

Bioenergia tropical e os dilemas da transição energética: neutralidade tecnológica e valorização global das soluções nacionais

*Luciano Rodrigues
Angelo Costa Gurgel
José Guilherme de Oliveira Belon
Lucas Rodrigues*

*Material preliminar para avaliação
19/09/2025*

SUMÁRIO

RESUMO EXECUTIVO	3
1. INTRODUÇÃO	7
2. BIOENERGIA, SEGURANÇA ENERGÉTICA E USO DA TERRA	10
2.1 Impactos diretos (dLUC) e indiretos (iLUC) de mudanças sobre o uso da terra	10
2.2 O debate “ <i>food vs. fuel</i> ” e suas limitações conceituais	15
3. REGULAÇÃO, POLÍTICAS PÚBLICAS E RESTRIÇÕES À BIOENERGIA TROPICAL	18
4. A MOBILIDADE DE BAIXO CARBONO COM BIOENERGIA AGROPECUÁRIA ..	22
4.1 Abordagem metodológica e estratégia empírica	23
4.1.1 Definição das classes de veículos e Análise do Ciclo de Vida (ACV).....	23
4.1.2 Parâmetros utilizados no cálculo das emissões no ciclo “berço ao portão”	28
4.1.3 Parâmetros utilizados no cálculo das emissões no ciclo “poço à roda”	28
4.1.4 Parâmetros utilizados no cálculo das emissões para o “fim de vida”	41
4.2 Resultados para as emissões por quilômetro rodado no ciclo “berço ao túmulo” ...	39
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	50
6. REFERÊNCIAS	49

RESUMO EXECUTIVO

A transição energética representa um dos principais desafios contemporâneos: reduzir de forma consistente as emissões de gases do efeito estufa e reorganizar os sistemas de produção e consumo de energia em escala global. Países de clima tropical, como o Brasil, desenvolveram soluções de baixo carbono comprovadas, entre elas a bioenergia, que já desempenha papel central em suas matrizes energéticas. No entanto, essas alternativas ainda enfrentam ceticismo e barreiras regulatórias em algumas instâncias internacionais, com regras que, muitas vezes, favorecem tecnologias predominantes em países desenvolvidos.

Este estudo analisa criticamente essa dinâmica. Os resultados sugerem que, embora a bioenergia brasileira tenha alcançado posição de destaque — respondendo por cerca de 60% de toda a energia renovável consumida no Brasil —, o seu reconhecimento pleno no cenário global permanece limitado. Longe de se restringir a uma questão técnica, essa situação reflete disputas políticas e econômicas mais amplas, capazes de influenciar a inserção dos países no mercado de energia e no comércio de bens intensivos em carbono nos próximos anos.

1. O peso das barreiras climáticas

Em nome da sustentabilidade, legislações da União Europeia (UE), dos Estados Unidos (EUA) e de organismos internacionais têm imposto regras que acabam atuando como barreiras climáticas. São critérios de difícil comprovação, multiplicadores artificiais e classificações de risco que penalizam a bioenergia tropical — mesmo quando ela apresenta resultados mais efetivos em termos de mitigação.

Exemplo marcante é a exclusão de biocombustíveis de políticas públicas e as restrições associadas às emissões das chamadas mudanças indiretas no uso da terra (iLUC, na sigla em inglês), fenômeno complexo, de difícil mensuração e sem consenso científico. Ademais, os mesmos critérios raramente são aplicados a outras tecnologias que também deslocam o uso da terra, como hidrelétricas ou fazendas solares, por exemplo.

Esse desequilíbrio gera distorções competitivas. Enquanto veículos elétricos recebem incentivos generosos na Europa, biocombustíveis sustentáveis

são limitados por tetos rígidos ou simplesmente excluídos de programas estratégicos de descarbonização, como no caso da aviação naquele continente.

2. O falso dilema entre comida e combustível

Outro ponto polêmico é o famoso impasse “*food vs. fuel*” — a ideia de que biocombustíveis competem com a produção de alimentos e podem agravar a fome. A revisão apresentada mostra que essa narrativa é simplista e não resiste à análise de longo prazo.

