Ciclo de Vida, muito útil quando certo produto possui uma cadeia de suprimentos complexa e com potencial para reduzir ou até anular as reduções diretas na sua etapa de consumo. Esse é o caso das diversas tecnologias de combustíveis utilizados no Ciclo Diesel, que variam desde derivados de petróleo até o uso de fontes totalmente renováveis e de baixo impacto ambiental direto. A comparação, dentro de um contexto nacional, de tecnologias não sustentáveis (diesel convencional derivado do petróleo) com aquelas de origem renovável que estão expandindo a sua representatividade (biodiesel éster), e aquelas que ainda estão em uma etapa inicial de implementação na matriz de combustíveis (diesel verde) é um exercício teórico interessante, ainda mais se a comparação englobar a ótica ambiental, que neste escopo focou na emissão de CO₂.

Com base nesse contexto, a questão de pesquisa que se pretende responder é qual é o biocombustível com o maior potencial de redução de emissões de CO₂ no contexto brasileiro.

1.2

Objetivo final

O presente estudo tem como objetivo final comparar o impacto ambiental das três principais tecnologias do ciclo diesel no contexto nacional: diesel convencional, biodiesel éster e diesel verde, buscando avaliar qual deles tem melhor desempenho na emissão de CO₂ ao longo dos seus ciclos de vida.

1.3

Objetivos intermediários

Para alcançar o objetivo final, este trabalho passa por alguns objetivos intermediários:

1. Entender o processo de emissão de CO₂ pelas três tecnologias analisadas.

2. Estudar as diversas avaliações de ciclo de vida já realizadas para tecnologias do ciclo diesel em diferentes contextos geográficos a fim de entender suas premissas, procedimentos, resultados e limitações.
3. Definir a estrutura metodológica mais adequada para atingir o objetivo final, levando em consideração eficácia, eficiência e disponibilidade de informações.
4. Realizar o inventário de ciclo de vida de cada um dos combustíveis em análise, de forma a possibilitar diversas análises comparativas entre as diferentes etapas, produtos e cenários de demanda.
5. Avaliar e interpretar os desempenhos de cada produto ao longo do seu ciclo de vida, assim como os diferentes cenários de demanda de acordo com as suas restrições tecnológicas.

1.4

Delimitação do estudo

A primeira (e mais relevante) delimitação do estudo é que ele se concentra no desempenho ambiental, mais especificamente nas emissões de CO₂. Isso significa que os desempenhos econômicos e sociais não serão abordados nesse conteúdo. Além disso, como as emissões de CO₂ são o maior ofensor do efeito estufa segundo o IPCC (2023), o recorte do desempenho ambiental é ainda mais específico, se concentrando nesse parâmetro para a realização de comparações.

Uma outra delimitação do estudo é relativa aos sistemas de produtos que serão analisados individualmente: o óleo diesel de origem fóssil é um deles, uma vez que é o combustível de maior representatividade hoje na matriz energética brasileira. As principais alternativas avaliadas para os motores diesel são o biodiesel éster, já estabelecido no mercado e na regulação, e o diesel verde, que está ganhando protagonismo em projetos e estudos brasileiros e possui um maior potencial de impacto. Apesar de tanto no biodiesel éster quanto no diesel verde existirem diferentes fontes de matéria-prima para o óleo proveniente de biomassa (HOEKMAN *et al.*, 2011), a soja será considerada como matéria-prima principal nos inventários de ciclo de vida, uma vez que, segundo Gonçalves *et al.* (2023), ela é a mais relevante fonte de óleo vegetal para biocombustíveis no Brasil.

1.5

Relevância do estudo

O Brasil está em um momento de redefinição no que tange as estratégias de transição energética do ciclo diesel, que representou 48,1% da matriz de combustíveis brasileira em 2023 (ANP, 2023) e ainda está em uma etapa muito inicial no Brasil e no mundo. Entender os impactos ambientais, sociais e regulatórios são uma etapa mandatória no processo de tomada de decisão, e se espera que os resultados deste estudo possam servir de subsídio para a tomada de decisão nas esferas governamentais e privadas em relação a essa transição energética, direcionando esforços para aquelas tecnologias com o maior poder de impactar positivamente o meio ambiente.

O biodiesel éster já havia se estabelecido como a principal alternativa de biocombustível no ciclo diesel, mas recentes descobertas tecnológicas relativas tanto a novas rotas de biodiesel éster quanto de HVO tornam necessárias as atualizações das avaliações de ciclo de vida já existentes, principalmente no contexto nacional, que ainda está em uma etapa de redefinição.

Finalmente, esse estudo se destaca por dois aspectos: o fato de não comparar somente o impacto de biocombustíveis com o de combustíveis fósseis, mas também entre si, é uma condição que não foi observada na maior parte das avaliações de ciclo de vida que serviram de referência teórica para este estudo. Além disso, a escolha do dióxido de carbono (puro) como parâmetro único de impacto ambiental na etapa de avaliação, apesar de ser uma simplificação da estrutura metodológica proposta, apresenta um caráter de escassez, já que a maior parte dos estudos atuais de ACVs relacionados a efeito estufa utilizam o CO₂equiv como referência.

2

Referencial teórico

Neste capítulo será revisada e discutida a bibliografia relacionada ao tema investigado. A seção foi dividida em três partes: a primeira aborda a literatura relacionada com avaliações do ciclo de vida, buscando trazer a história dessa ferramenta, a sua base teórica e as diferentes estruturas metodológicas utilizadas ao longo do tempo e em diversas aplicações; a segunda parte busca explicar a relação entre as emissões de CO₂ e o setor de transportes, de forma a conectar combustíveis e efeito estufa em sua relação de causa e efeito, ou entradas e saídas (conforme dita a estrutura metodológica); e a terceira parte detalha quais são as alternativas de combustíveis dentro do ciclo diesel que serão avaliadas segundo a estrutura metodológica escolhida, explicando as suas histórias, especificidades tecnológicas, oportunidades e desafios.

2.1

Emissões de CO₂ e o Setor de Transportes

O efeito estufa é um fenômeno natural que aprisiona parte da radiação solar incidente sobre a Terra, e é causado pelos gases de efeito estufa (GEEs): vapor d'água (H₂O), dióxido de carbono (CO₂), ozônio (O₃), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) (MIGUEZ *et al.*, 2001). Esses gases aquecem a superfície e a atmosfera do planeta, e possuem diversas consequências desde variações nas precipitações, recuo de geleiras e avanço do nível do mar, entre outros (RAMANATHAN e FENG, 2009). Apesar de ser um fenômeno natural, esse efeito tem no homem o principal contribuinte para sua intensificação, uma vez que é o responsável pelo crescente desmatamento florestal, consumo de combustíveis fósseis e produção industrial (IPCC, 2023). Conforme pode ser verificado na Tabela 1, o CO₂ é o principal GEE de origem humana (MIKHAYLOV *et al.*, 2020), e o seu tempo de permanência na atmosfera pode chegar a 200 anos.

Tabela 1: Contribuição dos GEEs para a Efeito Estufa.

| Composto | Fórmula | Concentração na atmosfera (ppm) | Contribuição (%) |
|------------------------|------------------|---------------------------------|------------------|
| Vapor de água e nuvens | H ₂ O | 10-50.000 | 36-72% |
| Dióxido de carbono | CO ₂ | ≈ 400 | 9-26% |
| Metano | CH ₄ | ≈ 1,8 | 4-9% |
| Ozônio | O ₃ | 2-8 | 3-7% |

Fonte: Mikhaylov *et al.*, 2020.

Como pode ser visto na Figura 1 (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2023), o setor de energia é o que apresenta a maior representatividade nas emissões totais de CO₂ (76%), seguido pelo setor de processos industriais (16%), uso de produtos (4%) e emissões fugitivas (4%). Os derivados de petróleo e gás natural representam somados quase 70% da matéria-prima utilizada nesse setor, enquanto a biomassa (matéria-prima dos biocombustíveis) representa apenas 3% do total. O subsetor com maior percentual das emissões de CO₂ é o de transportes, e no caminho contrário da maioria dos países membros da OCDE, o caso brasileiro de emissões de CO₂ no setor de transporte apresenta taxas de crescimento cada vez maiores, o que pode ser explicado tanto pela crescente demanda por meios de transporte, quanto pelo baixo grau de importância que o país dispensa ao setor de transporte na discussão de sustentabilidade (DE ANDRADE e MATTEI, 2011).

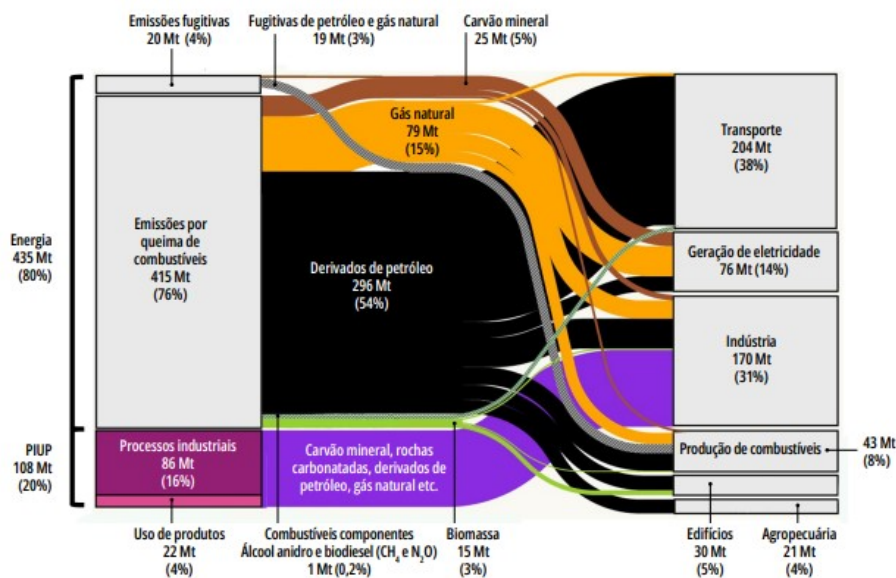


Figura 1: Distribuição proporcional das emissões de CO₂ nos setores de Energia e Processos Industriais em 2021 de acordo com os subsectores, combustíveis/produtos e atividades

Fonte: Observatório do Clima (2023).

De Andrade e Mattei (2011) ainda explicam que a matriz de transportes brasileira é majoritariamente rodoviária, um perfil distinto de outros países de geografia similar (grandes extensões territoriais e que procuram utilizar modais de maior rendimento e menor necessidade energética, como o ferroviário e o aquaviário. Segundo os autores (DE ANDRADE e MATTEI, 2011), EUA, China e Rússia usam o modal ferroviário de forma extensiva como forma de cobrir as suas geografias continentais, fato que não é observado no Brasil e que impacta a sustentabilidade tanto ambiental, uma vez que implica no uso de mais combustível para uma mesma distância (PARENTE, 2003), quanto econômica, uma vez que esses modais também são menos custosos para o embarcador. A representatividade de cada modal nos diversos países pode ser vista na Tabela 2.

Tabela 2: Representatividade de cada modal no transporte de cargas e passageiros por país.

| Cargas | Modal | Brasil (2006) | EUA (2007) | China (2007) | Rússia (2008) | União Européia (2008) |
|--------------------|--------------|--------------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------------|----------------------------------|
| | Rodoviário | 61,10% | 31,0% | 11,2% | 4,4% | 45,9% |
| | Ferrovário | 20,70% | 42,9% | 23,5% | 42,8% | 10,8% |
| | Aquaviário | 14,00% | 13,0% | 63,5% | 3,0% | 40,2% |
| | Dutoviário | 4,20% | 13,1% | 1,8% | 49,8% | 3,0% |
| Passageiros | Modal | Brasil (2006) | EUA (2007) | China (2007) | Rússia (2008) | União Européia (2008) |
| | Rodoviário | 96,18% | 87,8% | 54,1% | 26,2% | 82,7% |
| | Ferrovário | 1,37% | 0,7% | 33,3% | 47,8% | 7,8% |
| | Aquaviário | 0,00% | 0,0% | 0,3% | 0,2% | 0,6% |
| | Dutoviário | 2,45% | 11,5% | 12,3% | 25,8% | 8,8% |

Fonte: De Andrade e Mattei (2011).

Apesar da opinião de De Andrade e Mattei (2021), a Figura 2 (Our World in Data, 2023) mostra que em 2022, os países citados apresentam maior emissão de CO₂ per capita proveniente de combustíveis fósseis ou do setor industrial. Essa constatação poderia ser um indicativo de que as políticas de incentivo a biocombustíveis nos últimos 20 anos estão surtindo efeito, mas nesse período o consumo per capita aumentou de 1,9 para 2,2 toneladas de CO₂, tendo atingido o seu pico em 2014, quando alcançou 2,7 toneladas de CO₂ *per capita*.

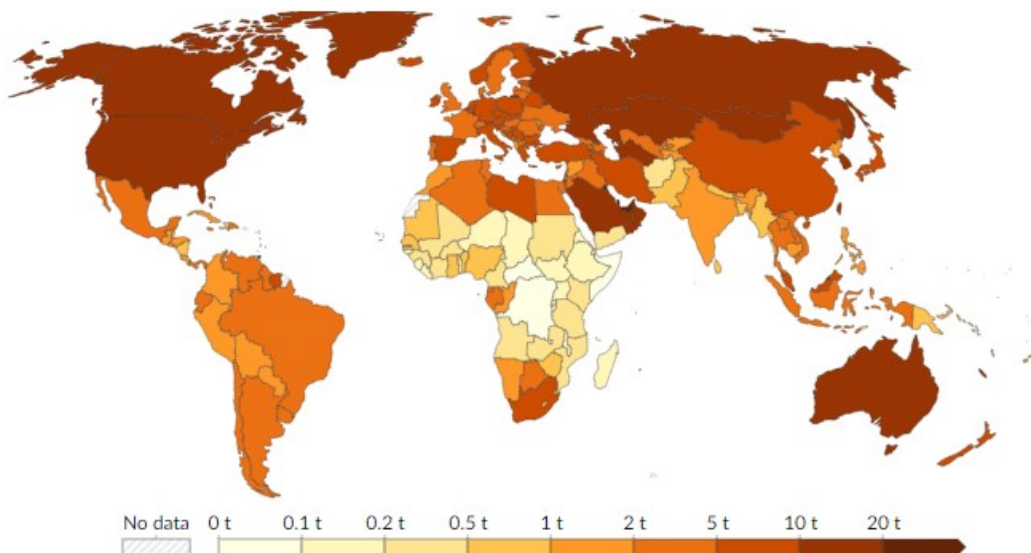


Figura 2: Emissões de CO₂ per capita nos setores de energia ou provenientes de combustíveis fósseis.

Fonte: Our World in Data (2023).

2.2

Óleo Diesel e Suas Tecnologias Alternativas

2.2.1

Óleo Diesel Fóssil

O petróleo foi a fonte de energia mais utilizada no século XX, e sua descoberta trouxe diversas vantagens para a indústria, mas apesar da sua importância econômica, a exploração, extração e o uso do petróleo e de seus derivados também criou uma série de impactos ambientais, como as emissões de gases poluentes, sobretudo os GEEs (DA SILVA *et al.*, 2020). Um dos seus derivados mais relevantes no mundo é o óleo diesel, combustível utilizado nos motores de combustão a diesel. Corro (2002) listou as diversas emissões (gasosas, líquidas e sólidas) a partir desse tipo de motor, que podem ser observadas na Tabela 3.

Tabela 3: Emissões gasosas, líquidas e sólidas a partir de um motor diesel.

| Gasosas | Líquidas | Sólidas |
|---|--|--|
| N_2 CO_2 CO H_2 NO/NO_2 SO_2/SO_3 $HC (C_2-C_{15})$ Oxigenados Nitrogênio orgânico e compostos sulfúricos | H_2O H_2SO_4 $HC (C_2-C_{15})$ Oxigenados Poliaromáticos | Fuligem Metais Compostos Inorgânicos Sulfatos Hidrocarbonetos Sólidos |

Fonte: Corro, pág. 2 (2002).

Desde a sua invenção no século IXX, esses motores já apresentavam diversas vantagens em relação ao seu principal concorrente (os motores Otto abastecidos a gasolina), entre elas a maior densidade energética do seu combustível (motores a diesel teriam o dobro de autonomia com a mesma quantidade de combustível), a capacidade de queimar derivados de qualidade mais baixa e a maior pressão nos cilindros do seu sistema de injeção, chegando a alcançar 300 Mpa, contra os 50 Mpa dos motores à gasolina (SVIL, 2017). Essas vantagens fizeram com que a invenção dos motores a diesel fosse apontada por Svil (2007) como um dos dois principais fatores para a globalização, uma vez que permitiu a movimentação de bilhões de toneladas de matérias primas e produtos acabados entre continentes a um baixo custo. Para o autor, o único outro fator comparável aos motores a diesel são as turbinas a gás utilizadas nos aviões, que complementaram a movimentação de produtos com o transporte de pessoas em longas distâncias.

Os motores do ciclo diesel estão presentes em carros, ônibus, caminhões, pequenas embarcações marítimas, máquinas industriais de grande porte, locomotivas, navios e geradores estacionários (SANTANA, 2012). Amaral, Rodriguez e Souza (2021) destacaram o consumo de diesel do setor automotivo, agrícola e industrial em 90%, enquanto outros setores como embarcações, ferroviário, mineração e energia são responsáveis por aproximadamente 10% da demanda total.

Vempatapu e Kanaujia (2017) listaram os diversos órgãos internacionais que regulam os padrões de garantia e controle da qualidade de combustíveis, entre eles a ISO (International Standard Organization), a ASTM Internacional (antiga American Society for Testing and Materials) e a EN (European Norm). No Brasil, a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) é a responsável por estabelecer os parâmetros de qualidade dos combustíveis, inclusive o diesel.

A Resolução ANP nº 50/2013, estabelece as especificações e parâmetros do óleo diesel de uso rodoviário, bem como as regras referentes ao controle da qualidade a serem atendidas por todos os agentes econômicos que comercializam o produto no território nacional, e a Resolução ANP nº 905/2022 faz a mesma regulação para o óleo diesel não rodoviário (ODNR) (ANP, 2013; ANP, 2022). Entre alguns dos parâmetros mais relevantes regulamentados nessas resoluções estão a massa específica, a viscosidade cinemática, o ponto de fulgor, a quantidade de enxofre e a quantidade de cetano.

Apesar da ANP regulamentar as especificações e parâmetros do óleo diesel, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) é o órgão responsável por estabelecer os parâmetros para a emissão de poluentes. O CONAMA faz essa regulação através de diversos programas, entre eles o Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE), criado em 1986 com o objetivo de reduzir a emissão de poluentes pelo escapamento de veículos automotores com motor do Ciclo Otto e do Ciclo Diesel (MURGEL, 1987). O PROCONVE já está na sua oitava fase (P8), e cada uma das suas fases se equivalem a uma regulamentação europeia denominada EURO, criada em 1991 com o mesmo objetivo do PROCONVE de reduzir a poluição do ar na Europa. Miller e Posada (2019) detalham na Tabela 4 o cronograma de implementação das etapas do PROCONVE, que têm sido implementadas no Brasil com uma defasagem média de cinco anos em relação à Europa, assim como a sua equivalência com as fases do programa europeu.

Tabela 4: Cronograma de implementação das normas do PROCONVE para veículos pesados no Brasil.

| Norma | Resolução | Equivalente europeia | Data de Implementação |
|--------------|---------------------------------|----------------------|---|
| PROCONVE P-1 | CONAMA 18/1986 | - | 1987 (ônibus urbanos) 1989 (100%) |
| PROCONVE P-2 | CONAMA 08/1993 | Euro 0 | 1994 (80%) 1996 (100%) |
| PROCONVE P-3 | | Euro I | 1994 (ônibus urbanos) 1996 (80%) 2000 (100%) |
| PROCONVE P-4 | | Euro II | 1998 (ônibus urbanos) 2000 (80%) 2002 (100%) |
| PROCONVE P-5 | CONAMA 315/2002 | Euro III | 2004 (ônibus urbanos) 2005 (micro-ônibus) 2005 (40%) 2006 (100%) |
| PROCONVE P-6 | CONAMA 315/2002 | Euro IV | Nunca implementada, pois o diesel com teor ultrabaixo de enxofre (ULSD) não estaria disponível. A P-5 permaneceu até 2011 |
| PROCONVE P-7 | CONAMA 403/2008 | Euro V | 2012 |
| PROCONVE P-8 | CONAMA 490/2018 | Euro VI | 2022 (homologações) 2023 (todas as vendas e registros) |

Fonte: Miller e Posada, pág. 3 (2019).

Na Figura 3, podemos visualizar algumas etapas da cadeia de produção e distribuição do diesel convencional. Segundo a EPE (2019), essa cadeia se inicia na exploração e produção de petróleo (E&P) e vai até o consumidor final, passando por etapas como diversas etapas de produção (refinarias), distribuição (distribuidores) e revenda (postos e transportadores-revendedores-retalhistas, também conhecidos como TRR).

Uma outra divisão da cadeia do petróleo comumente utilizada é a de Patidar *et al.* (2023), que divide a indústria de O&G em 3 setores: *upstream*, *midstream* e *downstream*. Segundo os autores, enquanto o *upstream* consiste em atividades variadas desde a aquisição de áreas do governo para conduzir pesquisas geológicas e geofísicas no intuito de encontrar reservas de hidrocarbonetos, até a perfuração e extração de petróleo e gases dessas reservas. Os mesmos autores definem o setor de *downstream* como os processos de refino do petróleo, processamento do gás, e distribuição dos produtos derivados de ambas as matérias primas. O *midstream*, por sua vez, foi definido por Patidar *et al.* (2023) como o transporte de hidrocarbonetos entre os pontos de produção no *upstream* e as unidades de refino e processamento do *downstream*.

Não é parte do escopo desse estudo descrever em detalhes a complexa cadeia petrolífera, apontada por Hussain *et al.* (2006) como uma das mais complexas do mundo. Dessa forma, a cadeia e as suas etapas serão apresentadas de forma geral, trazendo-se apenas elementos para permitir a compreensão do

impacto de cada etapa no ciclo de vida do diesel convencional e, mais especificamente, no seu potencial de emissão de CO₂.

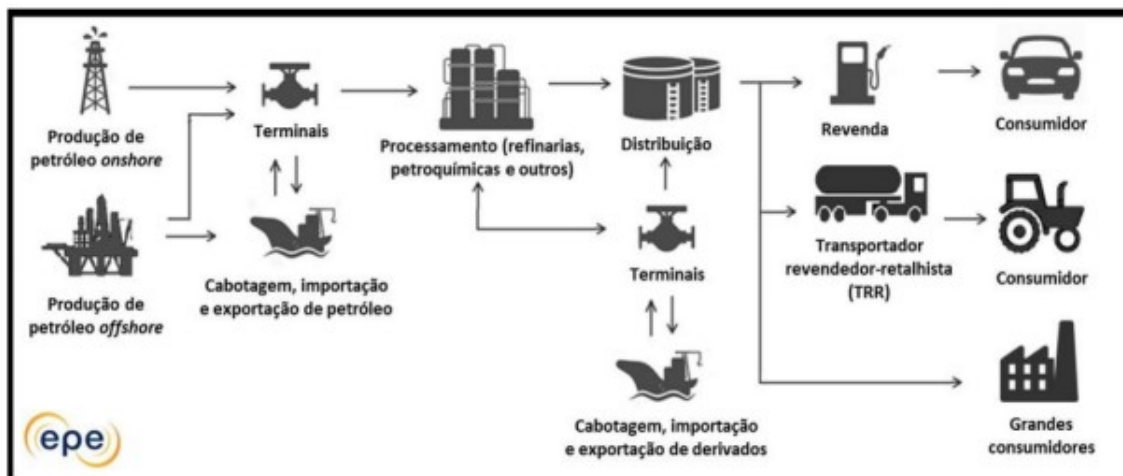


Figura 3: Representação da Cadeia Produtiva do Diesel Convencional.

Fonte: EPE, pág. 16, 2019.

Ribeiro e Grisoli (2020) explicam como as atividades que englobam o *upstream* geram as suas emissões de GEE: o petróleo e o gás são extraídos de formações subterrâneas utilizando poços onshore e offshore, e as suas extrações ocorrem de forma simultânea para depois serem separados. Como o metano (CH₄) é o principal componente do gás natural, qualquer vazamento nessa operação gera uma emissão de GEE. Essas emissões são complementadas pelas queimas em tochas (*flares*), que emitem CO₂, CH₄ e N₂O. Ribeiro e Grisoli (2020) ainda demonstram que essas emissões (também chamadas de emissões fugitivas) possuem não só tendência contínua de crescimento, como também 2 picos (2005 e 2009), que os autores explicaram através de operações de queima em tochas (*flaring*) decorrentes de entradas de novas plataformas e paradas programadas de produção.

Szklo e Schaeffer (2007) explicam que como o processo de refino é intensivo no uso de energia, o mesmo necessita de quantidades consideráveis de calor direto ou indireto, e um exemplo disso é que entre 7% e 15% do petróleo utilizado nas refinarias não é refinado, mas sim consumido nos processos de geração de energia. Jing *et al.* (2020), apresenta outros dados alarmantes em relação à etapa de refino: o setor é no mundo a terceira maior fonte estacionária – ou seja, excluindo os meios de transporte – de emissões GEEs, sendo responsável por 40% das emissões na cadeia de suprimentos de petróleo & gás, e 6% de todas

as emissões industriais no mundo; além disso, é um setor em expansão, tendo dobrado a sua capacidade entre 1970 e 2015.

Jing *et al.* (2020) mostraram na Figura 4 que o Brasil não está entre os países com maior intensidade de carbono por barril refinado no mundo (como China e Índia) e até mesmo na América do Sul (como Chile e Argentina), mas também não está entre os menos intensivos como Rússia, República Tcheca e Venezuela.

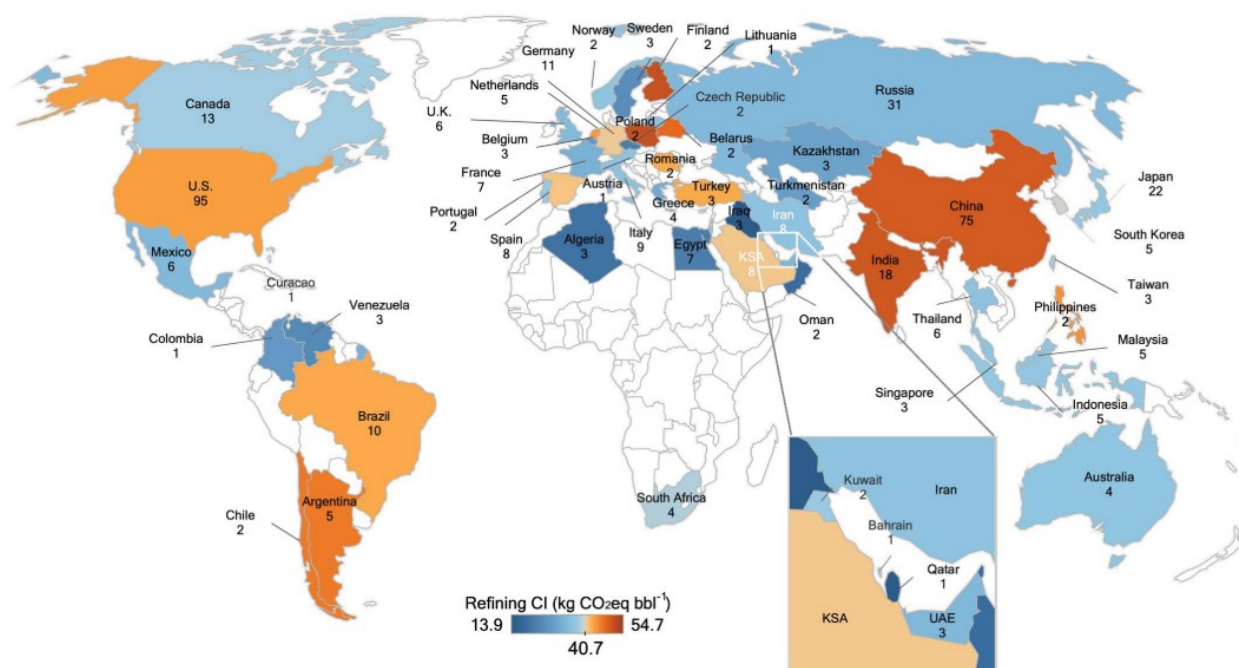


Figura 4: Intensidade de Carbono no Refino.
Fonte: Jing *et al.* pág. 13 (2020).

Segundo Jing *et al.* (2020), o potencial de emissão de GEEs é impactado por vários fatores, e entre os mais relevantes estão a complexidade de processos que o projeto de cada refinaria permite, assim como o *blend* de petróleo utilizado. Os autores reforçam que esse *blend* possui restrições não somente nos processos da refinaria, mas também na oferta de petróleo, que faz parte de uma rede global complexa e que dificulta o equilíbrio de escolhas sustentáveis de *blend* com a rentabilidade da refinaria. Szklo e Schaeffer (2007) acrescentam o *mix* de produtos resultantes do processo de refino como um terceiro fator relevante na geração de emissões de GEEs, e que a forma como cada um desses fatores afeta a emissão varia bastante no mundo.

Ainda no segmento de *downstream*, e após a etapa refino, temos a etapa de distribuição de combustíveis, que possui 2 categorias de agentes relevantes conectando o refino ao consumidor final: os postos revendedores, também chamados popularmente de postos de gasolina (mas que comercializam outros combustíveis como diesel e etanol), são o elo mais conhecido pelo consumidor final, representando o varejo; e as distribuidoras de combustíveis, que adquirem os combustíveis dos refinadores (e os biocombustíveis dos produtores), e realizam todas as atividades de transporte, armazenagem e mistura de combustíveis para abastecer os postos revendedores (FERREIRA *et al.*, 2023).

A Lei nº 9.478/97 (BRASIL, 1997) define formalmente esses 2 agentes no seu art. 6º, incisos XX e XXI:

“XX – Distribuição: atividade de comercialização por atacado com a rede varejista ou com grandes consumidores de combustíveis, lubrificantes, asfaltos gás liquefeito envasado, exercida por empresas especializadas, na forma das leis e regulamentos aplicáveis;

XXI – Revenda: atividade de venda a varejo de combustíveis, lubrificantes e gás liquefeito envasado, exercida por postos de serviços ou revendedores, na forma das leis e regulamentos aplicáveis;”

A CBIE (2020) descreveu os principais aspectos dos fluxos de distribuição dos combustíveis e biocombustíveis na Figura 5, e eles são essenciais para o entendimento da estrutura metodológica e de alguns dos seus resultados: enquanto o diesel convencional é produzido nas refinarias concentradas no litoral, o biodiesel éster é produzido nas usinas localizadas próximas à oferta de soja para esmagamento. Como existe uma concentração demográfica na zona litorânea (STROHAECKER, 2017), o diesel convencional apresenta uma maior proximidade com a demanda do que o biodiesel éster. Essa vantagem competitiva pode ser explorada pelo Diesel Verde, que pode também ser produzido nas refinarias e utilizar da mesma infraestrutura de distribuição que o diesel convencional (dutos, ferrovias, rotas de cabotagem etc.).



Figura 5: Principais Aspectos dos Ciclos de Produção e Distribuição.
 Fonte: CBIE, pág. 1 (2020).

