

## Diesel Verde na Transição Energética Brasileira: Uma Avaliação Econômica e Ambiental com o Modelo BIM-RD<sup>1</sup>

Admir Antonio Betarelli Junior<sup>2</sup>

Gustavo Luz Coutinho<sup>3</sup>

Pedro Henrique Moura Siqueira<sup>4</sup>

### Resumo

Este artigo analisa os impactos econômicos e ambientais da introdução do diesel verde (*Hydrotreated Vegetable Oil* – HVO) na matriz energética brasileira, a partir de sua incorporação progressiva ao diesel B, conforme o Programa Combustível do Futuro (PCF). Utiliza-se o modelo de Equilíbrio Geral Computável BIM-RD, calibrado com dados da matriz insumo-produto nacional e adaptado para simulações dinâmicas. Os resultados indicam redução acumulada de 1,75% nas emissões de gases de efeito estufa (GEE) e aumento de 0,24% no conteúdo energético do combustível, sinalizando ganhos ambientais e operacionais. Contudo, observam-se *trade-offs* econômicos relevantes: elevação dos custos de produção, retração do PIB (-0,52%), do investimento (-3,27%) e do capital (-1,29%), além da queda da arrecadação pública e do consumo das famílias. A utilidade agregada reduz com perdas maiores para grupos de menor renda. Conclui-se que a transição energética com HVO exige medidas compensatórias — como incentivos fiscais, estímulo à inovação e ajustes regulatórios — para compatibilizar sustentabilidade ambiental com estabilidade macroeconômica, atenuando os efeitos regressivos da política.

### Abstract

This article analyzes the economic and environmental impacts of introducing green diesel (Hydrotreated Vegetable Oil – HVO) into the Brazilian energy matrix, through its progressive incorporation into diesel B, as established by the *Programa Combustível do Futuro* (Fuel of the Future). The study employs the BIM-RD Computable General Equilibrium (CGE) model, calibrated with data from the national input-output matrix and adapted for dynamic simulations. The results indicate a cumulative reduction of 1.75% in greenhouse gas (GHG) emissions and a 0.24% increase in the fuel's energy content, pointing to environmental and operational gains. However, relevant economic trade-offs are observed: rising production costs, contraction of GDP (-0.52%), investment (-3.27%), and capital stock (-1.29%), as well as declines in public revenue and household consumption. The aggregate utility decreases with greater losses for lower-income groups. The study concludes that the energy transition involving HVO requires compensatory measures—such as tax incentives, technological innovation support, and regulatory adjustments—to align environmental sustainability with macroeconomic stability while mitigating the policy's regressive effects.

**Palavras-chave:** HVO. Biocombustíveis. Equilíbrio Geral Computável.

**Keywords:** HVO. Biofuels. Computable General Equilibrium.

**JEL:** Q42, Q58, R40.

**Área de submissão:** Meio ambiente, recursos naturais e sustentabilidade.

---

<sup>1</sup> Os autores agradecem ao financiamento da FAPEMIG, CAPES e CNPq.

<sup>2</sup> Professor Adjunto – PPGE/UFJF.

<sup>3</sup> Doutorando – CEDEPLAR/UFMG.

<sup>4</sup> Doutorando – PPGE/UFJF.

## 1. Introdução

O crescimento econômico acelerado nas últimas décadas tem ampliado substancialmente a demanda por energia e, como consequência, intensificado a emissão de gases de efeito estufa (GEE) (KOLSTAD, 1993; ANSUATEGI; ESCAPA, 2002; HAMIT-HAGGAR, 2012). Tal dinâmica evidencia uma das externalidades negativas mais persistentes da economia contemporânea: o uso intensivo de recursos naturais sem internalização dos custos ambientais atrelados ao seu uso (KOLSTAD, 1993; KOSUGI, 2009; BITHAS, 2011). As mudanças climáticas, já materializadas no aumento da temperatura média global, eventos extremos e degradação de ecossistemas, impulsionaram a construção de um arcabouço institucional global para mitigação de emissões, representado por marcos como a Conferência de Estocolmo (1972), o Protocolo de Kyoto (1997) e o Acordo de Paris (2015), os quais vêm orientando estratégias globais e nacionais de transição energética (NU, 2015; PECEQUILO, 2019).

No caso brasileiro, a transição energética assume características particulares. Embora o país se destaque positivamente no cenário internacional com uma matriz elétrica majoritariamente renovável — composta, em 2022, por 86,1% de fontes renováveis como hidrelétrica, eólica e solar — e com uma matriz energética total mais limpa que a média mundial, os principais focos de emissão permanecem no uso do solo e no setor de transportes (IEA, 2023a; EPE, 2025). Este último é marcado pela elevada dependência do modal rodoviário, responsável por quase dois terços do volume de cargas, e por uma matriz de consumo baseada no uso de combustíveis fósseis (CNT, 2023). Tais características impõem desafios estruturais à descarbonização de tal setor e evidenciam a necessidade de políticas setoriais orientadas à substituição energética.

Entre as alternativas tecnológicas de menor intensidade de carbono, o diesel verde, ou *Hydrotreated Vegetable Oil* (HVO), desponta como inovação promissora. Produzido a partir da hidrogenação de óleos vegetais ou gorduras animais, o HVO apresenta propriedades superiores ao biodiesel convencional, chamado de *Fatty Acid Methyl Esters* (FAME), como maior estabilidade oxidativa, ausência de formação de borras em baixas temperaturas — problema comum ao FAME devido à degradação oxidativa —, melhor desempenho em climas frios, elevado índice de cetano e compatibilidade total com motores existentes. Sua aplicação em substituição parcial ou total ao diesel fóssil não exige alterações tecnológicas na infraestrutura veicular, o que lhe confere vantagem operacional (NO, 2014; SINGH; KALLIGEROS; UPPAL, 2018; NEVES; HARDER, 2021; EPE, 2023; HUNICZ et al., 2025).

Apesar de suas qualidades técnicas e ambientais, a difusão do HVO no Brasil enfrenta entraves. O alto custo de produção e a ausência de plantas industriais nacionais em operação dificultam sua competitividade frente aos combustíveis tradicionais (NTU, 2020; JULIO et al., 2023). Além disso, a expansão do uso de biocombustíveis avançados como o HVO demanda crescente volume de insumos agrícolas, gerando pressões sobre a oferta de alimentos, disputa por matérias-primas com outras cadeias produtivas e riscos de desequilíbrio nos mercados internos (PAVLENKO; ARAUJO, 2019).

A viabilidade da transição energética no setor de transportes, portanto, dependerá da integração de instrumentos econômicos e regulatórios. A criação do Programa Combustível do Futuro (PCF) e o fortalecimento de políticas como o RenovaBio sinalizam o reconhecimento institucional da necessidade de estímulo à inovação e ao ganho de eficiência energética, promovendo a adoção gradual de combustíveis mais limpos como o HVO (*Hydrotreated Vegetable Oil*, ou óleo vegetal hidrotratado), o combustível sustentável de aviação (*Sustainable*

*Aviation Fuel* – SAF) e o biometano (BRASIL, 2023; EPE, 2023). Assim como ocorreu com o etanol e o biodiesel em seus estágios iniciais de introdução no mercado, a viabilidade do HVO dependerá da articulação entre políticas públicas, incentivos econômicos e marcos regulatórios capazes de garantir escala, previsibilidade e competitividade. O PCF, portanto, representa uma continuidade e expansão dessas estratégias, adaptando-as aos novos desafios tecnológicos e ambientais (MILANEZ et al., 2008; GT–E2G, 2022; BRASIL, 2023; EPE, 2025).

Diante desse contexto, esta pesquisa tem por objetivo avaliar, por meio do modelo de equilíbrio geral computável BIM-RD (*Brazilian Intersectoral Model with Recursive Dynamic*), os impactos econômicos e ambientais da inserção do diesel verde (HVO) na matriz energética brasileira, em mistura com o diesel fóssil e o biodiesel tradicional. As simulações consideram o incremento gradual do HVO no blend do biodiesel conforme metas definidas pelo Programa Combustível do Futuro (PCF), permitindo capturar os efeitos diretos e indiretos sobre os setores produtivos, variáveis macroeconômicas e emissões de GEE. Ao articular dimensões econômicas, logísticas e ambientais em uma estrutura de análise integrada, o estudo busca contribuir para a formulação de estratégias sustentáveis de transição energética no setor de transportes.