A segurança alimentar é afetada por múltiplos fatores — desigualdade de renda, infraestrutura, políticas públicas e conflitos —, e não apenas pela destinação de terras. Muitos estudos, quando ampliam o escopo, concluem que a bioenergia pode gerar ganhos para famílias vulneráveis ao criar empregos, dinamizar economias locais e aumentar renda em áreas rurais. Além disso, a experiência brasileira com sistemas de segunda safra, substituição de áreas de pastagem degradadas, uso de resíduos e integração com cadeias agroindustriais mostra que é possível produzir energia e alimentos de forma complementar, e não excludente.

3. Regulação internacional e interesses ocultos

O documento analisa como regras internacionais vêm privilegiando algumas tecnologias em detrimento de outras. Entre os exemplos estão:

- **UE** — estabeleceu limites rígidos para o uso de biocombustíveis de culturas alimentares e criou multiplicadores que aumentam artificialmente a contribuição de eletricidade e combustíveis sintéticos, independentemente do seu real impacto climático.
- **EUA** — classificam o etanol de milho brasileiro como combustível “convencional”, com baixa redução de emissões, aplicando a mesma penalização atribuída ao etanol de milho norte-americano, apesar dos sistemas de produção serem distintos.

Esses mecanismos, embora apresentados como preocupações ambientais, funcionam, muitas vezes, como instrumentos de proteção de mercados internos e de estímulo a setores estratégicos nos países desenvolvidos. A consequência é um sistema regulatório que ameaça excluir soluções de baixo carbono comprovadas em regiões tropicais.

4. Mobilidade sustentável: Brasil x potências globais

O estudo dedica atenção especial à comparação entre a mobilidade de baixo carbono no Brasil e nas principais economias globais (EUA, China e UE). Com base em metodologias de Análise do Ciclo de Vida (ACV), evidencia-se que o desempenho climático dos veículos *flex* brasileiros, movidos a etanol, supera o de carros elétricos em países cuja matriz elétrica ainda depende de carvão ou gás natural.

Entre todas as tecnologias e mercados avaliados, destacam-se como de menor emissão no ciclo “berço ao túmulo” os veículos a combustão interna (ICEs, na sigla em inglês) e os híbridos convencionais (HEVs, também em inglês) abastecidos com etanol no Brasil, bem como os veículos elétricos recarregados a partir da matriz elétrica brasileira. Esse resultado reforça a biomobilidade como rota competitiva, escalável e de rápida contribuição para a descarbonização.

A análise comparativa das emissões médias da frota de veículos novos também confirma essa vantagem relativa. No Brasil, embora mais de 90% das vendas ainda se concentrem em veículos com motor a combustão interna (ICEs), a média de emissões situa-se em torno de 151 g CO₂/km. Esse valor é cerca de 31% inferior ao registrado na União Europeia, 34% menor do que nos Estados Unidos e 42% abaixo do verificado na China — mesmo considerando que, neste último caso, os veículos elétricos e híbridos *plug-in* já representam quase metade das vendas de automóveis novos.

Esses resultados refletem a combinação de uma matriz elétrica predominantemente limpa e do etanol certificado, com reduzida pegada de carbono, o que garante reduções de gases do efeito estufa superiores às alternativas atualmente dominantes nos mercados analisados. Já os veículos elétricos, embora prometam zero emissões no uso direto, ainda carregam uma pegada inicial significativa ligada à produção das baterias — podendo representar cerca de 2 vezes mais emissões na fase de fabricação em comparação aos veículos a combustão – e dependem de fonte de energia limpa e renovável.

Isso não significa descartar a eletrificação, mas sim reconhecer que soluções distintas devem ser avaliadas conforme as especificidades locais, de forma a oferecer opções de descarbonização efetivas e viáveis.

