

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA SIMPLIFICADA PARA DIFERENTES TECNOLOGIAS  
DO CICLO DIESEL**

**LUCAS PEREIRA CAETANO**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (UFRJ)

**MARCOS COHEN**

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO (PUC-RIO)

# AValiação DO CICLO DE VIDA SIMPLIFICADA PARA DIFERENTES TECNOLOGIAS DO CICLO DIESEL

## 1. INTRODUÇÃO

Os impactos ambientais causados pelos produtos e processos industriais provenientes da atividade humana estão crescendo de forma acelerada, e a comunidade científica e as organizações vêm se mobilizando para tentar combater esse retrocesso com o avanço de ferramentas que ajudam a dimensionar e expor esses impactos.

Uma dessas ferramentas é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), muito útil quando certo produto possui uma cadeia de suprimentos complexa e com potencial para reduzir ou até anular os ganhos diretos do seu 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 da curva S de inovação (HVO) é um exercício teórico interessante, ainda mais se a comparação englobar a ótica ambiental, que neste escopo focou na emissão de CO<sub>2</sub>.

Utilizando esse indicador como forma de quantificar os impactos ambientais desses produtos e uma Avaliação do Ciclo de Vida simplificada, esse estudo buscará responder a seguinte pergunta: Quais são os combustíveis do ciclo diesel que, nas etapas de transporte e consumo, geram menos emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera?

## 2. CONTEXTO INVESTIGADO

### 2.1. Emissões de CO<sub>2</sub> 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 (H<sub>2</sub>O), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), ozônio (O<sub>3</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), responsáveis por um aumento em torno de 30° da temperatura no planeta (MIGUEZ, 2001). 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 (FREIRE DIAS, 2002). Conforme pode ser verificado na Tabela 1, o CO<sub>2</sub> é o principal GEE de origem humana (ALESHIN et al, 2020), e o seu tempo de permanência na atmosfera pode chegar a 200 anos.

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

Tabela 1 – Contribuição dos GEEs para a Efeito Estufa  
Fonte: ALESHIN et al, 2020

Como pode ser visto na Tabela 2, o subsetor com maior representatividade de emissões de CO<sub>2</sub> na matriz energética é o de transportes, e no caminho contrário da maioria dos países

membros da OCDE, o caso brasileiro de emissões de CO<sub>2</sub> no setor de transporte apresenta taxas de crescimento cada vez maiores, o que pode ser explicado tanto por 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).

Subsetores da Matriz Energética		Em Gg CO <sub>2</sub>		Participação no Total das Emissões Brasileiras em %	
		1990	2005	1990	2005
Queima de Combustíveis Fósseis	Subsetor Energético	22.176	48.454	2,4	3,1
	Subsetor Industrial	64.903	114.620	7,0	7,3
	Subsetor Transporte	82.235	136.155	8,8	8,6
	Subsetor Residencial	13.817	15.429	1,5	1,0
	Subsetor Agricultura	10.052	14.808	1,1	0,9
	Outros Setores	2.584	3.611	0,3	0,2
Emissões Fugitivas		7.451	13.913	0,8	0,9
<b>Total</b>		<b>203.218</b>	<b>346.990</b>	<b>21,8</b>	<b>22,0</b>

Tabela 2 – 7 Emissões de CO<sub>2</sub> Oriundas da Matriz Energética  
Fonte: DE ANDRADE e MATTEI, 2011

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 o autor (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 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 nas Tabelas 3 e 4.

Modal	Brasil (2006)	EUA (2007)	China (2007)	Rússia (2008)	União Europeia (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%

Tabela 3 – Matriz de Transporte de Cargas – Comparativo Internacional  
Fonte: DE ANDRADE e MATTEI, 2011

Modal	Brasil (2006)	EUA (2007)	China (2007)	Rússia (2008)	União Europeia (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%

Tabelas 4 – Matriz de Transporte de Passageiros – Comparativo Internacional  
Fonte: DE ANDRADE e MATTEI, 2011

### 3. SITUAÇÃO-PROBLEMA: CICLO DIESEL, TECNOLOGIAS ALTERNATIVAS E DISTRIBUIÇÃO

O óleo diesel (também conhecido como diesel A ou diesel convencional) é um derivado do petróleo utilizado em motores de combustão interna e ignição por compressão (também chamados motores do Ciclo Diesel e que possuem rendimento superior aos motores do Ciclo Otto, ou seja, alimentados por gasolina ou etanol), que, por sua vez, possuem grande aplicação em diversas áreas do setor econômico. 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). Na Figura 1, podemos visualizar algumas etapas da cadeia de produção e distribuição desse derivado.

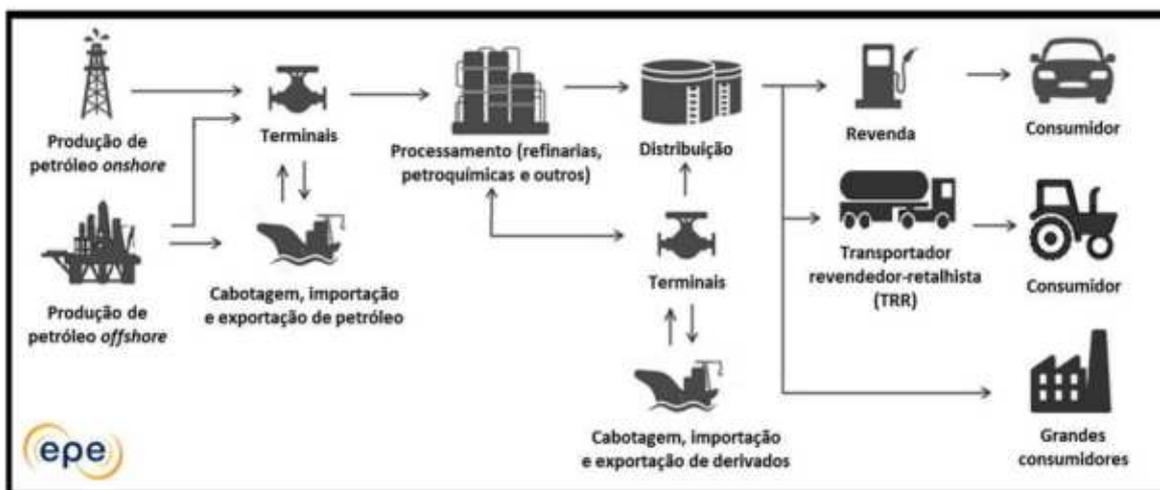


Figura 1 – Representação da Cadeia Produtiva do Diesel Convencional  
Fonte: EPE, 2019

Na definição de Cardellini 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 (CARDELLINI et al, 2021) Por questões de estabilidade e decomposição, é normalmente utilizado em misturas com o diesel convencional de 7 a 10%, apesar de no Brasil já terem sido reguladas misturas de até 12% (ANP, 2014). Para se obter misturas maiores de biodiesel na composição final do combustível, modificações nos motores são necessárias, mas existem frotas hoje que suportam até o uso do Biodiesel Éster sem nenhuma mistura com o Diesel convencional. A cadeia produtiva e de suprimentos deste produto pode ser visto na Figura 2.