Além da introdução, esta pesquisa é composta por uma revisão teórico-empírica sobre os biocombustíveis, com ênfase no diesel verde (HVO); um capítulo metodológico que detalha a inserção do HVO no modelo de Equilíbrio Geral Computável (EGC) utilizado e suas principais características; uma seção de análise e discussão dos resultados obtidos; e, por fim, pelas considerações finais.

## **2. Biocombustíveis e Sustentabilidade: Contribuições Teóricas e Empíricas para a Inserção do HVO no Brasil**

A intensificação do crescimento econômico ao longo do século XX contribuiu para um padrão de desenvolvimento baseado em elevada demanda energética e no uso extensivo de combustíveis fósseis. Esse modelo implicou uma série de externalidades negativas, com destaque para a elevação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e os consequentes impactos climáticos. Do ponto de vista econômico, tais emissões configuram uma falha de mercado clássica, na medida em que os agentes não internalizam os custos ambientais de suas decisões, resultando em alocação ineficiente de recursos (PIGOU, 1920; KOLSTAD, 1993).

A literatura econômica ambiental oferece diferentes interpretações e soluções para essa falha. A abordagem pigouviana defende a aplicação de instrumentos de comando e controle, como tributos sobre carbono, enquanto a perspectiva coasiana destaca a possibilidade de soluções negociadas, desde que existam direitos de propriedade bem definidos. Em contextos de bens públicos globais como o clima, no entanto, a ausência de mecanismos efetivos de *enforcement* internacional impõe limitações práticas a ambas as abordagens, o que leva à necessidade de arquiteturas institucionais mais complexas e coordenadas (STERN, 2007; OSTROM, 2009; COASE, 2013; PIGOU, 2017).

A construção de uma governança climática multilateral reflete essa complexidade. Desde a Conferência de Estocolmo (1972), passando pelo Protocolo de Kyoto (1997) e pelo Acordo de Paris (2015), os esforços internacionais têm buscado criar um arcabouço normativo capaz de induzir a redução de emissões, internalizar os custos ambientais e promover a transição

energética em âmbito global. No entanto, a implementação das metas climáticas depende da capacidade de cada país em articular políticas públicas com instrumentos econômicos eficazes (PECEQUILO, 2019; UNFCCC, 2015).

No caso brasileiro, o compromisso firmado no âmbito do Acordo de Paris foi inicialmente estabelecido na *Nationally Determined Contribution* (NDC) de 2022, que projetava a redução de 37% das emissões até 2025 e de 50% até 2030, com a meta de neutralidade climática até 2050 (BRASIL, 2023b). A atualização submetida em 2024 elevou esse compromisso, estabelecendo a meta de redução entre 59% e 67% até 2035, mantendo o objetivo de neutralidade até meados do século (BRASIL, 2023b). Para alcançar tais metas, a diversificação da matriz energética e o uso de biocombustíveis avançados são considerados eixos centrais da estratégia de descarbonização do setor de transportes.

Os quatro pilares da transição energética — acesso, eficiência, sustentabilidade e segurança — se refletem nas políticas brasileiras desde os anos 2000. O Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB) foi pioneiro ao introduzir mandatos de mistura obrigatória e fomentar a produção regional (EPE, 2021). Em seguida, o RenovaBio avançou no pilar da sustentabilidade, ao estabelecer metas compulsórias de descarbonização e criar o mercado de créditos de descarbonização (CBIOs). Tais instrumentos buscam alinhar as decisões privadas às metas ambientais, internalizando os custos de carbono e promovendo investimentos em biocombustíveis com menor intensidade de GEE (IEA, 2023b).

Nesse cenário, a transição energética é compreendida não apenas como uma substituição tecnológica, mas como um processo sociotécnico que envolve mudanças institucionais, econômicas e culturais (GEELS, 2002; ROGGE; REICHARDT, 2016). De acordo com a International Energy Agency (IEA, 2023a), esse processo pode ser estruturado em torno de quatro pilares principais: acesso à energia, eficiência energética, sustentabilidade ambiental e segurança energética. No caso dos biocombustíveis, os pilares da sustentabilidade e da segurança energética são particularmente relevantes, dado seu potencial de mitigar emissões e reduzir a dependência de combustíveis fósseis importados.

O conceito de “*lock-in* tecnológico” é central para essa discussão: trata-se da dificuldade de abandonar trajetórias produtivas consolidadas, mesmo diante de alternativas mais eficientes, devido à rigidez institucional, custos afundados e inércia organizacional (FOXON, 2014; DOLFSMA; LEYDESDORFF, 2009). No setor de transportes, essa rigidez é acentuada pela dependência histórica do modal rodoviário e da infraestrutura de refino de derivados fósseis, dificultando a adoção de novas rotas energéticas.

Os biocombustíveis surgem como instrumentos intermediários na transição energética, com potencial para reduzir emissões no curto e médio prazo sem exigir alterações estruturais significativas na infraestrutura existente (PANOUTSOU, 2021; ZEEUW, 2025). Sua adoção, no entanto, depende de condições como a diversificação de matérias-primas, a sustentabilidade ambiental e a eficiência econômica na produção e distribuição. A literatura alerta para os possíveis efeitos colaterais de uma expansão descoordenada desses combustíveis, como a pressão sobre terras agricultáveis, a competição com a produção de alimentos e o risco de insegurança alimentar — especialmente quando as políticas energéticas não estão integradas às diretrizes agrárias e de uso do solo (RATHMANN; SCHAEFFER, 2010; MURPHY, 2011). Esses desafios exigem o fortalecimento de políticas públicas que orientem a expansão dos biocombustíveis de forma articulada com objetivos sociais, econômicos e ambientais.

Entre as alternativas disponíveis de biocombustíveis, o diesel verde (*Hydrotreated Vegetable Oil* – HVO) representa uma alternativa avançada. Por ser um hidrocarboneto semelhante ao diesel fóssil, pode ser utilizado em motores convencionais sem necessidade de adaptação, além de apresentar melhor desempenho operacional e menores emissões locais. Seu elevado custo de produção, no entanto, limita sua adoção em países sem políticas públicas robustas de incentivo ou subsídio (EPE, 2023; ICCT, 2019).

A literatura destaca, portanto, a necessidade de coordenação entre inovação tecnológica e mecanismos de incentivo para superar os gargalos da transição. Políticas públicas como o RenovaBio e o Programa Combustível do Futuro (PCF) se inserem nesse esforço, ao estruturar instrumentos econômicos — como o crédito de descarbonização (CBIO) — e estabelecer metas graduais de incorporação de biocombustíveis na matriz energética. Essas medidas visam não apenas induzir a substituição de fontes fósseis, mas também orientar o setor produtivo a internalizar os custos ambientais e reduzir a dependência de insumos não renováveis (BRASIL, 2023a; EPE, 2023).

Estudos internacionais têm evidenciado o potencial dos biocombustíveis avançados na mitigação das emissões do setor de transportes. Na União Europeia e na Indonésia, por exemplo, políticas de incentivo à substituição do diesel fóssil por misturas com biodiesel e HVO vêm sendo testadas com resultados promissores. A Indonésia tem conduzido experimentações com formulações como B30D10 (30% biodiesel, 10% HVO), que apresentaram ganhos operacionais em eficiência térmica, redução de emissões e menor desgaste mecânico (PARYANTO et al., 2022; REKSOWARDOJO et al., 2020).

Contudo, os custos de produção do HVO permanecem significativamente mais altos que os do diesel fóssil e do biodiesel convencional, representando um obstáculo à sua ampla adoção. Essa dificuldade se agrava em economias emergentes, onde a sensibilidade do setor de transportes aos preços dos combustíveis afeta diretamente os custos logísticos e a competitividade econômica. A experiência internacional sugere que, sem incentivos econômicos e apoio institucional, a inserção do HVO tende a se restringir a nichos específicos ou ao cumprimento de metas regulatórias obrigatórias (MILESSI et al., 2022; HASAN; RAHMAN, 2017).

No contexto brasileiro, os entraves à produção nacional de HVO incluem a ausência de refinarias especializadas, a necessidade de investimentos elevados para adaptação de infraestrutura e a dependência de matérias-primas como óleos vegetais e gorduras animais. Apesar de projetos anunciados visando à produção integrada de HVO e SAF, ainda não há escala industrial consolidada no país (EPE, 2023). Como agravante, a produção de soja — principal insumo para o biodiesel e potencial base para o HVO — concentra-se em regiões distantes dos polos de consumo, exigindo longas cadeias logísticas que elevam os custos, fenômeno conhecido como "passeio logístico" (EPE, 2023).