Nos países tropicais em desenvolvimento, a biomobilidade é uma opção importante nos segmentos em que já é competitiva, além da possibilidade de incentivar sua adoção em outras regiões com potencial produtivo. Os veículos híbridos baseados em motores a combustão interna com bioenergia surgem como alternativa estratégica de transição. Em médio e longo prazos, a tendência é que a hibridização das plataformas elétricas incorpore cada vez mais o uso de

combustíveis biológicos ou sintéticos derivados de fontes renováveis, compondo soluções mais eficazes e sustentáveis. Com o amadurecimento das tecnologias e a diversificação de aplicações, haverá espaço para a convivência harmônica entre diferentes rotas tecnológicas, consolidando um caminho plural rumo à mobilidade sustentável.

5. O caminho para uma transição efetiva

A mensagem central é clara: a transição energética precisa ser guiada por neutralidade tecnológica e métricas reais de desempenho climático, e não por barreiras artificiais ou “campeões tecnológicos” escolhidos por interesses particulares.

O Brasil oferece um exemplo de como a bioenergia pode ser integrada em larga escala, com impactos positivos para o clima, a economia e a sociedade. Países desenvolvidos, responsáveis por quase 70% das emissões acumuladas desde a Revolução Industrial, não podem impor restrições que penalizem soluções tropicais justamente quando estas demonstram capacidade de resposta mais rápida e escalável.

A lição é que não existe uma única rota de descarbonização válida para todos. O futuro da mobilidade sustentável — e da descarbonização de forma geral — deve ser plural.

6. Agenda de aperfeiçoamento da governança climática

Para além da defesa da neutralidade tecnológica, o avanço da bioenergia exige consolidação das políticas nacionais e ajustes nas negociações internacionais. No plano doméstico, destaca-se a necessidade de consolidar e aprimorar programas já existentes — como a Política Brasileira de Biocombustíveis (RenovaBio), a política de mobilidade sustentável e as iniciativas voltadas à descarbonização nos setores de gás e aviação —, assegurando previsibilidade regulatória. Também é fundamental eliminar distorções subnacionais, como a concessão de benefícios fiscais a veículos híbridos *plug-in* (PHEVs, na sigla em inglês) sem comprovação de menor intensidade de carbono.

No campo tecnológico, o Brasil deve intensificar o desenvolvimento de biocombustíveis avançados, especialmente os combustíveis sustentáveis de aviação (SAFs, na sigla em inglês), e ampliar a integração entre bioenergia e eletrificação na mobilidade. Essa estratégia pode posicionar o País como referência em soluções híbridas, capazes de unir motores de combustão eficientes a biocombustíveis e tração elétrica de forma complementar.

No âmbito internacional, impõe-se uma diplomacia climática proativa. Isso envolve contestar critérios regulatórios arbitrários, defender padrões baseados em evidências científicas e incorporar mecanismos que valorizem o desempenho climático efetivo de cada solução energética. O reconhecimento da bioenergia tropical pode reforçar alianças estratégicas e difundir esse modelo entre países em desenvolvimento.

O Brasil reúne vantagens comparativas — disponibilidade de terra, experiência na produção e liderança tecnológica — que podem ser convertidas em vantagens competitivas duradouras. A consolidação de políticas internas e a atuação internacional coordenada são condições essenciais para transformar a bioenergia tropical de solução promissora em ativo estratégico global.

1. INTRODUÇÃO

A transição energética global avança sob a urgência climática, e a busca por trajetórias de neutralidade de emissões tornou-se eixo importante das agendas internacionais. Nesse percurso, as escolhas tecnológicas, as diretrizes de políticas públicas e os instrumentos regulatórios definirão não apenas os caminhos da descarbonização, mas também a inserção competitiva dos países na geopolítica da energia e no comércio de bens intensivos em carbono.

É nesse contexto que emergem os dilemas da bioenergia em ambientes tropicais. Embora consolidada em países como o Brasil — com ganhos comprovados em mitigação, segurança energética e desenvolvimento regional —, sua legitimidade ainda é contestada em certas arenas multilaterais e em legislações de países desenvolvidos.