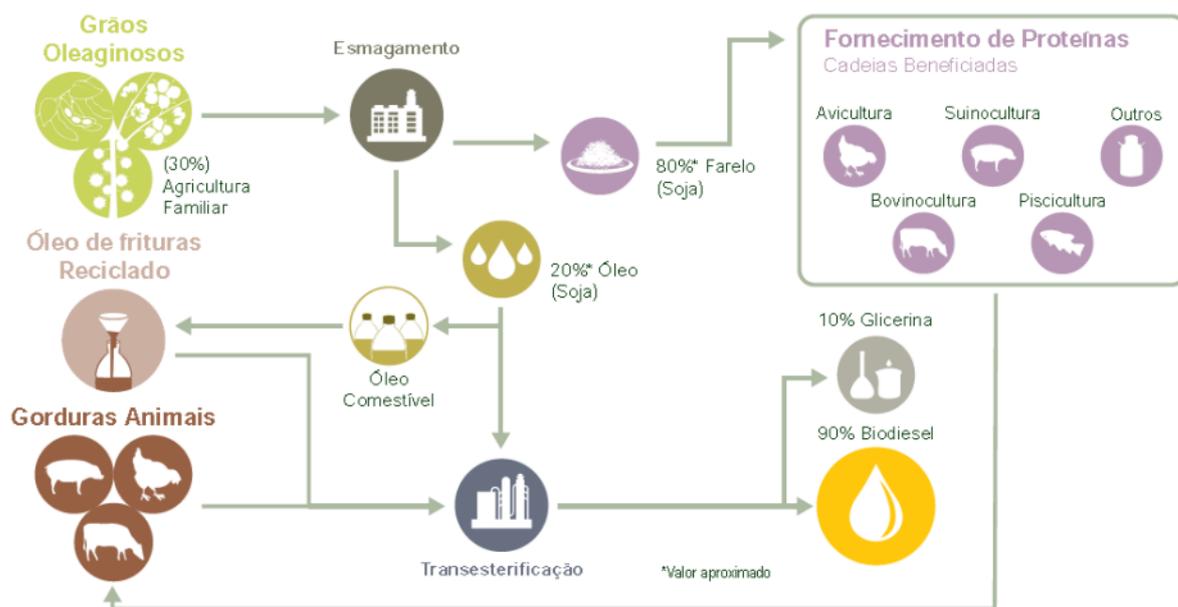


Figura 2 – Representação da Cadeia Produtiva do Biodiesel  
 Fonte: UBRABIO, 2017

Ainda segundo Cardellini et al (2021), o HVO (Hydrotreated Vegetable Oil) – também conhecido como Diesel Verde, é um combustível do grupo chamado “dieseis renováveis”, e é um diesel parafínico derivado de biomassa. Uma das tecnologias para a obtenção desse tipo de combustível é o hidroprocessamento, que pode ser realizado em módulos HDT existentes nas 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 (CARDELLINI et al, 2021). A tecnologia e a regulação do HVO são ambas recentes, e ainda estão em ampla discussão no mercado de combustíveis (ANP, 2021).

A CBIE (2020) descreveu os principais aspectos dos ciclos de produção e distribuição dos combustíveis e biocombustíveis na Figura 3, e esses pontos são essenciais para o entendimento da metodologia e dos seus consequentes resultados: enquanto o diesel convencional é produzido nas refinarias localizadas mais próximas ao 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 HVO, que pode também ser produzido nas refinarias e utilizar da mesma infraestrutura de distribuição que o diesel convencional (dutos, ferrovias, rotas de cabotagem, etc.).

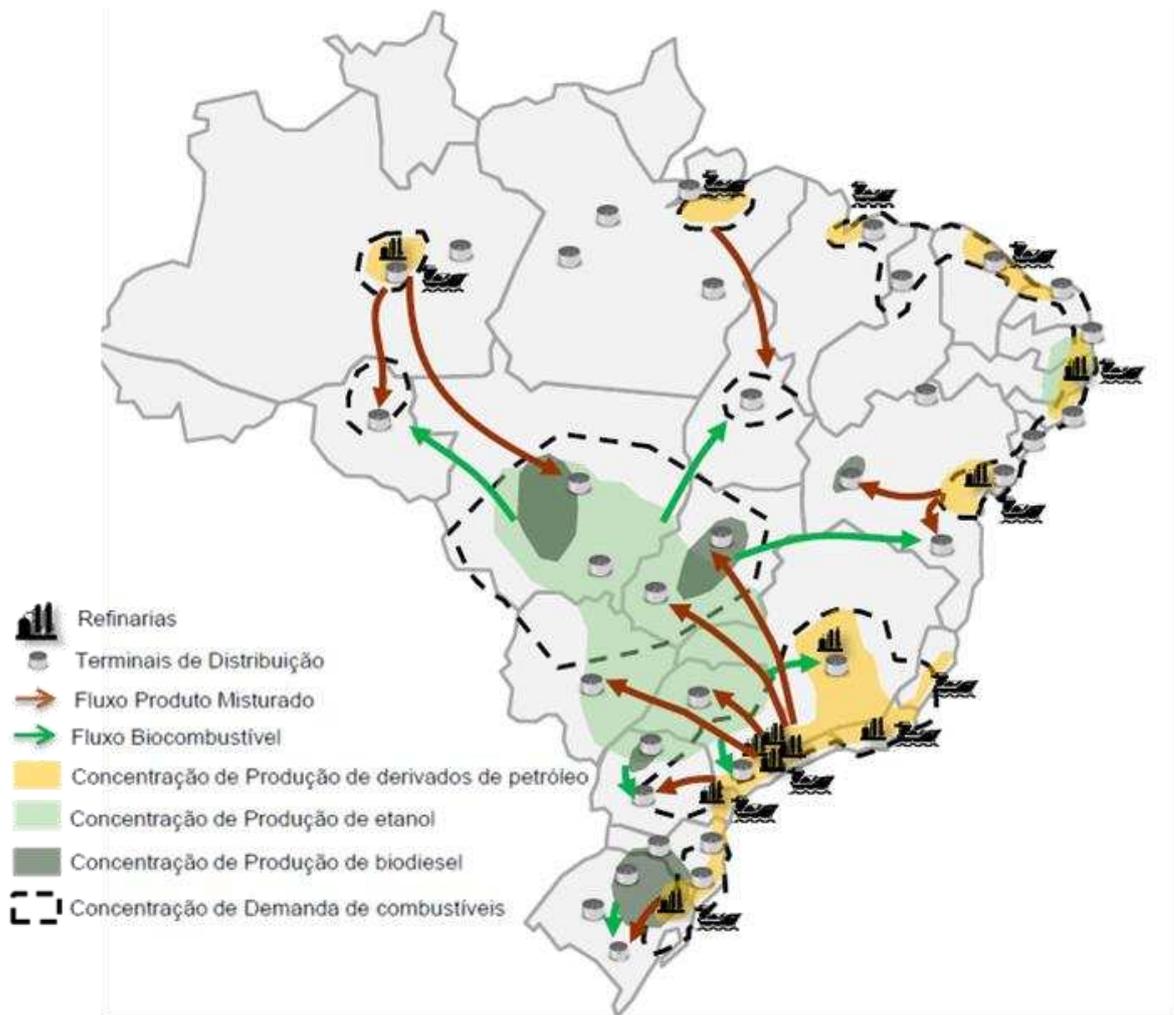


Figura 3: Principais Aspectos dos Ciclos de Produção e Distribuição de Combustíveis  
 Fonte: CBIE, 2020

Considerando a situação-problema descrita nesta seção, o presente estudo tem como objetivo analisar o impacto ambiental das 3 principais tecnologias (atuais e futuras) do Ciclo Diesel: diesel convencional, biodiesel éster e HVO, buscando entender a emissão de CO<sub>2</sub> não só no que sai do escapamento dos veículos abastecidos com esse tipo de combustível, mas também na etapa de transporte entre a unidade produtora e o consumidor final. Para isso, utilizará a Avaliação do Ciclo de Vida Simplificada, selecionando algumas etapas do ciclo de vida e fazendo alguns recortes temporais e geográficos nesse escopo para concluir a análise.