Além das barreiras de infraestrutura, há preocupações crescentes com a competição entre usos energéticos e alimentares da produção agrícola. A ampliação da demanda por soja e outros insumos para fins energéticos pode deslocar a oferta de alimentos e insumos industriais, gerando impactos adversos sobre a segurança alimentar, o abastecimento interno e os preços. Essa disputa intersetorial, se não for mediada por políticas adequadas de uso do solo e incentivo à eficiência produtiva, pode comprometer os ganhos ambientais pretendidos pela substituição energética (RATHMANN; SCHAEFFER, 2010; HARVEY; PILGRIM, 2011; MURPHY, 2011).

Frente a esse panorama, as políticas públicas assumem papel estratégico. O Programa Combustível do Futuro (PCF) define metas ambiciosas de ampliação dos biocombustíveis avançados, com previsão de aumento do teor obrigatório de biodiesel no diesel comercial até 25% após 2030 (BRASIL, 2023a). Já o RenovaBio instituiu um mercado regulado de créditos de descarbonização (CBIOs), com metas de redução da intensidade de carbono na matriz de combustíveis (EPE, 2021). Essas iniciativas buscam criar um ambiente econômico e regulatório mais favorável à transição energética no setor de transportes, embora sua eficácia dependa da articulação entre agentes públicos e privados. Análises de impacto utilizando modelos de equilíbrio geral computável (CGE) estimam que, até 2029, a política exigirá aumento de 87,7% na produção de etanol para o cumprimento das metas, resultando em redução de 7,1% no consumo final de combustíveis, modesto aumento no PIB (+0,08%) e leve pressão inflacionária (+0,35%) (RIBEIRO; CUNHA, 2022). Complementando essa análise, Ribeiro e Da Cunha (2022) mostram que o RenovaBio expande o uso de biocombustíveis e eleva os preços dos insumos agrícolas, reduzindo o uso de derivados de petróleo.

A sanção da Lei nº 14.993/24 (*Lei do Combustível do Futuro*), em 2024, instituiu o Programa Combustível do Futuro (PCF), criando um marco regulatório e multimodal que prevê incentivos para biometano, SAF (*Sustainable Aviation Fuel*), HVO (diesel verde) e metas ampliadas para o biodiesel (BRASIL, 2023a; EPE, 2023). No caso do HVO, o PCF estabelece metas progressivas de incorporação ao diesel B, partindo de 1% em 2027 e alcançando 3% até 2030, conforme diretrizes técnicas e disponibilidade de produção. O programa também prevê a articulação com o Plano Nacional de Desenvolvimento do Hidrogênio (PNDH), que visa fomentar a produção nacional de hidrogênio renovável, necessário para rotas como o PNDV (*Paraffinic No-Diesel Vegetable*). A dependência de hidrogênio importado, no entanto, representa um possível gargalo logístico e de custo. Já o SAF possui metas específicas de mistura ao querosene de aviação, com metas escalonadas até 2037 (BRASIL, 2023a; EPE, 2023).

Projetos anunciados após a sanção da lei envolvem mais de R\$ 22,8 bilhões em investimentos no setor – com destaque para nove novas usinas de etanol 2G da Raízen –, impulsionando empregos diretos, modernização logística e aumento da oferta de combustíveis sustentáveis (MOREIRA et al., 2024). Tais medidas devem contribuir para elevar a produção nacional de biocombustíveis, reduzir emissões de GEE e gerar ganhos macroeconômicos, incluindo fortalecimento da indústria nacional e menor vulnerabilidade externa ao petróleo (PAVLENKO; ARAUJO, 2019).

A transição para combustíveis avançados no Brasil vem sendo estruturada por meio de programas como o PCF e o Plano Nacional de Desenvolvimento do Hidrogênio (PNDH). Este último prevê o uso de hidrogênio renovável para produção de combustíveis como o PNDV (*Paraffinic No-Diesel Vegetable*), cuja mistura ao diesel B é tecnicamente viável (BRASIL, 2023a). Contudo, a dependência de hidrogênio importado pode representar um gargalo logístico e de custo, exigindo estratégias para produção nacional competitiva (ANP, 2022). Já o SAF (*Sustainable Aviation Fuel*) tem metas específicas de incorporação progressiva no setor aéreo, conforme a Lei 14.993/24. A coordenação desses esforços será decisiva para posicionar o Brasil como fornecedor estratégico de biocombustíveis avançados no mercado global (BRASIL, 2023a).

### 3. Abordagem metodológica

A introdução de combustíveis de maior preço, como o HVO, atrelado a redução do setor de diesel, requer uma abordagem analítica capaz de captar seus efeitos diretos e indiretos sobre a economia. Para tanto, os modelos de equilíbrio geral computável (CGE) têm se mostrado adequados, por permitirem simular impactos em múltiplos setores simultaneamente, incorporando ajustes nos preços relativos, na alocação de recursos e na renda dos agentes econômicos.

Entre os modelos CGE disponíveis para o caso brasileiro, destaca-se o BIM-RD (*Brazilian Intersectoral Model with Recursive Dynamic*), desenvolvido para captar os efeitos dinâmicos e setoriais de políticas públicas ao longo do tempo. O modelo permite simular cenários de inserção de biocombustíveis, avaliando as implicações sobre variáveis como produto, emprego, consumo intermediário e seus impactos nas famílias (Betarelli Junior et al., 2015; 2022).

Dessa forma, o modelo constitui uma ferramenta robusta para subsidiar decisões públicas, ao mensurar os *trade-offs* envolvidos na adoção do HVO em substituição ao diesel fóssil no diesel B. Os resultados obtidos por meio da modelagem permitem avaliar se os benefícios ambientais justificam os custos econômicos da política, identificando ainda os setores mais sensíveis à mudança e orientando o desenho de estratégias de mitigação de impactos.

#### 3.1 Tratamentos nos dados

A Matriz de Insumo-Produto (MIP) utilizada foi a mais recente, para o ano de 2015, sendo obtida no Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2024a). Além do banco de dados, foi necessário inserir a produção e demanda de HVO, visto que no ano base somente o biodiesel FAME e etanol eram biocombustíveis produzidos no país. Para fins de referência, a estrutura de custos dos produtos “Etanol e outros biocombustíveis” e “Diesel - biodiesel”, listados na MIP, foi dividida pelo volume produzido disponível no anuário estatístico da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis do mesmo ano (ANP, 2016).

Tais valores foram agrupados, segundo as categorias definidos por Wang et al. (2019), estimando o custo unitário e o preço ao consumidor dos produtos analisados por m<sup>3</sup>. Comparando os valores estimados com os praticados, há uma diferença menor que 1%, conferindo consistência a tal aplicação. Em posse de tal desagregação, o vetor de custos do HVO seguiu o comportamento do produto “Etanol e outros biocombustíveis”, sendo alterado na medida que informações estavam disponíveis na literatura.

De acordo com Villamil & Paniagua (2018), o valor de produção do HVO em 2016 foi de 1.100 €/tonelada. Corrigido o valor pela taxa de câmbio, deflacionando e utilizando a densidade de 780 Kg/m<sup>3</sup> do biocombustível, o preço do HVO em 2015, é igual a R\$4.131,68/m<sup>3</sup>. Considerando a decomposição de Hilbers et al. (2015), tais custos de produção representam somente 96% do valor final do HVO, dessa forma, 4% é adicionado como forma de se estimar o preço de mercado de referência, sendo igual a R\$4.303,83/m<sup>3</sup>.

Com base em parâmetros extraídos da literatura especializada, os custos associados às diferentes categorias — matéria-prima (gás natural e óleo vegetal), tratamento (infraestrutura física e reagentes químicos), utilidades (energia elétrica, gás e demais insumos energéticos) e

operações e manutenção (atividades de P&D, administrativas e de marketing) — foram incorporados à estrutura de custos intermediários do HVO. A imputação dos valores foi realizada proporcionalmente à participação relativa de cada categoria no custo total, utilizando-se estimativas monetárias em R\$/m<sup>3</sup>, com o objetivo de conferir maior granularidade e robustez à estimativa da estrutura de custos da cadeia produtiva do HVO (Directorate-General for Mobility and Transport (European Commission) et al., 2018; Hilbers et al., 2015; IEA Bioenergy, 2020; Letterio; McNew; Martin, 2016; Roque, 2022; Villamil; Paniagua, 2018).