Questões relativas ao uso da terra — como a alegada competição com alimentos e as emissões associadas a mudanças indiretas no uso da terra (iLUC, na sigla em inglês) — exigem avaliação ancorada em evidências, com metodologias robustas e sensíveis às especificidades locais. Sem esse cuidado, multiplicam-se os riscos de assimetrias regulatórias e incentivos desalinhados com a realidade produtiva. Em um cenário de múltiplas soluções e rotas de descarbonização, o debate internacional não deve impor respostas universais, tampouco operar com métricas e regras assentadas em fundamentos questionáveis ou em motivações particulares.

A experiência brasileira ilustra a relevância desse reconhecimento. A contribuição da bioenergia para a matriz nacional é robusta e persistente: a bioenergia associada ao agronegócio passou de 9,7% da oferta interna de energia, em 1970, para 29,1%, em 2023 (Rodrigues *et al.*, 2025). Em 2023, esse setor respondeu por cerca de 60% de toda a energia renovável do País — participação sem paralelo entre economias de perfil agroindustrial semelhante. Esses indicadores evidenciam a bioenergia tropical como componente estratégico da transição brasileira e como caso de integração de renováveis em larga escala, com potencial de adaptação a outros contextos tropicais.

Ainda que apresentadas como medidas ambientais, parte das regras recentes tem operado como barreiras climáticas, impondo custos assimétricos a soluções locais efetivas — como a bioenergia sustentável produzida no ambiente tropical — e favorecendo alternativas prioritárias nos países desenvolvidos. O resultado é a limitação do reconhecimento de soluções competitivas e imediatamente escaláveis para a mitigação de emissões em diversas regiões.

Diante disso, este trabalho propõe uma reflexão analítica orientada pela neutralidade tecnológica e pela avaliação por desempenho climático. A premissa é simples: uma vez corretamente precificadas as externalidades negativas dos combustíveis fósseis por instrumentos de política pública, consumidores e empresas devem poder selecionar as rotas de descarbonização mais adequadas às suas realidades. Cabe à política pública equalizar as externalidades entre fósseis e renováveis e estabelecer métricas transparentes, comparáveis e verificáveis de carbono, evitando a eleição de “campeões tecnológicos” e a imposição de soluções globais desenhadas a partir de interesses específicos.

Embora se detenha na experiência brasileira com bioenergia, a análise remete à discussão mais ampla sobre a necessidade de mobilizar todas as soluções efetivas, considerando especificidades econômicas, sociais e históricas — além das condições naturais — que oferecem opções competitivas a várias nações em desenvolvimento. Estas não dispõem das mesmas condições financeiras e de investimento dos países desenvolvidos, que, ao longo da história, foram os principais responsáveis pela ampliação das emissões de gases do efeito estufa.

A saber, juntos, EUA, China e os países europeus representam quase 60% de toda emissão global de gases causadores do efeito estufa (GEE)¹. Tomadas as emissões acumuladas desde 1750, essas regiões chegam a ser responsáveis por 69,1% do total mundial, posicionando-se ainda entre os cinco maiores emissores em termos *per capita* (GLOBAL CARBON BUDGET, 2024).

Sob esse contexto, o estudo organiza-se da seguinte forma. O capítulo 2 apresenta um exame da literatura sobre impactos diretos e indiretos do uso da terra associados aos biocombustíveis (dLUC e iLUC) e revisita o debate “*food vs. fuel*”. O capítulo 3 discute exemplos de políticas e regulações internacionais que, sob o objetivo de sustentabilidade, podem uniformizar soluções e gerar assimetrias — como critérios de risco de iLUC ou multiplicadores que priorizam eletrificação e combustíveis sintéticos —, além de explorar alternativas de desenho regulatório baseadas em desempenho climático.

¹Para fins deste estudo, as emissões de GEE serão tratadas, como sinônimos, pelos termos emissões de carbono, CO₂ ou CO₂eq.