O Brasil está em um momento de redefinição no que tange as estratégias de transição energética do Ciclo Diesel, que ainda está em uma etapa muito inicial no Brasil e no mundo. Entender os impactos ambientais, sociais e regulatórios são uma etapa obrigatória no processo de tomada de decisão, e se espera que os resultados deste estudo possam incentivar essa transição energética, direcionando esforços para aquelas tecnologias com o maior poder de impactar positivamente o meio ambiente.

## **4. INTERVENÇÃO PROPOSTA: AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA SIMPLIFICADA**

### **4.1. Ciclo de Vida e Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)**

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2009), 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 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 (2009), existem quatro fases de estudo de uma ACV:

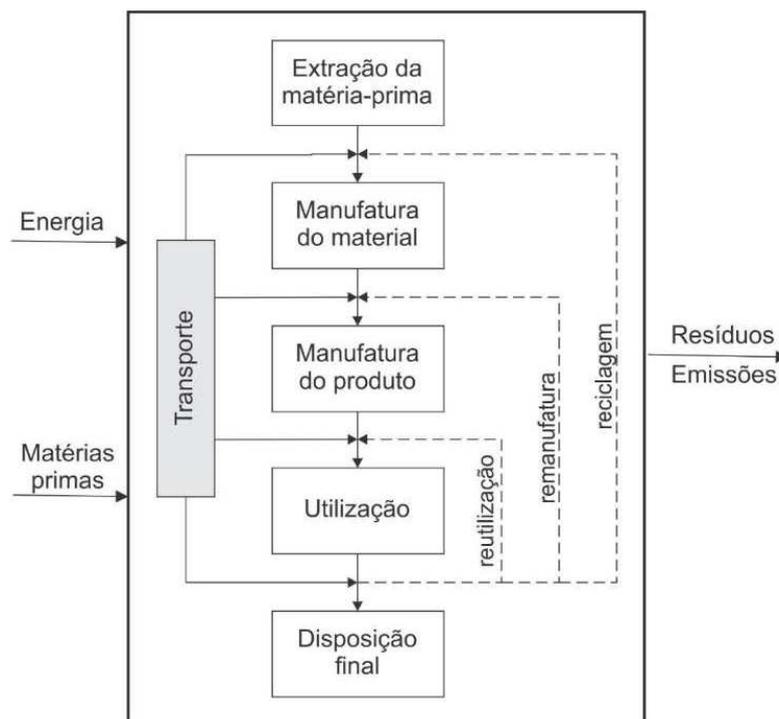
1. Fase 1: a fase de definição de objetivo e escopo, na qual define-se objetivos como a aplicação pretendida, as razões para a execução do estudo, o público-alvo e se existe a intenção de utilizar os resultados em afirmações comparativas a serem divulgadas publicamente; e limita-se o escopo, informando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

2. 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 saídas e entradas relevantes de um determinado sistema de produto. Entre os dados coletados, estão as entradas de matéria-prima e de energia, assim como outras entradas físicas e auxiliares. 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.

3. 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.

4. 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.

Existem diversas formas de se representar as etapas do ciclo de vida de um produto: A ABNT (2009) 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. O diagrama de um sistema feito por Librelotto e Jalali (2008), apesar de ser mais simples do que as anteriores, é o que melhor representa o ciclo de vida dos combustíveis, e será utilizado para limitar o escopo da análise. Este diagrama pode ser observado na Figura 4.



. Figura 4 - Diagrama Linear de um Sistema de Ciclo de Vida  
 Fonte: Librelotto e Jalali (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 (ALVARENGA, QUEIROZ e RENOFIO, 2012). Ainda segundo Alvarenga et al (2012, pág, 6), essas limitações podem ser superadas através do uso de ACVs simplificadas, definidas por ele 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.”*

#### 4.2. Aplicação da ACV ao Ciclo Diesel no Setor de Transporte

O presente estudo optou por limitar a Avaliação do Ciclo de Vida das tecnologias analisadas às etapas de distribuição e consumo, deixando outras etapas como matérias primas e produção para trabalhos futuros. Outro recorte do escopo será o geográfico, uma vez que o estudo se limitará ao território nacional, e o temporal, limitando a análise à demanda energética do Ciclo Diesel em 2020. A abordagem metodológica escolhida é a quantitativa, e o parâmetro comparativo entre os diferentes cenários foi a emissão de CO<sub>2</sub> no transporte de cargas como forma de dimensionar o impacto ambiental de cada tecnologia alternativa, comparando-as com a tecnologia mais utilizada atualmente (diesel convencional). Um desenho conceitual do método de análise pode ser observado na Figura 5.

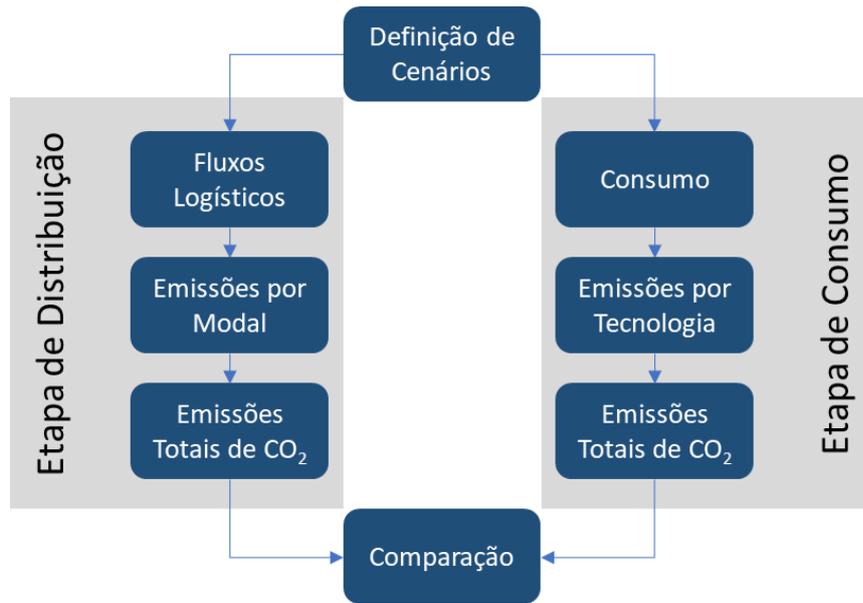


Figura 5: Método de Pesquisa  
Fonte: Os Autores

Para as análises relativas à emissão de CO<sub>2</sub> na etapa de distribuição de combustíveis, 3 categorias de informações foram utilizadas: 1) oferta e demanda de combustíveis; 2) fluxos logísticos realizados; 3) emissão de CO<sub>2</sub> por modal de transporte. Os parâmetros relativos à oferta e demanda de combustíveis foram retirados de publicações da ANP.