Os custos de transporte e comércio seguiram os valores de referência do “Diesel - biodiesel” e do “Etanol e outros biocombustíveis”, respectivamente. Devida similaridade física do HVO com o diesel fóssil e similaridade nos ambientes de venda e comércio com o setor de biocombustíveis, os valores em R\$/m<sup>3</sup> foram espelhados ao comportamento de custos do HVO (Milanez et al., 2022). Os valores para importação, impostos, remunerações, ocupações e subsídios replicaram o comportamento dos biocombustíveis comercializados no país em 2015.

Para que a alteração na taxa de blend ocorresse somente entre o diesel fóssil e o HVO, foi necessário desagregar o biodiesel FAME presente no diesel B, representado no banco de dados pelo produto “Diesel - biodiesel”. Tal desagregação foi realizada da mesma forma que o HVO, partindo dos valores em R\$/m<sup>3</sup>, e da literatura.

Pela análise de conjuntura dos biocombustíveis realizado pela Empresa de Pesquisas Energética (EPE), as matérias-primas utilizadas no biodiesel foram captadas e, para os componentes químicos, o relatório da Associação dos Produtores de Biocombustíveis do Brasil (APROBIO) foi utilizado (APROBIO, 2015; EPE, 2016). Os custos de transporte, manutenção, trabalho e utilidades foram retirados da matéria de Timmerman (2006), aplicando os percentuais sobre o preço praticado em 2015 de R\$2.155,31/m<sup>3</sup>. Pelos dados de comércio exterior do COMEX STAT, não houve importação de biodiesel (MDIC, 2024). Os custos com impostos, remunerações, subsídios e excedentes operacionais, por m<sup>3</sup>, foram replicados do produto “Etanol e outros biocombustíveis”.

Como forma de manter a validade da análise, os custos foram normalizados com relação ao preço de mercado estimado e os preços de referências do biodiesel e do HVO. Com a estrutura de custo por m<sup>3</sup> (Tabela 1), o volume consumido do biodiesel foi captado no anuário estatístico da ANP, alcançando o valor bruto da produção total para 2015. Para o HVO, um volume de 280 m<sup>3</sup> foi inserido como forma de não interferir na participação do biodiesel no diesel B em 7% e não exceder os valores do produto original “Etanol e outros biocombustíveis” (ANP, 2016).

A estimação da demanda do Diesel B, e cada um de seus componentes, foi realizada através do uso das tabelas híbridas do Sistema de Contas Ambientais, do IBGE, para 2015 (IBGE, 2024b). Convertendo os valores de toneladas equivalentes de petróleo (tep) para m<sup>3</sup>, foi possível captar o volume consumido de biodiesel por cada um dos 13 setores descritos no banco de dados. Realizando a agregação dos setores da MIP, foi possível compatibilizar os valores, desagregando o produto “Diesel - biodiesel” entre diesel fóssil e biodiesel, captando o fluxo dos produtores de biocombustíveis para as refinarias e das refinarias para o consumo final no formato de diesel B.

Utilizando a demanda, a preços básicos, do produto “Diesel – biodiesel”, disponível na Tabela de Recursos e Usos (TRU) do IBGE, o volume de biodiesel do SCA foi desagregado para os 67

setores e 6 componentes da demanda final da MIP (IBGE, 2024b). Partindo dos volumes e preços setoriais alcançados, foi possível estimar o volume monetário, e físico, demandado por cada setor e componente da demanda final a preços básicos e a preços do consumidor. Como o HVO é um biocombustível que sua introdução na matriz energética ocorrerá através da taxa de mistura obrigatória, sua demanda terá o mesmo comportamento que o biodiesel.

Tabela 1 - Custo Unitário estimado dos combustíveis avaliados

Classe	Insumos	Etanol e outros biocombustíveis		Diesel - biodiesel		Biodiesel		Diesel Verde	
		BRL/m3	Part. %	BRL/m3	Part. %	BRL/m3	Part. %	BRL/m3	Part. %
<b>Custo de matéria-prima</b>	Matéria-prima	872	50,27	147	6,46	906	47,25	1852	60,43
	Produtos químicos orgânicos e inorgânicos	32	1,82	2	0,08	117	6,09	52	1,70
	Outros insumos industriais	74	4,26	1325	58,28	66	3,45	136	4,45
<b>Custos de processamento e transformação da matéria-prima</b>	Máquinas e equipamentos	0	0,02	0	0,00	0	0,00	0	0,00
	Manutenção, reparação e instalação	21	1,23	3	0,15	0	0,00	24	0,77
	Construção	6	0,37	0	0,01	1	0,03	0	0,01
	Utilidades	1	0,08	0	0,01	21	1,08	102	3,34
	Gestão de água e resíduos	0	0,00	2	0,11	11	0,60	7	0,23
<b>Comércio</b>	Comércio	49	2,84	18	0,77	47	2,46	30	0,97
<b>Transporte</b>	Transporte	142	8,18	37	1,64	227	11,85	23	0,73
	P&D	11	0,63	1	0,05	11	0,55	10	0,33
<b>Administração</b>	Publicidade e Marketing	7	0,39	2	0,07	6	0,34	6	0,20
	Administração	96	5,54	55	2,41	62	3,23	88	2,86
	Outros serviços	10	0,58	3	0,13	10	0,51	6	0,19
	<b>Insumos intermediários</b>	1322	76,22	1595	70,18	1484	77,44	2336	76,23
	Insumos importados	41	2,34	237	10,45	52	2,72	72	2,34
	Impostos de produção	50	2,89	224	9,83	62	3,21	89	2,89
	Folha de pagamento	268	15,47	42	1,87	266	13,87	474	15,47
	Renda do Capital	53	3,07	175	7,68	53	2,75	94	3,07
	<b>Produção (preço básico)</b>	1735	100,00	2273	100,00	1917	100,00	3065	100,00
<b>Custos de venda</b>	Imposto sobre venda	377	21,72	164	9,45	413	21,54	666	21,72
	Despesas de distribuição	325	18,72	357	20,61	356	18,56	573	18,71
<b>Preços ao consumidor</b>	Preço (US\$/L)*	0,624		0,716		0,688		1,102	
	Preço (BRL/L)	2,437		2,795		2,686		4,304	

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da MIP do IBGE, 2016; ANP, 2016; Directorate-General for Mobility and Transport (European Commission) et al., 2018; Hilbers et al., 2015; IEA Bioenergy, 2020; Letterio; McNew; Martin, 2016; Roque, 2022; Villamil; Paniagua, 2018; APROBIO, 2015; EPE, 2016; Timmerman, 2006; MDIC, 2024.

Nota: \*preço convertido a partir da taxa de câmbio anual do Banco Central do Brasil para 2015.

Para o cálculo do fator energético e das emissões atreladas ao uso do diesel B em suas diversas taxas de mistura com o HVO, as características dos combustíveis foram retiradas da literatura. Pelos dados presentes na Tabela 2, o diesel verde tem menor densidade e conteúdo energético maior que seu similar fóssil, sendo mais eficiente. Quando avaliada as características ambientais, o m<sup>3</sup> do HVO emite 84,25% menos que o m<sup>3</sup> do diesel fóssil, sendo necessário uma taxa de blend de 1,19% para que todo o volume emitido anteriormente, considerando um tanque completo somente de diesel fóssil, reduza suas emissões em 1% (BP Bioenergy, 2024; EPE, 2022).

Tabela 2 - Características do Diesel fóssil e HVO

Combustíveis	Unidade	Diesel	HVO
Densidade	Kg/m <sup>3</sup>	840,00	780,00
Conteúdo energético específico	MJ/m <sup>3</sup>	0,05	0,06
Emissão total de GEE	TonCO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup>	3,07	0,48
Var.% das emissões em relação à Diesel	%	-	-84,25
% Bio na mistura para redução de 1% da emissão líquida de CO <sub>2</sub> e	% de blend	-	1,19

Fonte: Elaboração Própria a partir dos dados da EPE (2022); BP BIOENERGY (2024)

### 3.2 O modelo

Com a desagregação do HVO e do diesel fóssil na MIP 2015, o modelo EGC BIM-RD foi calibrado com o banco de dados. O modelo tem como referência o modelo ORANI, incluindo a recursiva dinâmica do modelo MONASH, seguindo a tradição australiana do tipo Johansen. Desta forma, o modelo consta com retorno constante de escala, lucro econômico zero e mercados em ambiente de concorrência perfeita. O BIM-RD tem em sua característica recursiva dinâmica o efeito de *backward looking*, uma relação defasada de um ano entre investimento e capital; relação positiva entre investimento e a taxa esperada de retorno e; relação defasada entre crescimento do salário real e oferta de trabalho (Betarelli Junior; Perobelli; Vale, 2015).