Por fim, o capítulo 4 detalha o retrato da mobilidade de baixo carbono no Brasil, adotando abordagem metodológica adequada para quantificar a entrega efetiva de descarbonização da matriz brasileira de combustíveis leves com o uso de biocombustíveis, em contraste com as estratégias dominantes nos EUA, na China e na UE.

2. BIOENERGIA, SEGURANÇA ENERGÉTICA E USO DA TERRA

Os biocombustíveis situam-se na confluência de dois desafios centrais do desenvolvimento sustentável: a transição energética e a segurança alimentar. O debate sobre uma possível competição por terra e insumos entre energia e alimentos remonta ao início da década de 1980 (Brown, 1980) e, desde então, incorporou novas dimensões, em especial as emissões de GEE associadas à iLUC.

À luz desse percurso, este capítulo organiza-se em duas seções: (i) análise da evolução do conceito de iLUC e das estratégias de mensuração, mitigação e regulação; e (ii) reexame da literatura sobre “*food vs. fuel*”, com ênfase em métodos, evidências e condicionantes contextuais. O objetivo é sintetizar como a avaliação científica tem tratado essas críticas e identificar as limitações dessas abordagens para o desenho de políticas orientadas por desempenho climático.

2.1 Impactos diretos (dLUC) e indiretos (iLUC) de mudanças sobre o uso da terra

Quando a produção de biomassa envolve o uso de áreas agrícolas, podem ocorrer emissões decorrentes de mudanças no uso da terra. Essas alterações manifestam-se pela conversão direta de áreas agropecuárias para o cultivo de biomassa — denominada mudança direta de uso da terra (*direct Land Use Change*, dLUC) — ou pela chamada mudança indireta (*indirect Land Use Change*, iLUC), que acontece quando a produção de biomassa substitui atividades agropecuárias existentes, deslocando-as para novas áreas e regiões (IPCC, 2022; Searchinger *et al.*, 2008; Fargione *et al.*, 2010; Rajagopal & Plevin, 2013; Plassmann, 2018).

Argumenta-se, assim, que essa expansão dos biocombustíveis poderia induzir emissões indiretas associadas à realocação do uso da terra, as quais deveriam ser incorporadas no balanço de carbono da bioenergia de origem agrícola.

Ocorre, entretanto, que a necessidade de área para o cultivo de biocombustíveis varia conforme múltiplos fatores, como a localização geográfica,

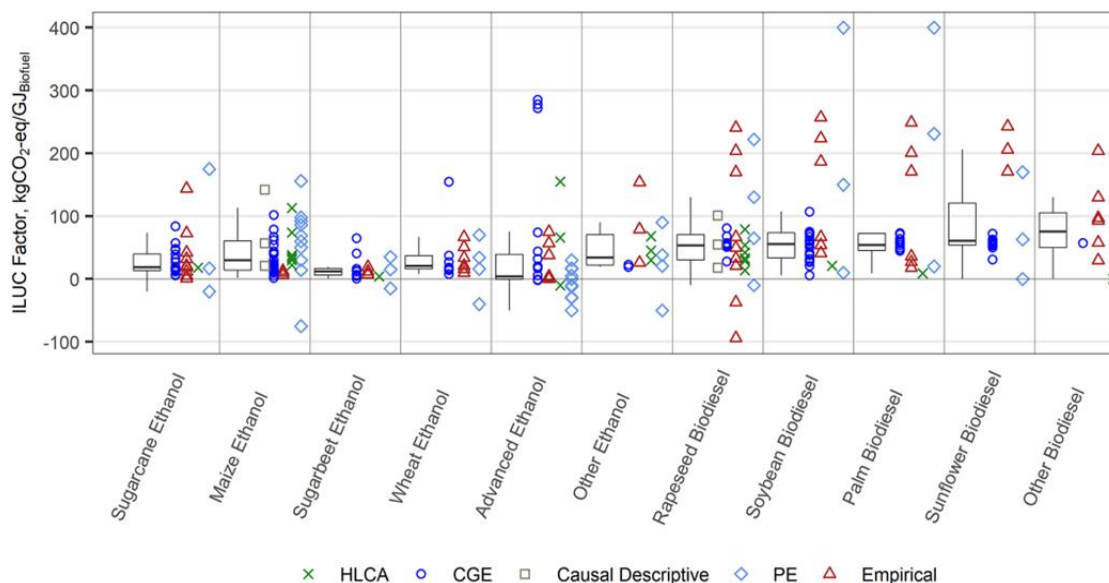
a escala de implantação, o uso anterior da terra, o desenho do sistema agrícola, as matérias-primas escolhidas, as condições climáticas e de solo, bem como a estratégia de manejo (IPCC, 2019; Robledo-Abad *et al.*, 2017; Calvin *et al.*, 2021). Essa diversidade gera um espectro de situações que incluem desde sistemas dedicados exclusivamente à biomassa até contextos em que nenhuma área adicional é necessária, como no caso da utilização de resíduos orgânicos. Entre esses extremos, encontram-se arranjos intermediários, como o uso de biomassa de segunda safra e os sistemas agroflorestais (Cherubini & Strømman, 2011; Chum *et al.*, 2011).