O Instituto Brasileiro de Petróleo (IBP) projetou que a atividade de transporte de combustíveis no Brasil pode emitir entre 2,5 e 3,0 bilhões KgCO₂ até 2035, dependendo do cenário de investimentos em infraestrutura, e consequentemente, da matriz de transporte utilizada nesse combustível (IBP, 2022). Entender como controlar o impacto dessa atividade pode ser essencial na busca pela redução das emissões de GEEs.

Para Jing *et al.* (2020), o *midstream* é também uma etapa relevante nas emissões de GEEs, uma vez que os polos de produção de petróleo e gás (*upstream*) e os pontos de refino e processamento desses produtos (*downstream*) fazem parte de uma complexa rede. Nos cálculos de Ankathi *et al.* (2022), o setor de transporte de petróleo gerou em 2018 cerca de 109 milhões de toneladas métricas de emissões GEEs, dos quais apenas 5 milhões são relativos ao modal dutoviário, considerado menos intensivo em emissões do que o transporte marítimo, responsável pelo resto das emissões. Na Figura 6 é possível entender a relevância desse modal na matriz de transporte global de petróleo: ali estão os fluxos entre regiões que produzem e refinam petróleo, o que demonstra a complexidade e a quantidade de fluxos dessa rede.

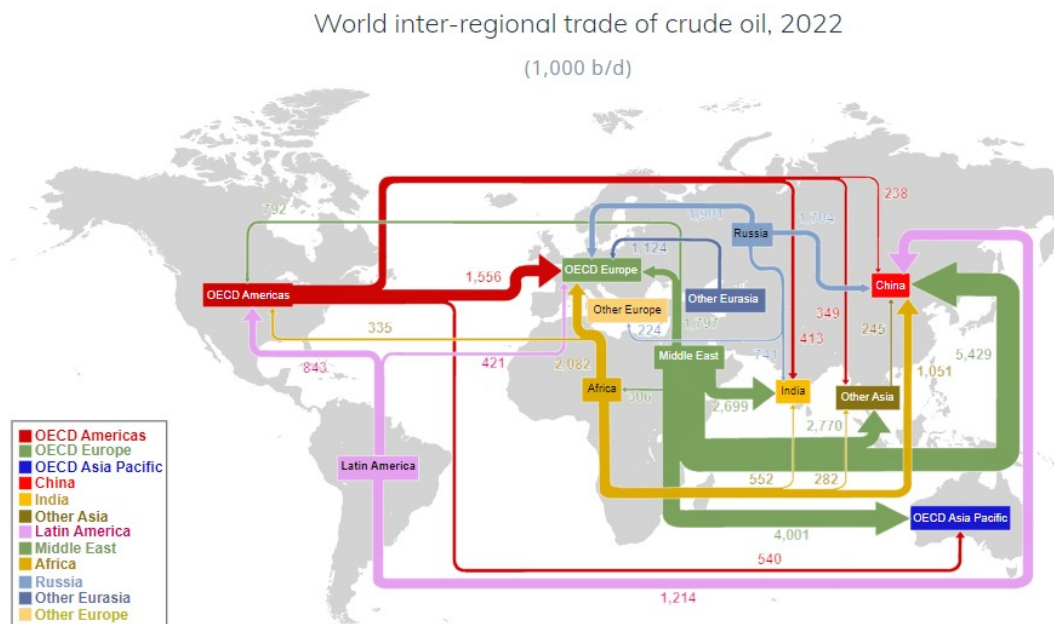


Figura 6: Fluxos inter-regionais de petróleo em 2022.
Fonte: OPEC, *Dashboard Online*, 2023.

2.2.2 Biodiesel Éster

Segundo Brännström *et al.* (2018), existem 3 processos químicos que podem ser aplicados a óleos vegetais para a produção de biocombustíveis (Figura 7): a transesterificação, a pirólise e o hidroprocessamento, que têm respectivamente com produtos o biodiesel éster (também conhecido como *Fatty Acid Alkyl Esters* – FAME), o bio-óleo (ou óleo de pirólise) e o diesel verde (também conhecido como diesel renovável ou HVO). Dentre esses 3 produtos, o biodiesel é o biocombustível que possui maior relevância atualmente no Brasil (ANP, 2023).

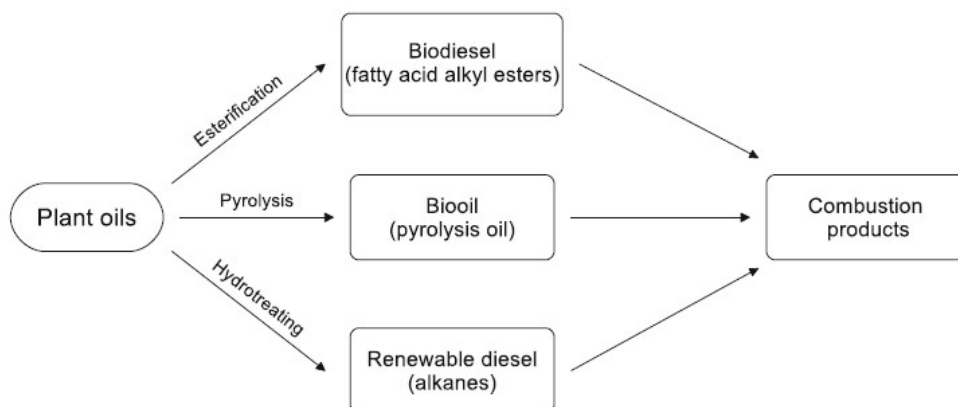


Figura 7: Diferentes rotas de combustíveis a partir de óleos vegetais.
Fonte: Brännström *et al.*, pág.3 (2018).

Na definição de Puricelli *et al.* (2021), o biodiesel éster (tipicamente conhecido como biodiesel) é produzido de componentes presentes em óleos vegetais e gordura animal e obtido através do processo de transesterificação para que as suas características se aproximem do óleo diesel derivado do petróleo. Ainda segundo os autores (PURICELLI *et al.*, 2021), por questões de estabilidade e decomposição, o biodiesel éster normalmente utilizado em misturas com o diesel convencional de 7 a 10%, apesar de no Brasil já terem sido reguladas misturas de até 14% e do país ter a meta de chegar aos 15% até 2025 (BRASIL, 2023). Os produtores de biodiesel informaram recentemente que o Brasil tem capacidade imediata para aumentar a produção de forma a atender até mesmo uma mistura B20, uma vez que possuem capacidade produtiva ociosa (JUNIOR, 2024).

Barros e Jardine (2021), em seu estudo para a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), explicam que o uso direto do B100 em motores é problemático devido à sua viscosidade, que pode chegar a ser 17 vezes maior que a do óleo diesel; e devido à sua baixa volatilidade, que forma depósitos nos bicos injetores dos motores e impede a queima completa do combustível.

O mesmo valor de 7% foi observado por Ershov *et al.* (2022) como a mistura que os países europeus consideram como a ideal em termos de desempenho da frota. Os autores explicam que existem duas rotas para a obtenção de biocombustível do ciclo diesel a partir de biomassa: a rota da transesterificação (biodiesel éster) e a rota do hidrotratamento (diesel verde).

Durante a produção do biodiesel, os triglicerídeos passam por uma transesterificação com metanol (de origem fóssil), mantendo um alto teor de oxigênio, assim como as ligações duplas dos ácidos graxos originais. sendo o produto inferior ao obtido no hidrotratamento em estabilidade de oxidação e valor calorífico que a segunda (ERSHOV *et al.*, 2022).

O biodiesel éster pode ser obtido através qualquer triglicerídeo (HOEKMAN *et al.*, 2011), e o seu perfil de matéria-prima varia de forma significativa de um mercado para o outro. No Gráfico 1, podemos ver que na Europa, as principais fontes de matéria-prima para esse biocombustível são o óleo de colza (*rapeseed* em inglês, planta oleaginosa da família Brassicaceae cujas sementes são utilizadas na produção de óleo) e o óleo de palma (óleo vegetal obtido a partir dos frutos da palma de óleo, amplamente utilizado na culinária, indústria alimentícia e na produção de produtos de higiene e limpeza).

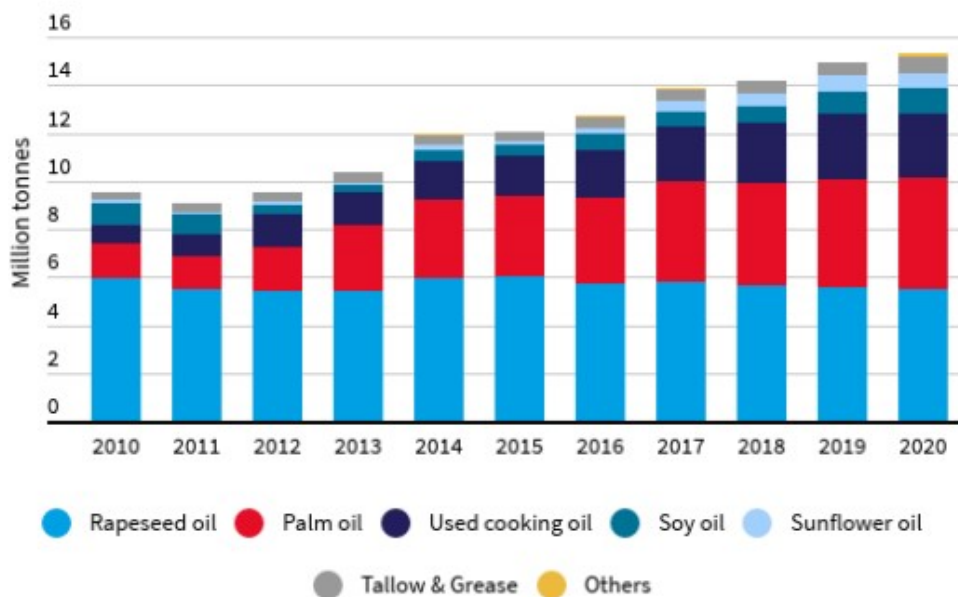


Gráfico 1: Matérias primas para a produção do biodiesel éster na Europa.
Fonte: Rangaraju, pág. 5 (2021).

Já no Gráfico 2, é possível observar que nos Estados Unidos o óleo vegetal mais utilizado como insumo da produção de biodiesel é o óleo de soja (variando entre 50 e 60% do total), seguido do óleo de cozinha (*yellow grease*, ou gordura amarela, também conhecidos como óleo de fritura ou gordura de cozinha usada) e do óleo de milho.

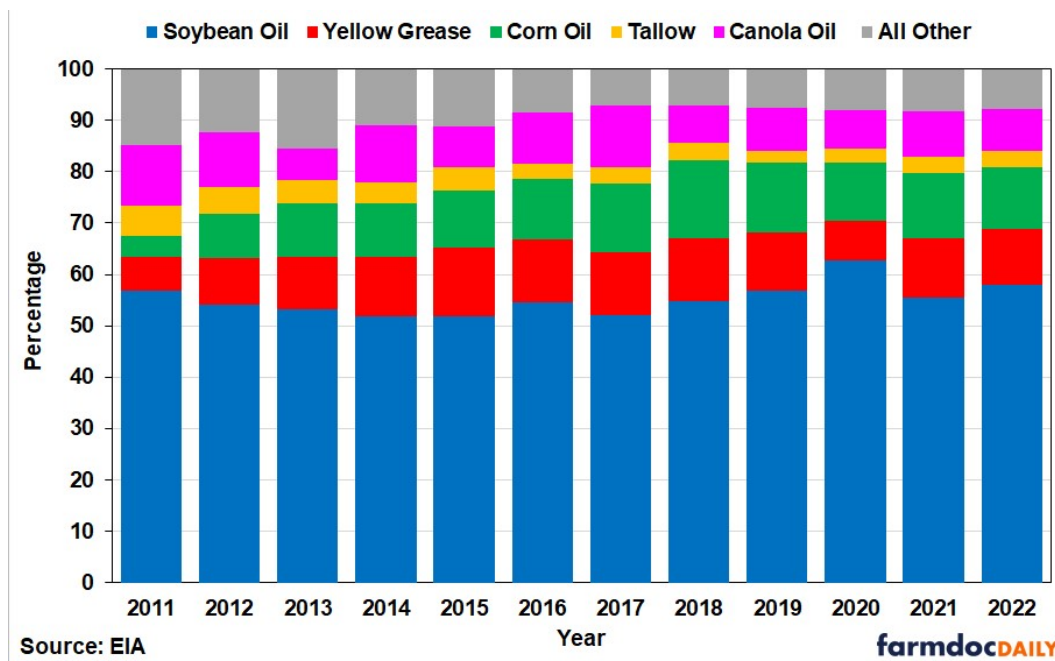


Gráfico 2: Matérias primas para a produção do biodiesel éster nos EUA.

Fonte: Gerverni et al., pág. 3 (2024).

O Brasil se assemelha com os Estados Unidos na representatividade do óleo de soja, como pode ser visto no Gráfico 3, com uma representatividade ainda maior no biodiesel produzido nacionalmente, mas ao contrário dos outros dois mercados, o segundo insumo mais relevante é proveniente de gorduras animais, o que condiz com as características produtivas da agropecuária brasileira.

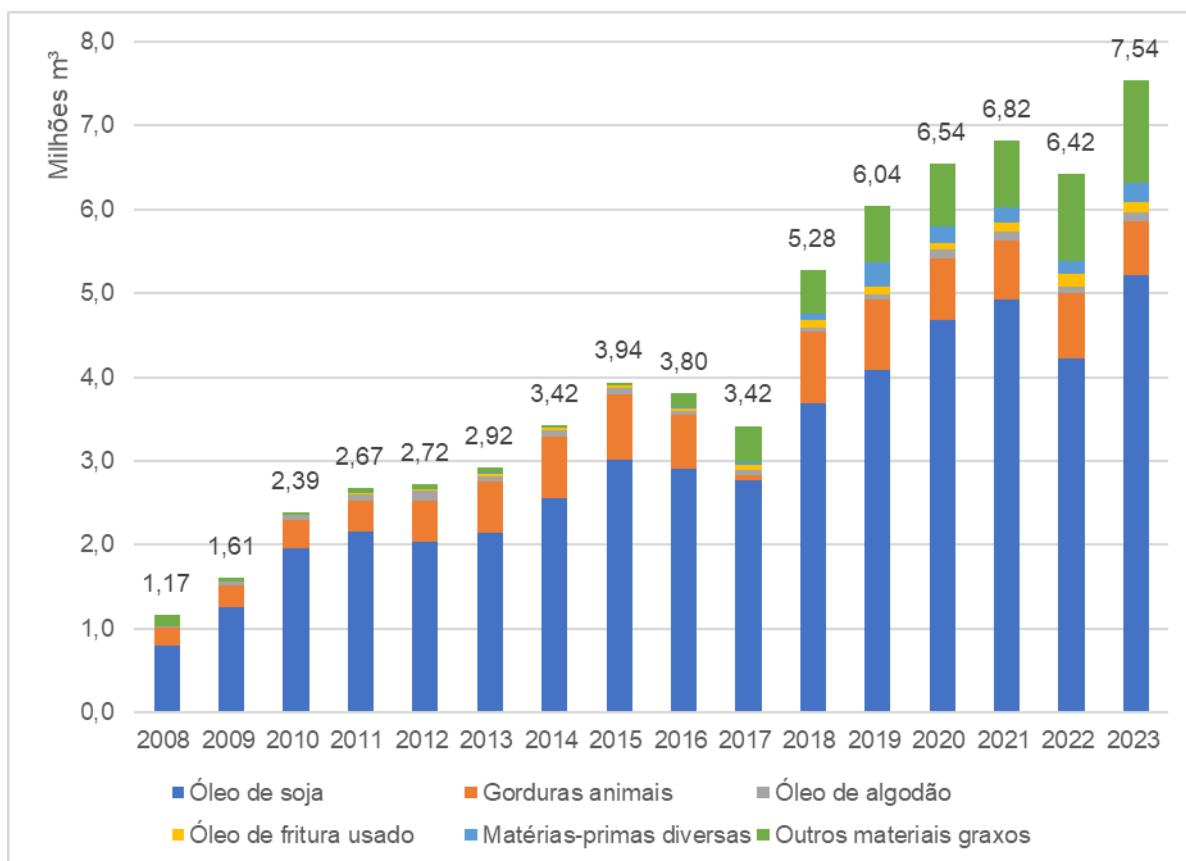


Gráfico 3: Composição de Matéria Prima na Produção de Biodiesel no Brasil.

Fonte: O autor com base em dados da ANP (2024).

Oliveira e Coelho (2017) fizeram uma revisão de todo o histórico, evolução e impacto do biodiesel no Brasil, e apontaram que, apesar de ter a sua mistura no óleo diesel B regulada de forma opcional de 2005 a 2007, o seu aumento aconteceu de forma progressiva e direcionada pelo governo através do PNPB, de forma que o Brasil saiu de não produtor em 2004 para ser a quarta maior potência em oferta de biodiesel no mundo em 2014.

Brännström *et al.* (2018) fizeram um resumo comparativo das vantagens e desvantagens de cada um dos diferentes combustíveis oriundos de óleos vegetais. Para os autores, as principais vantagens estão na simplicidade do seu processo produtivo e nas suas capacidades de lubrificação superiores ao diesel fóssil. As desvantagens, segundo eles, estão na necessidade de se misturar o biodiesel com óleo diesel fóssil, na sua compatibilidade limitada com motores a diesel, a necessidade de comercialização dos seus bioprodutos, o aumento das emissões de N_x , a sua degradação se armazenado por longos períodos, e o fato de que o biocombustível congela em águas mais geladas devido à sua menor densidade de energia.

Gonçalves *et al.* (2023) mapearam diversas oportunidades e desafios dos biocombustíveis no Brasil, entre eles o biodiesel éster e o diesel verde. Para os autores, as oportunidades estão relacionadas com as incertezas na oferta internacional de combustível fóssil (ampliadas pela pandemia de COVID-19 e pelos conflitos entre Rússia e Ucrânia) e na alta disponibilidade de recursos naturais em nosso território. Entretanto, os autores antecipam dificuldades para o setor de biodiesel na competição com a Petrobras, que se posiciona como um dos principais futuros supridores do diesel verde, seu concorrente. Segundo eles, para mitigar esse risco, uma regulação de como o diesel verde deve ser comercializado será essencial para evitar uma competição desnecessária entre esses combustíveis.

Ebadian *et al.* (2020) realizaram uma extensa pesquisa sobre políticas internacionais de incentivo ao uso e produção de biocombustíveis, e concluíram que esse tipo de regulação é essencial para uma transição energética rumo à descarbonização. No estudo, foi possível observar como o uso de mandatos obrigatórios de mistura foi usado de forma extensiva em quase todos os países, mas segundo os autores, os países com os melhores desempenhos foram aqueles que tiveram um equilíbrio entre políticas do tipo *demand-pull*, ou seja, demanda puxada (no sentido da criação de um mercado via regulação), com *technology-push*, ou seja tecnologia empurrada (no sentido de incentivar o desenvolvimento tecnológico e a inovação).

A cadeia produtiva e de suprimentos do biodiesel foi resumida pela UBRABIO (2017) e pode ser vista na Figura 8. É possível observar que essa cadeia é composta por diversas entradas e saídas, mas pode ser resumida por algumas etapas:

- 1) A soja é plantada, cultivada, colhida e transportada para os pontos de esmagamento.
- 2) Os produtos do esmagamento são o farelo (que servem de insumo para a pecuária e psicultura) e o óleo de soja, que serve de insumo para o biodiesel, junto com o metanol utilizado no processo de transesterificação.
- 3) Outras fontes de triglicerídeos também são utilizados, como as gorduras animais.

- 4) O produto final é o biodiesel éster, que é misturado ao óleo diesel A para formar uma mistura BX (na qual o X representa o percentual de mistura de biodiesel éster) e ser consumido no transporte de veículos pesados.

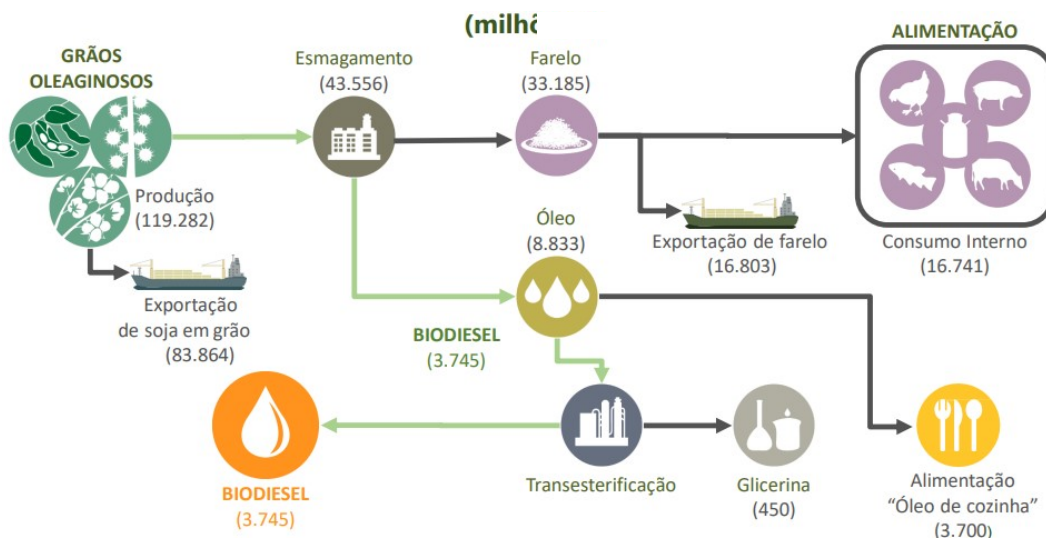


Figura 8: Representação da Cadeia Produtiva do Biodiesel.
Fonte: UBRABIO, pág. 22, 2019.

2.2.3

Diesel Verde, Diesel Renovável ou HVO

A tecnologia e a regulação do diesel verde são ambas recentes e ainda estão em ampla discussão no mercado de combustíveis (ANP, 2021). Ainda segundo Puricelli *et al.* (2021), o diesel verde, também conhecido diesel renovável ou HVO (*Hydrotreated Vegetable Oil*), é um diesel parafínico derivado de biomassa. A principal tecnologia para a obtenção desse tipo de combustível é o hidroprocessamento, que pode ser realizado em refinarias (PETROBRAS, 2022) ou em usinas de diesel verde (RAMOS, 2021).

O HVO não contém moléculas de oxigênio, aromáticos e enxofre, tendo propriedades superiores ao biodiesel éster e ao diesel convencional, e pode ser utilizado nos motores do ciclo diesel sem a necessidade de mistura nem adaptações mecânicas, também chamado de combustível *drop-in* (PURICELLI *et al.*, 2021), o que representa uma grande vantagem desse biocombustível em relação ao biodiesel éster.

Brännström *et al.* (2018), em seu resumo dos biocombustíveis, explicaram que o diesel verde pode ser obtido dos mesmos óleos vegetais que o biodiesel

éster, e destacaram diversas vantagens do diesel verde, como as suas melhores propriedades químicas, maior valor calorífico, maior número de cetano, boa estabilidade de armazenagem, boa capacidade de desempenhar em ambientes mais frios e menos emissões de N_x . A única desvantagem apontada pelos autores foi o alto custo financeiro do hidrogênio, que normalmente é obtido do gás natural.

Para Julio *et al.* (2022), o diesel verde é um biocombustível capaz de superar as dificuldades que o biodiesel éster enfrenta ao longo das duas décadas desde a sua implementação. Os autores apontam a necessidade de uma melhor alternativa sustentável do que o biodiesel éster no processo de descarbonização no transporte por veículos pesados, e afirmam que ele se tornará cada vez menos atraente conforme o diesel verde entre no mercado brasileiro. Gonçalves *et al.* (2023) concordam com Julio *et al.* (2022) em relação às vantagens mercadológicas do diesel verde, e alertam sobre a necessidade de uma regulação que equilibre a competição entre os dois biocombustíveis, uma vez que a Petrobras é o principal player de mercado posicionado para ofertar diesel verde no Brasil.

Ao contrário do biodiesel éster, o diesel verde ainda está em etapa de implementação no Brasil e no mundo, e por isso espera-se que a sua capacidade produtiva dobre até 2027, conforme demonstra o Gráfico 4 produzido pela Global Data (2023) *apud* SUSTMEME (2023).

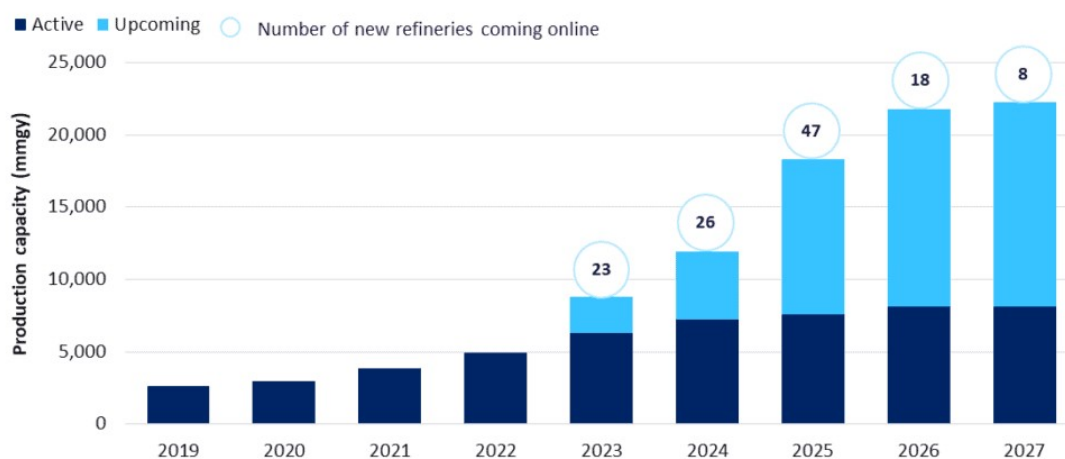


Gráfico 4: Estimativa de aumento de capacidade de refino de diesel verde no mundo.
Fonte: GLOBALDATA (2023) *apud* SUSTMEME, pág. 1 (2023).

No Gráfico 5, Lorne (2023) aponta uma grande representatividade do biodiesel éster no consumo global de biocombustíveis do Ciclo Diesel, com um crescimento do diesel verde na matriz global de consumo.

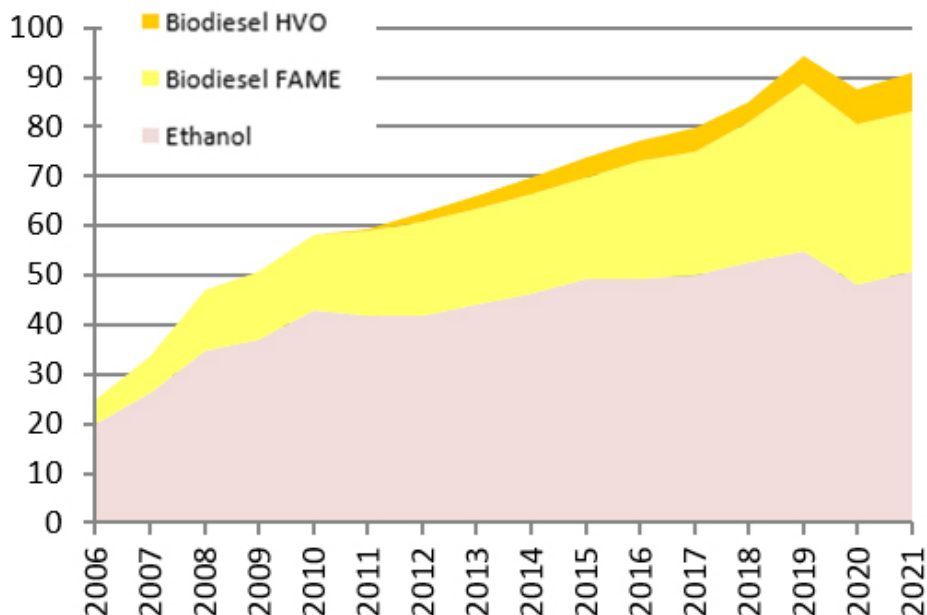


Gráfico 5: Evolução do consumo global de biocombustíveis no setor de transportes (em Mtoe).

Fonte: Lorne, pág. 2 (2023).

No entanto, quando avaliamos os Estados Unidos, país desenvolvido com a maior produção de biocombustíveis e sede da Neste Corporation (NESTE, 2024), maior produtor de combustíveis sustentáveis do mundo, vemos no Gráfico 6 uma possível igualdade entre as representatividades dos dois tipos de biocombustíveis.

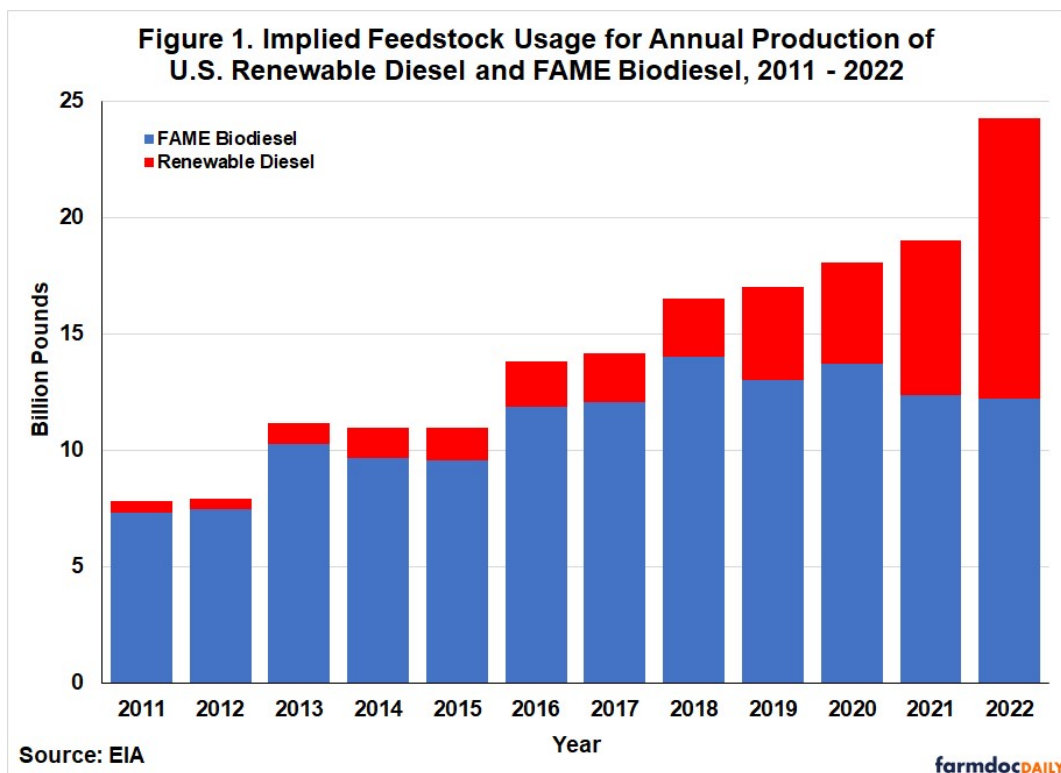


Gráfico 6: Uso de matérias-primas por rota de produção de biocombustíveis.
Fonte: Gerverni et al., pág. 3 (2023).

Apesar do recente aumento na sua representatividade, é importante ressaltar que quando analisamos as necessidades de óleo vegetal para a produção de 1 m³ de biodiesel éster (CAVALETT e ORTEGA, 2010) e 1 m³ de diesel verde (ARGUELLES-ARGUELLES *et al.*, 2021), o diesel verde utiliza mais matéria-prima (42%) na sua formulação, o que pode distorcer a conclusão do Gráfico 6.