### 3.3 Estrutura teórica

O modelo é representado por um conjunto de equações lineares que respeitam a hipótese do sistema *walrasiano* de equilíbrio geral de Debreu-Arrow (1954), resultando em soluções no formato de taxas de crescimento. Na estrutura teórica do modelo, cada setor produz mais de um produto, utilizando insumos intermediários de origem doméstica ou externa e fatores de produção. A produção de cada setor é definida por funções tecnológicas de agregação CET (*Constant Elasticity of Transformation*). As famílias demandam baseando-se em um sistema linear de gastos (LES) dividido entre bens de subsistência e de luxo, sujeitas a uma restrição orçamentária (Perobelli et al., 2017).

Neste trabalho, a demanda básica pelas famílias ( $x_3$  através do  $f_3$ ) e pelos setores ( $x_1$  através do  $a_1com$ ) de diesel fóssil e de HVO serão alteradas, simulando o comportamento resultante das alterações da taxa de *blend* previstas no PCF. As alterações ocorreram somente na demanda doméstica dos combustíveis, visto que a política se aplica somente no consumo interno. As variáveis são explicadas pelas equações (1).

$$\begin{aligned}
 x_1^{scj} &= z^j - \sigma_1^c (p_1^{scj} - p_1^{cj}) \\
 x_3^{hsc} &= x_{3T}^{hc} - \sigma_3^c (p_3^{hsc} - p_3^{hc})
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Em que  $x_1^{scj}$  é a quantidade de insumos usadas para o bem 1 de  $s$  origens,  $c$  de insumo e  $j$  de setores e  $x_3^{hsc}$  a demanda das famílias do bem 1 de  $s$  origem,  $c$  de insumo e  $h$  de família, sendo  $\sigma_1^c$  e  $\sigma_3^c$  a elasticidade de Armington (1969),  $(p_1^{scj} - p_1^{cj})$  e  $(p_3^{hsc} - p_3^{hc})$  a diferença entre os preços da ( $s$ )-ésima origem do bem com o preço do composto  $c$ .

Desta forma, variações na demanda de diesel fóssil e de HVO, gerará alterações nas relações de preços desses produtos, ponderado pelas elasticidades. Tais flutuações alteraram as demandas das famílias e setores com relação aos outros produtos necessários para o abastecimento de suas cestas de consumo e realização de suas produções, respectivamente. Com tais demandas sofrendo os choques propostos, ocorre uma reestruturação de toda economia para um novo ponto de equilíbrio.

### 3.4 Ambiente econômico e análise de política

Para que o modelo reflita o comportamento da economia de 2015 até 2036, o cenário de referência, chamado de cenário BAU (Business-As-Usual) é estimado tendo como base as variáveis macroeconômicas observadas entre 2015 a 2022 e suas projeções até 2036. O valor bruto de produção (VBP) do produto “Diesel – biodiesel” também foi utilizado, conferindo maior aderência as alterações do mercado em análise.

O governo do Brasil, através do Programa Combustível do Futuro (PCF), tem como um de seus objetivos a introdução de biocombustíveis avançados na matriz energética do país. Um dos pilares da política é o Programa Nacional do Diesel Verde (PNDV), incentivando a pesquisa, produção e comercialização do HVO, também chamado de diesel verde. Em sua formulação, foi estabelecido a participação do HVO no diesel B em 1%, entre 2027 a 2028; de 2%, entre 2029 a 2033; e 3%, entre 2034 e 2036; substituindo o diesel fóssil pelo novo biocombustível (BRASIL, 2023).

Para implementação do choque, foram projetados valor volumétricos de produção do diesel fóssil e HVO presente no diesel B mantendo a taxa *blend* constante de 93% e 0%, respectivamente. Sobre estes valores, as alterações na taxa de *blend* foram calculadas, compreendendo a variação percentual com a implementação da política. Tais variações foram inseridas no modelo, gerando os resultados avaliados, considerando a disponibilidade de matéria-prima para que a produção de todos os combustíveis avaliados seja realizada.

## 4. Resultados

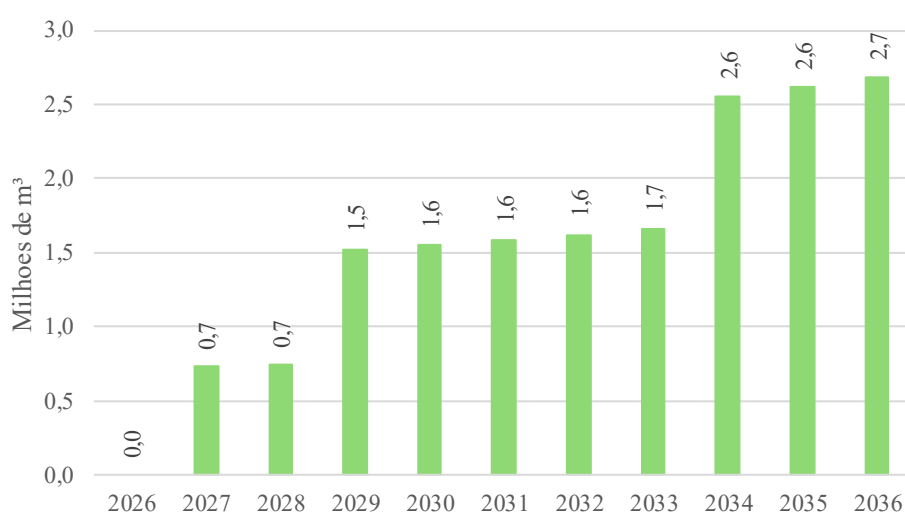
Mantendo o valor consumido de diesel B projetado pelo cenário BAU, a substituição do diesel fóssil pelo HVO respeitando as taxas de *blend* da política do PCF apresentam uma produção total de HVO de 17,27 milhões de m<sup>3</sup> entre 2026 a 2036. Para o diesel fóssil, tal substituição representa uma queda de 2,3% quando comparado com o cenário BAU, sendo o mesmo valor em volume. Para que o setor de HVO atinja tal produção, é necessário que, entre 2027 a 2036, a capacidade produtiva cresça, no mínimo, 15,55% ao ano; taxa superior ao 2,26% de crescimento da demanda do diesel B no mesmo período.

Utilizando dos valores volumétricos e as contantes presentes na Tabela 2, as emissões e conteúdo energético foram calculadas para o consumo de diesel B. Sendo o HVO um

combustível de menor fator de emissão, comparado ao diesel fóssil, sua substituição gerará uma queda agregada, entre 2026 a 2036, de 44,7 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente (Milhões de Ton. CO<sub>2</sub> eq.), representando uma queda de 1,75% quando comparado ao cenário BAU. Observando o conteúdo energético, ocorre um aumento de 104,73 GJ, representando crescimento médio durante a política de 0,24% com relação ao cenário BAU.

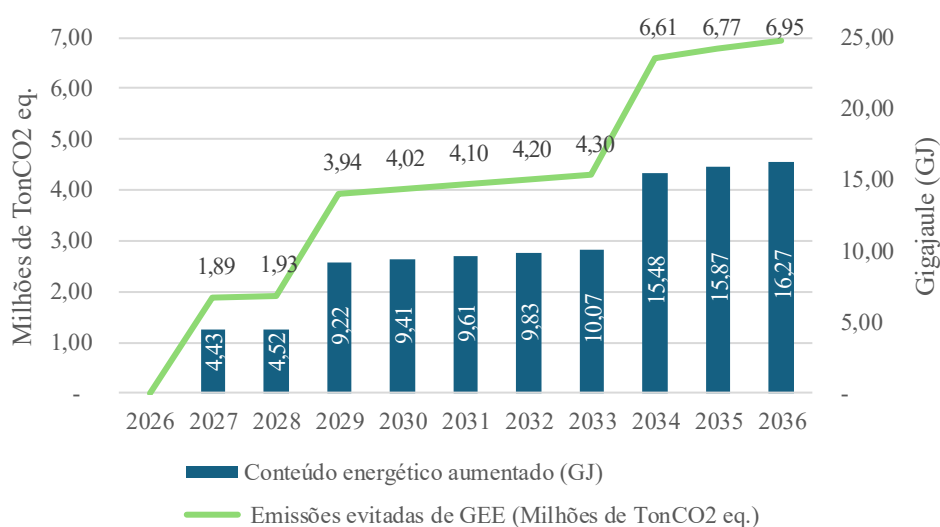
Em 2040, com a taxa de *blend* de 3% de HVO, as emissões anuais são 2,66% inferiores e o conteúdo energético é 0,37% superior ao cenário BAU, indicando que a introdução do biocombustível avançado reduz os impactos ambientais associados ao consumo de diesel B e melhora a eficiência energética, permitindo maior distância percorrida com a mesma quantidade de combustível.