Adicionalmente, sob perspectiva conceitual, a iLUC não deveria ser exclusiva aos biocombustíveis. Qualquer aumento de demanda por alimentos, fibras ou matérias-primas que utilizem a terra como insumo pode gerar iLUC (Witcover *et al.*, 2013), inclusive o uso de área para sistemas energéticos como a geração solar fotovoltaica e a hidrelétrica. Ainda assim, a iLUC associada aos biocombustíveis tem recebido atenção desproporcional, pautando políticas e influenciando o debate sobre sua aceitação.

Como a iLUC não pode ser mensurada diretamente, recorre-se a modelos de simulação mediados por alterações nos preços das *commodities* agropecuárias e da terra para quantificá-la. No entanto, é crescente o consenso científico de que essas estimativas são cercadas de incertezas e limitações metodológicas (Liska & Perrin, 2009; Fargione *et al.*, 2010; Harvey & Pilgrim, 2011; Wicke *et al.*, 2012; Njakou & Ceulemans, 2012; Witcover *et al.*, 2013; Panichelli & Gnansounou, 2015; Humalisto, 2015; Rosa *et al.*, 2016; Efroyimson *et al.*, 2016; Noszczyk, 2018; Calvin *et al.*, 2021; Daioglou *et al.*, 2020; Balugani *et al.*, 2022; Taheripour *et al.*, 2024; Swietek, 2024; Escobar *et al.*, 2025).

As limitações tornam-se evidentes quando se comparam as diferentes estimativas de iLUC para um mesmo biocombustível, como evidencia a **Figura 1**. A compilação de 31 estudos sobre o tema, realizada por Daioglou *et al.* (2020), mostra, por exemplo, que etanol de cana-de-açúcar possui estimativas de iLUC variando de valores negativos — que sugerem reduções líquidas de CO₂ — a valores muito superiores aos de combustíveis fósseis, evidenciando a fragilidade do indicador.

Figura 1. Coeficientes para iLUC, medidos em kg CO eq./GJ para biodiesel e etanol, compilados de 31 estudos quantitativos para diferentes tipos de matérias-primas e métodos de avaliação



Nota 1: diferentes símbolos representam métodos e abordagens alternativas de projeção de iLUC. HLCA – modelos híbridos de análise de ciclo de vida (*Hybrid Life Cycle Assessment*); CGE – modelos computáveis de equilíbrio geral (*Computable General Equilibrium*); *Causal Descriptive* – modelos descritivos de causalidade; PE – modelos de equilíbrio parcial (*Partial Equilibrium*); *Empirical Approaches* – abordagens empíricas baseadas em observações e tendências históricas extrapoladas para o futuro.

Nota 2: os *box plots* indicam a média e o intervalo interquartil, com coeficientes para um período de amortização harmonizado de vinte anos.

Nota 3: GJ: Gigajoule – unidade de medida de energia.