2.2.4

Desafios dos Biocombustíveis no Brasil e no Mundo

Assim como existem diversas oportunidades nos mercados de biocombustíveis do Brasil e do mundo, existem também diversos desafios para o aumento da sua relevância na matriz energética.

Gonçalves *et al* (2023) trazem em sua análise pós pandemia que o Brasil nunca esteve em um momento tão propício para expandir o uso de biocombustíveis, principalmente com a insegurança e instabilidade sofridas por políticas energéticas que utilizam o petróleo como principal insumo. Apesar disso, os autores apontam como principal desafio para o país o conflito esperado entre as

indústrias produtoras de biodiesel éster e a Petrobras, principal desenvolvedora do diesel verde como biocombustível do futuro.

Estevez *et al* (2022) explicam que no contexto global, a complexidade no processo de transesterificação e os altos custos atrelados à eliminação do glicerol como um dos seus subprodutos representaram um atraso na transição energética dos últimos 10 anos e são os principais motivos pelos quais o biodiesel éster não é um forte candidato a principal biocombustível substituto do diesel fóssil.

Anuar e Abdullah (2016) fizeram um estudo detalhado dos desafios de implementação do biodiesel éster na Malásia, que aparenta ter diversos paralelos com o contexto brasileiro. Os autores dividiram esses desafios em 3 categorias: matéria-prima, gestão de resíduos e qualidade/aceitação.

Entre os desafios de matéria-prima, se destacaram a alta flutuação de preços das matérias primas, o contexto regulatório complexo, a competição com a indústria de alimentos, o deflorestamento e o alto grau de impurezas do uso de óleos de fritura já utilizados (ANUAR E ABDULLAH, 2016).

Os desafios da categoria de gestão de resíduos são relacionados majoritariamente ao glicerol citado por Estevez *et al* (2022), uma vez que o subproduto possui hoje um grande excedente de oferta global causado pelo aumento da produção de biodiesel éster (ANUAR E ABDULLAH, 2016).

Finalmente, na categoria de qualidade/aceitação, os autores citaram a dificuldade para se obter no processo produtivo do biocombustível uma qualidade que alcance os níveis exigidos pelas normas internacionais, que tem por consequência uma menor aceitação do mercado, que por sua vez sofre com frequência alarmante problemas nos seus maquinários causados por produtos de qualidade inferior (ANUAR E ABDULLAH, 2016).

Em seu panorama do biodiesel éster e do diesel verde no Brasil e no mundo, Milanez *et al.* (2022) analisaram a experiência internacional com o biodiesel éster da Indonésia, Estados Unidos e União Europeia, todos produtores e consumidores relevantes do biocombustível. Segundo os autores, os aumentos recentes na produção da Indonésia têm sido objetos de preocupação internacional, uma vez que existe uma suspeita de que esse crescimento ocorreu às custas de um grande desmatamento de florestas nativas. Nos EUA, legislações federais e estaduais facilitaram de forma significativa o crescimento da produção e da demanda de biodiesel éster, fazendo com que o país se torna-se por muitos anos o

maior produtor de biocombustíveis no mundo. Na Europa, a presença de uma indústria automotiva relevante foi destacada pelos autores como um dos fatores de sucesso para o crescimento do biodiesel na matriz, com destaques para França e Alemanha.

No contexto nacional, Milanez *et al* (2022) trazem a dependência de uma matéria prima (soja) e a concentração da produção de biodiesel éster nas regiões Sul e Centro-Oeste (polos de pequenos agricultores e do agronegócio industrial, respectivamente) como os principais desafios do setor. Além disso, os autores trouxeram também aspectos de qualidade a serem superados pelo mercado, que reclama constantemente de impactos da baixa qualidade do biodiesel no desempenho dos motores e maquinários.

2.3

Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

2.3.1

Ciclo de Vida e Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

Baumann *et al.* (2005) explicam que o conceito de ciclo de vida de um produto remete ao final dos anos 60, quando a ideia de avaliações ambientais abrangentes dos produtos foi concebida na Europa e nos EUA. Segundo os autores, o paradigma de que avaliações conduzidas por diferentes consultores levavam a resultados distintos era explicado (em parte) por diferentes escolhas metodológicas. Assim, diversas iniciativas foram tomadas para harmonizar essas diferentes metodologias. Para eles, importantes diretrizes começaram a ser implementadas a partir dos anos 90, como o “Handbook on Life Cycle Assessment”, editado por Jeroen B. Guinée, e o “The Hitch Hiker’s Guide to LCA”, escrito por Henrikke Baumann e Anne-Marie Tillman, considerados referências no assunto. Complementarmente, no final dos anos 90, foi feito um trabalho de padronização dentro do framework da International Organization of Standardization, também conhecida como ISO (BAUMANN *et al.*, 2005).

Como este estudo busca uma aplicação em âmbito nacional, utilizaremos como referência a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2014a, pág. 1), que na sua norma ISO 14040:2009 define o ciclo de vida de um produto como

“os estágios consecutivos e encadeados de um sistema, desde a aquisição da matéria-prima a partir de recursos naturais (ou de sua geração) até a disposição

final”. Consequentemente, a mesma ABNT (2014a, pág. 2) conceitua a avaliação do ciclo de vida (ACV) como “a compilação e avaliação dos fluxos de entrada, saída e impactos ambientais potenciais de um sistema ao longo do ciclo de vida de determinado produto ou serviço”.

Ainda segundo a ABNT (2014a), existem quatro fases de estudo de uma ACV:

Fase 1: a fase de definição de objetivo e escopo, na qual se definem objetivos como a aplicação pretendida, as razões para a execução do estudo, o público-alvo e se existe a intenção de utilizar os resultados em afirmações comparativas a serem divulgadas publicamente; e se limita o escopo, informando os sistemas de produtos a serem estudados (detalhando as suas fronteiras), as suas funções, possíveis limitações, entre outros.

Fase 2: a fase de análise de inventário de ciclo de vida (ICV), que envolve todo o processo de coleta de dados e procedimentos para calcular as entradas e saídas relevantes de um determinado sistema de produto. Entre os dados coletados, estão as entradas de matéria-prima e de energia, e as saídas de emissões e rejeitos poluentes. Os procedimentos dessa etapa incluem a validação dos dados, assim como a sua correlação com os processos elementares, com os fluxos de referência e com a unidade funcional.

Coltro (2007) define a unidade funcional como um dos elementos fundamentais da ACV. Segundo a autora,

“a unidade funcional é definida como o desempenho quantificado de um sistema de produto e tem como objetivo primário servir de unidade de referência do estudo. Assim, todos os dados do estudo de ACV são relacionados à unidade funcional, ou seja, todas as entradas e saídas do sistema são relacionadas a esta unidade. Portanto, esta unidade precisa ser bem definida e mensurável. Como exemplos tem-se 1.000 kg de café torrado e moído disponível para distribuição, 1.000 kg de água tratada pronta para o consumo, 1 m² revestido por tinta por um período de um ano etc.” (Coltro, pág. 14, 2007).

Fase 3: a fase de avaliação de impactos do ciclo de vida (AICV), que tem como objetivo estudar a significância dos impactos ambientais potenciais, tentando entendê-los através da associação dos dados do ICV com categorias de impacto específicas, e fornecendo informações para a fase de interpretação do ciclo de vida. São considerados elementos obrigatórios dessa etapa a seleção de categorias de impacto, indicadores de categoria e modelos de caracterização,

assim como a correlação de resultados do ICV e o cálculo de resultados dos indicadores de categoria.

Fase 4: a fase de interpretação do ciclo de vida é aquela que une as constatações da ICV e da AICV, sendo necessário que essa etapa seja consistente com os objetivos e escopos definidos, assim como levem a conclusões, expliquem limitações e provejam recomendações.

Um exemplo aplicado das 4 fases pode ser visto na Figura 9, na qual Sala *et al.* (2016) mostra um diagrama de ACV de um determinado veículo do tipo X, sendo utilizado por Y anos no país Z. Sala *et al.* (2016) demonstra como as informações ficam distribuídas nas quatro fases da ACV:

Objetivo e escopo: ACV de carro do tipo X, assumindo o seu uso por Y anos, produzido no carro Z etc.;

Inventário do Ciclo de Vida (ICV): Para cada etapa do ciclo de vida, dados de emissões no meio ambiente (CO₂, benzeno, químicos orgânicos) e recursos utilizados (metais, petróleo etc.) são coletados. Cada emissão e recurso são convertidos em termos de impacto em preparação para a próxima etapa;

Avaliação dos Impactos do Ciclo de Vida (AICV): A análise é feita por categoria de impacto e agrupada em áreas de proteção para a próxima etapa;

Interpretação do Ciclo de Vida: O impacto é interpretado por área de proteção (saúde humana, equilíbrio do ecossistema e recursos naturais).

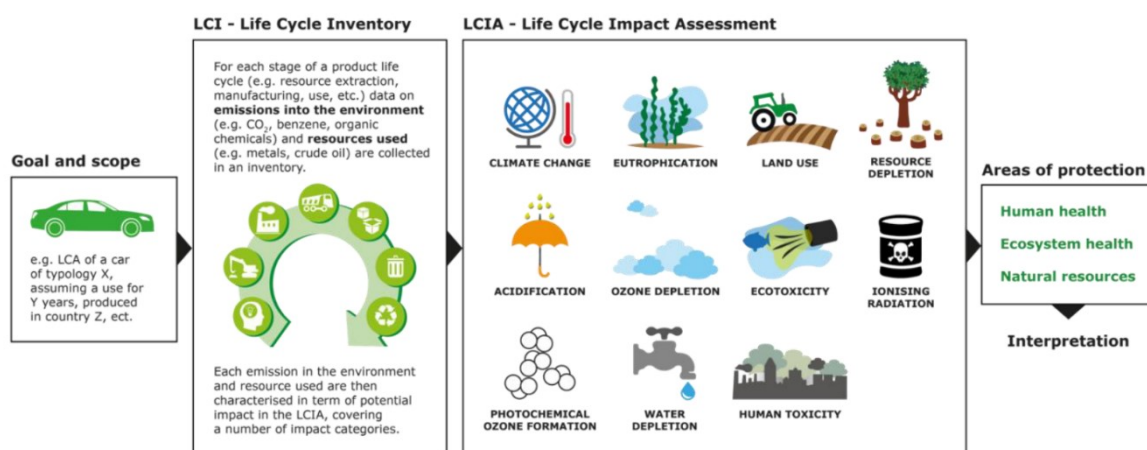


Figura 9: Exemplo de Avaliação do Ciclo de Vida de um Carro.
Fonte: Sala *et al.* pág. 7 (2016).

Sala *et al.* (2016), quando detalharam as 11 categorias de impacto da AICV, reforçaram que não existem restrições na escolha das categorias de

impacto avaliadas e nos seus respectivos métodos de avaliação, desde que essa escolha seja feita com transparência e justificativa. O Instituto de Meio Ambiente e Sustentabilidade do Centro de Pesquisa Integradas da Comissão Europeia (2010) detalham e discutem em seus diversos manuais categorias de impacto similares às trazidas por Sala et al (2016), assim como os seus respectivos métodos.

1. Mudanças Climáticas: Refere-se ao impacto das emissões de GEEs que representam um dos principais fatores para o aquecimento global, entre eles o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4), os óxidos de nitrogênio (NO_x) e outros, que contribuem para o efeito estufa da Terra e elevam as temperaturas globais, além de causar mudanças nos padrões climáticos e outros efeitos ambientais.
2. Depleção da Camada de Ozônio: Trata da redução da camada de ozônio na estratosfera causada por substâncias como clorofluorcarbonetos (CFCs) e compostos halogenados. A depleção da camada de ozônio tem como consequência o aumento da quantidade de radiação UV-B que atinge a superfície terrestre, causando danos à saúde humana e efeitos prejudiciais aos ecossistemas.
3. Toxicidade Humana: Avalia os efeitos negativos das substâncias químicas liberadas no meio ambiente sobre a saúde humana, incluindo a exposição a produtos químicos através da inalação, ingestão ou contato com a pele, e causando doenças agudas ou crônicas.
4. Partículas Inorgânicas Respiratórias: Refere-se aos impactos na saúde humana devido à inalação de partículas inorgânicas (ex: poeira, sulfatos e nitratos) que podem causar ou agravar doenças respiratórias e outros problemas de saúde.
5. Radiação Ionizante: Engloba os efeitos da radiação ionizante emitida por radionuclídeos sobre a saúde humana e o meio ambiente, podendo causar câncer, danos genéticos e outros problemas de saúde.
6. Formação de Ozônio Troposférico: Relaciona-se à formação de ozônio no nível do solo devido à reação de compostos orgânicos voláteis (COVs) e óxidos de nitrogênio (NO_x) na presença de luz solar. Esse gás é um poluente que pode causar problemas respiratórios e danos às plantas e materiais.

7. Acidificação: Refere-se ao aumento da acidez no solo e nos corpos hídricos devido às emissões de óxidos de enxofre (SOx) e óxidos de nitrogênio (NOx). A acidificação pode incorrer em danos aos ecossistemas terrestres e aquáticos, afetando a vida vegetal e animal.
8. Eutrofização: Relaciona-se ao excesso de nutrientes nos ecossistemas terrestres e aquáticos (ex: nitrogênio e fósforo), levando ao crescimento desequilibrado de plantas e algas, o que pode causar um baixo nível de oxigênio nos corpos hídricos e afetar negativamente a vida marinha.
9. Ecotoxicidade: Avalia os efeitos tóxicos das substâncias químicas nos organismos vivos em diferentes ecossistemas. A ecotoxicidade pode causar mortalidade, redução na reprodução e outros efeitos adversos nas populações de plantas e animais.
10. Uso do Solo: Refere-se aos impactos ambientais associados à ocupação e transformação do solo, incluindo a perda de biodiversidade, mudanças nos habitats naturais e impactos na função dos ecossistemas.
11. Depleção de Recursos: Envolve a redução dos recursos naturais devido à extração e uso de minerais, combustíveis fósseis, energia renovável e água. A depleção de recursos pode levar à escassez e ao aumento dos impactos ambientais associados à extração e processamento desses recursos.

Apesar de entender que outras diversas categorias e modelos poderiam ser utilizados na AICV (ex: Partículas Inorgânicas Respiratórias, Acidificação, Uso do Solo e Depleção de Recursos), a categoria mais relevante relacionada a transportes e gases de efeito estufa é a de Mudanças Climáticas, cujos principais resultados avaliados da ICV são as quantidades de GEEs emitidos por unidade funcional (ABNT, 2014a).

Existem diversas formas de se representar as etapas do ciclo de vida de um produto: A ABNT (2014a) representa o meio ambiente de um sistema de forma não linear, destacando os diversos fluxos de retorno, assim como as atividades comuns em diversas etapas, como transporte e uso de energia. Sala *et al.* (2016), por sua vez, optaram por um diagrama que representasse melhor o caráter cíclico dos sistemas atuais, com a evolução dos sistemas de reciclagem e reuso. A diagramação de um sistema feita por Librelotto e Jalali (2008), apesar de ser mais

simples do que as anteriores, é a que melhor representa o ciclo de vida dos combustíveis, e foi utilizada como referência da análise. Essa diagramação pode ser observada na Figura 10.

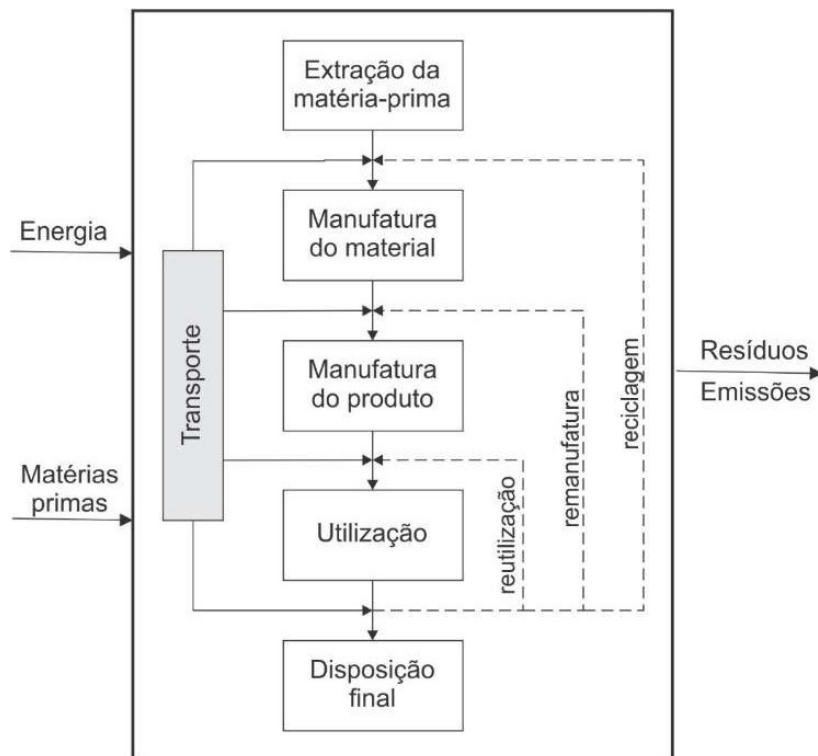


Figura 10: Representação Linear de um Sistema de Ciclo de Vida.
Fonte: Librelotto e Jalali, pág. 6 (2008).

Os benefícios da ACV (CURRAN, 2008, *apud* ALVARENGA, QUEIROZ e RENOFIO, 2012) são diversos, entre eles a identificação dos impactos ambientais de uma ou mais áreas relacionadas, a avaliação dos potenciais impactos ambientais associados com as entradas e liberações identificadas, a análise de trade-offs associados a produtos e processos diversos, a avaliação dos efeitos humanos e ecológicos do consumo de determinado material e a avaliação dos lançamentos ambientais em caráter local, regional e mundial. Apesar dos benefícios, também é importante compreender algumas das limitações da ACV, como o alto consumo de recursos (humanos e de tempo) e ausência ou dificuldade de obtenção de dados relevantes (CURRAN, 2008 *apud* ALVARENGA, QUEIROZ e RENOFIO, 2012).

2.3.2 Avaliação do Ciclo de Vida Simplificada

Ainda segundo Alvarenga *et al.* (2012), essas limitações podem ser superadas através do uso de ACVs simplificadas, definidas pelos autores como “uma variedade menos complexa de uma ACV detalhada, conduzida de acordo com guias de execução, mas não em total consonância com os padrões das normas da série ISO relacionadas ao estudo de uma ACV.”

Após realizar uma extensa pesquisa bibliográfica sobre ACVs simplificadas, Baumann *et al.* (2020) propõem uma sistematização na abordagem dessas simplificações. Os autores concluíram que para lidar com as complexidades dos sistemas de produtos e com as expectativas dos usuários finais da ACV, existem cinco categorias de simplificação, sendo elas exclusão, substituição de dados nos inventários, julgamento qualitativo especialista, padronização e automatização. Essas cinco categorias, quando combinadas, podem compor até treze estratégias de simplificação, cada uma com as suas aplicações recomendadas e com os seus desafios.

Essas diferentes estratégias podem ser observadas nas extensas literaturas nacionais e internacionais sobre a aplicação de ACVs simplificadas, em diferentes épocas e segmentos. Na esfera nacional, Pereira e Corlaite Lana (2020) aplicaram a ferramenta para identificar as emissões de CO₂ em sistemas de vedação arquitetônica; Cruz (2020) utilizou a ferramenta para realizar comparações entre diferentes estratégias de tratamento de resíduos orgânicos; e Alvarenga (2012) utilizou a ferramenta na sua dissertação de mestrado para analisar a problemática ambiental envolvida com a produção agrícola de milho de uma unidade produtiva.

No âmbito internacional, Hospido *et al.* (2003) utilizaram a ferramenta para contornar a falta de dados confiáveis em uma produtora de leite na Espanha; Beccali *et al.* (2016) compararam, através de ACVs simplificadas, o desempenho ambiental de diferentes sistemas de aquecimento e refrigeração; e Danilecki (2017) mapeou as mudanças de perfil ambiental de diferentes modelos de um mesmo carro popular ao longo de 30 anos aplicando um estudo de ACV simplificada.

2.4

Avaliações de Ciclo de Vida de Combustíveis e Biocombustíveis no Brasil

Entre todas as ACVs estudadas no referencial teórico, uma das mais relevantes foi a realizada por Cavalett e Ortega (2010), na qual os autores construíram um inventário completo do ciclo de vida desde as etapas de matéria prima até as etapas de produção e transporte. Apesar do estudo já ter quinze anos, o seu inventário se destaca por sua relevância, rigor técnico e nível de detalhe, e foi fonte de dados para este estudo.

Cherubini *et al.* (2017), após uma extensa pesquisa bibliográfica nas bases nacionais entre 2003 e 2015, concluíram que a categoria que mais aparecia relacionada com os termos gerais de ACV (“environmental impact”, “system” ou “emission”) era a de biocombustíveis, com maior destaque para o etanol e a cana-de-açúcar. A relevância de cada categoria e palavra-chave pode ser observada na Figura 11. Indiretamente, Do Carmo Brito *et al.* (2022) destacaram também o crescimento da quantidade de ACVs na cadeia de suprimentos da soja, na qual as alternativas do ciclo diesel estão inseridas. A importância da avaliação do ciclo de vida como ferramenta para aumentar a efetividade das políticas públicas relacionadas a biocombustíveis foi destacada por Ebadian *et al.* (2023), concluindo também que as condições geográficas e locais irão impactar significativamente as ACVs.

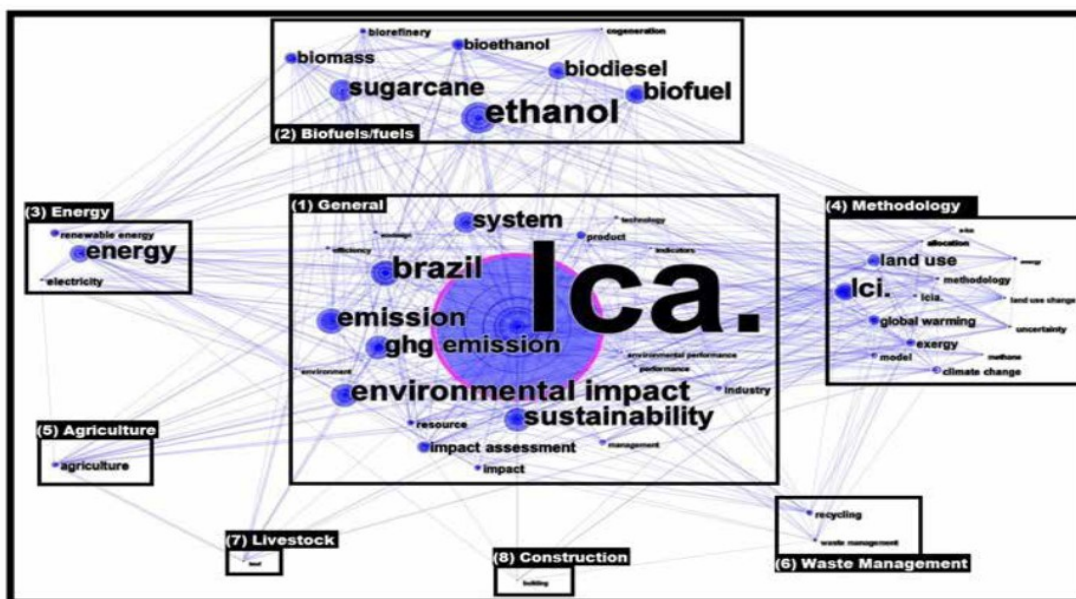


Figura 11: Agrupamento das 50 principais palavras-chave com maior frequência de aparição por critério de similaridade, e rede de conexões entre temas para o período de 1993-2015.

Fonte: Zanghelini *et al.* (2016) *apud* Cherubini *et al.* (2017).

No intuito de compreender as diferentes aplicações metodológicas, essa bibliografia foi revisada de forma extensiva, e algumas das suas principais conclusões serão expostas a seguir.

Sugawara (2012) realizou uma avaliação de ciclo de vida detalhada para comparar os desempenhos ambientais no Brasil do óleo diesel e da sua alternativa na época (B5 etílico de soja). Apesar do B5 etílico de soja não ser considerado mais uma das alternativas relevantes para a transição energética do ciclo diesel, a sua dissertação de mestrado serviu como uma referência em profundidade e estrutura para diversos estudos posteriores, inclusive esta dissertação, que utiliza a mesma estrutura metodológica.

Uma das principais razões do B5 etílico de soja não ter tido sucesso na sua implementação pode ser o seu baixo desempenho ambiental total (não só em termos de emissões, mas em diversas categorias) apontado no estudo de Sugawara (2012). Quando comparado com o diesel fóssil, a mistura B5 teve desempenho ambiental pior em nove das treze categorias avaliadas. Apesar disso, na categoria de mudanças climáticas, o autor confirmou a grande representatividade do CO₂ entre os gases de efeito estufa nos ciclos de vida de combustíveis fósseis ou oriundos de biomassa. Essa descoberta pode ser observada na Tabela 5.

Tabela 5: Quantidade e contribuição de gases de efeito estufa em ACV do óleo diesel fóssil e da mistura B5.

| Aspecto ambiental | Óleo Diesel | | Mistura B5 | |
|-------------------------------------|---------------------------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------|
| | Quantidade (kg CO ₂ eq) | Contribuição (%) | Quantidade (kg CO ₂ eq) | Contribuição (%) |
| Carbon dioxide, fossil | 123,1 | 96,2 | 120,4 | 96,1 |
| Methane, fossil | 3,616 | 2,8 | 3,601 | 2,9 |
| Carbon dioxide, land transformation | 0,654 | 0,5 | 0,659 | 0,5 |
| Dinitrogen monoxide | 0,575 | 0,2 | 0,600 | 0,5 |

Fonte: Sugawara (2012).

Castanheira *et al.* (2013) compararam, através de uma ACV, duas alternativas de matéria-prima para o biodiesel éster (grãos de soja e sebo bovino). Os autores concluíram que a soja apresenta um desempenho melhor como matéria-prima, uma vez que os sistemas de criação de gado apresentam baixa eficiência, comparada com o setor de oleaginosas. Quatro anos após a ACV de Castanheira *et al.* (2013), Cerri *et al.* (2017) atualizaram a ACV do biodiesel de soja e Sousa *et al.* (2017) atualizaram a ACV do biodiesel proveniente do sebo bovino. Ressalta-se que apesar das 2 ACVs terem como escopo o mesmo sistema de produto, as avaliações utilizaram estruturas metodológicas distintas, com resultados de difícil comparação entre si.

Rocha *et al.* (2014) também fizeram uma meta-análise das ACVs de biocombustíveis nas condições brasileiras, comparando o etanol de cana, o biodiesel de soja e o biodiesel de palma, e a superioridade da soja como matéria-prima para o biocombustível do ciclo diesel também se confirmou através da aplicação de diversas estruturas metodológicas pelos autores.

Esteves *et al.* (2016) estimaram as emissões de GEEs do biodiesel de soja através da combinação de ACV com uma análise da mudança no uso da terra (*Land Use Change*, ou LUC). Entre as diversas conclusões dos autores, destaca-se a importância das emissões indiretas relacionadas à mudança de uso da terra, especialmente nas áreas de maior eficiência agrícola, e o cuidado na definição das terras utilizadas para a expansão da produção de soja, principalmente na região amazônica.

Mais recentemente, Costa e Oliveira (2022) realizaram uma ACV simplificada, na qual analisaram o diferente impacto social das matérias primas para o biodiesel éster, utilizando a estrutura metodológica S-LCA (sigla em inglês

para Avaliação de Ciclo de Vida Social). Entre as conclusões mais relevantes do estudo, estão as dificuldades de todas as matérias primas no cumprimento dos direitos trabalhistas; a dificuldade de trabalhadores das regiões norte e nordeste em se associarem a cooperativas e com isso, reduzir a sua fragilidade competitiva e aumentar os seus rendimentos; e o desempenho negativo das matérias primas de gado e milho em relação a condições de trabalho análogas à escravidão.

Com a evolução tecnológica do diesel verde, cada vez mais estudos relativos ao seu ciclo de vida começaram a aparecer na bibliografia nacional. Julio *et al.* (2022) analisaram o potencial técnico, econômico e ambiental do diesel verde como complemento da matriz do ciclo diesel no Brasil, e concluíram que o novo biocombustível tem um desempenho superior ao biodiesel éster nos diversos campos estudados, tendo em alguns casos pontuação 50% superior em relação ao seu concorrente. Os autores também concluíram que até 12,95 milhões de toneladas de CO₂ podem ser reduzidos das emissões anuais em cenários de uso do diesel verde. Ambos os estudos não se limitaram aos aspectos técnicos, recomendando caminhos regulatórios para financiar os investimentos necessários à expansão dessas tecnologias.

Roque *et al.* (2023) combinou análises experimentais de misturas de HVO e bioetanol com ACVs comparativas desses biocombustíveis e dos combustíveis fósseis aos quais eles buscam substituir, e as conclusões das ACVs reforçam a superioridade do desempenho ambiental do HVO em relação ao diesel convencional.

2.5

Avaliações de Ciclo de Vida de Combustíveis e Biocombustíveis em Outros Países

Na revisão bibliográfica conduzida por Liu *et al.* (2023) sobre ACVs para combustíveis alternativos no transporte, alguns temas interessantes são discutidos, como por exemplo o fato de que metade dos estudos sobre combustíveis de biomassa não incluíram ou aprofundaram a etapa de matéria-prima (ex: cultivo da soja), e o maior foco dos estudos em consumo de energia e emissão de GEEs pelos combustíveis alternativos, negligenciando outros possíveis impactos ambientais. Entre as principais conclusões, estão algumas das limitações

observadas na literatura, como a escassez e instabilidade dos dados, e a consideração inadequada de diversos estágios do ciclo de vida.

Assim como o presente estudo objetiva, Koroneos e Nanaki (2012) realizaram ACVs comparativas entre gasolina, diesel e biodiesel, mas no contexto geográfico da Grécia. De forma consistente com a literatura, os autores confirmaram o desempenho ambiental superior do biodiesel em relação ao seu concorrente convencional, mas em uma das suas conclusões, afirmou que o uso do biodiesel puro sem mistura (B100) pode ser facilmente utilizado nos motores a diesel, o que até hoje não é o paradigma tecnológico.

A Índia, 7º maior país produtor de biocombustíveis no mundo em 2022 (STATISTA, 2022), teve uma ACV realizada por Kumar *et al.* (2012) para o seu biodiesel de *Jatropha*, uma matéria-prima considerada promissora no início do século XXI, mas que ainda não se provou sustentável do ponto de vista financeiro ou tecnológico (MOMBRAV, 2023). Os indicadores de impacto utilizados pelos autores foram o consumo de energia, a emissão de GEEs e a sustentabilidade (ou grau de renovação) do biocombustível. Ao contrário da maior parte das ACVs observada na revisão bibliográfica, o estudo analisa com profundidade a etapa de agricultura da matéria-prima, demonstrando que os indicadores podem variar significativamente entre agricultura de irrigação ou agricultura sequeira (dependente das chuvas). Condizente também com o observado em toda a literatura, o estudo também conclui um desempenho superior do biocombustível em relação aos combustíveis convencionais.