Os fluxos logísticos estão disponíveis para alguns modais (ex: movimentações ferroviárias – ANTT – e aquaviárias - ANTAQ), mas carecem de informações relativas aos fluxos rodoviários, majoritários dentro da distribuição de combustíveis. Para identificar esses fluxos faltantes, foi utilizado um otimizador de custo total que simula a tomada de decisões que uma distribuidora teria ao minimizar o custo total de distribuição. Os fluxos logísticos apontados pelo otimizador se aproximariam do que as distribuidoras fariam dentro do cenário testado. Uma representação dos fluxos públicos e do complemento de informações fornecido pelo modelo pode ser visualizado na Figura 6.

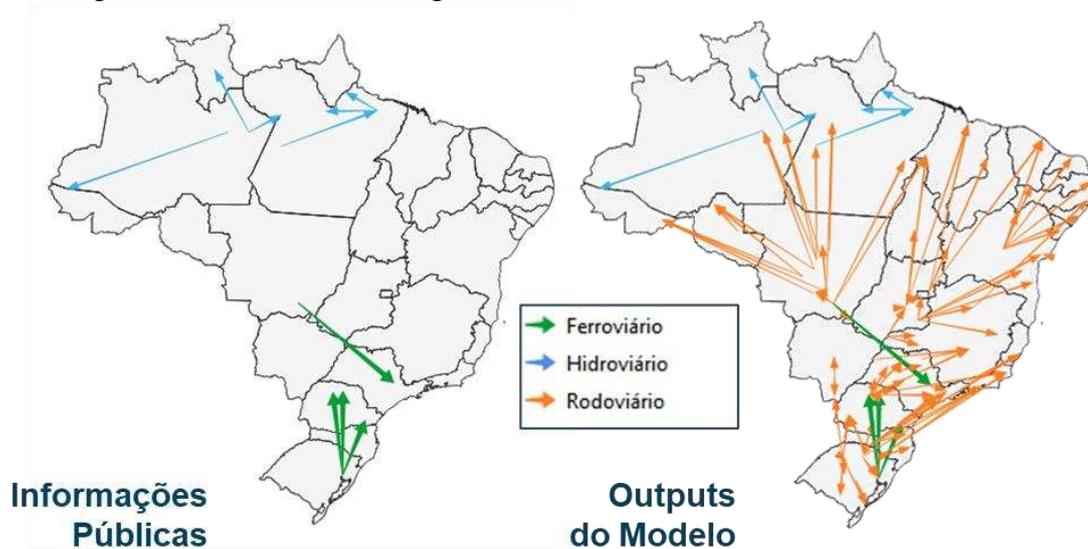


Figura 6 – Mapa Explicativo dos Fluxos Disponíveis Publicamente e dos que Serão Estimados  
Fonte: ANTT, ANTAQ, Os Autores

Para os parâmetros de emissão de CO<sub>2</sub> por modal de transporte, duas fontes foram consideradas na definição dos parâmetros de input da análise: o Plano Setorial de Transporte e de Mobilidade Urbana para Mitigação e Adaptação à Mudança do Clima (BRASIL, 2013), e a Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes (BARTHOLOMEU, BRANCO e VETTORAZZI 2019).

Para as análises relativas à emissão de CO<sub>2</sub> na etapa de consumo dos combustíveis, e para utilizar a mesma fonte nas 2 etapas, a referência foi a ANPET (BARTHOLOMEU, BRANCO e VETTORAZZI 2019).

## 5. RESULTADOS OBTIDOS PELA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

### 4.2.1. Cenários

Para avaliação dos impactos ambientais na emissão de CO<sub>2</sub> de diferentes misturas para o Ciclo Diesel, foram selecionados alguns cenários de referência: O cenário Histórico 2020 é baseado no que foi consumido em 2020 dentro do Ciclo Diesel (mistura de aproximadamente 12% de biodiesel éster) e o cenário D100 é um exercício teórico para servir de referência ao analisar os outros cenários de mistura de biocombustíveis: o cenário B15 se baseia na limitação tecnológica que a regulação atual do Brasil estipula para a mistura do biodiesel éster – e baseia as suas metas de transição energética. O cenário R15 consiste no mesmo percentual de mistura que o B15, mas ao invés de biodiesel éster, o biocombustível a ser misturado é o HVO. O último cenário consiste na mudança completa da matriz energética do Ciclo Diesel, passando a ser totalmente renovável.

### 4.2.2. Oferta e demanda de combustíveis e biocombustíveis

Como pode ser observado no Gráfico 1, foi construído para cenário um mix de demanda total dos combustíveis, podendo este variar entre diesel convencional, biodiesel éster e HVO. Para todos os cenários, foi considerado o mesmo volume total demandado, uma vez que não foi encontrada nenhuma evidência na literatura que especifique qualquer ganho de eficiência. Não foram avaliadas as capacidades instaladas ou em projeto para a produção de ambos os biocombustíveis.

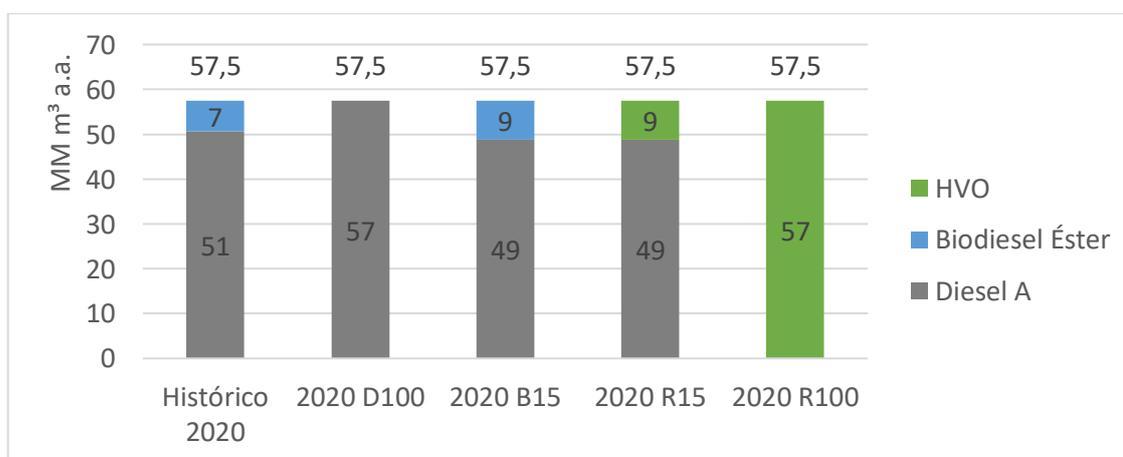


Gráfico 1 - Demanda de Ciclo Diesel por Cenário em 2020

Fonte: ANP, Os Autores

Outro aspecto relevante da análise é a localização e quantificação da oferta e da demanda de combustíveis e biocombustíveis por cenário, uma vez que as refinarias estão localizadas próximas ao litoral e ao petróleo, enquanto as plantas de biodiesel éster estão próximas à oferta de soja no interior do país. Na Figura 8, é possível verificar que a oferta histórica de diesel convencional (e a oferta projetada de HVO) está concentrada no litoral, mais próxima à demanda e aos grandes centros urbanos, enquanto a oferta de biodiesel éster se concentra em estados como Mato Grosso, Goiás e Rio Grande do Sul.