Figura 1 - Volume de substituição entre Diesel fóssil para Diesel verde (milhões de m<sup>3</sup>)



Fonte: Resultados da pesquisa

Figura 2 – Variação do conteúdo energético e das emissões com a substituição



Fonte: Resultados da pesquisa

Para a economia, a introdução de um combustível de maior preço gera maiores custos que, no acumulado de todo o período, gerará uma retração no produto interno bruto (PIB) do país em 0,52% e queda do deflator do PIB, referência dos preços internos, em 2,16%, o que indica uma contração real maior do PIB, como apresentando na Tabela 3. O aumento dos custos de transporte reduz o potencial de crescimento da economia, indicado pela redução do investimento, com queda de 3,27%, e do estoque de capital, queda de 1,29%.

A queda no PIB é indicio da existência de *trade-offs* relevantes na transição energética brasileira quando se busca reduzir emissões de gases de efeito estufa (GEE) com a introdução do HVO. Essa dicotomia entre crescimento econômico e sustentabilidade climática explicita a necessidade de políticas públicas mais robustas, capazes de mitigar os efeitos negativos da transição sobre a renda, os preços e a arrecadação do governo, evitando que os ganhos ambientais sejam alcançados às custas de um enfraquecimento prolongado da atividade produtiva.

Com a retração do setor de refino de petróleo e a expansão da produção de diesel verde, observam-se efeitos mistos sobre as famílias. Apesar do aumento do emprego agregado e da utilidade, esses ganhos são acompanhados por uma redução do consumo e do salário real. Com aumento dos custos de produção, a queda do nível de salário foi atingida, culminando no movimento de desinflação observado do deflator. Como os tributos são maiores no diesel fóssil comparado aos biocombustíveis, a arrecadação total do governo, sua receita e renda total caem 4,24% e 3,30%, respectivamente.

Tabela 3 - Resultado macroeconômicos

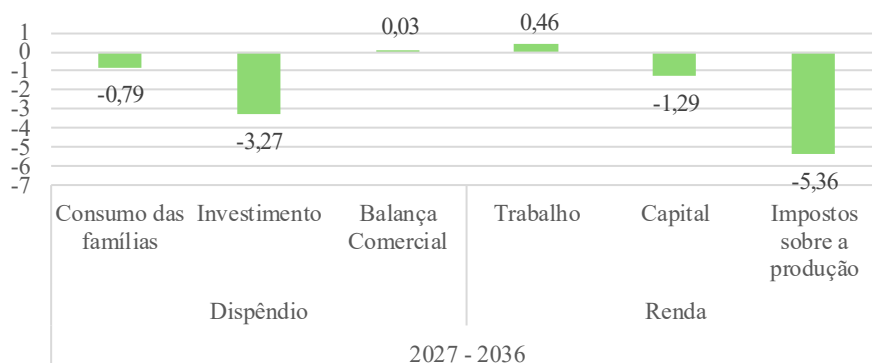
Variáveis	Resultado da Política Combustível do Futuro		
Período	2027 - 36		
PIB	-0,52	Renda total do governo	-3,30
Investimento	-3,27	Receita tributária do governo	-4,24
Consumo das famílias	-0,79	Deflator do PIB	-2,16
Utilidade das famílias	0,29	Termos de comércio	-1,39
Emprego agregado	0,46	Balança comercial	0,03
Salário Real	-2,39	Exportação	1,48
Estoque de capital	-1,29	Importação	-1,78

Fonte: Resultado da pesquisa

Nota: desvios % acumulados em relação ao cenário de referência

O resultado negativo do PIB tem como principal reflexo a queda dos investimentos, pela ótica do dispêndio, e dos impostos e capital, pela ótica da renda, como apresentado na Figura 3. Com o aumento dos custos de produção, setores intensivos em insumos derivados do transporte tornam-se menos lucrativos, o que reduz a parcela da renda direcionada ao investimento e, conseqüentemente, o estoque de capital, dada a natureza recursiva do modelo.

Figura 3 - Variação do PIB pelas óticas dispêndio e renda



Fonte: Resultados da pesquisa

Nota: desvios % acumulados em relação ao cenário de referência.

Setorialmente, os segmentos que mais dependem do diesel B para a geração de serviços ou produtos, como o transporte terrestre e a extração mineral, ou que possuem fortes vínculos com o setor de refino de petróleo, como a construção civil, apresentaram retração. Por outro lado, setores fornecedores de insumos para a produção de HVO, como a indústria química e a agricultura, exibiram crescimento, conforme mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 - Efeitos setoriais

Cenários	Resultado da política Combustível do Futuro		
Período	2027 - 36		
Variável	Produção Setorial		
Agropecuária	0,11	Refino de Petróleo (Diesel)	-2,63
Agricultura	0,66	Biocombustíveis (HVO; Biodiesel e Etanol)	7,32
Indústrias	-0,35	Químicos	0,53
Extração	-0,27	Serviços	-0,56
Alimentar	-0,19	Transp. Terrestre	-1,19
Variável	Emprego		
Agropecuária	0,19		
Indústrias	0,89		
Serviços	0,27		

Fonte: Resultados da pesquisa

Nota: desvios % acumulados em relação ao cenário de referência.

Quanto ao emprego, observa-se crescimento em diversos setores. Entretanto, ao analisar o comportamento das famílias, nota-se que tal crescimento está atrelado a queda do salário real das mesmas, como apontados na Tabela 3. A introdução do HVO onera mais as famílias de menor renda H2 e H1, tendo suas utilidades, renda real disponível e consumo reduzida em 2,1%, 1,35% e 1,35%, respectivamente, em média. As famílias de maior renda (H10), por possuírem maior consumo e uma cesta de bens mais extensa, o impacto percentual é o menor, quando comparado as outras famílias, reduzindo suas utilidades, renda real disponível e consumo em 0,20%, 0,28% e 0,13%. Quando avaliado o índice de preço de suas cestas características, a cesta que obteve a menor redução de preços foi a relacionada as famílias mais pobres, variando somente -1,75%, já para as mais ricas, foi de -2,19%, como apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Efeito nas famílias

Período	2027 - 2036			
Variáveis	Utilidade	Renda Real Disponível	Consumo	Índice de preço do consumidor
Famílias	Resultado da Política Combustível do Futuro			
H1	-1,96	-1,30	-1,31	-1,75
H2	-2,24	-1,40	-1,39	-1,76
H3	-2,06	-1,13	-1,12	-1,78
H4	-1,89	-1,08	-1,28	-1,86
H5	-1,81	-1,04	-1,04	-1,86
H6	-1,40	-0,91	-0,90	-1,89
H7	-1,07	-0,71	-0,69	-1,98
H8	-0,98	-0,64	-0,62	-2,01
H9	-0,50	-0,48	-0,32	-2,11
H10	-0,20	-0,28	-0,13	-2,19

Fonte: Resultados da pesquisa

Nota: desvios % acumulados em relação ao cenário de referência.

De modo geral, a inserção do HVO em detrimento do diesel fóssil tem como características a maior concentração de renda no país, penalizando a utilidade das famílias de menor renda em maior grau quando comparado as famílias mais ricas. Esse efeito se explica pela maior participação dos custos de transporte no orçamento das famílias mais pobres, que são proporcionalmente mais afetadas pelo aumento do preço do diesel. Outro aspecto é que a mão de obra empregada no setor de biocombustível, em geral, está atrelada as famílias de maior renda e, pensando em toda a cadeia do refino de petróleo, o diesel fóssil possui vínculos com a maioria dos extratos familiares. Logo, a substituição de um setor por outro tem como consequências a maior penalização das famílias de menor renda em detrimento das mais ricas.