Em um estudo mais recente feito nos Estados Unidos por Ou *et al.* (2022), uma ACV das emissões de GEEs por biodiesel e diesel verde foi conduzida, dando um enfoque maior nas etapas de matéria-prima e produção dos biocombustíveis, em comparação com o diesel convencional. Interessante observar que o estudo utilizou a premissa de neutralidade de carbono para os combustíveis derivados de biomassa, ou seja, o CO₂ emitido para a atmosfera é capturado no processo de agricultura que gera a sua matéria-prima. As conclusões do estudo também estão em linha com o observado na literatura: a redução das emissões de GEEs pela substituição do diesel convencional por biocombustíveis; a menor taxa de emissão de GEEs da soja como matéria-prima, em relação a outros como canola, milho e sebo bovino; e a menor taxa de emissão de GEEs do diesel verde, em relação ao biodiesel.

3

Método de pesquisa

O presente estudo irá aplicar uma versão simplificada da estrutura metodológica estabelecida pela ABNT através da norma NBR ISO 14040 (ABNT, 2014a) que estabelece os princípios e estrutura geral de uma ACV, e da norma NBR ISO 14044 (ABNT, 2014b), que fornece orientações mais detalhadas e práticas de como realizar efetivamente uma ACV. Assim como na versão completa, a versão simplificada da ACV que a estrutura metodológica deste trabalho foi construída consiste em 4 etapas: 1) definição de objetivo e escopo; 2) inventário do ciclo de vida (ICV); 3) avaliação dos impactos do ciclo de vida (AICV) e 4) interpretação do ciclo de vida. Nesse estudo, a primeira etapa será descrita na seção de método, enquanto as 2 seguintes irão compor a seção de apresentação e análise de dados, e a última será descrita no capítulo de conclusões.

A simplificação da estrutura metodológica se concentra majoritariamente em 2 aspectos: a utilização de somente um parâmetro para a avaliação de impacto (emissão de CO₂), focando nos desdobramentos ambientais do uso de cada combustível, ao invés de avaliar também os impactos econômicos e sociais; e a não modelagem detalhada de todos os subsistemas, utilizando modelagens de fontes secundárias (compostas majoritariamente de artigos acadêmicos).

Para a primeira simplificação, a justificativa se encontra no fato de que a discussão de transição energética se concentra na redução emissão dos GEEs, dos quais o CO₂ é o que possui mais representatividade entre as emissões provenientes das atividades desempenhadas pelo homem. Sugawara (2012), ao realizar uma ACV completa de combustíveis e biocombustíveis para comparar os seus desempenhos ambientais, já havia observado que o CO₂ é o gás mais relevante no que diz respeito a mudanças climáticas ocasionadas por esses produtos, com 96,2% de representatividade, o que pode ser observado na Tabela 5.

A segunda simplificação se justifica pelo fato de que os subsistemas são estudados com grande profundidade e de forma individual na literatura levantada, tornando desnecessária uma modelagem específica para esse estudo. As exceções a esses casos serão explicitadas na sequência.

Um exemplo disto é a diferença entre a complexidade de alguns subsistemas desta ACV: enquanto no subsistema de Extração do Petróleo (4.1.1.1) no sistema Óleo Diesel foi feita uma modelagem detalhada com diversas fontes e operações matemáticas para a construção do indicador que iria compor o inventário final do ciclo de vida, no subsistema de Consumo do Óleo Diesel (4.1.1.5) foi utilizado diretamente um parâmetro de um inventário já existente e construído na mesma unidade funcional deste estudo.

Existe ainda uma categoria de subsistemas que não possuem modelagem para a construção do inventário, mas que necessitaram de cálculos para a conversão dos parâmetros na unidade funcional escolhida: é o caso da maior parte dos subsistemas relacionados a agricultura, transporte e produção de óleos vegetais e biocombustíveis.

3.1

Definição de Objetivo e Escopo da ACV Simplificada

3.1.1

Definição de Objetivo da ACV Simplificada

Uma vez estabelecido o objetivo do estudo de comparar o impacto ambiental das 3 principais tecnologias do ciclo diesel através especificamente do seu potencial de emissão de CO₂, esta ACV buscará primeiramente entender o impacto individual de cada combustível, para na sequência avaliar diferentes cenários de matriz energética no transporte nacional e os seus respectivos impactos.

Por ser um estudo acadêmico, o público-alvo principal da ACV é a própria comunidade acadêmica, que realiza diversos estudos acerca de ACV de combustíveis, e que está suportando essa parte da discussão de transição energética no Brasil. Entretanto, outros públicos-alvo podem ser suportados pelas informações contidas nesse estudo, como os setores estatais de planejamento

energético, e as empresas que fazem ou desejam fazer parte do setor de combustíveis em todas as suas etapas.

Os resultados desta ACV permitirão o direcionamento das discussões estratégicas em torno da transição energética de combustíveis do ciclo diesel, permitindo um planejamento estratégico mais embasado e técnico por parte das entidades estatais e privadas.

3.1.2

Definição de Escopo da ACV Simplificada

3.1.2.1

Função e Unidade Funcional

A função utilizada para avaliar os desempenhos ambientais dos combustíveis é: atender à demanda energética anual do ciclo diesel no Brasil. Para isso, definiu-se como a unidade funcional 1 m³ de combustível do ciclo diesel consumido no ano 2020, independentemente do tipo de combustível (óleo diesel, biodiesel éster ou diesel verde). Decidiu-se por utilizar a demanda histórica como referência de consumo para evitar discussões de projeções futuras, que não fazem parte do escopo deste estudo.

A principal motivação da escolha do ano foi encontrar um ano de referência com dados suficientes sobre emissões – alguns inventários possuem atraso de até 4 anos para serem divulgados – e que não causassem uma distorção entre os parâmetros, como a entrada do PROCONVE P-8, homologado a partir de 2022 (MILLER e POSADA, 2019) e que poderia tornar inadequado o uso do parâmetro de consumo (BRASIL, 2013). Apesar de ser um ano atípico devido à pandemia de COVID-19, Lobato *et al.* (2021) não observaram uma redução significativa nas emissões relacionadas ao transporte de carga por veículos pesados – alguns até aumentaram a sua emissão, como foi o caso dos caminhões semi-pesados.

Importante ressaltar que foi utilizada como premissa a mesma eficiência energética dos 3 combustíveis, conforme observado por GEÇA *et al.* (2021) em seu estudo comparativo entre as combustões e emissões de motores diesel. Essa premissa indica que 1 m³ dos combustíveis é capaz de gerar a mesma quantidade de energia independente do combustível que esteja abastecendo o motor.

Além disso, apesar das etapas de consumo serem realizadas muitas vezes em conjunto devido à prática de mistura dos combustíveis fósseis e renováveis, os sistemas serão avaliados primeiro de forma separada, com parâmetros individuais de impacto ambiental, para depois avaliarmos cenários de mistura e os seus respectivos impactos.

3.1.2.2 Sistemas de Produtos

3.1.2.2.1 Óleo Diesel

O sistema de produto do óleo diesel modelado nesse estudo foi dividido em 4 subsistemas:

1. **Extração do Petróleo:** atividades de *flaring* no ato da extração do petróleo.
2. **Transporte do Petróleo:** todas as atividades de transporte do petróleo entre a sua origem em seus campos e bacias, e a sua entrega nas refinarias por embarcações e dutos.
3. **Refino do Petróleo:** os processos de transformação do petróleo em derivado, ocorridos dentro das refinarias.
4. **Transporte e Armazenagem do Óleo Diesel:** todas as atividades de transporte de óleo diesel, desde a refinaria, até os postos de gasolina ou grandes clientes, passando por dutos, ferrovias, terminais terrestres, terminais aquaviários e bases de distribuição.
5. **Consumo do Óleo Diesel:** Queima do óleo diesel para obtenção de energia.

O sistema completo pode ser observado na Figura 12:

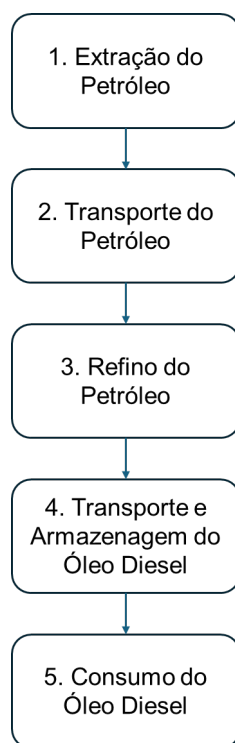


Figura 12: Fluxo Principal do Sistema do Óleo Diesel
Fonte: O autor

3.1.2.2.2 Biodiesel Éster

O sistema de produto do biodiesel éster modelado nesse estudo foi dividido em 5 subsistemas:

0. **Captura de CO₂:** A captura de CO₂ durante a soja em sua fase vegetal.
1. **Plantação e Transporte da Soja:** todas as atividades que envolvem o plantio da soja e o seu transporte até as unidades de produção de óleo de soja.
2. **Produção do Óleo de Soja:** todas as atividades que envolvem a produção do óleo, incluindo o esmagamento do grão e o transporte do óleo de soja para as unidades de produção de biodiesel éster.
3. **Produção do Metanol:** todas as atividades que envolvem a produção do metanol, incluindo o plantio da cana, a produção de metanol e o transporte do metanol para as unidades de produção de biodiesel éster.

4. **Produção do Biodiesel Éster:** os processos de transformação das matérias primas em biodiesel éster através do processo de transesterificação.
5. **Transporte e Armazenagem do Biodiesel Éster:** todas as atividades de transporte do Biodiesel Éster, desde a sua unidade produtiva, até os postos de gasolina ou grandes clientes, passando por ferrovias, terminais terrestres e bases de distribuição.
6. **Consumo do Biodiesel Éster:** queima do biodiesel éster para obtenção de energia.

O sistema completo pode ser observado na Figura 13:

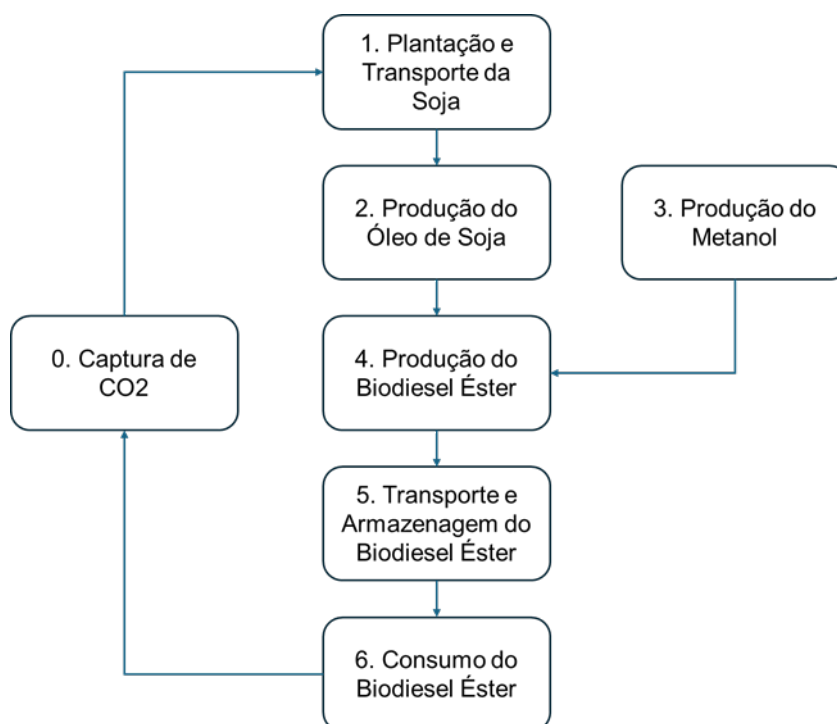


Figura 13: Fluxo Principal do Sistema do Biodiesel Éster.
Fonte: O autor.

3.1.2.2.3

Diesel Verde

0. **Captura de CO₂:** A captura de CO₂ durante a soja em sua fase vegetal.

1. **Plantação e Transporte da Soja:** todas as atividades que envolvem o plantio da soja e o seu transporte até as unidades de produção de óleo de soja.
2. **Produção do Óleo de Soja:** todas as atividades que envolvem a produção do óleo, incluindo o esmagamento do grão e o transporte do óleo de soja para as unidades de produção de biodiesel éster.
3. **Produção do Hidrogênio:** todas as atividades que envolvem a produção do hidrogênio, incluindo o transporte para as unidades de produção de diesel verde.
4. **Produção do Diesel Verde:** os processos de transformação das matérias primas em diesel verde através do processo de hidroprocessamento.
5. **Transporte e Armazenagem do Diesel Verde:** todas as atividades de transporte de diesel verde, desde a unidade de biorefino, até os postos de gasolina ou grandes clientes, passando por dutos, ferrovias, terminais terrestres, terminais aquaviários e bases de distribuição.
6. **Consumo do Diesel Verde:** Queima do diesel verde para obtenção de energia.

O sistema completo pode ser observado na Figura 14:

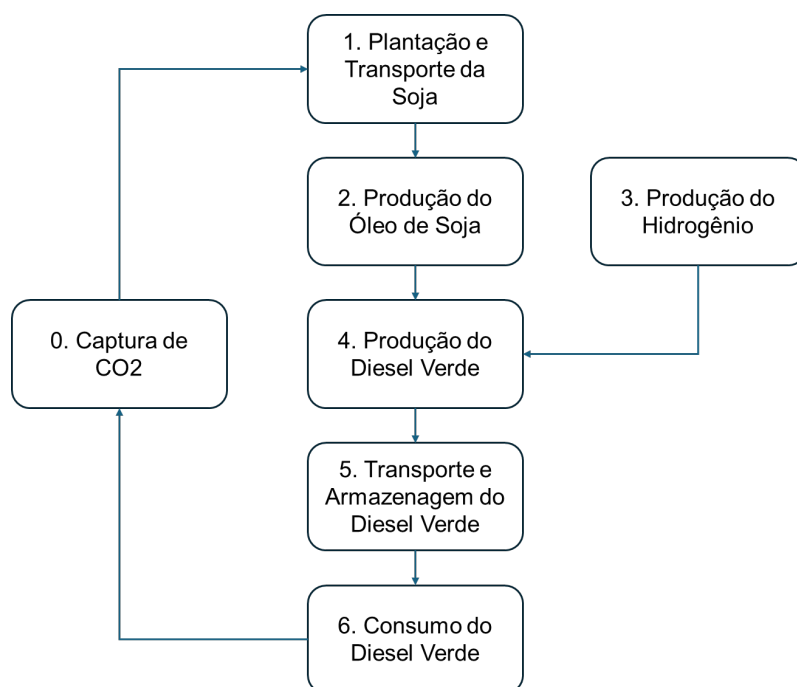


Figura 14: Fluxo Principal do Sistema do Diesel Verde.
Fonte: O autor.

3.1.2.3

Cenários de Matriz de Combustíveis

Segundo dados da ANP (2023), a demanda de óleo diesel B (mistura B12, ou seja, 88% de diesel fóssil e 12% de biodiesel éster) automotivo em 2020 foi de 57,47 milhões de m³. Esse valor será utilizado como referência na construção dos diferentes cenários teóricos de demanda. Para avaliação dos impactos ambientais de diferentes possibilidades na matriz de combustíveis do ciclo diesel, foram selecionados alguns cenários de referência:

1. **Histórico:** baseado no que foi consumido em 2020 dentro do ciclo diesel (com mistura de aproximadamente 12% de biodiesel éster no óleo diesel B). Todos os outros cenários possuem o mesmo consumo total desse cenário, se diferenciando pelo *mix* de combustíveis. O objetivo deste cenário é servir de comparação entre o que era praticado em 2020 e os cenários teóricos com diferentes misturas ou combustíveis puros.
2. **D100:** exercício teórico com um consumo igual ao do cenário histórico, mas com 100% de óleo diesel fóssil ao invés da mistura B12. O objetivo deste cenário é entender qual seria o impacto em emissões do setor transporte de cargas em veículos pesados, se não o país não houvesse implementado a mistura com o biodiesel éster.
3. **B15:** se baseia na limitação tecnológica de 15% na mistura do diesel B que a regulação atual do Brasil estipula para o biodiesel éster – e estabelece suas metas atuais de transição energética. Esse cenário reflete um patamar de emissões por m³ no curto prazo, uma vez que o governo já estabeleceu o aumento da mistura para B15 até 2025.
4. **R15:** consiste no mesmo percentual de mistura que o cenário B15, mas ao invés de biodiesel éster, o biocombustível a ser misturado é o diesel verde. O objetivo desse cenário é entender a diferença nas emissões de CO₂ em comparação com o

cenário B15, mas cabe ressaltar que o diesel verde não possui a mesma limitação na mistura que o biodiesel éster, sendo este somente um exercício teórico para efeito de comparação.

5. **R100:** Consiste na mudança completa da matriz energética do Ciclo Diesel, passando a ser totalmente renovável e composta de somente diesel verde. Esse é um cenário muito distante em diversos aspectos (capacidade de oferta, viabilidade econômica e regulação), mas serve como referência de potencial que o diesel verde pode ter na matriz energética, uma vez que consiga ultrapassar as suas principais barreiras atuais.

Como pode ser observado no Gráfico 7, foi construído para cada cenário um *mix* de demanda total dos combustíveis, podendo este variar entre diesel convencional, biodiesel éster e diesel verde. Para todos os cenários, foi considerado o mesmo volume total demandado.

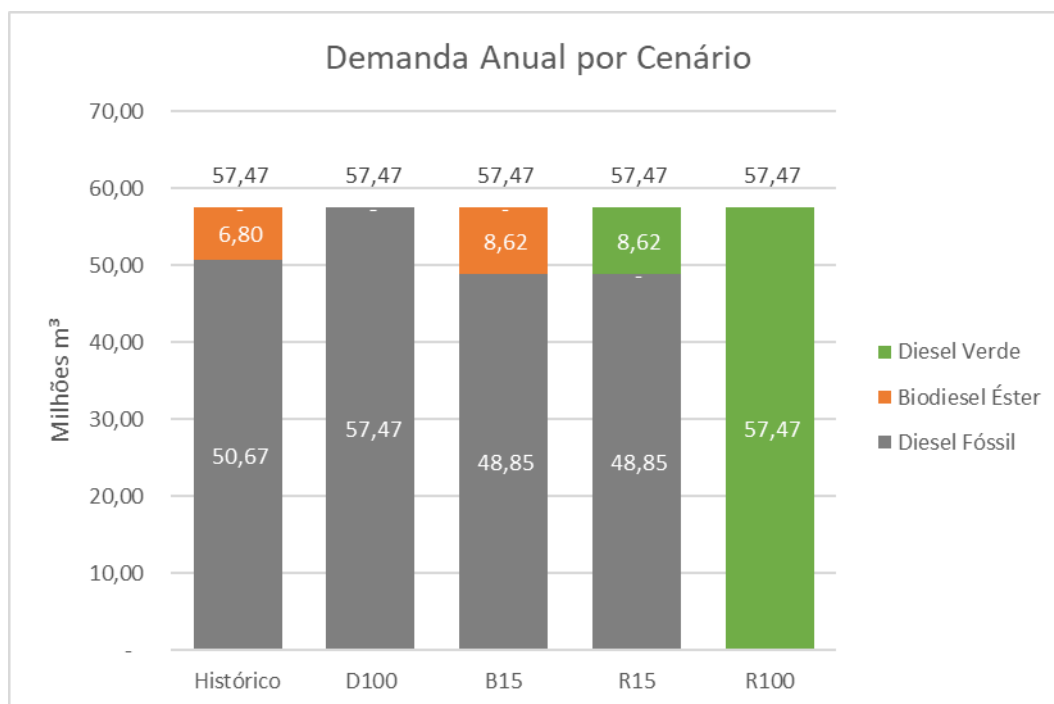


Gráfico 7: Demanda de combustíveis por cenário.
Fonte: O autor.

3.1.2.4

Fronteiras dos Sistemas

É importante reforçar que atualmente os sistemas de produtos possuem fronteiras e interações entre si, destacando-se as interações nos subsistemas de produção de óleo de soja para o biodiesel éster e o diesel verde, e as interações nos subsistemas de consumo para os 3 combustíveis, uma vez que hoje a regulação prevê mistura entre os combustíveis fósseis e os renováveis.

Além disso, existem fronteiras comuns a todos os subsistemas:

Fronteira geográfica: Como o estudo busca suportar decisões de transição energética de combustíveis no Brasil, as suas fronteiras serão utilizadas tanto na avaliação do impacto individual quanto nos cenários de matriz de combustíveis. As exceções para essa fronteira geográfica estão nos produtos com importação relevante para o Brasil, como o petróleo. Para essas exceções, é aplicada uma ponderação entre a oferta nacional e a importação para o cálculo dos parâmetros.

Fronteira temporal: apesar de ser um estudo com pretensões de embasar decisões futuras, será utilizado o passado para avaliar e quantificar o impacto ambiental dos cenários de matriz de combustível, mais especificamente o ano de 2020, que será a referência de demanda nacional.

3.1.2.5

Requisitos de Qualidade dos Dados, Escolha de Valores e Critérios de Alocação

Para a construção do ICV, foram utilizados majoritariamente dados secundários oriundos de outras publicações científicas ou de bancos de dados públicos. Esses dados serão detalhados na seção do inventário, assim como modelagens específicas (quando necessárias), critérios de alocação e pressupostos para as escolhas de valores, uma vez que diferem para os distintos subsistemas.

Em relação às coberturas temporais, geográficas e tecnológicas, estabeleceu-se o seguinte:

Cobertura geográfica: foram priorizados os dados de procedência nacional em detrimento das referências e parâmetros de outros países. Da mesma forma, dados com uma abrangência maior dentro do Brasil foram selecionados à revelia daqueles que caracterizam uma região específica. Como será observado, essa

cobertura foi respeitada em sua totalidade, já que todas as referências utilizadas são de âmbito nacional (a não ser produtos importados).

Cobertura temporal: a idade dos dados foram o principal critério de qualidade, priorizando-se aqueles provenientes de publicações e bancos de dados mais recentes. Ao contrário da cobertura geográfica, a cobertura temporal foi bem mais heterogênea devido à escassez de dados e informações relativas às emissões de CO₂ por etapa dos ciclos de vida de combustíveis e biocombustíveis.

Cobertura tecnológica: foram priorizadas as referências produtivas que melhor refletem o contexto brasileiro: o óleo diesel obtido do *mix* histórico de refino brasileiro e os biocombustíveis produzidos a partir do óleo vegetal de soja (matéria prima mais relevante e com maior oferta no Brasil), sendo o biodiesel éster produzido através do processo de transesterificação e o diesel verde através do processo de hidroprocessamento.

A tabela 6 apresenta um quadro-resumo das fontes utilizadas na modelagem para a construção do inventário em cada etapa dos ciclos de vida avaliados:

Tabela 6: Tabela resumo das fontes para cada etapa do ciclo de vida.

| Produto | Subsistema | Fonte |
|-----------------|--|---|
| Óleo Diesel | 1. Extração do Petróleo | Climate Watch (2023) OECD (2023) ANP (2023) Guo <i>et al.</i> (2016) |
| | 2. Transporte do Petróleo | OECD (2023) Ankathi <i>et al.</i> (2022) ANP (2023) Guo <i>et al.</i> (2016) |
| | 3. Refino do Petróleo | MCTI (2022) ANP (2023) |
| | 4. Transporte e Armazenagem do Óleo Diesel | Leggio (2022) Branco <i>et al.</i> (2019) BRASIL (2013) |
| | 5. Consumo do Óleo Diesel | BRASIL (2013) |
| Biodiesel Éster | 0. Captura de CO ₂ | BRASIL (2013) |
| | 1. Plantação e Transporte da Soja | Cavalett e Ortega (2010) Bezergianni e Dimitriadis (2013) |
| | 2. Produção do Óleo de Soja | Cavalett e Ortega (2010) Bezergianni e Dimitriadis (2013) |
| | 3. Produção do Metanol | Cavalett e Ortega (2010) Bezergianni e Dimitriadis (2013) |
| | 4. Produção do Biodiesel Éster | Cavalett e Ortega (2010) Bezergianni e Dimitriadis (2013) |
| | 5. Transporte e Armazenagem do Biodiesel Éster | Leggio (2022) Branco <i>et al.</i> (2019) |
| | 6. Consumo do Biodiesel Éster | BRASIL (2013) |
| Diesel Verde | 0. Captura de CO ₂ | BRASIL (2013) Hartikka <i>et al.</i> (2012) |
| | 1. Plantação e Transporte da Soja | Cavalett e Ortega (2010) Bezergianni e Dimitriadis (2013) Arguelles-Arguelles (2021) |
| | 2. Produção do Óleo do Soja | Cavalett e Ortega (2010) Bezergianni e Dimitriadis (2013) Arguelles-Arguelles (2021) |
| | 3. Produção do Hidrogênio | (IEA, 2019) Bezergianni e Dimitriadis (2013) Arguelles-Arguelles <i>et al.</i> (2021) |
| | 4. Produção do Diesel Verde | Arguelles-Arguelles <i>et al.</i> (2021) |
| | 5. Transporte e Armazenagem do Diesel Verde | Leggio (2022) Branco <i>et al.</i> (2019) BRASIL (2013) |
| | 6. Consumo do Diesel Verde | BRASIL (2013) Hartikka <i>et al.</i> (2012) |

Fonte: O Autor.

3.1.2.6

Método de Avaliação de Impacto e Interpretação

A avaliação do impacto se dará através da quantidade de emissões de CO₂ que cada sistema de produto (e subsequentemente cada cenário) gera no contexto brasileiro. Cada subsistema fornecerá uma referência de KgCO₂/m³ de combustível, que no final irá compor a emissão total do ciclo de vida de determinado produto. Essa referência será utilizada para o cálculo de impacto dos diferentes cenários de matriz de combustível.

Tanto no caso dos sistemas quanto no caso dos cenários, quanto menor for a emissão de CO₂, menor é o impacto ambiental. Para os sistemas, será utilizado o parâmetro KgCO₂/m³ de combustível, uma vez que o KgCO₂ foi identificado como o parâmetro principal de avaliação de impacto e o m³ foi definido como a unidade funcional por possuir o mesmo valor energético entre os diferentes combustíveis objetos dessa ACV (GECA *et al.* 2021).

Além de comparar os parâmetros por unidade funcional, este estudo se propõe a analisar os impactos por cenário de demanda, testando diferentes tipos de mistura na matriz de combustíveis para identificar aquela com maior potencial de redução de impactos ambientais. Nesses casos, será utilizado o KgCO₂/ano como produto da multiplicação do parâmetro KgCO₂/m³ (emissão por unidade funcional) e m³/ano (demanda anual de referência).

3.1.2.7

Revisão Crítica e Formato do Relatório

Como se trata de um estudo acadêmico para obtenção de título de mestrado, o formato do relatório seguirá este modelo de publicação. Pelo mesmo motivo, não será feita uma revisão crítica nos moldes da estrutura metodológica escolhida (ABNT, 2014). Apesar disso, recomenda-se esse tipo de revisão, a ser conduzida por um especialista externo e independente, no caso de tomada de decisões futuras tanto pelo Estado quanto por entidades privadas.

3.1.2.8 Limitações do Método

Algumas limitações da estrutura metodológica adotada serão abordadas nessa seção. A primeira delas é não uso de metodologias denominadas Land Use Change (LUC) nos inventários de ciclo de vida. Segundo Wicke *et al.* (2014), essa metodologia dimensiona as emissões a partir de mudanças no uso da terra e é considerada uma ferramenta importante para o cálculo de impactos ambientais, ecológicos e sociais provenientes da agropecuária como matéria-prima de bioenergia: deflorestamento, perda de biodiversidade, emissões de GEEs, competição com a produção de alimentos e consequente aumento no seu preço.

Entretanto, Sanchez *et al.* (2012) explicam que o uso dessa ferramenta, especialmente no caso dos biocombustíveis, possui diversos desafios, entre eles falta de dados, dificuldade de alocação, efeitos indiretos, tratamento temporal e grande incerteza em fatores variados dentro da sua composição.

A escolha do dióxido de carbono como indicador de desempenho ambiental (e não o CO₂ equivalente, que abrange todos os GEEs) também representa uma limitação do método em dimensionar os impactos ambientais de cada um dos cenários. Essa limitação pode representar um fator favorável aos biocombustíveis, que por possuírem como matéria-prima óleo vegetal derivado de soja, tendem a ter emissões de outros gases poluentes do efeito estufa nas etapas de agricultura, como N₂. Apesar de ter representado uma dificuldade para este estudo, a escassez de estudos que realizam inventários de emissões de CO₂ (e não CO₂equiv) foi também uma das principais motivações para a escolha desse parâmetro como referência de impacto ambiental.

Dada a ausência de um inventário único de emissões de CO₂ nos ciclos de vida dos objetos deste estudo, uma outra limitação do método é ter utilizado neste inventário uma combinação de diversas categorias de referências: dados públicos, inventários publicados em outros artigos e modelagens feitas pelo próprio autor dessa pesquisa. Atualmente, os inventários mais completos de impactos ambientais relacionados a aquecimento global possuem assinaturas privadas que requeriam um investimento incompatível com o exercício teórico representado por este estudo.

Finalmente, a impossibilidade de se utilizar dados com as mesmas dimensões temporais e metodológicas também representa uma limitação ao estudo, mesmo tendo-se adotado uma unidade funcional que pudesse ser comparada na etapa de análises.

4

Apresentação e Análise dos Dados

Nesse capítulo, serão apresentadas as etapas 2 e 3 da estrutura metodológica proposta, sendo elas o inventário do ciclo de vida (dividido nos seus respectivos sistemas e subsistemas) e a avaliação dos impactos do ciclo de vida de cada sistema individual, assim como de cada cenário final combinando os sistemas.

4.1

Inventário do Ciclo de Vida (ICV)

Os dados coletados para a realização da ACV simplificada serão apresentados nessa etapa, detalhando as diversas dimensões das informações (fontes, modelagens, coberturas temporais, limitações, fatores de alocação e parâmetros obtidos). Para uma melhor organização do inventário, os dados de cada sistema serão divididos nos subsistemas apresentados na seção 3.1.2.2.

4.1.1

Sistema Óleo Diesel

4.1.1.1

Subsistema Extração do Petróleo

- a) Fonte dos dados:
 - i. Emissões fugitivas no Brasil e no mundo: Climate Watch (2023), base de dados em planilha;
 - ii. Produção de petróleo no Brasil e no mundo: OECD (2023), base de dados em planilha;
 - iii. Histórico do *blend* de petróleo refinado: ANP (2023), base de dados em planilha;
 - iv. Densidades do petróleo Guo *et al.* (2016);

- b) Cobertura Temporal: 2020;
- c) Cobertura Geográfica: Brasil e Mundo;
- d) Cobertura Tecnológica: Extração de petróleo em plataformas *offshore* e *onshore*;
- e) Critério de alocação: alocações das emissões realizadas por rateio de volume, ou seja, proporcional ao volume de entradas e saídas da etapa de refino, que converte petróleo em óleo diesel;

A primeira informação levantada na modelagem desse subsistema foi a de emissões fugitivas de CO₂ no processo de produção de energia (classificação da extração de petróleo atrelada às operações de *flaring*). Segundo os dados divulgados pela Climate Watch (2023), essas emissões totalizaram em 2020 1.980 kton de CO₂ no Brasil e 265.360 kton CO₂ no resto do mundo (descontando o Brasil). A distribuição dessas emissões fugitivas entre os continentes pode ser observada na Tabela 7.

Tabela 7: Emissões Fugitivas de na Extração do Petróleo em 2020.

| Dado | Valor | Unidade |
|--------------------|-------------------|----------------------------|
| Ásia | 101.110 | kton CO ₂ |
| África | 54.250 | kton CO ₂ |
| Europa | 49.110 | kton CO ₂ |
| América do Norte | 36.140 | kton CO ₂ |
| América do Sul | 24.590 | kton CO ₂ |
| Oceania | 2.140 | kton CO ₂ |
| Total Geral | 267.340.00 | kton CO₂ |

Fonte: O autor com base em Climate Watch (2023).