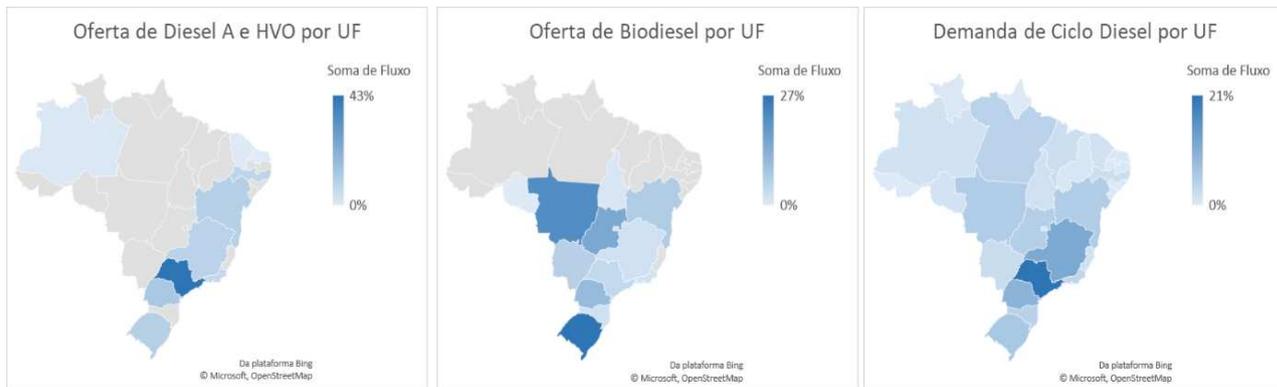


Figura 7: Mapas de Oferta e Demanda do Ciclo Diesel  
Fonte: Os Autores

#### 4.2.3. Parâmetros de emissão por modal no transporte de combustíveis

Para a construção dos parâmetros de emissão por modal de transporte, foi utilizada a referência da ANPET (BARTHOLOMEU, 2019), complementando a informação de cabotagens com parâmetros do PSTM (BRASIL, 2013), uma vez que a da ANPET não disponibilizava informações relativas a esse modal. É possível observar no Gráfico 2 que o uso de modais de grande volume como ferrovias e hidrovias já apresentam uma redução significativa nas emissões de CO<sub>2</sub>, quando comparadas com o modal rodoviário. Essa redução é ainda mais representativa para os modais dutoviários e de cabotagem, que não são utilizados nas rotas de biodiesel éster.

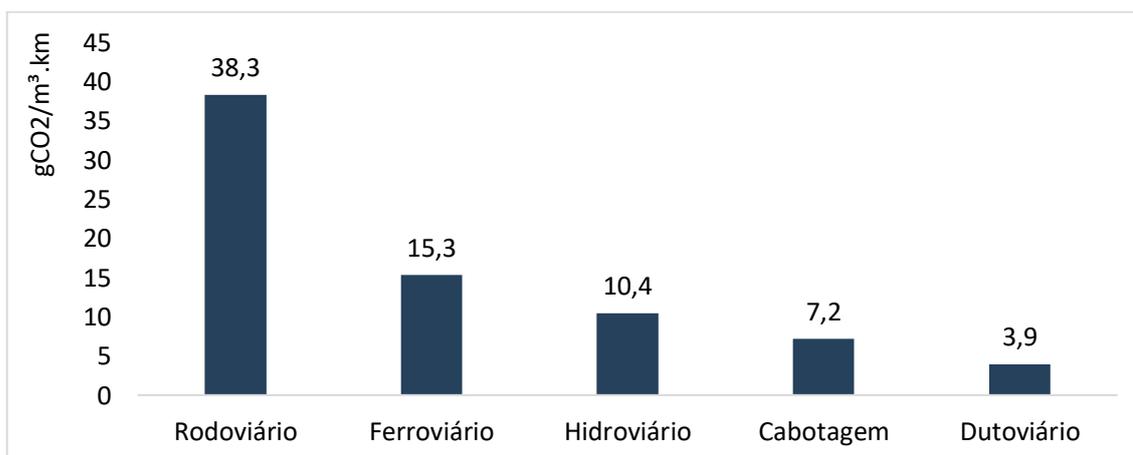


Gráfico 2 - Fatores de Emissão de CO<sub>2</sub> por m<sup>3</sup>\*km de combustível transportado  
Fonte: BARTHOLOMEU 2019, BRASIL 2013

É possível antecipar através dos dados acima que um aumento no percentual de biodiesel éster dentro do Ciclo Diesel tende a causar um aumento das emissões no seu transporte, uma

vez que o modal rodoviário é mais representativo na sua matriz do que na do diesel convencional derivado do petróleo.

#### 4.2.4. Fluxos de combustíveis

Para calcular o impacto de emissão de CO<sub>2</sub> no transporte, foram mapeados e estimados os principais fluxos de transferência de Diesel A, assim como os de coleta de biodiesel éster. O HVO, em todos os cenários, utilizaria a mesma rede e fluxos de distribuição do diesel convencional, uma vez que seria produzido nas refinarias e consumido em todo o território nacional. Esses fluxos podem ser observados na Figura 9, com destaque para a grande quantidade de rotas rodoviárias presentes no mapa de fluxos do biodiesel éster.

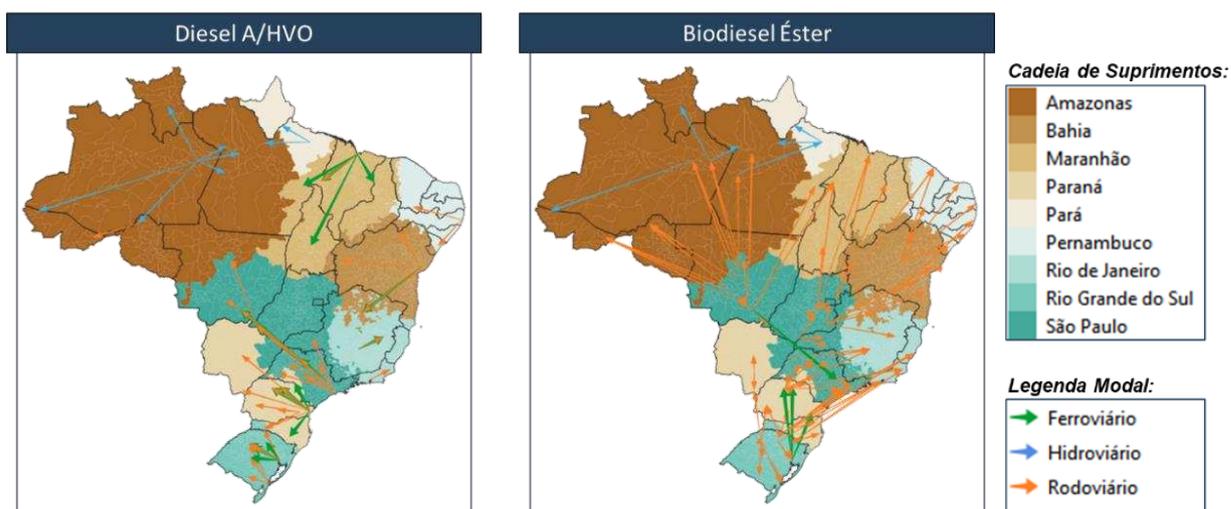


Figura 1: Fluxos Mapeados e Estimados para os Combustíveis do Ciclo Diesel  
Fonte: Os Autores

#### 4.2.5. Matriz de Transportes e diferença de emissão na distribuição

As diferenças de fluxo na distribuição começam a ser observadas no Gráfico 3, uma vez que os cenários de maior representatividade do modal rodoviário são aqueles nos quais existe um percentual de mistura de biodiesel éster no Ciclo Diesel. Quanto maior é a mistura, mais representativo é o modal rodoviário. Por outro lado, o aumento da mistura de HVO no Ciclo Diesel não impactaria a matriz de transporte, uma vez que o produto faria uso das mesmas rotas e infraestruturas de grande volume que o diesel convencional utiliza hoje.