## 5. Considerações Finais

Este estudo buscou avaliar os efeitos econômicos e ambientais da introdução do diesel verde (*Hydrotreated Vegetable Oil* – HVO) na matriz energética brasileira, por meio de sua incorporação progressiva ao diesel B, conforme estabelecido pelo Programa Combustível do Futuro (PCF). Para tanto, utilizou-se o modelo de Equilíbrio Geral Computável (EGC) BIM-RD, calibrado com base na matriz de insumo-produto brasileira e adaptado para simular os efeitos dinâmicos da substituição parcial do diesel fóssil por HVO no período de 2026 a 2036.

Os resultados das simulações indicam que a política proposta gera efeitos ambíguos sobre a economia nacional. Do ponto de vista ambiental, constata-se uma redução acumulada de 1,75% nas emissões de gases de efeito estufa (GEE) associadas ao consumo de diesel B, com uma economia de aproximadamente 44,7 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente. Ademais, observa-se um aumento de 0,24% no conteúdo energético médio do combustível, indicando ganhos em eficiência energética e desempenho operacional.

Sob a ótica econômica, no entanto, os resultados sugerem a presença de *trade-offs* relevantes. A substituição de parte do diesel fóssil por um insumo mais caro e com menor tributação implica aumento dos custos de produção, sobretudo nos setores intensivos em transporte e energia. Como consequência, a economia experimenta uma redução acumulada do PIB de 0,52%, além

de uma contração do investimento (-3,27%) e do estoque de capital (-1,29%) ao longo do horizonte analisado. Pela ótica da renda, observa-se uma redução expressiva na arrecadação tributária (-4,24%) e na renda total do governo (-3,30%), evidenciando efeitos fiscais adversos da política.

Ainda que o emprego agregado apresente leve crescimento no período, tal expansão ocorre em um contexto de queda do salário real (-2,39%) e retração do consumo das famílias (-0,79%), indicando que o dinamismo do mercado de trabalho não se traduz imediatamente em melhora das condições de vida da população. O aumento da utilidade das famílias (+0,29%), por sua vez, pode refletir a substituição de produtos mais poluentes por alternativas ambientalmente superiores, sinalizando mudanças qualitativas na estrutura do bem-estar social, ainda que com sacrifício econômico de curto prazo.

Esses resultados revelam, portanto, uma dicotomia estrutural entre os objetivos de crescimento econômico e os compromissos de mitigação climática, característica dos processos de transição energética em países em desenvolvimento. A incorporação de combustíveis avançados, como o HVO, exige não apenas marcos regulatórios claros e metas progressivas de descarbonização, mas também instrumentos econômicos capazes de mitigar os efeitos regressivos da política sobre o investimento, o consumo e a arrecadação.

Conclui-se que, embora a introdução do diesel verde no diesel B contribua positivamente para a redução das emissões e para a diversificação energética, sua implementação requer uma estratégia coordenada de política industrial, energética e fiscal. O sucesso da transição energética dependerá da capacidade do Estado em criar mecanismos de compensação, como subsídios à produção nacional de HVO, incentivos à inovação tecnológica, e reformas na estrutura tributária sobre combustíveis, de forma a compatibilizar os objetivos ambientais com a estabilidade macroeconômica e o combate a concentração de renda familiar nacional.

## Referências

AGREEMENT, Paris. **Adoption of the Paris Agreement**. United Nations Climate Change Secretariat (UNFCCC). FCCC/CP/2015/L, v. 9, 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS – ANP. Estudo de suporte à implementação do marco regulatório do hidrogênio no Brasil. Brasília: ANP, 2022. Disponível em: . Acesso em: 15 jul. 2025.

ANP, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis : 2016**. Rio de Janeiro, RJ: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2016. Disponível em: <[https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/arquivos-anuario-2016/anuario\\_estatistico\\_anp\\_2016.pdf](https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/arquivos-anuario-2016/anuario_estatistico_anp_2016.pdf)>. Acesso em: 6 fev. 2025.

ANSUATEGI, Alberto; ESCAPA, Marta. Economic growth and greenhouse gas emissions. **Ecological Economics**, v. 40, n. 1, p. 23-37, 2002.

APROBIO. **BIODIESEL – A (R)EVOLUÇÃO NAS MÃOS DO BRASIL**. [S.l.]: Associação dos Produtores de Biodiesel do Brasil – APROBIO, ago. 2015. Disponível em: <[https://aprobio.com.br/arquivos/2015\\_08\\_Biodiesel-A-R\\_Evolu%C3%A7%C3%A3onasM%C3%A3osdo-Brasil\\_Peterson\\_Aprobio.pdf](https://aprobio.com.br/arquivos/2015_08_Biodiesel-A-R_Evolu%C3%A7%C3%A3onasM%C3%A3osdo-Brasil_Peterson_Aprobio.pdf)>.

ARMINGTON, Paul S. A Theory of Demand for Products Distinguished by Place of Production. **IMF Staff Papers**, v. 1969, n. 001, p. A007, 1969.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS EMPRESAS DE TRANSPORTES URBANOS, NTU. A revolução do HVO. **Revista NTUrbano**, n. 42, nov./dez. 2020. p. 20, Disponível em: <https://www.ntu.org.br/publicacoes/nturbano.aspx>. Acesso em: 15 jul. 2025.

BETARELLI JUNIOR, Admir Antonio; PEROBELLI, Fernando Salgueiro; VALE, Vinícius de Almeida. **RECURSIVO (EGC-RD) PARA O BRASIL NO ANO DE 2011 (BIM-RD)**. Juiz de Fora: LATES – Laboratório de Análises Territoriais e Setoriais, 2015.

BITHAS, Kostas. Sustainability and externalities: Is the internalization of externalities a sufficient condition for sustainability?. **Ecological economics**, v. 70, n. 10, p. 1703-1706, 2011.

BP BIOENERGY. **bp bioenergy HVO | Products and services | Home**. Disponível em: [https://www.bp.com/en\\_gb/united-kingdom/home/products-and-services/bp-fleet/bp-bioenergy-hvo.html](https://www.bp.com/en_gb/united-kingdom/home/products-and-services/bp-fleet/bp-bioenergy-hvo.html). Acesso em: 24 jul. 2024.

BRASIL. 4196. PL 4196/2023. . 29 ago. 2023a.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **A NDC do Brasil: determinação nacional em contribuir e transformar – A visão do Brasil para 2035**. Brasília: MMA, 2023b. Disponível em: . Acesso em: 15 jul. 2025.

COASE, Ronald Harry. The problem of social cost. **The journal of Law and Economics**, v. 56, n. 4, p. 837-877, 2013.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES, CNT. **Participação do setor privado mudou a feição das rodovias brasileiras**. 2023. Disponível em: <https://cnt.org.br/agencia-cnt/participao-do-setor-privado-mudou-a-feicao-das-rodovias-brasileiras> >. Acesso em: 15 jul. 2025.

DEBREU, Gerard; ARROW, Kenneth J. Existence of an Equilibrium for a Competitive Economy. **Econometrica**, v. 22, n. 3, p. 265–290, 1954.

DIRECTORATE-GENERAL FOR MOBILITY AND TRANSPORT (EUROPEAN COMMISSION) et al. Building up the future, cost of biofuel: sub group on advanced biofuels : sustainable transport forum. [S.l.]: **Publications Office of the European Union**, 2018.

DOLFSMA, Wilfred; LEYDESDORFF, Loet. Lock-in and break-out from technological trajectories: Modeling and policy implications. **Technological forecasting and social change**, v. 76, n. 7, p. 932-941, 2009.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Nota de esclarecimento: Lei Combustível do Futuro. NE-EPE-DPG-SDB-2024-81. **Superintendência de Derivados de Petróleo e Biocombustíveis (SDB)**. Rio de Janeiro: EPE, 10 fev. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **RenovaBio: Panorama e Perspectivas. Nota Técnica EPE-DHNL-NT-042/2021-r0**. Rio de Janeiro: EPE, 2021. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-552/topico-578/NT\\_EPE\\_DHNL\\_042\\_2021\\_R0.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-552/topico-578/NT_EPE_DHNL_042_2021_R0.pdf). Acesso em: 15 jul. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balço Energético Nacional 2025: ano base 2024**. Relatório final. Rio de Janeiro: EPE, 2025. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2025>. Acesso em: 15 jul. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, EPE. **Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis – Ano 2023**. , ago. 2024.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis – Ano 2015**. Empresa de Pesquisa Energética – EPE, , 10 maio 2016. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-398/An%C3%A1lise%20de%20Conjuntura%20dos%20Biocombust%C3%ADveis1%20-%20Ano%202015.pdf>>

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2032 - Oferta de Biocombustíveis**. , dez. 2022.