Para obter a quantidade de CO₂ emitido por unidade de petróleo produzida no Brasil e no mundo em 2020, foram levantadas as informações de produção de petróleo por país no banco de dados da OECD (2023).

Tabela 8: Produção de petróleo no Brasil e no resto do mundo em 2020.

| Dado | Valor | Unidade |
|---|-----------|---------------|
| Produção de petróleo no Brasil – 2020 | 152.634 | kton petróleo |
| Produção de petróleo no resto do mundo – 2020 | 3.522.708 | kton petróleo |

Fonte: O autor com base em OECD (2023).

Quando dividimos as emissões pela produção de petróleo, obtemos o indicador de KgCO_2/Kg de Petróleo para o petróleo extraído tanto no Brasil quanto no resto do mundo. Esse cálculo foi feito tanto para o Brasil ($1.980 / 152.634$) quanto para o resto do mundo ($265.230 / 3.522.708$), e o resultado pode ser observado na Tabela 9.

Tabela 9: Indicadores de emissões fugitivas no Brasil e no resto do mundo.

| Dado | Valor | Unidade |
|---|--------|----------------------------------|
| Indicador de emissões fugitivas no Brasil | 0,0130 | kg CO_2 /kg de Petróleo |
| Indicador de emissões fugitivas no resto do mundo | 0,0753 | kg CO_2 /kg de Petróleo |

Fonte: O Autor.

Ponderando os indicadores de emissões nacionais e globais no percentual da origem do petróleo refinado no Brasil em 2020 (ANP, 2023) – 93% para o nacional e 7% para o petróleo importado – é possível encontrar o indicador ponderado de 0,0172 kg CO_2 /kg de Petróleo.

Como a unidade funcional é KgCO_2/m^3 de combustível, será necessário converter o peso de petróleo (Kg) em volume de petróleo (m^3). Para isso, foi necessário calcular uma densidade específica do petróleo utilizado no Brasil aplicando o *blend* histórico dos petróleos refinados e as suas respectivas densidades (ANP, 2023), conforme pode ser observado na (Tabela 10). Como os derivados são produtos de *blends* de petróleo, e não de um tipo específico, é necessário o cálculo da densidade ponderada para refletir a densidade média do petróleo utilizado no parque de refino nacional, e utilizar essa densidade como premissa de conversão. A densidade final calculada de 962 Kg/m^3 foi a utilizada para fazer a conversão.

Tabela 10: Densidades e *share* histórico por tipo de petróleo no refino nacional em 2020.

| Dado | Share | Densidade |
|----------------------------------|-------------|--|
| Óleo Leve | 40% | 934 Kg/m^3 |
| Óleo Pesado | 34% | 967 Kg/m^3 |
| Óleo Extra-Pesado | 26% | 1.000 Kg/m^3 |
| Densidade Final Ponderada | 100% | 962 Kg/m^3 |

Fonte: O autor com base em ANP (2023).

Após converter kg em m^3 de petróleo, obtemos o indicador de 16,57 kgCO_2/m^3 de petróleo. Entretanto, foi necessário entender a relação entre o

petróleo refinado e o óleo diesel produzido, para se converter as emissões por m³ de petróleo para emissões por m³ de óleo diesel. Na Tabela 11 é possível observar os dados necessários para o cálculo da razão histórica entre o volume de derivado refinado (em m³) e o petróleo processado nas refinarias em 2020 (em m³). Essa relação demonstra que a cada 1.000 m³ de petróleo refinado, 1.048 m³ de óleo diesel são produzidos, ou seja, uma razão de 1,048.

Tabela 11: Volume total de petróleo refinado e de derivados produzidos em 2020.

| Dado | Quantidade | Unidade |
|-------------------------------|-------------|----------------|
| Petróleo Total Refinado | 102.915.492 | m ³ |
| Total de Derivados Produzidos | 107.815.740 | m ³ |

Fonte: O autor com base em ANP (2023).

Ao dividir o indicador de 16,53 KgCO₂/m³ de petróleo pela razão derivado/petróleo de 1,048, obteve-se o indicador final do subsistema de extração do petróleo: **15,82 KgCO₂/m³ de Óleo Diesel**.

4.1.1.2

Subsistema Transporte do Petróleo

- a) Fonte dos dados:
 - i. Emissões no transporte de petróleo: Ankathi *et al.* (2022), pág. 2049;
 - ii. Produção de petróleo no Brasil e no mundo: OECD (2023), base de dados em planilha;
 - iii. Histórico do *blend* de petróleo refinado: ANP (2023), base de dados em planilha;
 - iv. Densidades do petróleo Guo *et al.* (2016);
- b) Cobertura Temporal: 2018
- c) Cobertura Geográfica: Mundo
- d) Cobertura Tecnológica: Todos os tipos de oleodutos e de embarcações empregados no transporte de petróleo, entre elas VLCC, Suezmax, Aframax e Panamax.
- e) Critério de alocação: alocações das emissões realizadas por rateio de volume, ou seja, proporcional ao volume de entradas e saídas da etapa de refino, que converte petróleo em óleo diesel;

Para a modelagem desse subsistema, dividiu-se a estimativa feita por Ankathi *et al.* (2022) das emissões de CO₂ provenientes do transporte marítimo de petróleo em 2018 pelo volume total de petróleo produzido no mesmo ano (OECD, 2023). As informações podem ser observadas na Tabela 12.

Tabela 12: Dados de produção de petróleo e emissão proveniente do seu transporte no mundo em 2020.

| Dado | Quantidade | Unidade |
|--|------------|----------------------|
| Emissões Provenientes do Transporte de Petróleo no Mundo | 109.000 | kton CO ₂ |
| Produção de Petróleo no Mundo | 4.032.035 | kton petróleo |

Fonte: OECD (2023); Ankathi *et al.*, (2022).

A cobertura temporal de 2018 e a cobertura geográfica global foram escolhidas devido à falta de informações das emissões específicas do transporte de petróleo no ano de 2020 ou na região do Brasil. Apesar disso, não se espera uma grande distorção dos resultados, uma vez que o perfil da frota de navios não pode se alterar em um período de 2 anos e a cadeia de suprimentos do Brasil não se diferencia do resto do mundo, com transporte primário mais longo em navios (entre os poços e os terminais marítimos) e secundário em dutos mais curtos (entre os terminais marítimos e as refinarias, localizadas majoritariamente no litoral).

Ao dividir as emissões pela produção, obtém-se o indicador de 0,0270 kgCO₂/kg de petróleo. Assim como na seção item 4.1.1.1, foi necessário converter esse indicador para kgCO₂/m³ de petróleo (26,02 kgCO₂/m³ de petróleo) através da aplicação da sua densidade específica para o Brasil (962 kg/m³), e em seguida aplicar a razão histórica entre o petróleo refinado e o óleo diesel obtido (1,048) para se obter o indicador de **24,83 KgCO₂/m³ de Óleo Diesel**.

4.1.1.3

Subsistema Refino do Petróleo

a) Fonte dos dados:

- i. CO₂ total emitido no Brasil pelo setor de refino: (MCTI, 2022), pág. 81;
- ii. Volume refinado de derivados: (ANP, 2023), dados em planilha;

- b) Cobertura Temporal: 2020;
- c) Cobertura Geográfica: Brasil;
- d) Cobertura Tecnológica: Refinarias de petróleo;
- e) Critério de alocação: ao dividir as emissões totais pelo volume total de derivados produzidos, assumiu-se automaticamente um critério de rateio por volume, ou seja, a mesma alocação para cada m³ de derivado;

Para a modelagem desse subsistema, foi levantada a quantidade de CO₂ emitido em território nacional em processos de refino de petróleo. Segundo o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI pág. 81, 2022), essas emissões totalizaram em 2020 16.738 kton CO₂, que quando divididas pelos 107.815.740 m³ de derivados refinados no mesmo ano (ANP, 2023), resultam no indicador de 155,25 KgCO₂/m³ de derivados, ou seja, **155,25 KgCO₂/m³ de Óleo Diesel**.

4.1.1.4

Subsistema Transporte e Armazenagem do Óleo Diesel

- a) Fonte dos dados:
 - a. Fluxos de combustíveis por modal: Leggio (2022);
 - b. Emissões por modal: Branco *et al.* pág. 2.594 (2019)
 - c. Razão entre cabotagem e navegação interior: BRASIL pág. 38 (2013)
- b) Cobertura Temporal: 2020;
- c) Cobertura Geográfica: Brasil;
- d) Cobertura Tecnológica: Transporte de combustíveis através de caminhões tanque, dutos, trens, navios e barcas;

Como parte dos dados históricos de transporte de combustíveis não são públicos (principalmente os relacionados a fluxos rodoviários e marítimos), esses dados foram solicitados a uma consultoria especializada no setor de combustíveis (Leggio), que realiza estudos setoriais e estimativas de movimentação para planejamento de infraestruturas, e na qual o autor deste trabalho é um dos sócios. Nesses estudos, a Leggio utiliza um modelo de otimização de redes logísticas

programado no software Aimms para determinar quais os fluxos logísticos que minimizariam os custos de distribuição de combustíveis em um determinado ano.

Como os fluxos ferroviários e hidroviários são dados públicos, ambos foram inseridos no modelo como restrição, e o software completou as informações desconhecidas com os fluxos ideais do ponto de vista de minimização de custo. Um exemplo de como o modelo estima os fluxos não publicados pode ser observado na Figura 15.

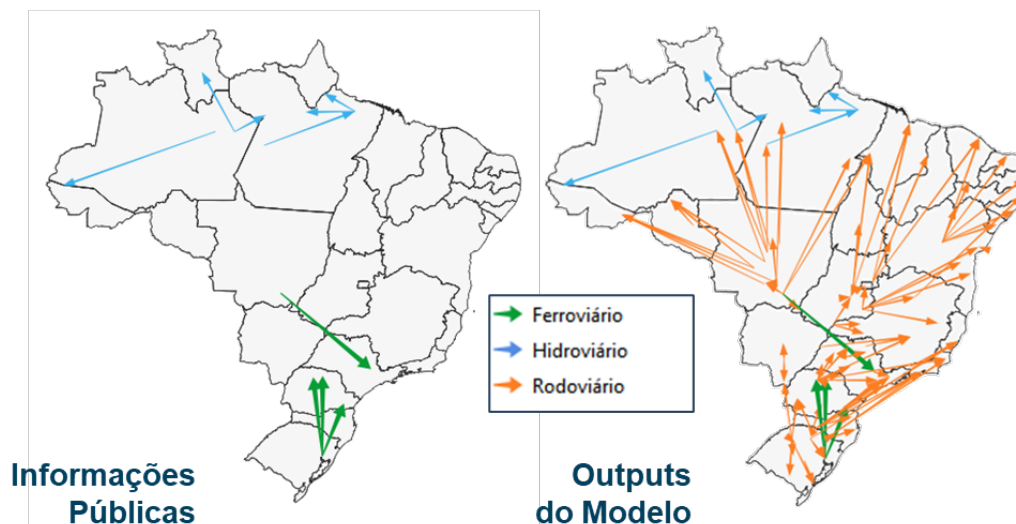


Figura 15: Explicativo dos fluxos disponíveis publicamente e dos fluxos estimados pelo modelo de otimização.

Fonte: ANTT (2023); ANTAQ (2023); O Autor.

É importante ressaltar que como os cenários gerados foram baseados em um histórico no qual o diesel verde ainda não possuía produção nacional relevante, somente os produtos óleo diesel fóssil e biodiesel éster estavam presentes nos outputs do modelo. Para lidar com essa limitação de informação, adotou-se a premissa de que o diesel verde terá perfil de distribuição semelhante ao óleo diesel fóssil por ter a maior parte da produção estimada nas refinarias que produzem óleo diesel (IBP, 2023).

É possível observar na Figura 16 um mapa disponibilizado pela Leggio com os fluxos entre os modais de cada um dos produtos. O mapa demonstra que o biodiesel éster utiliza majoritariamente o modal rodoviário, enquanto o óleo diesel (e futuramente o diesel verde) utiliza os modais de grande volume com mais frequência.

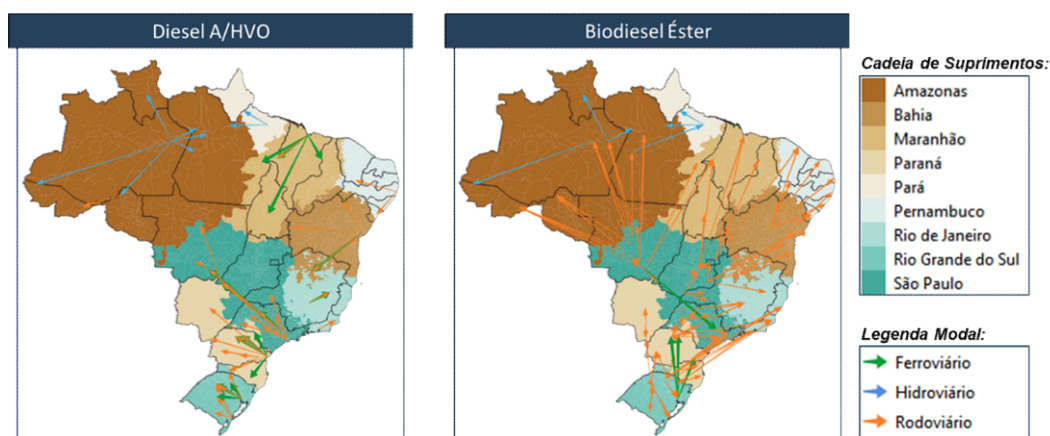


Figura 16: Mapa com fluxos logísticos por modal.
Fonte: Leggio (2023).

A consultoria também disponibilizou as estimativas de movimentação (em m^3km) por óleo diesel fóssil para o ano de 2020, e essa informação pode ser observada na Tabela 13. As informações são detalhadas em tipo de fluxo (transferência/coleta entre refinarias e/ou terminais das distribuidoras e distribuição entre terminais e postos de gasolina), modal e produto.

Nessa tabela, observamos a movimentação por tipo de diesel fóssil (a nomenclatura S10 e S500 se refere à quantidade de enxofre por milhão na sua composição). É possível notar também que os modais rodoviário e cabotagem são os mais significativos, com respectivamente 41% e 25%. Esses parâmetros de m^2km devem ser multiplicados por um parâmetro de emissão de transporte por km e modal para se chegar na emissão total estimada no ano de 2020 para o transporte desses produtos.

Tabela 13: Estimativas de movimentação (em m^3km) por óleo diesel fóssil e por modal para o ano de 2020.

| Tipo de Fluxo | Modal | Diesel A S10 | Diesel A S500 |
|----------------------|--------------------|---------------|---------------|
| Coleta/Transferência | Cabotagem | 5.717.659.201 | 2.622.266.109 |
| Coleta/Transferência | Dutoviário | 2.416.970.730 | 1.828.691.729 |
| Coleta/Transferência | Ferroviário | 2.694.183.789 | 1.727.196.495 |
| Coleta/Transferência | Hidroviário | 1.047.857.473 | 1.434.555.911 |
| Coleta/Transferência | Rodoviário | 2.643.516.032 | 3.387.472.876 |
| Distribuição | Rodoviário | 3.971.247.588 | 3.621.417.098 |

Fonte: Leggio (2023).

Para o levantamento dos parâmetros de emissão por modal de transporte, foi utilizada a referência da Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes – ANPET (BRANCO *et al.*, 2019), complementando a informação

de cabotagens com parâmetros do Plano Setorial de Transporte e de Mobilidade Urbana para Mitigação e Adaptação à Mudança do Clima - BRASIL (2013), uma vez que Branco *et al.*, (2019) não disponibilizava informações relativas a esse modal. Como as unidades dos dois estudos são diferentes (m^3km e tku), e a sua conversão possui uma grande complexidade devido ao estabelecimento de premissas foi aplicada a razão entre a cabotagem e o transporte hidroviário (52%) do estudo do PSTM no parâmetro de emissões do transporte hidroviário da ANPET garantir que os parâmetros utilizados não tivessem nenhuma distorção.

É possível observar no Gráfico 8 que o uso de modais de grande volume como ferrovias e hidrovias já apresentam uma redução significativa nas emissões de CO_2 , quando comparadas com o modal rodoviário. Essa redução é ainda mais representativa para os modais dutoviários e de cabotagem, que não podem ser utilizados nas rotas de biodiesel éster por restrições das especificações técnicas do produto (Acharya *et al.*, 2017), o que explicará o seu desempenho inferior nessa etapa de transporte.

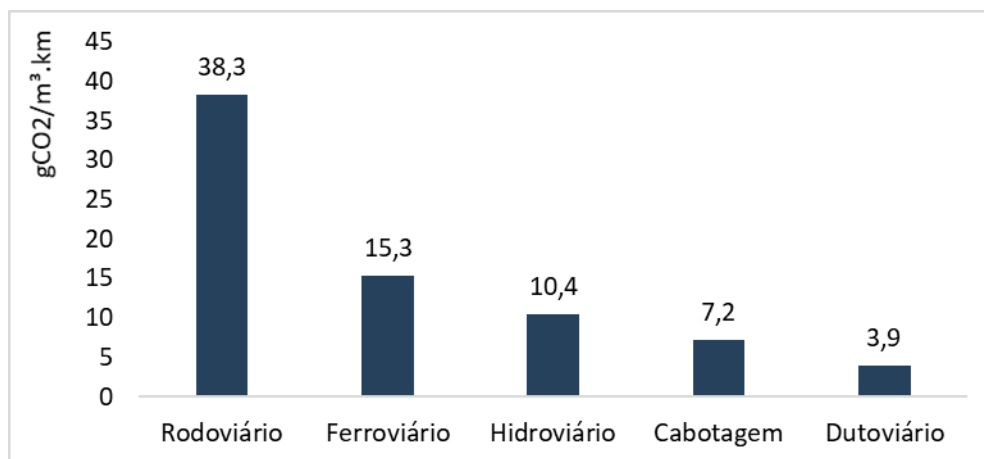


Gráfico 8: Fatores de Emissão de CO_2 por $\text{m}^3\cdot\text{km}$ de combustível transportado.
Fonte: Branco *et al.* (2019); BRASIL (2013).

Aplicando os parâmetros de emissão por modal nos valores de m^3km disponibilizados pela consultoria, é possível chegar no total de emissões por produto e modal (em kgCO_2), conforme pode ser observado na Tabela 14.

Tabela 14: Estimativas de emissões (em kgCO₂) por óleo diesel fóssil para o ano de 2020.

| Modal | Descrição Fluxo | Diesel A S10 | Diesel A S500 |
|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Coleta/Transferência | Cabotagem | 41.029.922 | 18.817.382 |
| Coleta/Transferência | Dutoviário | 9.426.186 | 7.131.898 |
| Coleta/Transferência | Ferrovário | 41.221.012 | 26.426.106 |
| Coleta/Transferência | Hidroviário | 10.897.718 | 14.919.381 |
| Coleta/Transferência | Rodoviário | 101.246.664 | 129.740.211 |
| Distribuição | Rodoviário | 152.098.783 | 138.700.275 |
| Total | | 355.920.285 | 335.735.253 |

Fonte: O Autor.

Para obter o indicador de KgCO₂/m³ de óleo diesel, é necessário dividir a estimativa das suas emissões (somadas entre S10 e S500) em 2020 pelo volume da sua demanda no mesmo ano, que foi de 50,67 m³ (ANP, 2023). A mesma modelagem foi feita para a etapa de transportes de todos os combustíveis. Após a última operação, foi possível encontrar o indicador de **13,65 KgCO₂/m³ de Óleo Diesel**.

4.1.1.5

Subsistema Consumo do Óleo Diesel

- a) Fonte dos dados:
 - a. Emissões no escapamento: (BRASIL, 2013);
- b) Cobertura Temporal: 2013;
- c) Cobertura Geográfica: Brasil;
- d) Cobertura Tecnológica: todos os veículos que utilizam motores do ciclo diesel;

Como referência para as emissões desse subsistema, foi utilizado o fator de emissão publicado pelo último inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários (BRASIL, 2013). Como desde então não houve atualização desse inventário, não foi possível encontrar dados mais recentes para se utilizar como parâmetro da etapa de consumo, que é uma das mais relevantes dentro desse estudo. Entretanto, dois fatores minimizam as possíveis distorções provenientes da antiguidade do dado: em primeiro lugar, como pode ser observado na Tabela 4 do referencial teórico, o PROCONVE P-7 teve vigência entre 2012 e 2023, o que indica que o desempenho de emissões da frota não teve

mudanças significativas; em segundo lugar, os parâmetros na etapa de consumo utilizaram como fonte principal a mesma fonte, portanto, não se espera distorções entre os sistemas de produtos, uma vez que os esses efeitos são distribuídos de forma equivalente entre eles. Após essas considerações, o indicador utilizado para a etapa de consumo do óleo diesel fóssil é de **2.603 KgCO₂/m³ de Óleo Diesel**.

4.1.2 Sistema Biodiesel Éster

4.1.2.1 Captura de CO₂

- a) Fonte dos dados:
 - i. Emissões no escapamento: (BRASIL, 2013);
- b) Cobertura Temporal: 2019;
- c) Cobertura Geográfica: Brasil;
- d) Cobertura Tecnológica: Captura de CO₂ pelas plantas de soja no seu processo de fotossíntese;

Como na maioria das ACV's de biocombustíveis apresentadas no referencial teórico, foi considerado que a quantidade de CO₂ capturada pela soja se equivale ao CO₂ lançado na atmosfera na etapa de combustão do motor. Entretanto, ao invés das capturas e emissões se anularem por equivalência, ambas foram contabilizadas nesse estudo em diferentes etapas do ciclo de vida, de forma a entender a contribuição individual de cada uma delas no impacto ambiental de cada etapa.

O indicador de emissões de CO₂ na etapa de consumo foi obtido no último inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários (BRASIL, 2013) e corresponde a 2.431 KgCO₂/m³ de biodiesel éster. Consequentemente, a captura de CO₂ na etapa de plantio da soja corresponde a (-) **2.431 KgCO₂/m³ de Biodiesel Éster**, com o sinal negativo do indicador significando que se trata de uma captura de CO₂, e não uma emissão, ou seja, esse valor será abatido da emissão total de CO₂ ao longo de todo o ciclo de vida.

4.1.2.2

Subsistema Plantação e Transporte da Soja

- a) Fonte dos dados:
 - i. Emissões de CO₂: Cavalett e Ortega (2010);
 - ii. Densidade do biodiesel éster: Bezergianni e Dimitriadis (2013)
- b) Cobertura Temporal: 2010;
- c) Cobertura Geográfica: Brasil;
- d) Cobertura Tecnológica: Plantação, colheita e transporte de grãos de soja no território brasileiro;
- e) Critério de alocação: como Cavalett e Ortega (2010) utilizaram em seu estudo critérios de energia para alocação (ou seja, o rateio é ponderado pelo valor energético do subproduto), esse estudo utilizou os mesmos critérios, refletidos nos dados de emissões de CO₂ por subproduto que os autores informaram;

Para o cálculo das emissões de CO₂ nas atividades de cultivo, colheita e transporte de soja, foi feita uma modelagem em cima do inventário apresentado por Cavalett e Ortega (2010). Esse estudo realizou coletas primárias (em campo) para a construção do seu inventário, e desde então não houve um estudo tão detalhado do ciclo de vida do biodiesel éster que fornecesse os dados de forma que pudessem ser utilizados também no ciclo de vida do diesel verde.

Apesar da antiguidade do dado apresentar uma possível fonte de distorção para o estudo, esses riscos são mitigados por dois fatores: em primeiro lugar, as mesmas fontes de informação são utilizadas para os ciclos de vida do biodiesel éster e do diesel verde, que só se diferenciam nas quantidades de matéria-prima e na etapa de produção, o que reduz a possibilidade de distorção entre os produtos; em segundo lugar, espera-se que com o avanço tecnológico da agricultura, os fatores de emissão sejam reduzidos, e não aumentados, de forma que ao utilizar um dado antigo, o estudo adota uma postura conservadora em relação aos ganhos dos biocombustíveis, que tendem a aumentar com a evolução das suas tecnologias.

Antes de iniciar os cálculos, é necessário entender as entradas e saídas nas primeiras etapas do ciclo de vida do biodiesel éster. Essas entradas e saídas podem ser observadas na Figura 17, e demonstram como o grão de soja passa por um

processo de esmagamento para obter-se como produtos o óleo de soja, o farelo de soja e o lecithin; e como o óleo de soja segue o fluxo principal para, junto com o metanol, passar pelo processo de transesterificação e produzir o biodiesel éster, a glicerina e o sabão cru.

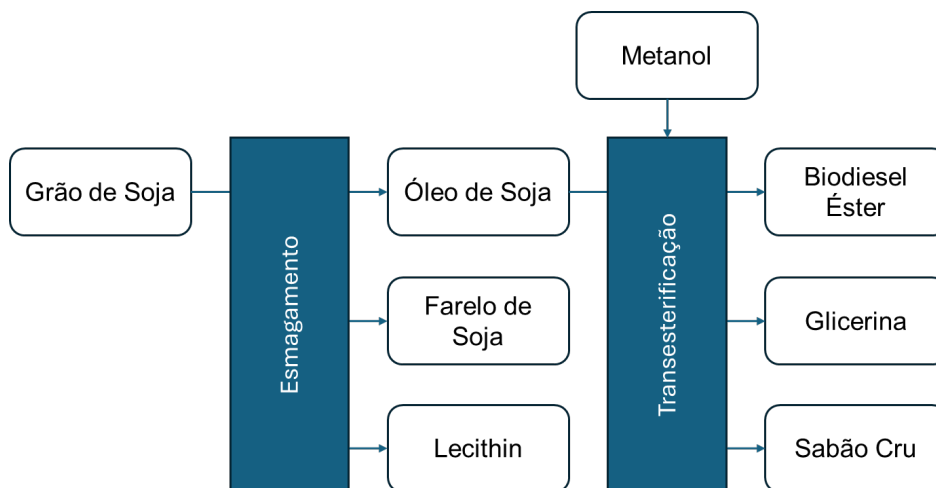


Figura 17: Diagrama de entradas e saídas nas etapas do ciclo de vida do biodiesel éster.
Fonte: O autor.

A Tabela 15 apresenta um resumo dos dados apresentados por Cavalett e Ortega (2010). Reitera-se que os autores já fizeram o inventário com a alocação das emissões por produto utilizando a energia do produto como critério de alocação, como pode ser observado na alocação de CO₂ entre o biodiesel éster (100% das emissões de CO₂) e os outros subprodutos do processo de transesterificação (0% das emissões por não terem valor energético relevante).

Além disso, os dados são apresentados por Cavalett e Ortega (2010) de forma acumulada, ou seja, a emissão total do biodiesel engloba todas as etapas até a sua produção. Para calcular as emissões da etapa de plantio da soja, foi então necessário calcular a razão de massa entre a soja e o biodiesel éster – ou sejam quantos kg de soja são necessários na produção de 1 kg de biodiesel éster – e o fator de alocação das emissões de soja por unidade funcional do biodiesel.

Tabela 15: Resumo do inventário de emissões de CO₂ nas etapas do ciclo de vida do biodiesel éster entre a plantação da soja e a produção do biocombustível.

| Produto | Entrada/Saída (Kg Produto) | Saída (Kg CO ₂) | Indicador de Emissões Acumuladas (KgCO ₂ /Kg Produto) |
|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|--|
| Grão de Soja Transportado | 2.830 | 928 | 0,3279152 |
| Óleo de Soja | 510 | 418 | 0,8196078 |
| Farelo de Soja | 2.300 | 741 | 0,3221739 |
| Lecithin | 20 | 16 | 0,8232323 |
| Glicerina | 44 | 0 | 0 |
| Sabão Cru | 27 | 0 | 0 |
| Biodiesel | 599 | 665 | 1,1101836 |

Fonte: Cavalett e Ortega (2010).

A primeira razão foi calculada através da divisão de 2.830 Kg de soja por 599 kg de Biodiesel, obtendo-se 4,72 Kg de soja para cada kg de biodiesel éster produzido. Utilizando como critério o valor energético dos subprodutos (refletido nas emissões acumuladas), obtivemos os fatores de alocação do óleo de soja por grão de soja (36%) e do biodiesel por óleo de soja (100%). A multiplicação desses 2 fatores resultou no fator de alocação final das emissões dos grãos de soja na unidade funcional de biodiesel: 36%.

Finalmente, multiplica-se o indicador de emissão da soja (0,3279152 kg CO₂/kg de soja transportada) pela quantidade de soja necessária para 1 kg de biodiesel (4,72 Kg de soja transportada), aplica-se o fator de alocação de 36% da soja na unidade funcional do biodiesel, e se utiliza a densidade de 878 Kg/m³ do biodiesel éster (Bezergianni e Dimitriadis, 2013) para se obter o indicador final das emissões totais da etapa de plantação e transporte da soja: **483,5 KgCO₂/m³ de Biodiesel Éster**.

4.1.2.3

Subsistema Produção do Óleo de Soja

- a) Fonte dos dados:
 - i. Emissões de CO₂: Cavalett e Ortega (2010);
 - ii. Densidade do biodiesel éster: Bezergianni e Dimitriadis (2013)
- b) Cobertura Temporal: 2010;
- c) Cobertura Geográfica: Brasil;

- d) Cobertura Tecnológica: Produção de óleo de soja através do esmagamento dos grãos de soja;
- e) Critério de alocação: como Cavalett e Ortega (2010) utilizaram em seu estudo critérios de energia para alocação (ou seja, o rateio é ponderado pelo valor energético do subproduto), esse estudo utilizou os mesmos critérios, refletidos nos dados de emissões de CO₂ por subproduto que os autores informaram;

Para a produção do óleo de soja, foi utilizado o mesmo inventário da etapa anterior (CAVALETT e ORTEGA, 2009), assim como a mesma modelagem. Foi calculada a razão de massa entre o óleo de soja e o biodiesel éster ($510 / 599 = 0,85$) e o fator de alocação de energia do óleo de soja no biodiesel ($665 / 665 = 100\%$) para converter 0,819607 (kg CO₂/kg de óleo de soja) em 0,697829 (kg CO₂/kg de biodiesel éster), e em seguida foi aplicada a densidade do biodiesel éster para se obter o indicador de 612,35 kg CO₂/m³ de biodiesel éster para a emissão total acumulada do ciclo de vida do óleo de soja (incluindo todas as etapas anteriores). Os dados necessários para esses cálculos encontram-se na tabela 16.

Tabela 16: Resumo do inventário de emissões de CO₂ na etapa de produção óleo de soja no ciclo de vida do biodiesel éster.

| Produto | Entrada/Saída (Kg Produto) | Saída (Kg CO ₂) | Indicador de Emissões Acumuladas (KgCO ₂ /Kg Produto) |
|--------------|----------------------------|-----------------------------|--|
| Óleo de Soja | 510 | 418 | 0,8196078 |
| Glicerina | 44 | 0 | 0 |
| Sabão Cru | 27 | 0 | 0 |
| Biodiesel | 599 | 665 | 1,1101836 |

Fonte: Cavalett e Ortega (2010).

Para entender a emissão de CO₂ somente da etapa de produção do óleo de soja, é necessário subtrair a emissão da etapa anterior de cultivo e transporte da soja (483,50 kg CO₂/m³ de biodiesel éster). Dessa forma, obtém-se o indicador de **128,85 KgCO₂/m³ de Biodiesel Éster**.