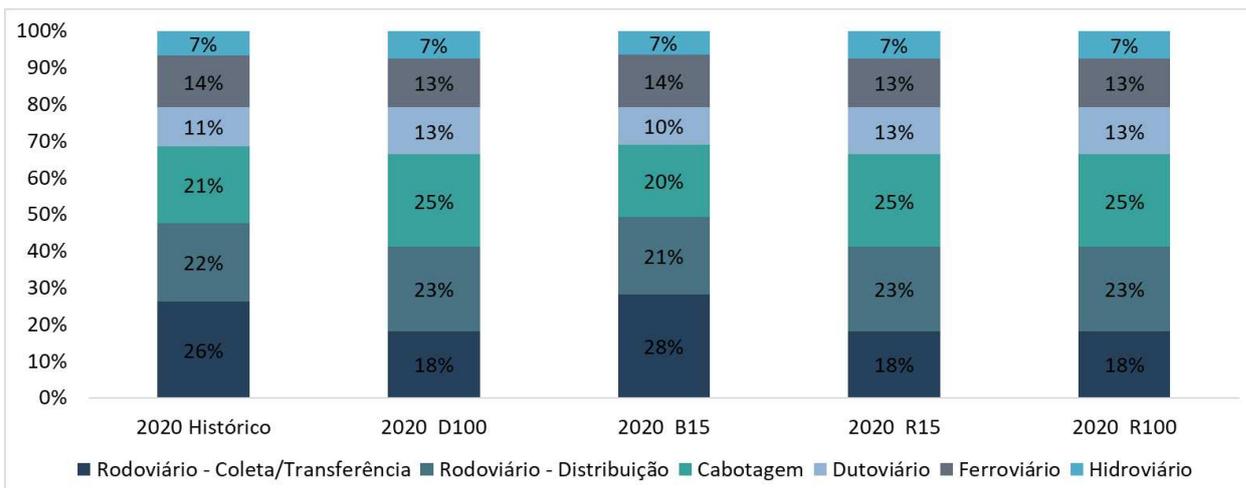


Gráfico 3 - Matriz de Transporte de Cada Cenário por Modal

Fonte: Os Autores

A consequência de uma menor representatividade do modal rodoviário nos fluxos de diesel convencional e HVO pode ser verificado no Gráfico 4, que estima a emissão total de CO<sub>2</sub> realizada no transporte de combustíveis. Interessante reparar que o comportamento do Gráfico 3 é consistente com os resultados abaixo: quanto maior o aumento da mistura de biodiesel na composição do ciclo diesel, maior é a emissão de CO<sub>2</sub>, uma vez que esses cenários possuem maior representatividade do modal rodoviário.

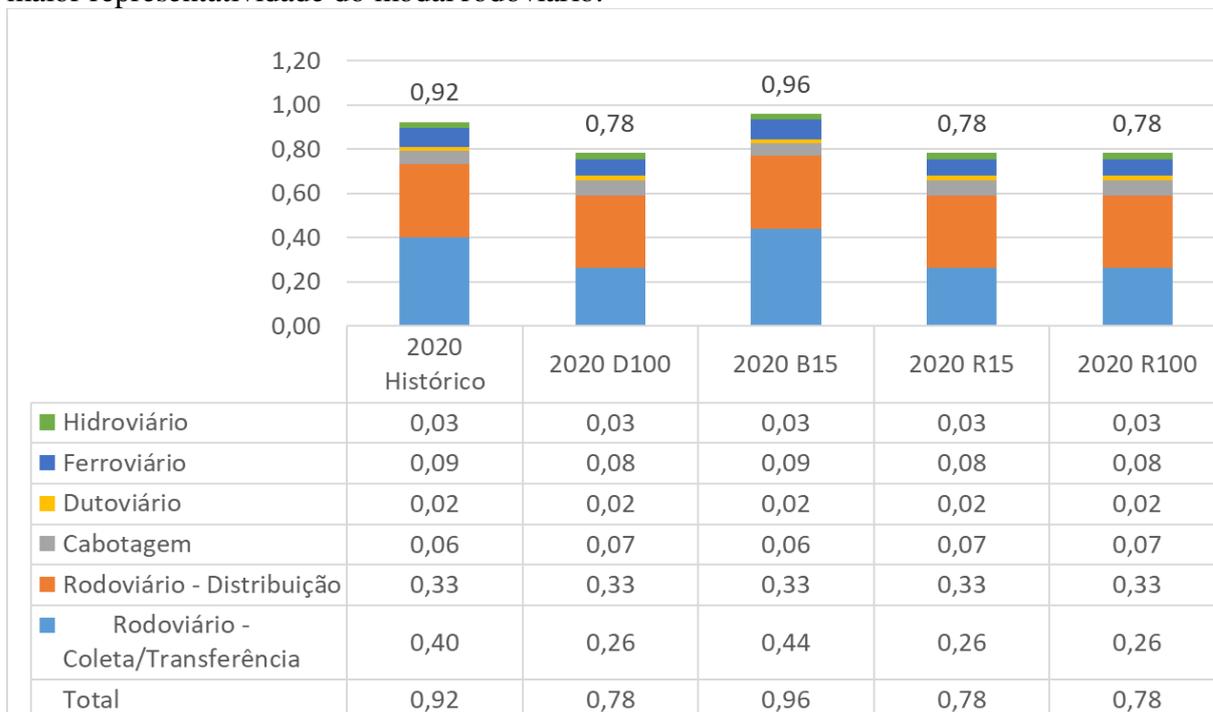


Gráfico 4 – Emissão de CO<sub>2</sub> Total na Distribuição de Combustíveis em MMTon

Fonte: Os Autores

#### 4.2.6. Parâmetros de emissão por produto no consumo do Ciclo Diesel

Nas referências encontradas na literatura, tanto o biodiesel éster (BARTHOLOMEU, 2019) quanto o HVO (CARDELLINI et al, 2021) apresentam emissão de CO<sub>2</sub> inferior ao diesel convencional. Um aspecto interessante é que em diversas referências bibliográficas, o biodiesel éster apresenta emissão de CO<sub>2</sub> inferior ao HVO, quando queimados puros, como pode ser visto

no Gráfico 5. Importante ressaltar que esse comparativo é feito por litro consumido, e não por energia gerada, o que pode fazer diferença na hipótese de algum desses combustíveis possuir uma eficiência energética superior ao outro. Para fins deste estudo, a mesma eficiência energética foi utilizada para os 3 combustíveis do Ciclo Diesel.