FOXON, Timothy J. Technological lock-in and the role of innovation. In: **Handbook of sustainable development**. Edward Elgar Publishing, 2014. p. 304-316.

GT–E2G. Relatório Ciclo-Otto: avaliação das condições técnicas e econômicas para produção em larga escala do etanol de 2ª geração. Coordenação: Artur Milanez (BNDES) e Marlon Arraes Jardim (MME). Brasília: **Ministério de Minas e Energia**, 2022. Disponível em: [https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-combustivel-do-futuro/relatorio\\_final\\_gt\\_\\_\\_e2g.pdf](https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-combustivel-do-futuro/relatorio_final_gt___e2g.pdf). Acesso em: 15 jul. 2025.

HAMIT-HAGGAR, Mahamat. Greenhouse gas emissions, energy consumption and economic growth: A panel cointegration analysis from Canadian industrial sector perspective. **Energy Economics**, v. 34, n. 1, p. 358-364, 2012.

HARVEY, Mark; PILGRIM, Sarah. The new competition for land: Food, energy, and climate change. **Food policy**, v. 36, p. S40-S51, 2011.

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

HUNICZ, Jacek et al. Comparison of diesel and hydrotreated vegetable oil as the high-reactivity fuel in reactivity-controlled compression ignition. **Energy Conversion and Management**, v. 323, p. 119264, 2025.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Sistema de Contas Nacionais: Brasil | IBGE**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9052-sistema-de-contas-nacionais-brasil.html>>. Acesso em: 2 ago. 2024b.

IBGE. **Matriz de Insumo-Produto | IBGE**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9085-matriz-de-insumo-produto.html?=&t=conceitos-e-metodos>>. Acesso em: 16 jul. 2024a.

IEA BIOENERGY. **Advanced Biofuels – Potential for Cost Reduction**. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <[https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2020/02/T41\\_Cost\\_ReductionBiofuels-11\\_02\\_19-final.pdf](https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2020/02/T41_Cost_ReductionBiofuels-11_02_19-final.pdf)> . Acesso em: 17 jul. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA BIOENERGY. **Assessment of successes and lessons learned for biofuels deployment: Report Work Package 1** – Status of biofuels policies and market deployment in Brazil, Canada, Germany, Sweden and the United States. Paris: IEA Bioenergy TCP, 2023b. Disponível em: . Acesso em: 15 jul. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **Tracking Clean Energy Progress 2023**. Paris: IEA, 2023a. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/tracking-clean-energy-progress-2023>. Acesso em: 15 jul. 2025. Licença: CC BY 4.0

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **World Energy Outlook 2023**. Annual Report (26th Edition), Paris, 2023. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/42b23c45-78bc4482-b0f9-eb826ae2da3d/WorldEnergyOutlook2023.pdf> (accessed December 27, 2023).

JULIO, A. A. V. et al. Assessment of the sustainability and economic potential of hydrotreated vegetable oils to complement diesel and biodiesel blends in Brazil. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 17, n. 2, p. 312–323, mar. 2023.

KOLSTAD, Charles D.; KRAUTKRAEMER, Jeffrey A. Natural resource use and the environment. In: **Handbook of natural resource and energy economics**. Elsevier, 1993. p. 1219-1265.

KOSUGI, Takanobu et al. Internalization of the external costs of global environmental damage in an integrated assessment model. **Energy Policy**, v. 37, n. 7, p. 2664-2678, 2009.

LETTERIO, Michael P.; MCNEW, Robert; MARTIN, Nickolas. Methods and Economics of Renewable Diesel Production. [S.l.]: **Biolight**, 12 maio 2016. Disponível em: <<https://www.slideshare.net/slideshow/green-dieselfinal-report-63153897/63153897>>. Acesso em: 17 jul. 2024.

MDIC, Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. **Comex Stat.**, 2024. Disponível em: <<https://comexstat.mdic.gov.br/pt/home>>. Acesso em: 21 ago. 2024

MILANEZ, Artur Yabe et al. Biodiesel e diesel verde no Brasil: panorama recente e perspectivas. set. 2022.

MILANEZ, Artur Yabe; FAVERET FILHO, Paulo de Sá Campello; ROSA, Sérgio Eduardo Silveira da. **Perspectivas para o etanol brasileiro**. 2008.

MOREIRA, Marcelo M. R. et al. Evaluation of the Brazilian RenovaBio conversion-free criteria on land use change emissions: Brazilian Biofuel Program and the use of risk-management approach. **IEA Bioenergy**: Task 45. November 2024. ISBN: 979-12-80907-45-5.

MURPHY, Richard et al. Global developments in the competition for land from biofuels. **Food policy**, v. 36, p. S52-S61, 2011.

NEVES, T. J.; HARDER, M. N. C. Diesel verde: a nova era dos biocombustíveis em uma revisão. **Bioenergia em Revista: Diálogos** (ISSN: 2236-9171), v. 11, n. 2, 23 dez. 2021.

NO, S.-Y. Application of hydrotreated vegetable oil from triglyceride based biomass to CI engines – **A review**. **Fuel**, v. 115, p. 88–96, jan. 2014.

OSAWA, Mitsuru et al. Influence of base diesel fuel upon biodiesel sludge formation tendency. **SAE International Journal of Fuels and Lubricants**, v. 2, n. 1, p. 127-138, 2009.

PANOUSO, Calliope et al. Advanced biofuels to decarbonise European transport by 2030: Markets, challenges, and policies that impact their successful market uptake. **Energy Strategy Reviews**, v. 34, p. 100633, 2021.

PAVLENKO, Nikita; ARAUJO, Carmen. Oportunidades e riscos para a expansão continuada dos biocombustíveis no Brasil. ICCT – **International Council on Clean Transportation**, 26 ago. 2019. Disponível em: <https://theicct.org/publication/opportunities-and-risks-for-continued-expansion-of-biofuels-in-brazil-portuguese/>. Acesso em: 15 jul. 2025.

PECEQUILO, C. S. Temas da agenda internacional O Brasil e o mundo. [s.l.: s.n.].

PEROBELLI, Fernando Salgueiro et al. Impactos Econômicos do Aumento das Exportações Brasileiras de Produtos Agrícolas e Agroindustriais para Diferentes Destinos. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 55, n. 2, p. 343–366, jun. 2017.

PIGOU, Arthur. The economics of welfare. **Routledge**, 2017.

RATHMANN, Régis; SZKLO, Alexandre; SCHAEFFER, Roberto. Land use competition for production of food and liquid biofuels: An analysis of the arguments in the current debate. **Renewable energy**, v. 35, n. 1, p. 14-22, 2010.

RIBEIRO, Carolina Habib; DA CUNHA, Marcelo Pereira. The economic and environmental impacts of Brazilian National Biofuel Policy. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 16, n. 2, p. 413-434, 2022.

ROQUE, Luís Filipe de Almeida. Modelagem e análise do ciclo de vida da produção e comercialização de diesel verde (HVO) e sua aplicação no modo dual-fuel com etanol em motores de ignição por compressão. 25 fev. 2022.

SINGH, D. et al. Combustion and emission characteristics of a light duty diesel engine fueled with hydro-processed renewable diesel. **Energy**, v. 154, p. 498–507, jul. 2018.

TIMMERMAN, Luke. **Can biodiesel compete on price?** Disponível em: <https://www.seattletimes.com/business/can-biodiesel-compete-on-price/>. Acesso em: 24 jun. 2024.

VILLAMIL, Javier Moreno Fernández; PANIAGUA, Aurelio Hurtado de Mendoza. Preliminary design of the green diesel production process by hydrotreatment of vegetable oils. 2018.

WANG, Zhizhen et al. Socioeconomic effects of aviation biofuel production in Brazil: A scenarios-based Input-Output analysis. *Journal of Cleaner Production*, v. 230, p. 1036–1050, set. 2019.

ZEEUW, Hyung-Ja de. Driving the shift to sustainability: Alternative fuels in the transport sector. **Rabobank**, 10 jul. 2025. Disponível em: <https://www.rabobank.com>. Acesso em: 15 jul. 2025.