4.1.2.4

Subsistema Produção do Metanol

- a) Fonte dos dados:
 - i. Emissões de CO₂: Cavalett e Ortega (2010);
 - ii. Densidade do biodiesel éster: Bezergianni e Dimitriadis (2013)
- b) Cobertura Temporal: 2010;
- c) Cobertura Geográfica: Brasil;
- d) Cobertura Tecnológica: Produção e transporte do metanol desde a sua origem (majoritariamente de importação) até pontos de produção de biodiesel éster;
- e) Critério de alocação: como Cavalett e Ortega (2010) utilizaram em seu estudo critérios de energia para alocação (ou seja, o rateio é ponderado pelo valor energético do subproduto), esse estudo utilizou os mesmos critérios, refletidos nos dados de emissões de CO₂ por subproduto que os autores informaram;

De forma análoga à produção do óleo de soja, a emissão na produção do metanol também fez uso dos mesmos inventários (CAVALETT e ORTEGA, 2009) e modelagens, e os dados para esse cálculo podem ser observados na Tabela 17.

Tabela 17: Resumo do inventário de emissões de CO₂ na etapa de produção do biodiesel no seu ciclo de vida.

| Produto | Entrada (Kg Produto) | Saída (Kg CO ₂) | Indicador de Emissões Acumuladas (KgCO ₂ /Kg Produto) |
|-----------|----------------------|-----------------------------|--|
| Metanol | 75 | 144 | 1,9123506 |
| Glicerina | 44 | 0 | 0 |
| Sabão Cru | 27 | 0 | 0 |
| Biodiesel | 599 | 665 | 1,1101836 |

Fonte: Cavalett e Ortega (2010).

Foi calculada a razão de massa entre o metanol e o biodiesel éster ($75 / 599 = 0,13$) e o fator de alocação do metanol no biodiesel ($665 / 665 = 100\%$) para se obter o indicador de **210,95 kg CO₂/m³ de Biodiesel Éster** para a emissão total do ciclo de vida do metanol. Diferentemente do óleo de soja, o indicador do Metanol não foi subtraído de nenhum indicador calculado nas etapas anteriores, pois o insumo não tem a soja como matéria-prima.

4.1.2.5

Subsistema Produção do Biodiesel Éster

- a) Fonte dos dados:
 - i. Emissões de CO₂: Cavalett e Ortega (2010);
 - ii. Densidade do biodiesel éster: Bezergianni e Dimitriadis (2013)
- b) Cobertura Temporal: 2010;
- c) Cobertura Geográfica: Brasil;
- d) Cobertura Tecnológica: Produção de óleo de soja através do esmagamento dos grãos de soja;

O mesmo inventário (CAVALETT e ORTEGA, 2009) das 2 etapas anteriores foi utilizado para a etapa de produção do biodiesel éster, mas a modelagem utilizada foi ainda mais simples, uma vez que o inventário e a unidade funcional da ACV simplificada utilizam o mesmo produto, só havendo a necessidade de utilizar a densidade de 878 Kg/m³ do biodiesel éster (Bezergianni e Dimitriadis, 2013) para converter os 1,11 Kg CO₂/kg de biodiesel em 974 Kg CO₂/m³ de Biodiesel. Assim como nas modelagens anteriores, foi necessário subtrair as emissões das etapas anteriores para se chegar no indicador específico da etapa de Produção do Biodiesel Éster: **150,89 kg CO₂/m³ de Biodiesel Éster.**

4.1.2.6

Subsistema Transporte e Armazenagem do Biodiesel Éster

- a) Fonte dos dados: Secundários;
 - i. Fluxos de combustíveis por modal: Leggio (2022);
 - ii. Emissões por modal: Branco *et al.* pág. 2.594 (2019)
- b) Cobertura Temporal: 2020;
- c) Cobertura Geográfica: Brasil;
- d) Cobertura Tecnológica: Transporte de combustíveis através de caminhões tanque, trens e barcas. Navios e dutos não são utilizados atualmente nesse tipo de transporte de longa distância.

A modelagem das etapas de transportes do óleo diesel fóssil se repete para as ACVs simplificadas dos outros 2 biocombustíveis (biodiesel éster e diesel verde), utilizando os dados fornecidos pela consultoria e gerados via modelagem de otimização para detalhar os fluxos logísticos em produto, distância e modal, para o cálculo subsequente das emissões médias por produto. A informação de m^3km pode ser verificada na tabela 18.

Tabela 18: Estimativas de movimentação (em m^3km) do biodiesel éster por modal para o ano de 2020.

| Tipo de Fluxo | Modal | Biodiesel |
|----------------------|--------------------|---------------|
| Coleta/Transferência | Cabotagem | 0 |
| Coleta/Transferência | Dutoviário | 0 |
| Coleta/Transferência | Ferrovário | 1.244.110.053 |
| Coleta/Transferência | Hidroviário | 199.677.804 |
| Coleta/Transferência | Rodoviário | 4.457.147.045 |
| Distribuição | Rodoviário | 1.018.825.020 |

Fonte: Leggio (2023).

Quando aplicamos os parâmetros de emissões por modal nos dados de m^3km , obtemos a informação relativa ao total emitido pelo transporte do biodiesel éster no ano de 2020. Esse dado pode ser verificado na tabela 19, na qual é possível observar que os fluxos dutoviários e de cabotagem não geraram nenhuma emissão pois não existiram no histórico analisado.

Tabela 19: Estimativas de emissões (em kgCO_2) do biodiesel éster por modal para o ano de 2020.

| Modal | Descrição Fluxo | Biodiesel |
|----------------------|--------------------|--------------------|
| Coleta/Transferência | Cabotagem | 0 |
| Coleta/Transferência | Dutoviário | 0 |
| Coleta/Transferência | Ferrovário | 19.034.884 |
| Coleta/Transferência | Hidroviário | 2.076.649 |
| Coleta/Transferência | Rodoviário | 170.708.732 |
| Distribuição | Rodoviário | 39.020.998 |
| Total | | 230.841.263 |

Fonte: O Autor.

Quando dividimos as emissões estimadas pelo transporte de biodiesel éster (230,8 milhões de kg de CO_2) pelo volume de 6,8 milhões de m^3 de biodiesel éster consumidos em 2020 – dados da ANP (2023), é possível obter o indicador de **33,95 KgCO_2/m^3 de Biodiesel Éster**.

4.1.2.7

Subsistema Consumo do Biodiesel Éster

- a) Fonte dos dados:
 - i. Emissões no escapamento: (BRASIL, 2013);
- b) Cobertura Temporal: 2013;
- c) Cobertura Geográfica: Brasil;
- d) Cobertura Tecnológica: todos os veículos que utilizam motores do ciclo diesel;

Assim como no caso do diesel fóssil, esse estudo utilizou como referência para as emissões desse subsistema o fator de emissão publicado pelo último inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários (BRASIL, 2013): **2.431 KgCO₂/m³ de Biodiesel Éster**. Vale ressaltar que o valor é o mesmo da etapa de captura, diferenciando-se apenas pelo sinal, que nesse caso é positivo por gerar emissões atmosféricas de CO₂.

4.1.3

Sistema Diesel Verde

4.1.3.1

Captura de CO₂

- a) Fonte dos dados:
 - i. Emissões no escapamento de diesel fóssil: (BRASIL, 2013);
 - ii. Redução das emissões de CO₂ do diesel verde (Hartikka *et al.*, 2012)
- b) Cobertura Temporal: 2012;
- c) Cobertura Geográfica: Brasil;
- d) Cobertura Tecnológica: Captura de CO₂ pelas plantas de soja no seu processo de fotossíntese;

Assim como no caso do biodiesel éster, o subsistema de captura de CO₂ do Diesel Verde na etapa do plantio da soja foi modelado para ter os mesmos valores de emissão da etapa de consumo. Entretanto, ao contrário do seu concorrente, o indicador de consumo

do diesel verde não foi reportado no inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários (BRASIL, 2013).

Como alternativa, foi utilizada a informação trazida por Hartikka *et al.* (2012), que descobriram uma redução de 4% nas emissões de CO₂ quando comparado com o diesel fóssil. Com essa informação, o indicador de captura de CO₂ na etapa de plantio da soja foi obtido através da aplicação desses 4% de redução das emissões no indicador de consumo do diesel fóssil (2.603 kgCO₂/m³ de diesel fóssil), obtendo-se **(-) 2.499 KgCO₂/m³ de Diesel Verde**. O sinal negativo do indicador significa que se trata de uma captura de CO₂, e não uma emissão. Por isso, esse valor será abatido da emissão total de CO₂ ao longo de todo o ciclo de vida.

4.1.3.2

Subsistema Plantação e Transporte da Soja

- a) Fonte dos dados:
 - i. Emissões de CO₂: Cavalett e Ortega (2010);
 - ii. Densidade do diesel verde: Bezergianni e Dimitriadis (2013)
 - iii. Necessidade de óleo vegetal no hidrocessamento: Arguelles-Arguelles *et al.* (2021)
- b) Cobertura Temporal: 2009;
- c) Cobertura Geográfica: Brasil;
- d) Cobertura Tecnológica: Plantação, colheita e transporte de grãos de soja no território brasileiro;
- f) Critério de alocação: como Cavalett e Ortega (2010) utilizaram em seu estudo critérios de energia para alocação (ou seja, o rateio é ponderado pelo valor energético do subproduto), esse estudo utilizou os mesmos critérios, refletidos nos dados de emissões de CO₂ por subproduto que os autores informaram;

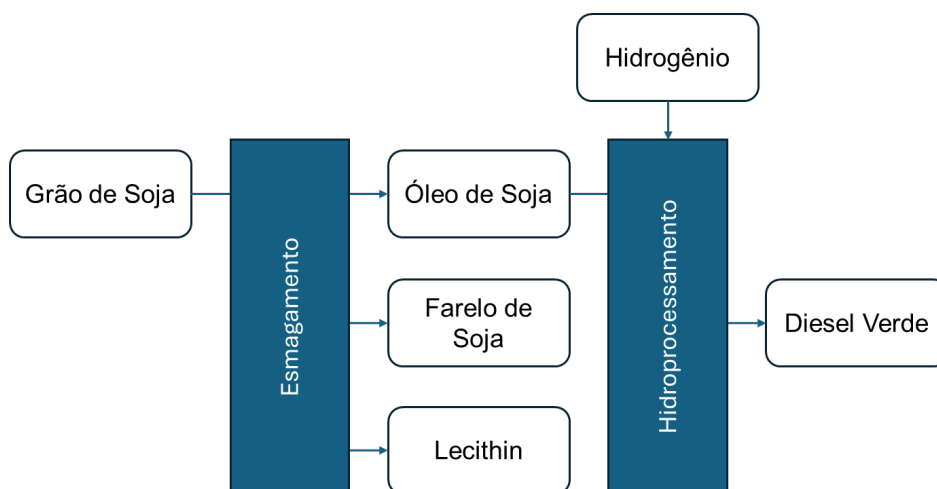


Figura 18: Diagrama de entradas e saídas nas etapas do ciclo de vida do diesel verde.
Fonte: O autor.

De forma análoga ao diagrama do biodiesel éster, é possível verificar a entrada e saída de produtos do ciclo de vida do diesel verde na Figura 18. A modelagem e os dados utilizados no subsistema de plantação e transporte da soja foram os mesmos do biodiesel éster. Entretanto, Arguelles-Arguelles *et al.* (2021) apresentaram em seu estudo necessidade de 1,21 kg de óleo vegetal para cada kg de diesel verde, enquanto (CAVALETT e ORTEGA, 2009) apresentaram dados nos quais cada kg de biodiesel éster necessitava de 0,85 Kg de óleo vegetal. Essa necessidade de se utilizar 42% a mais de óleo de soja no processo produtivo foi aplicada no indicador análogo do biodiesel éster (483,5 kgCO₂/m³ de biodiesel éster) para a obtenção do indicador de **688,37 KgCO₂/m³ de Diesel Verde**.

4.1.3.3

Subsistema Produção do Óleo de Soja

- e) Fonte dos dados:
 - i. Emissões de CO₂: Cavalett e Ortega (2010);
 - ii. Densidade do diesel verde: Bezergianni e Dimitriadis (2013)
 - iii. Necessidade de óleo vegetal no hidroprocessamento: Arguelles-Arguelles *et al.* (2021)
- a) Cobertura Temporal: 2009;
- b) Cobertura Geográfica: Brasil;
- c) Cobertura Tecnológica: Plantação, colheita e transporte de grãos de soja no território brasileiro;

- f) Critério de alocação: como Cavalett e Ortega (2010) utilizaram em seu estudo critérios de energia para alocação (ou seja, o rateio é ponderado pelo valor energético do subproduto), esse estudo utilizou os mesmos critérios, refletidos nos dados de emissões de CO₂ por subproduto que os autores informaram;

O mesmo fator da seção anterior (42% a mais de óleo de soja) obtido no estudo de Arguelles-Arguelles *et al.* (2021) foi aplicado no indicador análogo do biodiesel éster (128,85 kgCO₂/m³ de biodiesel éster) para a obtenção de **183,44 KgCO₂/m³ de Diesel Verde** na etapa de produção de óleo de soja.

4.1.3.4

Subsistema Produção do Hidrogênio

- a) Fonte dos dados:
 - i. Emissões de CO₂ na produção global de hidrogênio: IEA (2019);
 - ii. Produção global de hidrogênio: IEA (2019);
 - iii. Densidade do diesel verde: Bezergianni e Dimitriadis (2013)
 - iv. Necessidade de hidrogênio: Arguelles-Arguelles *et al.* (2021)
- b) Cobertura Temporal: 2019;
- c) Cobertura Geográfica: Mundo;
- d) Cobertura Tecnológica: Produção e transporte de hidrogênio de diferentes fontes no mundo todo;
- g) Critério de alocação: foi utilizado o mesmo critério de energia para alocação (ou seja, o rateio é ponderado pelo valor energético do subproduto);

Apesar de nenhum estudo ter previamente apontado o hidrogênio como um fator relevante nas emissões de CO₂ dentro do ciclo de vida do diesel verde, ele é o segundo insumo mais relevante dentro do processo produtivo de hidroprocessamento, portanto este estudo estimou a sua contribuição para as emissões totais do ciclo de vida do diesel verde.

Sua modelagem consistiu na divisão do total anual de CO₂ gerado nas atividades de produção de hidrogênio em 2019 (IEA, 2019) pela produção total de

hidrogênio desse mesmo ano (IEA, 2019). Os dados podem ser vistos na Tabela 20, assim como o resultado do cálculo.

Tabela 20: Dados de produção total de hidrogênio e respectiva emissão de CO₂ em 2019.

| Dado | Valor | Unidade |
|--|------------|---------------------|
| CO ₂ emitidos na produção de Hidrogenio em 2019 | 843 | ton CO ₂ |
| Produção de Hidrogenio em 2019 | 70.000.000 | ton Hidrogênio |

Fonte: IEA (2019).

Assim como o fez para o óleo esmagado, Arguelles-Arguelles *et al.* (2021) apontaram a razão entre o input de hidrogênio e o output de diesel verde: são necessários 0,026Kg de hidrogênio para cada Kg de diesel verde. Quando multiplicamos esse fator pela emissão de CO₂ por kg de hidrogênio calculada com os dados da Tabela 20 (0,0000012 KgCO₂/Kg Hidrogênio) e aplicamos a densidade do diesel verde de 800 kg/m³ (Bezergianni e Dimitriadis, 2013), o resultado é o indicador de **0,00025 KgCO₂/m³ de Diesel Verde**. Como esse montante não está na mesma proporção dos outros indicadores relativos a outras etapas e produtos, consideraremos o impacto do hidrogênio nas emissões de CO₂ como nulo.

4.1.3.5

Subsistema Produção do Diesel Verde

- a) Fonte dos dados:
 - i. Emissões de CO₂: Arguelles-Arguelles *et al.* (2021)
 - ii. Densidade do diesel verde: Bezergianni e Dimitriadis (2013)
- b) Cobertura Temporal: 2020;
- c) Cobertura Geográfica: México;
- d) Cobertura Tecnológica: produção de diesel verde em unidades de hidrotratamento utilizando óleo de palma;

A referência para a produção de diesel verde foi retirada do estudo de Arguelles-Arguelles *et al.* (2021), no qual os autores registraram o inventário do ciclo de vida de produção de diesel verde. Assumiu-se como premissa que a eficiência e as emissões relativas à produção do diesel verde a partir do óleo de palma é a mesma do óleo de soja, uma vez que a tecnologia adotada é a mesma

(transesterificação), e como Roque *et al.* (2023) comprovou em seu estudo, as propriedades de ambos os óleos são similares em emissão de gases de efeito estufa nas etapas de produção do diesel verde. O uso de uma cobertura tecnológica relativa a outra matéria-prima se deve ao caráter recente da tecnologia do diesel verde, o que tem como consequência uma escassez de informações relativas a esse tipo de inventário para o óleo de soja. As possíveis distorções do indicador dessa etapa para o diesel verde serão discutidas em etapas posteriores deste estudo.

Para calcular o indicador final, o estudo utilizou diretamente os dois principais produtos do processo: o diesel verde (13.330g) e o CO₂ (849g), calculando o indicador de 0,064661 kgCO₂/kg de diesel verde. Aplicando a densidade calculada por Bezergianni e Dimitriadis (2013) de 800 kg/m³, chegou-se ao indicador de **51,73 KgCO₂/m³ de Diesel Verde** na etapa de produção. Importante ressaltar que esse valor não acumula as etapas anteriores, sendo somente relativo à etapa de produção do biocombustível.

4.1.3.6

Subsistema Transporte e Armazenagem do Diesel Verde

- a) Fonte dos dados:
 - i. Fluxos de combustíveis por modal: Leggio (2022);
 - ii. Emissões por modal: Branco *et al.* pág. 2.594 (2019)
 - iii. Razão entre cabotagem e navegação interior: BRASIL pág. 38 (2013)
- b) Cobertura Temporal: 2020;
- c) Cobertura Geográfica: Brasil;
- d) Cobertura Tecnológica: Transporte de combustíveis através de caminhões tanque, dutos, trens, navios e barcas;

Como o ano de referência de fluxos foi 2020 e a primeira comercialização de diesel R5 no Brasil aconteceu em setembro de 2022 (PETROBRAS, 2022), ele não foi inserido no otimizador, e como consequência, não faz parte dos seus resultados.

Foi utilizada então como premissa uma oferta proveniente das refinarias de petróleo, o que faria o diesel verde seguir um fluxo de distribuição similar ao do diesel fóssil (de $13,65 \text{ KgCO}_2/\text{m}^3$ de Óleo Diesel), pois teria como origem as refinarias (localizadas próximas ao litoral), assim como o seu similar oriundo do petróleo.

Essa premissa, no entanto, implica no transporte do óleo de soja até as refinarias, fluxo que não acontece atualmente, uma vez que as etapas de esmagamento da soja para produção do óleo de soja e transesterificação do óleo de soja para produção do biodiesel éster acontecem na mesma instalação ou em instalações próximas, localizadas no interior. A Figura 19 exemplifica como o caminho percorrido pelo diesel verde até a base de distribuição (ou óleo de soja, seu principal insumo, até a refinaria) tende a ser mais longo do que o caminho percorrido pelo diesel fóssil ou pelo biodiesel éster (e o seu mesmo insumo).

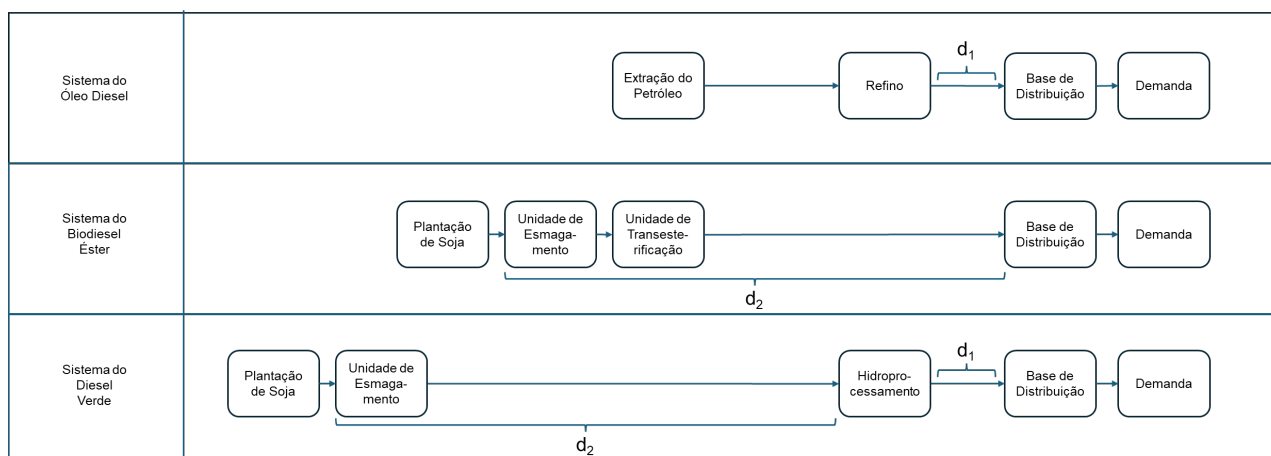


Figura 19: Diagrama explicativo do aumento de distância percorrida no transporte de óleo de soja e diesel verde

Fonte: O autor.

Além disso, como a razão entre o óleo de soja e o diesel verde é de 121 para 100, o indicador da etapa de transporte do biodiesel éster ($33,95 \text{ KgCO}_2/\text{m}^3$) foi ajustado em 21% ($41,15 \text{ KgCO}_2/\text{m}^3$) para refletir o maior transporte desse insumo.

Como para esse estudo não foi criada uma etapa de transporte do óleo de soja, o aumento desse transporte será contabilizado na etapa de transporte do diesel verde, para a qual obtivemos o indicador de **$55 \text{ KgCO}_2/\text{m}^3$ de Diesel Verde**, superior ao do diesel fóssil e do biodiesel éster.

4.1.3.7

Subsistema Consumo do Diesel Verde

- a) Fonte dos dados:
 - a. Emissões no escapamento: (BRASIL, 2013);
- b) Cobertura Temporal: 2012;
- c) Cobertura Geográfica: Brasil;
- d) Cobertura Tecnológica: todos os veículos que utilizam motores do ciclo diesel;

A modelagem e os dados que suportaram o cálculo do indicador na etapa de consumo são idênticos ao apresentado na seção 4.1.3.1. Assim como na etapa de captura, o indicador de emissões na etapa de consumo é de **2.499 KgCO₂/m³ de Diesel Verde**. A única diferença entre as duas etapas é relativa ao sinal, que na etapa de consumo é positivo por gerar emissões atmosféricas de CO₂.

4.1.4

Resumo do Inventário

Na Tabela 21, é possível observar um resumo do inventário de emissões que servirá de base para a avaliação dos impactos do ciclo de vida.

Tabela 21: Tabela resumo da captura e das emissões de CO₂ por produto e etapa do ciclo de vida.

| Produto | Subsistema | Dado Convertido (KgCO ₂ /m ³ Combustível) |
|-----------------|--|--|
| Óleo Diesel | 1. Extração do Petróleo | 16 |
| | 2. Transporte do Petróleo | 25 |
| | 3. Refino do Petróleo | 155 |
| | 4. Transporte e Armazenagem do Óleo Diesel | 14 |
| | 5. Consumo do Óleo Diesel | 2.603 |
| Biodiesel Éster | 0. Captura de CO ₂ | -2.431 |
| | 1. Plantação e Transporte da Soja | 483 |
| | 2. Produção do Óleo de Soja | 129 |
| | 3. Produção do Metanol | 211 |
| | 4. Produção do Biodiesel Éster | 151 |
| | 5. Transporte e Armazenagem do Biodiesel Éster | 34 |
| | 6. Consumo do Biodiesel Éster | 2.431 |
| Diesel Verde | 0. Captura de CO ₂ | -2.499 |
| | 1. Plantação e Transporte da Soja | 688 |
| | 2. Produção do Óleo de Soja | 183 |
| | 3. Produção do Hidrogênio | 0 |
| | 4. Produção do Diesel Verde | 52 |
| | 5. Transporte e Armazenagem do Diesel Verde | 55 |
| | 6. Consumo do Diesel Verde | 2.499 |

Fonte: O Autor.

4.2

Avaliação dos Impactos do Ciclo de Vida (AICV)

Nessa seção, serão apresentadas diversas análises que suportarão as conclusões acerca do ciclo de vida dos combustíveis que foram objetos dessa ACV simplificada. Serão apresentadas visões comparativas de cada etapa por sistema de produto, assim como de cada produto por etapa, além do impacto ambiental total de cada produto por unidade funcional e por cenário de demanda.

4.2.1

Comparação dos Impactos dentro dos Sistemas de Produto

4.2.1.1

Diesel Fóssil

Quando somamos os indicadores de cada etapa do ciclo de vida do diesel fóssil, obtemos a quantia de 2.813 KgCO₂ emitidos para cada metro cúbico de óleo diesel consumido no motor de um veículo movido a um motor diesel. A contribuição de cada etapa pode ser vista no Gráfico 9 e na Tabela 22.

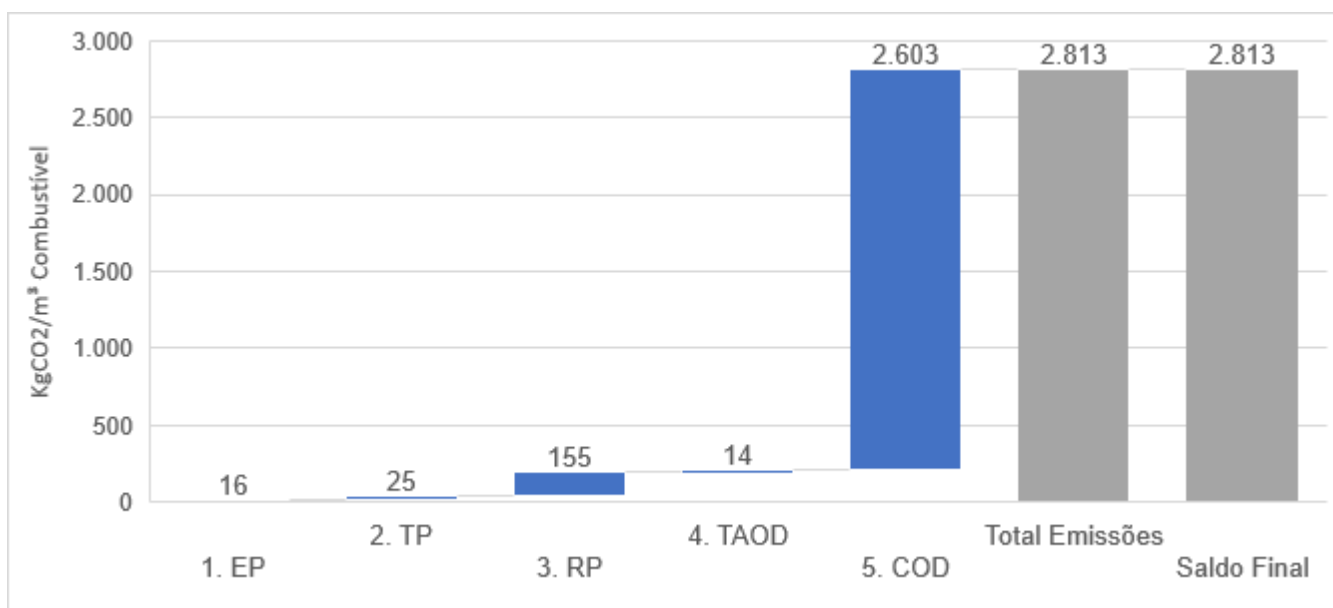


Gráfico 9: Emissões de CO₂ no ciclo de vida do óleo diesel fóssil por unidade funcional (m³).

Fonte: O autor.

Tabela 22: Emissões de CO₂ no ciclo de vida do óleo diesel fóssil por unidade funcional (m³).

| Produto | Subsistema | Sigla | Dado Convertido (KgCO ₂ /m ³ Combustível) | % Total de Emissões |
|----------------|--|---------|---|---------------------|
| Óleo Diesel | 1. Extração do Petróleo | 1. EP | 16 | 0,6% |
| Óleo Diesel | 2. Transporte do Petróleo | 2. TP | 25 | 0,9% |
| Óleo Diesel | 3. Refino do Petróleo | 3. RP | 155 | 5,5% |
| Óleo Diesel | 4. Transporte e Armazenagem do Óleo Diesel | 4. TAOD | 14 | 0,5% |
| Óleo Diesel | 5. Consumo do Óleo Diesel | 5. COD | 2.603 | 92,5% |
| Total Emissões | | | 2.813 | 100,0% |
| Saldo Final | | | 2.813 | |

Fonte: O autor.

É notável que o maior contribuinte para o impacto ambiental calculado é a etapa 4. Consumo do Óleo Diesel, com 93% das emissões totais de todo o ciclo de vida e em seguida, temos a etapa 2. Refino do Petróleo, com 6% do total de emissões. A etapa que menos contribuiu para o ciclo de vida é a etapa 3. Transporte e Armazenagem do Óleo Diesel, com aproximadamente 0,5% das emissões totais.

Também vale ressaltar que não existe captura de CO₂ no curto prazo, fazendo com que o total de emissões e o saldo final sejam equivalentes.

4.2.1.2 Biodiesel Éster

Diferentemente do diesel fóssil, no caso dos biocombustíveis, existe um fator relevante de captura de CO₂ que reduz de forma significativa o saldo de emissões no ciclo de vida do produto. O impacto dessa etapa e das outras que compõem o ciclo de vida do biodiesel éster pode ser visto no Gráfico 10 e na Tabela 23.

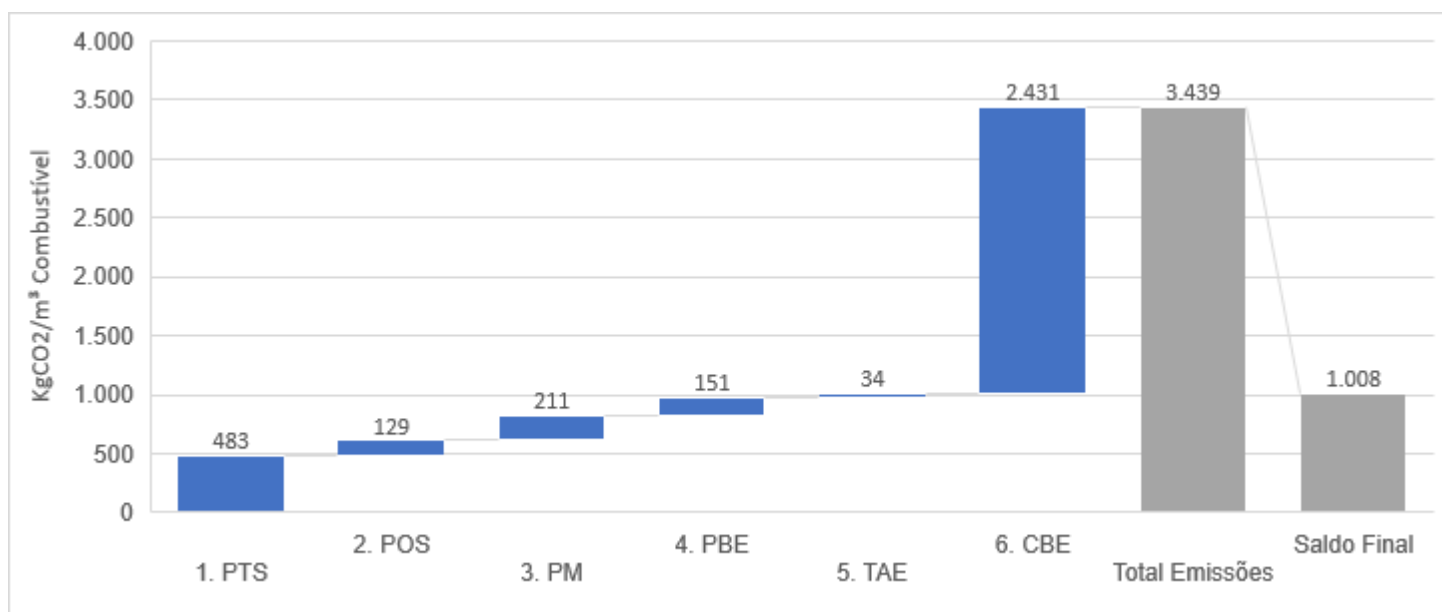


Gráfico 10: Emissões de CO₂ no ciclo de vida do biodiesel éster por unidade funcional (m³) e saldo final após descontar a captura de CO₂. Fonte: O autor.