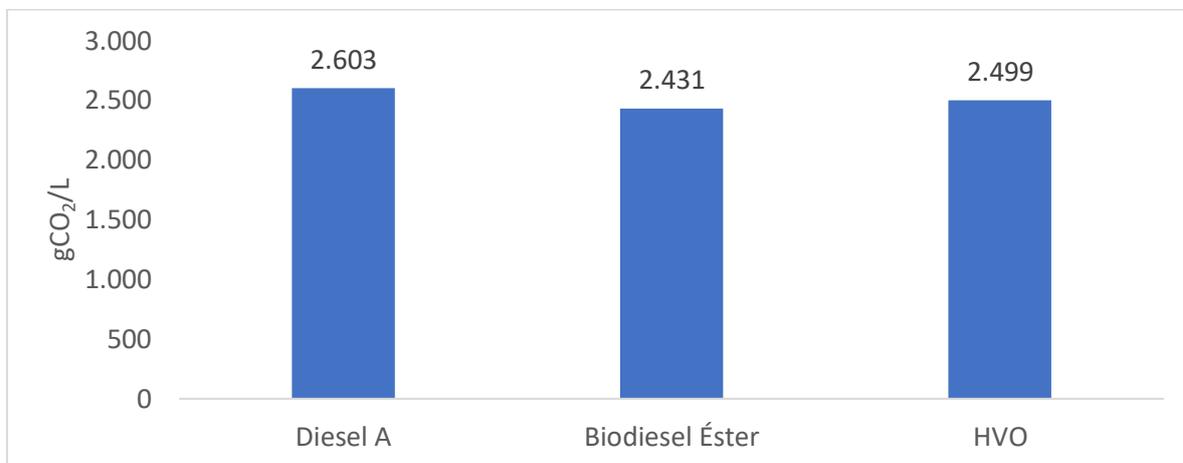


Gráfico 5 - Fatores de Emissão de CO<sub>2</sub> por Litro Consumido  
 Fonte: BARTHOLOMEU 2019, CARDELLINI et al 2021

#### 4.2.7. Diferença de emissão no consumo

Nessa etapa, foram avaliados os desempenhos ambientais dos diversos cenários na emissão de CO<sub>2</sub> do Ciclo Diesel total, ou seja, não só o transporte dos combustíveis, mas também de todas as cargas do país que são transportadas de caminhão, além do transporte de passageiros, consumo na indústria, entre outros. Esse comparativo pode ser visto no Gráfico 6.

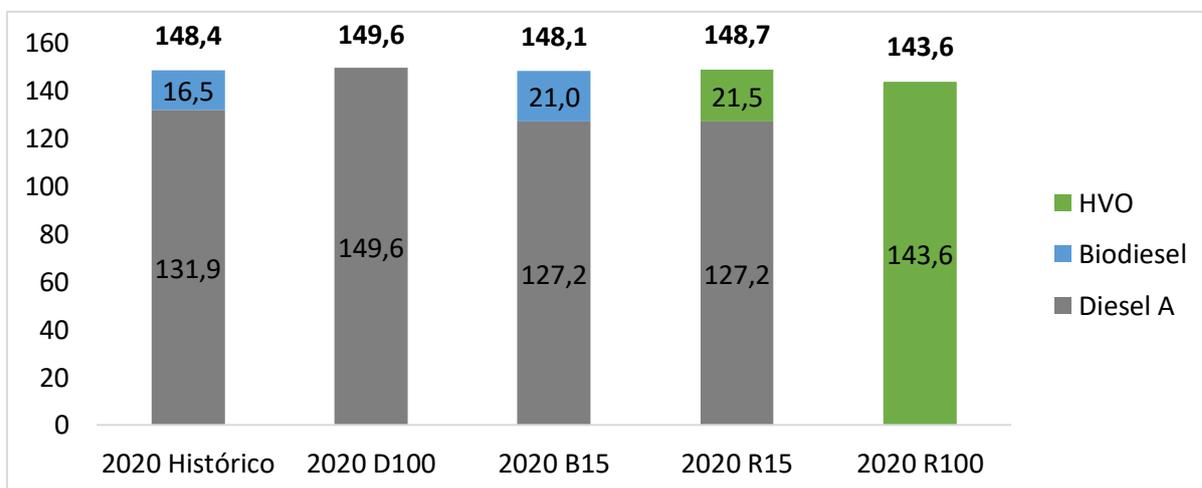


Gráfico 6 – Emissões de CO<sub>2</sub> no Consumo do Ciclo Diesel por Produto e Total em MMTon  
 Fonte: O Autor

Os cenários com as maiores taxas de emissão de CO<sub>2</sub> no Ciclo Diesel são aqueles que possuem mais derivados de petróleo (ex: D100 e Histórico 2020, que era aproximadamente B12). Entre os cenários de mistura parcial (B15 e R15), aquele que utilizou o biodiesel éster foi o que obteve menor emissão de CO<sub>2</sub>, ratificando o comportamento esperado após analisar os parâmetros na seção anterior. Entretanto, o cenário com o melhor desempenho de redução das emissões de CO<sub>2</sub> é o R100 (100% HVO), uma vez que a sua mistura não é limitada, e a emissão do biocombustível é inferior à do derivado de petróleo.

#### 4.2.8. Emissão Total das Etapas Somadas

Para concluir a ACV simplificada, foram somadas as emissões das etapas de transporte e consumo, a fim de se verificar qual é o produto cujo ciclo de vida possui menor impacto. O resultado dessa soma pode ser observado no Gráfico 7, que demonstra que os cenários com melhor desempenho na etapa de consumo são os com melhor desempenho no comparativo final (R100, seguido do B15).

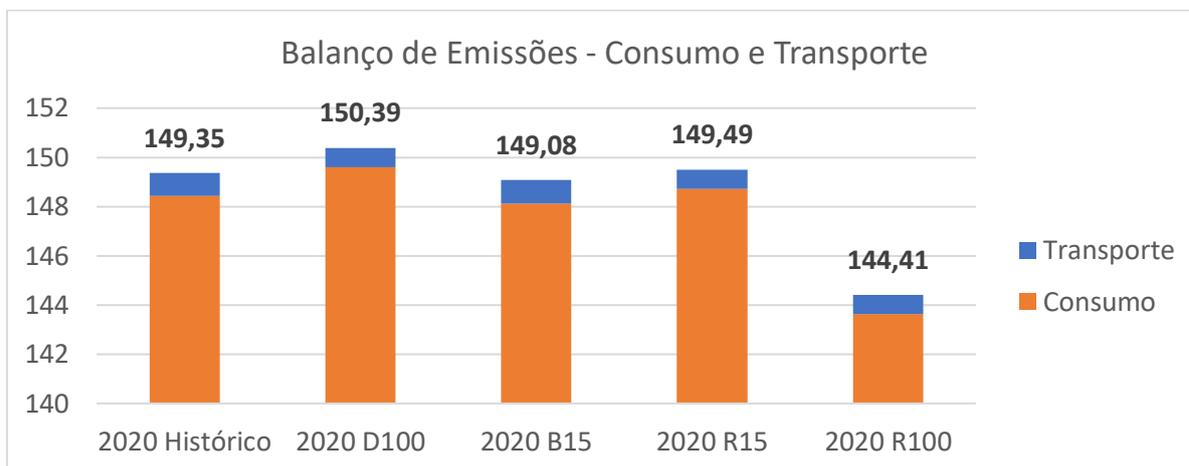


Gráfico 7 – Emissões Totais de CO<sub>2</sub> nas Etapas de Transporte e Consumo em MMTon  
Fonte: O Autor CO<sub>2</sub>

### 5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONTRIBUIÇÃO DA SOLUÇÃO

A aplicação de uma ACV simplificada (cujo resultado pode ser resumido no Gráfico 7) foi não somente um exercício teórico válido, mas trouxe algumas conclusões relevantes para as discussões de transição energética. A primeira conclusão é que o aumento do uso de qualquer um dos biocombustíveis no Ciclo Diesel reduz a emissão total de CO<sub>2</sub>, quando somamos as etapas de transporte e de consumo. Essa informação é relevante, uma vez que pode servir de estímulo a políticas de incentivo para a transição energética no setor de transportes de carga, independente da tecnologia sustentável adotada.