Tabela 23: Emissões de CO₂ no ciclo de vida do biodiesel éster por unidade funcional (m³).

| Produto | Subsistema | Sigla | Dado Convertido (KgCO ₂ /m ³ Combustível) | % Total de Emissões |
|-----------------|--|-----------------------|---|---------------------|
| Biodiesel Éster | 0. Captura de CO ₂ | 0. CCO ₂ | -2.431 | -70,7% |
| Biodiesel Éster | 1. Plantação e Transporte da Soja | 1. PTS | 483 | 14,1% |
| Biodiesel Éster | 2. Produção do Óleo de Soja | 2. POS | 129 | 3,7% |
| Biodiesel Éster | 3. Produção do Metanol | 3. PM | 211 | 6,1% |
| Biodiesel Éster | 4. Produção do Biodiesel Éster | 4. PBE | 151 | 4,4% |
| Biodiesel Éster | 5. Transporte e Armazenagem do Biodiesel Éster | 5. TAE | 34 | 1,0% |
| Biodiesel Éster | 6. Consumo do Biodiesel Éster | 6. CBE | 2.431 | 70,7% |
| | | Total Emissões | 3.439 | 100,0% |
| | | Saldo Final | 1.008 | 29,3% |

Fonte: O autor.

Assim como no ciclo de vida do diesel fóssil, existe uma grande representatividade da etapa de consumo (6. Consumo de Biodiesel Éster), e uma baixa representatividade na etapa de transporte (5. Transporte e Armazenagem do

Biodiesel Éster). Destacam-se também outros fatores, como o impacto relevante da etapa de captura de CO₂ no saldo final, capturando de volta da atmosfera mais de 70% de todo o dióxido de carbono lançado ao longo do ciclo de vida; e a relevância da primeira etapa de matéria-prima (1. Plantação e Transporte da Soja) no total de emissões (14,1%). Por fim, cabe destacar a etapa 3. Produção do Metanol, produto de origem fóssil, como a terceira etapa com maior relevância dentro do ciclo de vida.

4.2.1.3 Diesel Verde

Assim como no biodiesel éster, o diesel verde também tem uma etapa inicial de captura de CO₂ que contribui para a redução do saldo total de emissões de CO₂. Esse impacto (e outros) pode ser visto no Gráfico 11 e na Tabela 24.

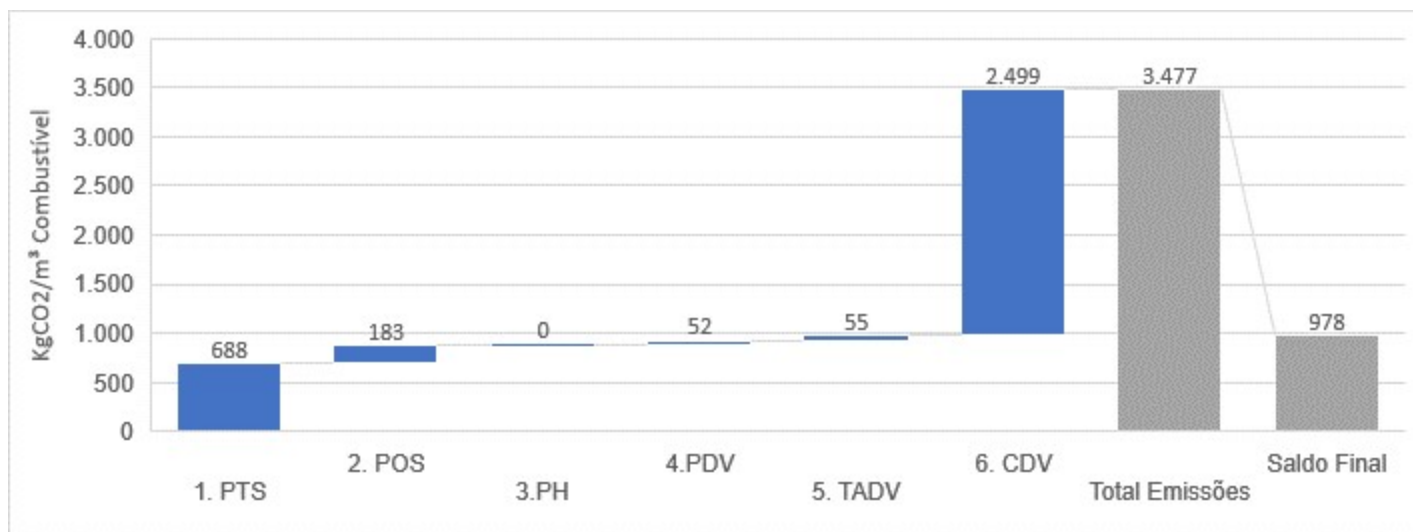


Gráfico 11: Emissões de CO₂ no ciclo de vida do diesel verde por unidade funcional (m³).
Fonte: O autor.

Tabela 24: Emissões de CO₂ no ciclo de vida do biodiesel éster por unidade funcional (m³)

| Produto | Subsistema | Sigla | Dado Convertido (KgCO ₂ /m ³ Combustível) | % Total de Emissões |
|--------------|---|-----------------------|---|---------------------|
| Diesel Verde | 0. Captura de CO ₂ | 0. CCO ₂ | -2.499 | -71,9% |
| Diesel Verde | 1. Plantação e Transporte da Soja | 1. PTS | 688 | 19,8% |
| Diesel Verde | 2. Produção do Óleo do Soja | 2. POS | 183 | 5,3% |
| Diesel Verde | 3. Produção do Hidrogênio | 3. PH | 0 | 0,0% |
| Diesel Verde | 4. Produção do Diesel Verde | 4. PDV | 52 | 1,5% |
| Diesel Verde | 5. Transporte e Armazenagem do Diesel Verde | 5. TADV | 55 | 1,6% |
| Diesel Verde | 6. Consumo do Diesel Verde | 6. CDV | 2.499 | 71,9% |
| | | Total Emissões | 3.477 | 100,0% |
| | | Saldo Final | 978 | 28,1% |

Fonte: O autor.

Seguindo as mesmas tendências dos outros dois combustíveis analisados, existe uma alta representatividade das etapas de consumo e plantação/transporte de soja (73% e 20%, respectivamente). As etapas de plantação e transporte de soja e de produção do óleo de soja são ainda mais representativas no ciclo de vida do diesel verde (20% e 5,3%) do que no do biodiesel éster (14,1% e 3,7), uma vez que o diesel verde utiliza mais soja na sua fórmula do que o biodiesel éster. Finalmente, a representatividade da etapa de consumo é um pouco maior no diesel verde do que no biodiesel éster.

4.2.2

Comparação dos Impactos das Etapas dos Ciclos de Vida entre Sistemas de Produto Distintos

Hoffrichter *et al.* (2012) definiram o ciclo de vida dos combustíveis como uma análise Well-to-Wheel, ou seja, do poço (em referência ao petróleo extraído) à roda (em referência à etapa de consumo), e o dividiu entre Well-to-Tank (do poço ao tanque) ou etapa de combustível para as etapas anteriores à etapa de consumo e Tank to Wheel (tanque à roda) ou etapa de eficiência veicular para a etapa de consumo. Como cada produto possui um ciclo de vida com etapas distintas, elas foram agrupadas nas categorias descritas por Hoffrichter *et al.* (2012) para que possam ser comparadas entre os sistemas de produto distintos. Como no ciclo total, etapas de captura de CO₂ contribuem negativamente para as emissões totais.

4.2.2.1 Well to Tank

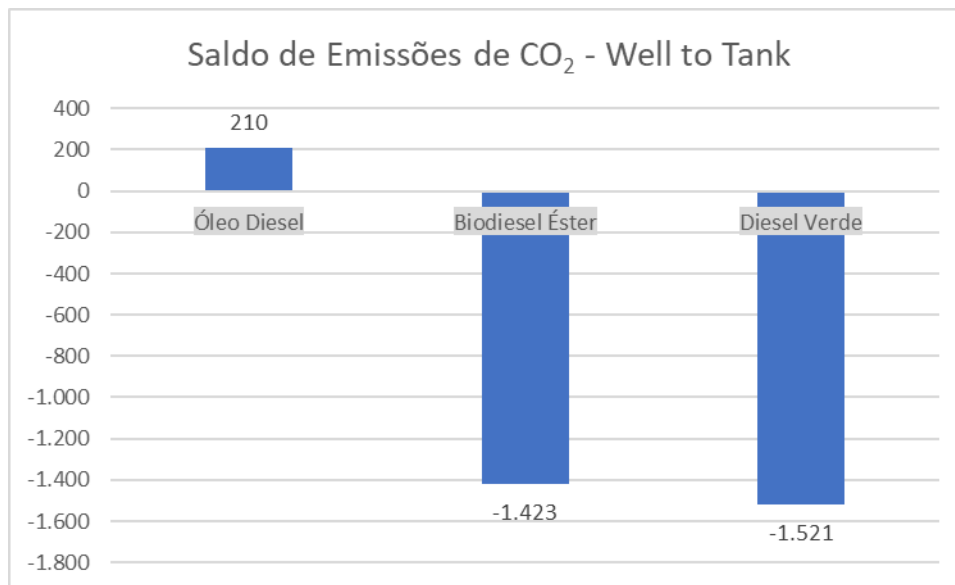


Gráfico 12: Saldo de emissões de CO₂ nas etapas Well-to-Tank.
Fonte: O autor.

Como o óleo diesel não possui captura de CO₂ para abater as emissões ao longo do ciclo de vida, ele é o único produto que apresenta saldo positivo nas etapas well to tank. O biodiesel éster e o diesel verde apresentam ordens de grandeza de saldo similares, com um melhor desempenho do diesel verde em relação ao outro biocombustível.

O fator que mais contribui para esse melhor desempenho é o uso de hidrogênio como uma das suas matérias primas principais depois do óleo de soja, ao contrário do biodiesel éster, que utiliza o metanol como um dos seus inputs produtivos. Enquanto o hidrogênio não possui contribuição relevante para as emissões, o metanol é a terceira etapa mais relevante no ciclo de vida do biodiesel éster, sendo precedida somente das etapas de consumo e de plantio e transporte da soja.

Um outro fator que é válido de ser citado é que a etapa de consumo do diesel verde apresenta mais emissões do que do biodiesel éster, o que pela estrutura metodológica adotada, faz com que a etapa de captura de CO₂ também seja maior no diesel verde, contribuindo para um saldo menor de emissões nas etapas Well to Tank.

4.2.2.2 Tank to Wheel

Podemos verificar o saldo das emissões de cada produto nas etapas Well to Tank no Gráfico 13.

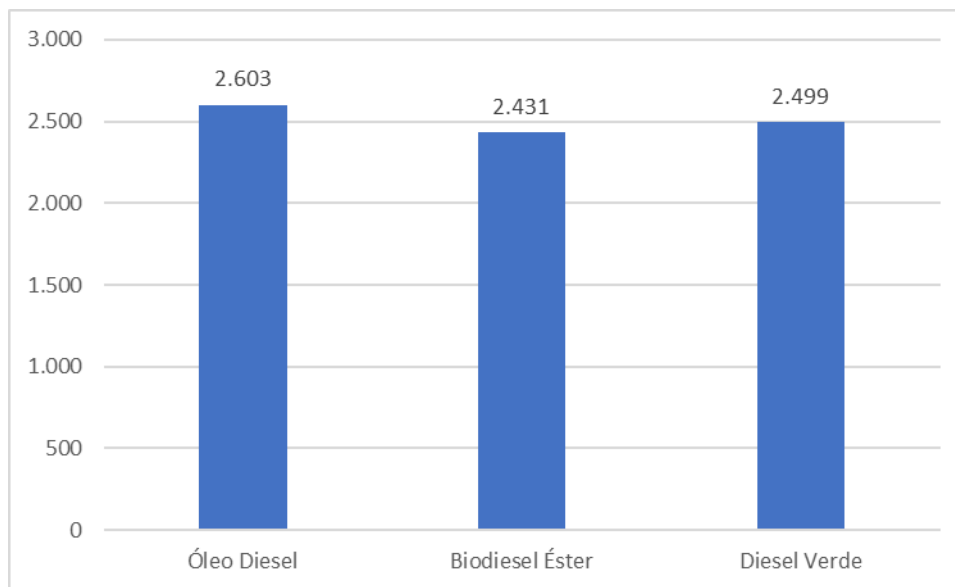


Gráfico 13: Saldo de emissões de CO₂ nas etapas Tank-to-Wheel.
Fonte: O autor.

É possível observar que, ao contrário das etapas anteriores terem diferentes ordens de grandeza e representatividades, a etapa Tank to Wheel apresenta uma ordem de grandeza similar entre os 3 combustíveis, com menos de 7% de diferença entre o produto com mais emissões (óleo diesel) e o com menos emissões (biodiesel éster). Apesar de uma diferença percentual pequena, esse valor é significativo pois possui grande impacto em valor absoluto quando multiplicado por todo o volume de combustível movimentado anualmente no Brasil. Importante observar também que ao contrário do que ocorreu nas etapas Well to Tank, o biodiesel éster é o biocombustível com melhor desempenho ambiental na etapa Tank to Wheel.

4.2.3

Comparação dos Impactos Totais de Cada Sistema de Produto

4.2.3.1

Por Unidade Funcional

A comparação do impacto ambiental total de todos os produtos, também chamada de Well to Wheel, pode ser observada no Gráfico 14.

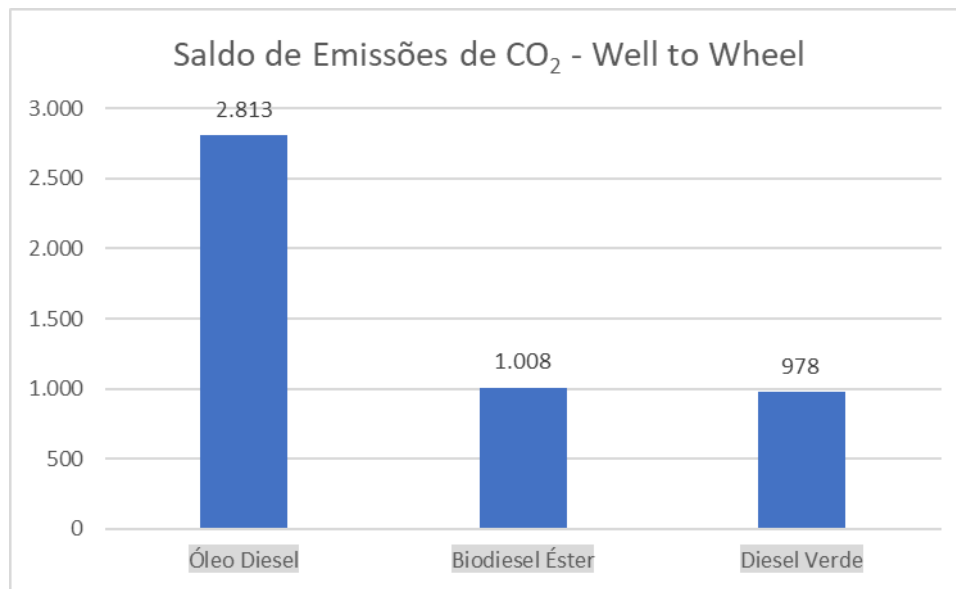


Gráfico 14: Saldo de Emissões de CO₂ nas etapas Well-to-Wheel.

Fonte: O Autor.

Nessa análise, é possível observar como o óleo diesel possui um total de emissões significativamente superior aos dois biocombustíveis que servem como alternativa ao seu consumo. Como observado nas etapas anteriores, esse desempenho superior dos biocombustíveis é uma combinação de uma etapa de captura de CO₂ relevante dentro do seu ciclo de vida com uma etapa de consumo inferior em emissões de CO₂ à alternativa fóssil.

Quando comparamos os dois biocombustíveis, vemos um desempenho ambiental similar, com uma pequena vantagem no diesel verde por usar hidrogênio (e não metanol) no processo de hidrotratamento do óleo de soja.

4.2.3.2 Por Cenário de Demanda

Quando comparamos as emissões de cada combustível por unidade funcional, é possível verificar uma grande diferença de desempenho ambiental entre o óleo diesel e os biocombustíveis, e uma diferença menos significativa entre os impactos dos 2 biocombustíveis (7%). No entanto, essa análise não demonstra a vantagem competitiva do diesel verde por ser um biocombustível *drop-in*, ou seja, possuir as mesmas especificações que a sua alternativa fóssil, sem a necessidade de alterações nos motores para que possa substituí-la.

Para entender o impacto dessa característica na emissão total nacional de CO₂ por veículos movidos a motor diesel, o indicador de emissões totais por unidade funcional foi multiplicado pela demanda anual histórica de 2020 do ciclo diesel (relembrada na Tabela 25) em cada uma das suas categorias de etapa (WTT e TTW) e dos ciclos totais (WTW).

Tabela 25: Resumo da demanda de combustível por cenário e por produto (em milhões de m³).

| Cenário | Diesel Fóssil | Biodiesel Éster | Diesel Verde | Total |
|------------------|---------------|-----------------|--------------|-------|
| <i>Histórico</i> | 50,67 | 6,80 | - | 57,47 |
| <i>D100</i> | 57,47 | - | - | 57,47 |
| <i>B15</i> | 48,85 | 8,62 | - | 57,47 |
| <i>R15</i> | 48,85 | - | 8,62 | 57,47 |
| <i>R100</i> | - | - | 57,47 | 57,47 |

Fonte: O autor.

O produto dessas operações é a quantidade anual total de CO₂ emitido em cada cenário de demanda, e pode ser observado nos Gráficos 15 e 16.



Gráfico 15: Emissões por Cenário e por Categoria de Etapa.
Fonte: O autor.

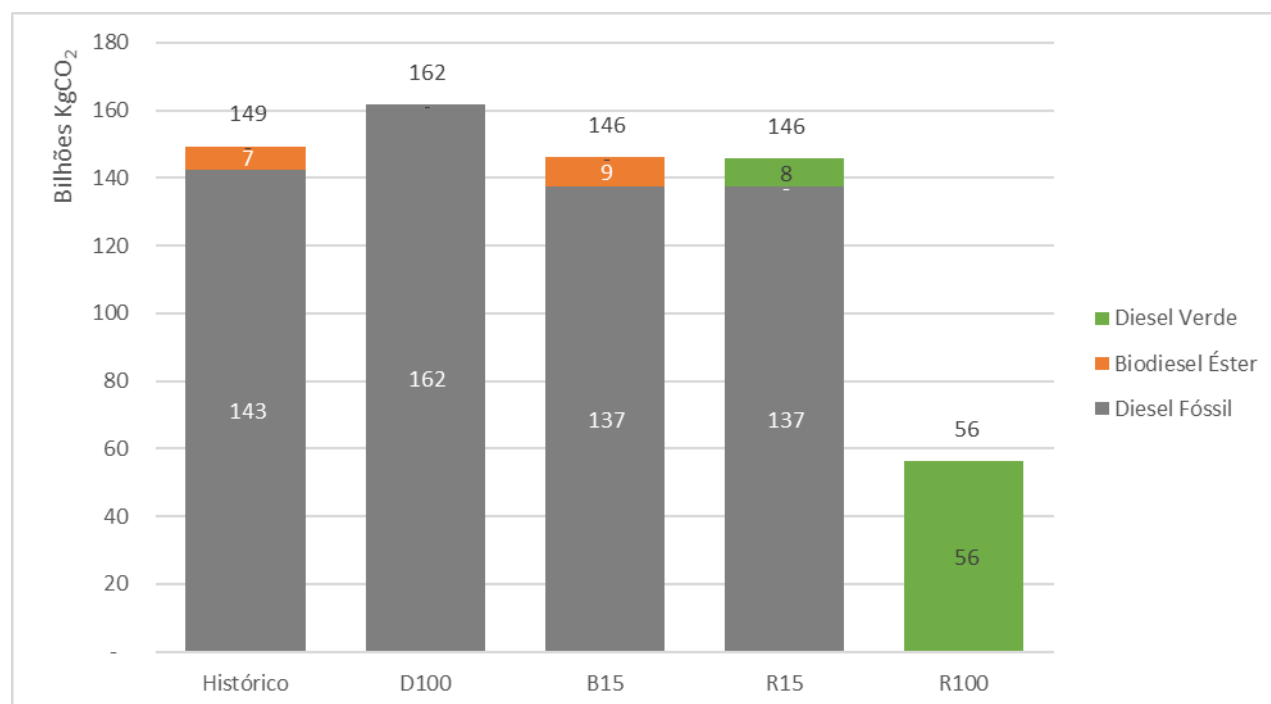


Gráfico 16: Emissões Totais por Cenário.
Fonte: O Autor.

Através da observação do Gráfico 15, é possível confirmar que o principal diferencial dos biocombustíveis para um desempenho ambiental superior aos combustíveis de origem fóssil está nas etapas anteriores à queima do combustível no motor e emissões no escapamento dos veículos. Nas etapas WTT, vemos que a mistura atual de biodiesel éster ($\approx 12\%$) já é suficiente para anular as emissões do diesel fóssil ($\approx 88\%$ do óleo diesel B), e o aumento percentual dos biocombustíveis gera ainda mais redução nas emissões. O limite superior dessa redução pode ser visto no único cenário com 100% de biocombustível (R100), que na sua etapa WTT gera um saldo negativo anual mais de 87 milhões de toneladas de CO_2 , ou seja, essas etapas emitem menos dióxido de carbono do que capturam.

Ainda é possível entender no Gráfico 15 que assim como os indicadores individuais da etapa TTW, os cenários também apresentam pouca diferença percentual entre as emissões de CO_2 de combustíveis fósseis e biocombustíveis, o que reforça o ponto anteriormente exposto de que o diferencial dos biocombustíveis reside nas etapas WTT.

Analisando o Gráfico 16 para entender as emissões totais de cada cenário de demanda, é possível observar que o cenário D100 representa um aumento no total de emissões dos veículos a diesel em relação ao histórico, uma vez que ele representa a matriz de combustíveis antes da introdução do biodiesel éster na regulação brasileira em 2005. Essa redução comprova que a introdução do biodiesel éster na matriz diesel vem diminuindo anualmente as emissões de CO_2 , chegando a uma redução de cerca de 7,6% do total de dióxido de carbono emitido.

Da mesma forma, o cenário B15 representa uma redução no total de emissões anuais, pois amplia a participação do biocombustível de menos de 12% em 2020 para 15%, mistura prevista para 2025 (BRASIL, 2023). Como o biodiesel éster necessita de modificações nos motores a diesel para que se possa de forma segura aumentar a sua composição no óleo diesel B, esse é o seu limite de contribuição na redução das emissões de CO_2 .

Uma outra comparação interessante é aquela entre os cenários com o mesmo percentual de mistura de biocombustíveis, mas com diferentes biocombustíveis a serem misturados. Os cenários B15 e R15 (com respectivamente 15% de biodiesel éster e de diesel verde), assim como na comparação por unidade funcional, possuem desempenhos ambientais similares entre si. Na realidade, a diferença entre os 2 cenários (0,4%) é ainda menor do que

a diferença entre os indicadores da unidade funcional (7,0%) devido ao fato de que a diferença na unidade funcional é diluída nos 85% de óleo diesel fóssil nessa matriz.

Finalmente, é necessário analisar o cenário R100, que se destaca por uma significativa redução das emissões totais. Os 66,7% de diferença entre os indicadores por unidade funcional do diesel fóssil e do diesel verde podem ser observados em sua totalidade na comparação com o cenário D100 e em uma menor escala no cenário histórico (63,9%), que também possui uma parcela de biodiesel éster. Essa redução significativa em relação a todos os outros cenários testados é oriunda da combinação do melhor desempenho dos biocombustíveis em relação ao diesel fóssil com a característica *drop-in* do diesel verde que permite a substituição do diesel fóssil em sua totalidade dentro do motor veicular.

5

Discussão dos Resultados e Conclusões ou Recomendações

Esse capítulo será dividido em 3 seções: interpretação do ciclo de vida, onde discutiremos as conclusões obtidas diretamente da observação dos resultados no capítulo anterior; recomendações, onde, a partir da experiência obtida ao longo do estudo serão recomendadas ações ou outros estudos complementares a este; e conclusões finais, relativas à aplicação da estrutura metodológica.

5.1

Interpretação do Ciclo de Vida

Uma das principais conclusões desta ACV é que as duas alternativas renováveis (biodiesel éster e diesel verde) reduzem significativamente as emissões de CO₂, quando comparadas com o diesel de origem fóssil, independentemente do cenário de mistura. Isso acontece porque enquanto o combustível fóssil gera emissões de CO₂ na sua etapa de matéria-prima (petróleo), os biocombustíveis capturam CO₂ na etapa equivalente (plantas)

As grandes diferenças de emissões entre os cenários observadas nas etapas WTT (*Well-to-Tank*) trazem interpretações importantes da avaliação do ciclo de vida, como o fato de que as misturas já regulamentadas no Brasil de 15% são suficientes para anular todas as emissões das etapas WTT das misturas B15 ou R15. Em resumo, os 15% de biocombustíveis capturam todo o CO₂ emitido pelas suas matérias-primas e pelos 85% de óleo diesel A (considerando somente as etapas WTT).

Sobre o óleo diesel de origem fóssil, a modelagem adotada trouxe observações relevantes, como a etapa de transporte de petróleo gerar mais emissões de CO₂ do que a etapa de extração do petróleo, mesmo com as suas operações de *flaring* para queimar o excesso de gás dentro dos poços. Isso acontece porque o transporte do petróleo ainda se concentra no modal marítimo, com navios movidos a óleo combustível, que possuem um alto nível de emissões.

O mesmo não ocorre com a soja, cujas atividades de transporte acrescentam representam apenas 2,7% das emissões totais de CO₂ pela soja que chega nas unidades de esmagamento. Os outros 97,3% estão relacionados com as atividades de cultivo da soja

(plantio, irrigação, colheita, armazenagem e transporte), sem contar as emissões das mudanças no uso da terra, metodologia não utilizada nesse estudo.

Nas emissões relativas ao seu insumo principal (óleo de soja), o diesel verde apresenta pior desempenho do que o biodiesel éster, pois utiliza 42% mais óleo de soja (e consequentemente mais soja) na sua formulação, como visto no estudo de Arguelles-Arguelles *et al.* (2021). Entretanto, como o hidrogênio é um insumo secundário com menor impacto em emissões de CO₂ do que o metanol, a diferença nas emissões dos insumos se reduz para aproximadamente 5%.

Essa diferença se inverte quando acrescentamos as etapas produtivas – tanto de óleo de soja e metanol em biodiesel éster, quanto de óleo de soja e hidrogênio em diesel verde – na avaliação do impacto, uma vez que a transesterificação (do biodiesel éster) apresenta indicador de emissões similar ao refino e superior ao hidroprocessamento (do diesel verde). Com a adição dessa etapa, o diesel verde passa a ter emissões 5% inferiores ao biodiesel éster, sem contar a etapa de captura de CO₂ e as etapas de transporte e consumo dos biocombustíveis.

Como o diesel verde precisará do mesmo insumo do biodiesel éster (óleo de soja, produzido no interior do país), mas será produzido em maior quantidade nas refinarias (localizadas no litoral), o seu indicador de emissões na etapa de transporte é superior à soma entre o indicador do biodiesel éster e o do diesel fóssil. Isso acontece porque se espera que os fluxos de transporte que são realizados hoje pelo biodiesel éster sejam realizados futuramente pelo óleo de soja que servirá de insumo para o diesel verde, e os fluxos de distribuição (entre refinarias e postos) se assemelhem ao atual do diesel fóssil.

As etapas de matéria-prima, produção e transporte não são tão significativas quando as etapas de captura de CO₂ e de consumo do combustível, mas quando temos dois produtos com consumo (e consequentemente captura) na mesma ordem de grandeza de emissões de CO₂ (como é o caso do biodiesel éster e do diesel verde), são essas as etapas que podem fazer a diferença no melhor desempenho por unidade funcional.

Esse estudo também demonstrou que apesar de ser a etapa mais representativa dentro do ciclo de vida de combustíveis, a etapa de consumo não é o principal driver para estimar a quantidade de CO₂ reduzida a partir da introdução de biocombustíveis na matriz de transportes. A diferença entre as emissões na etapa de consumo do diesel fóssil ou dos biocombustíveis não é percentualmente significativa, como mostra o Gráfico 13, e o que realmente traz uma grande melhora no desempenho ambiental é a etapa de captura do CO₂ (presente somente nos biocombustíveis), que anula a sua etapa de consumo.

Concluiu-se também que a possibilidade de se utilizar o diesel verde sem a necessidade de mistura com o diesel de origem fóssil nos motores a diesel e sem a necessidade de alteração mecânica nesses motores é uma vantagem ambiental desse

biocombustível em relação ao biodiesel éster. Se não considerarmos possíveis limitações de oferta e viabilidade econômica, é possível avaliar um cenário tecnologicamente possível com 100% de biocombustível, o que maximiza a redução nas emissões e apresenta os melhores indicadores.

Vale ressaltar que um cenário em que a oferta total de combustível do ciclo diesel se dá pelo diesel verde levanta questões que vão além da capacidade de produção e da viabilidade econômica do biocombustível. Como o diesel verde utiliza mais óleo vegetal do que o biodiesel éster, a necessidade de oferta desse produto aumenta, o que pode indicar aumento do desmatamento em áreas florestais na Amazônia e no cerrado brasileiro. Uma alternativa a isso pode ser o aumento do percentual da soja total que é esmagada, fazendo com que a necessidade de hectares para a produção de óleo de soja seja menor. Entretanto, fatores como restrições na demanda do farelo de soja, um dos subprodutos do esmagamento da soja, já fazem parte das restrições atuais para o crescimento da oferta de biodiesel éster. Como Castanheira *et al* (2013) já haviam identificado a terra como uma das restrições produtivas do biodiesel, e Esteves *et al.* (2016) reforçaram a importância das emissões diretas relacionadas à mudança de uso da terra, essa vantagem do cenário de melhor desempenho pode ser limitada não só em volume de oferta, mas também em redução real no saldo de emissões de CO₂.

Finalmente, é possível responder à pergunta de pesquisa, uma vez que o diesel verde se provou neste estudo como o biocombustível com maior potencial de redução das emissões de CO₂ no contexto brasileiro, dadas as condições estabelecidas na estrutura metodológica.