Outra conclusão importante do estudo é de que o biodiesel éster, apesar de ter uma matriz de transportes com maior representatividade rodoviária e menos sustentável do que teoricamente teria o HVO, continua sendo o biocombustível do Ciclo Diesel com menor taxa de emissão de CO<sub>2</sub>. A mesma relação observada no Gráfico 5, que compara os parâmetros fornecidos por Bartholomeu (2019) e Cardellini et al (2021), foi observada comparando os cenários B15 e R15, uma vez que o B15 possui menor emissão.

Uma terceira conclusão que podemos tirar do Gráfico 7 é de que o HVO, apesar de emitir mais CO<sub>2</sub> do que o biodiesel éster, não possui a sua limitação no teor da mistura (Cardellini et al, 2021), fazendo com que o seu cenário de percentual máximo seja o de melhor desempenho ambiental (comparado com o B15, teor de mistura ao qual o Ciclo Diesel é limitado).

Conclui-se também que a representatividade do transporte de diesel convencional e biodiesel na emissão total de CO<sub>2</sub> do consumo no Ciclo Diesel não é grande, uma vez que enquanto os cenários de emissão no transporte são da ordem de grandeza de 1 milhão de toneladas de CO<sub>2</sub>, a emissão no consumo total do Ciclo Diesel se aproxima dos 150 milhões de toneladas do GEE, ordem de grandeza compatível com os dados de 2005 fornecidos por ANDRADE e MATTEI (2011), mas que não se limitavam somente ao ciclo diesel.

Por ser uma ACV simplificada, uma das limitações do estudo é não observar outras etapas do ciclo de vida do produto que podem mudar ou ratificar as conclusões sobre o desempenho ambiental de cada um dos cenários. A inclusão de etapas como matéria prima e produção são essenciais para a evolução do conhecimento em relação a essas tecnologias no Brasil.

Também é necessário acompanhar os estudos relativos a essas tecnologias mais novas de diesel renovável, uma vez que estão sendo avaliados possíveis ganhos de eficiência do HVO em relação a outros combustíveis do Ciclo Diesel.

Não foi objeto deste estudo a análise da capacidade atual e futura de produção desses biocombustíveis, mas seria uma informação relevante, principalmente na hora de construir cenários mais alinhados com as expectativas de mercado.

Por fim, se pode concluir que a ACV se mostrou uma metodologia interessante para se avaliar de forma abrangente diversas tecnologias que possuem especificidades ao longo da sua cadeia de suprimentos, como temos nos biocombustíveis. Espera-se que esse estudo seja um incentivador de outras pesquisas que aplicam a ACV em alternativas de transição energética, principalmente quando falamos do Ciclo Diesel no Brasil, setor que avançou pouco quando comparado a outros países ou ao Ciclo Otto.

## 6. Referências Bibliográficas

ALESHIN, K.; BURKHARDT, T.; MIKHAYLOV, A.; MOISEEV, N. Global Climate Change and Greenhouse Effect. **Entrepreneurship and Sustainability Issues**, 7(4), 2897-2913, 2020. Disponível em: < [http://doi.org/10.9770/jesi.2020.7.4\(21\)](http://doi.org/10.9770/jesi.2020.7.4(21)) >.

ALVARENGA, R. P.; QUEIROZ, T. R.; RENOFIO, A. Avaliação do ciclo de vida simplificada: um levantamento bibliográfico sobre as mais recentes publicações nacionais e internacionais. **Anais do XXXII ENEGEP, Desenvolvimento Sustentável e Responsabilidade Social: As Contribuições da Engenharia de Produção**, Bento Gonçalves, RS, Brasil, 15 a 18 de outubro de 2012.

ANP - AGENCIA NACIONAL DE PETROLEO. RESOLUÇÃO ANP Nº 45, DE 25 DE AGOSTO DE 2014. Disponível em: < <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-45-2014?origin=instituicao&q=45/2014> >..

ANP - AGENCIA NACIONAL DE PETROLEO. RESOLUÇÃO ANP Nº 842, DE 14 DE MAIO DE 2021. Disponível em: < <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-anp-n-842-de-14-de-maio-de-2021-320059616> >.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: **NBR ISO 14040: Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura**. Brasil, 2009. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT).

BARTHOLOMEU, D. B.; BRANCO, J. E. H.; VETTORAZZI, A. C.: **Avaliação dos custos e emissões de CO<sub>2</sub> no transporte de etanol: aplicação de um modelo de otimização**. Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2019.

BRASIL - **PSTM – Plano Setorial de Transporte e de Mobilidade Urbana para Mitigação e Adaptação à Mudança do Clima**. Ministério das Cidades (MCID) e Brasil. Ministério dos Transportes. Junho de 2013

CARDELLINI, G.; CASADEI, S.; FAEDO, D.; PURICELLI, S.; VAN DEN OEVER, A.E.M: A review on biofuels for light-duty vehicles in Europe. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 137. 2021.

- CBIE: **Como é feita a distribuição de combustíveis no Brasil?**, Artigos CBIE, 2020
- CURRAN, M. A. Life Cycle Assessment. In: JORGENSEN, S. E.; FATH, B.D. (editor chefe). **Human Ecology**. Vol.3, p. 2168-2174, 2008.
- DE ANDRADE, A. L. C.; MATTEI, L.: Consumo energético e emissões de CO2: uma análise do setor de transportes brasileiro. **Anais da ANPEC 2011**.
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **A Relevância da Infraestrutura Dutoviária para o Abastecimento de Derivados de Petróleo no Brasil**, Rio Pipeline, 2019.
- FREIRE DIAS, G.: **Pegada Ecológica e Sustentabilidade Humana**. São Paulo: Ed. Gaia, 2002.
- LIBRELOTTO, D.; JALALI, S.: **Aplicação de uma ferramenta de análise do ciclo de vida em edificações residenciais: estudo de caso**. Guimarães: Universidade do Minho, 2008.
- MIGUEZ, J. D. G.: A Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima e o Protocolo de Quioto In: LIMA, A. P; CABRAL, O. M. R; MIGUEZ, J. D. G. “**Mudanças Climáticas Globais e a Agropecuária Brasileira**” Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, 2001, S.P.
- PETROBRAS: **Petrobras comercializa primeiro lote de Diesel R5**. In : Fatos e Dados . Disponível em: < <https://petrobras.com.br/fatos-e-dados/petrobras-comercializa-primeiro-lote-de-diesel-r5.htm> >. 2022
- RAMOS, C. S.: Com apoio da Vibra, BBF fará a 1ª usina de diesel verde do país. **Valor Econômico**, 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.ghtml> >
- SALA, S.; REALE, F.; CRISTOBAL-GARCIA J.; MARELLI, L.; PANT R.: **Life cycle assessment for the impact assessment of policies** EUR 28380 EN. Luxembourg (Luxembourg): Publications Office of the European Union; 2016. JRC105145. Disponível em: < <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC105145> >.
- 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.
- STROHAECKER, T. M.: **A dinâmica socioespacial da zona costeira brasileira**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Brasil. 2017.
- UBRABIO – UNIÃO BRASILEIRA PARA O BIODIESEL E O BIOQUEROSENE.: **Política Nacional para Biocombustíveis**. (apresentação realizada pelo Superintendente Donizete Tokarski). Disponível em: < <https://www.ubrabilio.com.br/sites/1800/1891/PDFs/Apresentacoes/20170921BiocombustAveiseaAviaAAoImpactos.pdf> >. São Paulo: 21 de setembro de 2017.