5.2

Recomendações

A primeira recomendação é a realização de um inventário público e detalhado em relação às matérias-primas apresentadas nesse estudo. Apesar de no caso das matérias primas fósseis o estudo foi capaz de ter encontrado dados secundários detalhados o suficiente para permitir modelagens específicas. No que diz respeito à soja, os estudos e inventários se concentram na metodologia de mudança de uso da terra (LUC), dificultando o acesso direto a informações de emissões diretas de CO₂. Além disso, esses inventários precisam ser atualizados com uma frequência adequada, uma vez que o diesel verde está em uma etapa introdutória no cenário nacional.

Outra recomendação é a de adoção de ACVs completas acerca do tema, levando em consideração uso da terra, contaminação da água, fatores econômico-sociais e até mesmo ecológicos. Apesar de não ser objetivo desse estudo, foram observados no referencial teórico diversos estudos que apontam impactos dos biocombustíveis em dimensões não abordadas neste escopo.

Como os resultados apontaram um cenário composto por 100% de diesel verde como o de menor quantidade de emissões de CO₂, recomenda-se também um estudo de capacidade futura de produção de tal biocombustível, abordando as diversas etapas do seu ciclo produtivo: área plantada e colhida da soja, processos de plantio e colheita, aumento de produtividade, técnicas de armazenagem e comercialização para o excedente gerado de farelo de soja, oferta de hidrogênio, capacidade de produção nas unidades de esmagamento (óleo de soja) e de hidroprocessamento (diesel verde) e ativos logísticos para armazenar e transportar todos os produtos ao longo dessas complexas cadeias de suprimento.

Finalmente, as conclusões de Esteves *et al.* (2016) devem ser levadas em consideração: a importância das emissões indiretas relacionadas à mudança de uso da terra, especialmente nas áreas de maior eficiência agrícola, e a necessidade de cuidado na definição das terras utilizadas para a expansão da produção de soja, principalmente na região amazônica. Recomenda-se então um estudo específico que detalhe os possíveis impactos do aumento de oferta nos ecossistemas, principalmente em função do desmatamento de áreas de biomas como o amazônico e o cerrado. Ao usarem a metodologia LUC, esses estudos, teriam um grande potencial para complementar as conclusões deste trabalho, assim como para suportar decisões futuras acerca de subsídios para uma transição energética bem-sucedida dentro do ciclo diesel.

5.3

Conclusões Finais

A apresentação por este estudo de resultados comparativos e detalhados demonstra que a ACV é uma ferramenta poderosa para o entendimento de impactos ambientais dos biocombustíveis, mesmo se aplicada em sua forma simplificada. Além disso, essa estrutura metodológica demonstrou ser eficiente em recursos, dados e duração, o que pode ser um diferencial para estimular

discussões que estejam em estado inicial, como é o caso da estratégia de transição energética do ciclo diesel no Brasil.

A conjuntura atual, no entanto, representou um grande desafio do ponto de vista de coleta de dados, uma vez que mesmo ampliando a busca de fontes secundárias para artigos com modelagens e inventários já construídos, existe uma escassez de informações, principalmente no que tange os biocombustíveis e, em especial, o diesel verde, tecnologia que ganhou relevância nos últimos três anos.

É válido ressaltar que os resultados obtidos nesse estudo são válidos somente para as premissas estabelecidas ao longo do trabalho, assim como para as suas coberturas temporais e tecnológicas. Não é objetivo deste material servir de evidência ou suporte para declarações indiscriminadas e genéricas sobre o desempenho ambiental dos biocombustíveis apresentados, que estão em fases distintas de curva tecnológica e cujos parâmetros podem se alterar no curto e médio prazo.

Vale ressaltar também que existem diversos desafios além dos relacionados a aspectos climáticos e emissões de GEEs. Esses desafios representaram barreiras para um aumento mais relevante do biodiesel éster na matriz energética dos últimos anos, e parte desses desafios se mantém, principalmente aqueles relacionados à etapa de matéria prima: dependência da soja como principal fonte de óleo vegetal, concentração regional desses insumos no Sul e Centro-Oeste e impactos de um provável aumento do deflorestamento em ecossistemas diversos. Além disso, a viabilidade financeira desses biocombustíveis ainda precisa ser melhorada para que seu crescimento não dependa exclusivamente de grande subsídio governamental.

Espera-se ainda que os resultados desse estudo contribuam para que a discussão de transição energética, tão vital para a limitação do aquecimento global, seja abordada de forma mais técnica e menos politizada. Se faz necessário enxergar além do lobby dos grandes players do mercado de energia brasileiro (majoritariamente de origem fóssil) para um futuro no qual seja possível haver ciclos de vida mais sustentáveis e ecológicos, como é o caso dos biocombustíveis.

Referências bibliográficas

ABNT: ABNT NBR ISO 14040 - Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura, 2014

ABNT: ABNT NBR ISO 14044 - Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações, 2014

ABREU, F.; VIEIRA, J.N.S.; RAMOS, S.Y. Programa Nacional para a Produção e Uso do Biodiesel Diretrizes, desafios e perspectivas. **Revista de Política Agrícola** 15.3 (2006): 5-18.

ACHARYA, N.; NANDA, P.; PANDA, S.; ACHARYA, S. Analysis of properties and estimation of optimum blending ratio of blended mahua biodiesel. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, vol. 20, no. 2, p. 511–517, Apr. 2017. DOI 10.1016/j.jestch.2016.12.005.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP): **Dados estatísticos**. < <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/dados-estatisticos> > Acesso em 03 dez. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP): **Painel dinâmico – Produtores de Biodiesel**. Acesso em 05 fev. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP): **Resolução ANP nº 50, de 23 de dezembro de 2013. Estabelece as especificações dos derivados de petróleo, do gás natural, do álcool etílico anidro combustível e do biodiesel**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 24 dezembro 2013. Seção 1, p. 263. Disponível em: <<https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-50-2013>>. Acesso em: 10 jan. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP): **Resolução ANP nº 842, de 14 de maio de 2021. Estabelece a especificação do diesel verde, bem como as obrigações quanto ao controle da qualidade a serem atendidas pelos agentes econômicos que o comercializem em território nacional**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 17 maio 2021. Seção 1, p. 7. Disponível em: <<https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-842-2021-estabelece-a-especificacao-do-diesel-verde-bem-como-as-obrigacoes-quanto-ao-controle-da-qualidade-a-serem-atendidas-pelos-agentes-economicos-que-o-comercializem-em-territorio-nacional>>. Acesso em: 10 jan. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP): **Resolução ANP nº 905, de 18 de novembro de 2022. Dispõe sobre as especificações do óleo diesel de uso não rodoviário e as obrigações quanto ao controle da qualidade a serem atendidas pelos agentes econômicos que comercializam o produto em território nacional.** Diário Oficial da União, Brasília, DF, 23 novembro 2022. Seção 1. Disponível em: <<https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-905-2022-dispoe-sobre-as-especificacoes-do-oleo-diesel-de-uso-nao-rodoviario-e-as-obrigacoes-quanto-ao-controle-da-qualidade-a-serem-atendidas-pelos-agentes-economicos-que-comercializam-o-produto-em-territorio-nacional?origin=institui%C3%A7%C3%A3o>>. Acesso em: 10 jan. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP): **Visão geral da indústria – Apresentação da Diretora Symone Araújo**, 2 de outubro de 2023 - Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/apresentacoes-palestras/2023/arquivos/2023-10-02-symone-araujo-aula-ibdea.pdf>> Acesso em: 10 jan. 2024.

ALVARENGA, R.P. **Subsídios para avaliação do ciclo de vida de modo simplificada da produção agrícola de milho por meio de um estudo de caso**, UNESP, 2012

ANKATHI, S.; LU, Z.; ZAIMES, G.G.; HAWKINS, T.; GAN, Y.; WANG, M. Greenhouse gas emissions from the global transportation of crude oil: Current status and mitigation potential. **Journal of Industrial Ecology**, vol. 26, no. 6, p. 2045–2056, 23 Mar. 2022. DOI 10.1111/jiec.13262.

ANUAR, M.R.; ABDULLAH, A.Z. Challenges in biodiesel industry with regards to feedstock, environmental, social and sustainability issues: A critical review. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, vol. 58, p. 208–223, 1 May 2016. DOI 10.1016/j.rser.2015.12.296.

ARGUELLES-ARGUELLES, A.; AMEZCUA-ALLIERI, M.A.; RAMÍREZ-VERDUZCO, L.F. Life Cycle Assessment of Green Diesel Production by Hydrodeoxygenation of Palm Oil. **Frontiers in Energy Research**, vol. 9, 23 Jul. 2021. DOI 10.3389/fenrg.2021.690725.

BARROS, T.; JARDINE, J. **Biodiesel** - Portal Embrapa. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/agroenergia/biodiesel>>. Acesso em: 08 dez. 2023.

BRANCO, J.E.H.; BARTHOLOMEU, D.B.; VETTORAZZI, A.C. Avaliação das emissões de co2 na etapa de transporte do etanol: aplicação de um modelo de otimização. **TRANSPORTES**, vol. 28, no. 1, p. 63–80, 30 Apr. 2020. DOI 10.14295/transportes.v28i1.1856.

BAUMANN, H.; RUSSELL, A.; EKVALL, T. **Life cycle assessment – introduction and overview**. Journal of Cleaner Production, vol. 13, no. 13-14, p. 1207–1210, Nov. 2005. DOI 10.1016/j.jclepro.2005.05.008.

BAUMANN, H.; BEEMSTERBOER, S.; WALLBAUM, H. **Ways to get work done: a review and systematisation of simplification practices in the LCA literature**. The International Journal of Life Cycle Assessment, vol. 25, no. 11, p. 2154-2168, 19 Sep. 2020. DOI 10.1007/s11367-020-01821-w.

BECCALI, M.; CELLURA, M.; LONGO, S.; GUARINO, F. Solar heating and cooling systems versus conventional systems assisted by photovoltaic: Application of a simplified LCA tool. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, vol. 156, p. 92-100, Nov. 2016. DOI 10.1016/j.solmat.2016.03.025.

BRÄNNSTRÖM, H.; KUMAR, H.; ALÉN, R. Current and Potential Biofuel Production from Plant Oils. **BioEnergy Research**, vol. 11, no. 3, p. 592-613, 11 Jun. 2018. DOI 10.1007/s12155-018-9923-2.

BRASIL: Lei nº 9.478, de 6 de agosto de 1997. Dispõe sobre a política energética nacional, as atividades relativas ao monopólio do petróleo, institui o Conselho Nacional de Política Energética e a Agência Nacional do Petróleo e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 7 ago. 1997. Disponível em: < https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9478.htm >. Acesso em: 10 fev. 2024.

BRASIL: Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005. Dispõe sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 14 jan. 2005. Disponível em: < <https://legis.senado.leg.br/norma/570546#:~:text=Disp%C3%B5e%20sobre%20a%20introdu%C3%A7%C3%A3o%20do,2002%3B%20e%20d%C3%A1%20outras%20provid%C3%Aancias> >. Acesso em: 10 jan. 2024.

BRASIL: PLANO SETORIAL DE TRANSPORTE E DE MOBILIDADE URBANA PARA MITIGAÇÃO E ADAPTAÇÃO À MUDANÇA DO CLIMA (PSTM), Ministério dos Transportes, Ministério das Cidades, BRASÍLIA/DF, 2013.

BRASIL.: INVENTÁRIO NACIONAL DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS POR VEÍCULOS AUTOMOTORES RODOVIÁRIOS/ Ministério do Meio Ambiente. 2013.

BRASIL.: Quarta Comunicação Nacional do Brasil à Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, Secretaria de Pesquisa e Formação Científica. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, 2021.

BRASIL: CNPE aprova antecipação do B14 para março de 2024 e B15 para março de 2025, incentivando a produção de biocombustíveis e a transição energética. Brasília, DF, 12 dez. 2023. Disponível em: < <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/cnpe-aprova-antecipacao-do->

[b14-para-marco-de-2024-e-b15-para-marco-de-2025-incentivando-a-producao-de-biocombustiveis-e-a-transicao-energetica](#) > Acesso em: 10 fev. 2024.

CAVALETT, O.; ORTEGA, E. Integrated environmental assessment of biodiesel production from soybean in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, vol. 18, no. 1, p. 55-70, Jan. 2010. DOI 10.1016/j.jclepro.2009.09.008.

CBIE: **Como é feita a distribuição de combustíveis no Brasil?**, Artigos CBIE, 2020

CERRI, C.E.P.; YOU, X.; CHERUBIN, M.R.; MOREIRA, C.S.; RAUCCI, G. S.; CASTIGIONI, B. de A.; ALVES, P.A.; CERRI, D.G.P.; MELLO, F.F. de C.; CERRI, C.C. Assessing the greenhouse gas emissions of Brazilian soybean biodiesel production. **PLOS ONE**, vol. 12, no. 5, p. e0176948, 11 May 2017. DOI 10.1371/journal.pone.0176948.

COLTRO, L. **Avaliação do ciclo de vida como instrumento de gestão**. Campinas: CETEA/ITAL, 2007.

COMISSÃO EUROPEIA: **ILCD Handbook: Framework and Requirements for Life Cycle Impact Assessment Models and Indicators**. Luxemburgo. 2010.

CORLAITE LANA, T.A.; PEREIRA, A.F. ACV Simplificada e Análise de Emissões de Co2 em Sistemas de Vedação Arquitetônica. **MIX Sustentável**, vol. 6, no. 1, p. 145-162, 23 Mar. 2020. DOI 10.29183/2447-3073.mix2020.v6.n1.145-162

CORRO, G. Sulfur impact on diesel emission control - A review, **Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis**. Lett. 75 (2002) 89-106. Janeiro de 2002. <https://doi.org/10.1023/A:1014853602908>.

COSTA, M.W.; OLIVEIRA, A.A.M. Social life cycle assessment of feedstocks for biodiesel production in Brazil. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, vol. 159, p. 112166, 1 May 2022. DOI 10.1016/j.rser.2022.112166.

CRUZ, T.R. Comparação de Diferentes Estratégias de Tratamento de Resíduos Orgânicos Usando ACV Simplificada. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, vol. 9, no. 2, p. 251, 17 Jul. 2020. DOI 10.19177/rgsa.v9e22020251-262.

DA SILVA, P. R.; ARAGÃO, M. E.; TRIERWEILER, J. O.; TRIERWEILER, L. F. An overview of different approaches in hydrogen network optimization via mathematical programming. **Brazilian Journal of Operations & Production Management**, vol. 17, no. 3, p. 1–20, 23 Sep. 2020. DOI 10.14488/bjopm.2020.031.

DE OLIVEIRA, F.C.; COELHO, S.T. History, evolution, and environmental impact of biodiesel in Brazil: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 75, p. 168-179, Aug. 2017. DOI 10.1016/j.rser.2016.10.060.

DO CARMO BRITO, T.R.; ARANHA, J.T.M.; FERNANDES-SILVA, A.A.; SANTOS, L.A.C.; DE SOUSA FRAGOSO, R.M. A Review and Analysis of Life Cycle Assessment Tendencies in the Brazilian Soybean Supply Chain. **Biology and Environment: Proceedings of the Royal Irish Academy**, vol. 122B, no. 1, p. 53-65, 2022. DOI 10.1353/bae.2022.0003.

EBADIAN, M.; VAN DYK, S.; MCMILLAN, J.D.; SADDLER, J. Biofuels policies that have encouraged their production and use: An international perspective. **Energy Policy**, vol. 147, p. 111906, Dec. 2020. DOI 10.1016/j.enpol.2020.111906.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE): **A Relevância da Infraestrutura Dutoviária para o Abastecimento de Derivados de Petróleo no Brasil**, Rio Pipeline, 2019

ESTEVEZ, V.P.P.; ESTEVES, E.M.M.; BUNGENSTAB, D.J.; LOEBMANN, D. G. dos S. W.; DE CASTRO VICTORIA, D.; VICENTE, L.E.; DE QUEIROZ FERNANDES ARAÚJO, O.; DO ROSÁRIO VAZ MORGADO, C. Land use change (LUC) analysis and life cycle assessment (LCA) of Brazilian soybean biodiesel. **Clean Technologies and Environmental Policy**, vol. 18, no. 6, p. 1655-1673, 2 Apr. 2016. DOI 10.1007/s10098-016-1161-8.

ESTEVEZ, R.; AGUADO-DEBLAS, L.; LÓPEZ-TENLLADO, F.J.; LUNA, C.; CALERO, J.; ROMERO, A.A.; BAUTISTA, F.M.; LUNA, D. Biodiesel Is Dead: Long Life to Advanced Biofuels—A Comprehensive Critical Review. **Energies**, vol. 15, no. 9, p. 3173, 26 Apr. 2022. DOI 10.3390/en15093173.

FERREIRA, M. de O.; MURAYAMA J.; MOLLE C.C.M. **O conceito de atacadista e varejista no setor de combustíveis - Atuação de fiscos estaduais na distribuição extrapola competências na cobrança de ICMS**, EPBR, 2023 Disponível em: < <https://epbr.com.br/o-conceito-de-atacadista-e-varejista-no-setor-de-combustiveis/> > Acesso em: 22 jan. 2024.

GERVENI, M.; HUBBS, T.; IRWIN, S. Revisiting Biomass-Based Diesel Feedstock Trends over 2011-2022. **farmdoc daily (14):12**, Department of Agricultural and Consumer Economics, University of Illinois at Urbana-Champaign, 17 Jan. 2024.

GERVENI, M.; HUBBS, T.; IRWIN, S. Renewable Diesel and Biodiesel Feedstock Trends over 2011–2022. **farmdoc daily (14):12**, Department of Agricultural and Consumer Economics, University of Illinois at Urbana-Champaign, 01 Mai. 2023.

GLITMAN, K.; FARNSWORTH, D.; HILDERMEIER, J. The role of electric vehicles in a decarbonized economy: Supporting a reliable, affordable and

efficient electric system. **The Electricity Journal**, vol. 32, no. 7, p. 106623, Aug. 2019. DOI 10.1016/j.tej.2019.106623.

GONÇALVES, T. dos S.; ORO, C.E.D.; WANCURA, J.H.C.; DOS SANTOS, M. S.N.; JUNGES, A.; DALLAGO, R.M.; TRES, M.V. Challenges for energy guidelines in crop-based liquid biofuels development in Brazil. **Next Sustainability**, vol. 2, p. 100002, Jun. 2023. DOI 10.1016/j.nxsust.2023.100002. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nxsust.2023.100002>.

HARTIKKA, T.; KURONEN, M.; KIISKI, U. Technical Performance of HVO (Hydrotreated Vegetable Oil) in Diesel Engines. **SAE Technical Paper Series**, 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, 10 Sep. 2012. DOI 10.4271/2012-01-1585.

HOEKMAN, S.K.; BROCH, A.; ROBBINS, C.; CENICEROS, E.; NATARAJAN, M. Review of biodiesel composition, properties, and specifications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 16, no. 1, p. 143-169, Jan. 2012. DOI 10.1016/j.rser.2011.07.143.

HOFFRICHTER, A.; MILLER, A.R.; HILLMANSEN, S.; ROBERTS, C. Well-to-wheel analysis for electric, diesel and hydrogen traction for railways. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, vol. 17, no. 1, p. 28-34, Jan. 2012. DOI 10.1016/j.trd.2011.09.002.

HOSPIDO, A.; MOREIRA, M.T.; FEIJOO, G. Simplified life cycle assessment of galician milk production. **International Dairy Journal**, vol. 13, no. 10, p. 783-796, Jan. 2003. DOI 10.1016/s0958-6946(03)00100-6.

HUSSAIN, R.A.E.D.; ASSAVAPOKEE, T.; KHUMAWALA, B.: Supply chain management in the petroleum industry: challenges and opportunities. **International Journal of Global Logistics & Supply Chain Management**, v. 1, n. 2, p. 90-97, 2006.

IBP: **PRIORIZAÇÃO DE INVESTIMENTOS EM INFRAESTRUTURA LOGÍSTICA PARA O DOWNSTREAM – SUMÁRIO EXECUTIVO**, Julho de 2022.

IBP: **Os Biocombustíveis e Sua Importância Para A Transição Energética Brasileira**, Caminhos para a Descarbonização, Janeiro de 2024.

IPCC: Climate Change 2023: Synthesis Report. **Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. IPCC, Genebra, Suíça. 2023.

JING, L.; EL-HOUJEIRI, H.M.; MONFORT, J.-C.; BRANDT, A.R.; MASNADI, M.S.; GORDON, D.; BERGERSON, J.A. Carbon intensity of global crude oil refining and mitigation potential. **Nature Climate Change**, vol. 10, no. 6, p. 526-532, Jun. 2020. DOI 10.1038/s41558-020-0775-3.

JULIO, A.A.V.; MILESSI, T.S.; OCAMPO BATLLE, E.A.; SILVA LORA, E.E.; YEPES MAYA, D.M.; ESCOBAR PALACIO, J.C. **Techno-economic and environmental potential of Renewable Diesel as complementation for diesel and biodiesel in Brazil: A comprehensive review and perspectives**. *Journal of Cleaner Production*, vol. 371, p. 133431, Oct. 2022. DOI 10.1016/j.jclepro.2022.133431.

JUNIOR, D. **Capacidade brasileira de produção de biodiesel atende mistura de 20%, apontam entidades**. Estadão, 02/2024. Disponível em: < <https://agro.estadao.com.br/sustentabilidade/capacidade-brasileira-de-producao-de-biodiesel-atende-mistura-de-20-apontam-entidades> > Acesso em: 22 jan. 2024.

KARGBO, H.; HARRIS, J.S.; PHAN, A.N. “Drop-in” fuel production from biomass: Critical review on techno-economic feasibility and sustainability. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 135, p. 110168, Jan. 2021. DOI 10.1016/j.rser.2020.110168.

KUMAR, S.; SINGH, J.; NANOTI, S. M.; GARG, M.O. A comprehensive life cycle assessment (LCA) of Jatropha biodiesel production in India. **Bioresource Technology**, vol. 110, p. 723–729, Apr. 2012. DOI 10.1016/j.biortech.2012.01.142.

LEGGIO: **Dados de movimentação de combustíveis por modal gerados pelo otimizador em Aimms**. Arquivo local recebido em Dez. 2022

LOBATO, M.F.; RODRIGUES, B.M.M.; SANTOS, A.G. dos.: Impacto da pandemia de COVID-19 nas emissões veiculares no Brasil no período de janeiro a maio de 2020. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, vol. 26, no. 5, p. 829-836, Oct. 2021. DOI 10.1590/s1413-415220200261.

LORNE, D. **Biofuels in the Road Transport Sector**, ECONOMIC OUTLOOK BIOFUELS DASHBOARD 2022, 23/01/2023 Disponível em: < <https://www.ifpenergiesnouvelles.com/article/biofuels-dashboard-2023> > Acesso em: 22 jan. 2024.

MILANEZ, A.Y.; MAIA, G.B.S.; GUIMARÃES, D.D.; FERREIRA, L.A. **Biodiesel e Diesel Verde no Brasil: Panorama Recente e Perspectivas**, BNDES, Rio de Janeiro, v. 28, n. 56, p. 41-71, set. 2022, vol. 7, no. 4, p. 2897-2913, 1 Jun. 2020. DOI 10.9770/jesi.2020.7.4(21).

MIKHAYLOV, A.; MOISEEV, N.; ALESHIN, K.; BURKHARDT, T. Global climate change and greenhouse effect. **Entrepreneurship and Sustainability Issues**, vol. 7, no. 4, p. 2897–2913, 1 Jun. 2020. DOI 10.9770/jesi.2020.7.4(21).

MILLER, J.; POSADA, F. **Norma PROCONVE P-8 de emissões no Brasil**. ICCT-The International Council on Clean Transportation, n. Fevereiro, p. 1-8, 2019.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES (MCTI). **Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil**. 6ª ed. Brasília, DF: MCTI, 2022

MOMBRA, S. **Jatropha: The biofuel that bombed seeks a path to redemption**, Mongabay, 2023 Disponível em: < <https://news.mongabay.com/2023/04/jatropha-the-biofuel-that-bombed-seeks-a-path-to-redemption/> > Acesso em: 22 jan. 2024.

NESTE. Site oficial da Neste Corporation <<https://www.neste.com/>> Acessado em 05 fev. 2024

OBSERVATÓRIO DO CLIMA: **Análise das Emissões de e suas Implicações para as Metas Climáticas do Brasil 1970-2021**, SEEG 10 anos, (2023)

OECD: **Crude Oil Production**. Disponível em: < <https://data.oecd.org/energy/crude-oil-production.htm> > Acessado em 05 fev. 2024

OPEC: **Trade Maps**. Annual Statistic Bulletin. Disponível em: < https://asb.opec.org/Trade_Maps.html > Acessado em 05 fev. 2024

OU, L.; LI, S.; TAO, L.; PHILLIPS, S.; HAWKINS, T.; SINGH, A.; SNOWDEN-SWAN, L.; CAI, H. Techno-economic Analysis and Life-Cycle Analysis of Renewable Diesel Fuels Produced with Waste Feedstocks. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, vol. 10, no. 1, p. 382–393, 28 Dec. 2021. DOI 10.1021/acssuschemeng.1c06561.

OUR WORLD IN DATA: **CO₂ and Green House Emissions**. Disponível em: < <https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions> > Acessado em 04/01/2023 > Acessado em 05 fev. 2024

OUR WORLD IN DATA: **Emissions by Sector**. Disponível em: < <https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions> > Acessado em 05 fev. 2024

PARENTE, E.J.S. Biodiesel: **Uma aventura tecnológica num país engraçado**. Fortaleza: Unigráfica, 2003.

PATIDAR, A.K.; AGARWAL, U.; DAS, U.; CHOUDHURY, T. Understanding the Oil and Gas Sector and Its Processes: Upstream, Downstream. In **Understanding Data Analytics and Predictive Modelling in the Oil and Gas Industry** (pp. 1-20). CRC Press, 2024

PETROBRAS: **Petrobras comercializa primeiro lote de DieselR5**. 31 Out. 2022 Disponível em: < <https://agencia.petrobras.com.br/w/petrobras-comercializa-primeiro-lote-de-diesel-r5> > Acessado em 05 fev. 2024

PRUSSI, M.; SCARLAT, N.; ACCIARO, M.; KOSMAS, V. Potential and limiting factors in the use of alternative fuels in the European maritime sector. **Journal of Cleaner Production**, vol. 291, p. 125849, Apr. 2021. DOI 10.1016/j.jclepro.2021.125849.

PURICELLI, S.; CARDELLINI, G.; CASADEI, S.; FAEDO, D.; VAN DEN OEVER, A.E.M.; GROSSO, M. A review on biofuels for light-duty vehicles in Europe. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 137, p. 110398, Mar. 2021. DOI 10.1016/j.rser.2020.110398.

RAMANATHAN, V.; FENG, Y. Air pollution, greenhouse gases and climate change: Global and regional perspectives. **Atmospheric Environment**, vol. 43, no. 1, p. 37-50, Jan. 2009. DOI 10.1016/j.atmosenv.2008.09.063.

RAMOS, C.S. **Com apoio da Vibra, BBF fará a 1ª usina de diesel verde do país**, 24/11/2021. Disponível em: <
<https://valor.globo.com/agronegocios/noticia/2021/11/24/com-apoio-da-vibra-bbf-fara-a-1a-usina-de-diesel-verde-do-pais.ghml>> Acessado em 05 fev. 2024

RANGARAJU, S. **10 years of EU fuels policy increased EU's reliance on unsustainable biofuels**, July 2021. Disponível em: <
<https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/08/Biofuels-briefing-072021.pdf>> Acessado em 05 fev. 2024

ROCHA, M.H.; CAPAZ, R.S.; LORA, E.E.S.; NOGUEIRA, L.A.H.; LEME, M.M.V.; RENÓ, M.L.G.; DEL OLMO, O.A. Life cycle assessment (LCA) for biofuels in Brazilian conditions: A meta-analysis. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, vol. 37, p. 435-459, 1 Sep. 2014. DOI 10.1016/j.rser.2014.05.036.

ROQUE, L.F.A.; DA COSTA, R.B.R.; DE SOUZA, T.A.Z.; CORONADO, C.J.R.; PINTO, G.M.; CINTRA, A.J.A.; RAATS, O.O.; OLIVEIRA, B.M.; FREZ, G.V.; ALVES, L.F.R. Experimental analysis and life cycle assessment of green diesel (HVO) in dual-fuel operation with bioethanol. **Journal of Cleaner Production**, vol. 389, p. 135989, Feb. 2023. DOI 10.1016/j.jclepro.2023.135989.

SANCHEZ, S.T.; WOODS, J.; AKHURST, M.; BRANDER, M.; O'HARE, M.; DAWSON, T.P.; EDWARDS, R.; LISKA, A.J.; MALPAS, R. Accounting for indirect land-use change in the life cycle assessment of biofuel supply chains. **Journal of The Royal Society Interface**, vol. 9, no. 71, p. 1105-1119, 18 Jan. 2012. DOI 10.1098/rsif.2011.0769.

SANTANA, I. **Emissão de gases poluentes por descarga de veículos do ciclo diesel provocadores de deterioramento do meio ambiente: busca de soluções para amenizar ou controlar o problema**. Belo Horizonte: FEAMIG, 2012.

SMIL, V. Diesel engine at 120 [Numbers Don't Lie]. **IEEE Spectrum**, vol. 54, no. 2, p. 24-24, Feb. 2017. DOI 10.1109/mspec.2017.7833500.

SMIL, V. The two prime movers of globalization: history and impact of diesel engines and gas turbines. **Journal of Global History**, vol. 2, no. 3, p. 373-394, Nov. 2007. DOI 10.1017/s1740022807002331.

SOUSA, V.M.Z.; LUZ, S.M.; CALDEIRA-PIRES, A.; MACHADO, F.S.; SILVEIRA, C.M. Life cycle assessment of biodiesel production from beef tallow in Brazil. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, vol. 22, no. 11, p. 1837-1850, 22 Sep. 2017. DOI 10.1007/s11367-017-1396-6.

SOUZA, Y.M. de; RODRIGUES, L.; FURLAN AMARAL, D. Análise Espacial da Demanda por Diesel nos Estados Brasileiros. **Revista de Economia e Agronegócio**, vol. 19, no. 1, p. 1-26, 2 Sep. 2021. DOI 10.25070/rea.v19i1.11671.

STATISTA: **Biofuel production in leading countries in oil equivalent** Disponível em: < <https://www.statista.com/statistics/274168/biofuel-production-in-leading-countries-in-oil-equivalent/>> Acessado em 09 jan. 2024

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)**, USP, 2012

SUSTMEME: **Energy Transition drives boom in biofuel production**. Out/2023 Disponível em: < <https://sustmeme.com/2023/10/18/energy-transition-drives-boom-in-biofuel-production/>> Acessado em 09 jan. 2024

SZKLO, A.; SCHAEFFER, R. Fuel specification, energy consumption and CO2 emission in oil refineries. **Energy**, vol. 32, no. 7, p. 1075-1092, Jul. 2007. DOI 10.1016/j.energy.2006.08.008.

UBRABIO: **Biocombustíveis: Histórico e Oportunidades**, Seminário “Biocombustíveis: A nova realidade do Brasil”, São José do Rio Preto, 18 de outubro de 2019

VEMPATAPU, B.P.; KANAUIA, P.K. **Monitoring petroleum fuel adulteration: A review of analytical methods**. TrAC Trends in Analytical Chemistry, vol. 92, p. 1–11, Jul. 2017. DOI 10.1016/j.trac.2017.04.011.

WICKE, B.; VERWEIJ, P.; VAN MEIJL, H.; VAN VUUREN, D. P.; FAAIJ, A. P. Indirect land use change: review of existing models and strategies for mitigation. **Biofuels**, vol. 3, no. 1, p. 87-100, Jan. 2012. DOI 10.4155/bfs.11.154