Fonte: Daioglou *et al.* (2020)

Essa enorme dispersão das estimativas de emissões associadas à iLUC atestam que os modelos e métodos atualmente empregados não oferecem indicadores suficientemente confiáveis e precisos. Nessa perspectiva, dados de 2022 do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC, na sigla em inglês) destacam que impactos negativos decorrentes de mudanças indiretas poderiam ser atenuados ou compensados por meio da intensificação sustentável da produção agropecuária, de melhorias no manejo de culturas e da adoção de práticas como sistemas de agrossilviculturas, por exemplo. Como as decisões sobre o uso da terra envolvem uma rede heterogênea de atores — proprietários rurais, agricultores, empresas privadas, povos indígenas e comunidades locais —, processos de governança participativa também tendem a reduzir efeitos indesejados e ampliar os benefícios secundários associados à produção de bioenergia.

Medidas de apoio institucional e financeiro, fortalecimento de direitos à terra, boa governança, acesso a tecnologias e conhecimento, além de maior capacidade de monitoramento, reporte e verificação, são igualmente fundamentais para mitigar os riscos de reversão e os impactos adversos de atividades intensivas sobre a terra, segundo o IPCC (2022).

O IPCC (2022) recomenda, ainda, que a bioenergia e outras políticas de mitigação baseadas em terra sejam orientadas para a redução direta de emissões

e compatibilizadas com instrumentos de precificação de carbono. Isso porque a maneira mais eficaz de lidar com mudanças no uso da terra é internalizar os custos dessas emissões por meio da precificação (Melillo *et al.*, 2009) ou da extensão das políticas de carbono a todas as atividades emissoras e sumidouros (Searchinger *et al.*, 2009).

Apesar da falta de convergência científica sobre o tema, parâmetros de iLUC são amplamente adotados nas regulamentações existentes sobre biocombustíveis mundialmente. Em geral, sua aplicação é realizada a partir de penalização no balanço de carbono do biocombustível com o uso de coeficientes fixos para contabilizar as emissões associadas à iLUC, ou esta é simplesmente utilizada como critério para excluir a bioenergia como opção de energia limpa.

No programa Renewable Fuel Standard (RFS), dos EUA, por exemplo, os combustíveis renováveis aceitos para o cumprimento das metas de substituição de fósseis são classificados com base na redução de emissões de GEE oriundas do cálculo do ciclo de vida. Esse cálculo inclui as emissões estimadas para iLUC e enquadra o etanol de milho produzido nos EUA como combustível “Renovável Convencional”, uma vez que permite reduções de emissões próximas a 20% em relação ao combustível fóssil, enquanto o etanol de cana-de-açúcar brasileiro é classificado como “Combustível Avançado”, por possibilitar reduções em emissões superiores a 50%.

Na mesma linha, a legislação da Califórnia sobre combustíveis sustentáveis (California Low Carbon Fuel Standard – LCFS) adiciona as emissões de mudanças diretas e indiretas “induzidas” no uso da terra (iLUC) ao coeficiente de emissões obtido por meio de análises do ciclo de vida. As emissões de iLUC nessa legislação são calculadas utilizando um único modelo de equilíbrio geral, que simula os impactos do aumento da produção de um determinado biocombustível considerando os efeitos globais de tal aumento. Atualmente, o modelo de iLUC do LCFS atribuiu ao etanol de milho norte-americano o valor de 19,8 g CO₂ eq./MJ² e, ao etanol de cana-de-açúcar brasileiro, o valor de 11,8 g CO₂ eq./MJ.

A UE, por sua vez, não integra coeficientes de iLUC na sua legislação de incentivo a combustíveis renováveis. Contudo, vem progressivamente excluindo a possibilidade de contribuição de matérias-primas com alto risco de iLUC, sendo consideradas como alto risco, precipuamente, as fontes de bioenergia baseadas em culturas que produzem alimentos. Matérias-primas com baixo risco de iLUC, como resíduos, podem ser utilizadas no âmbito da política europeia. Ainda, os valores de dLUC devem ser calculados quando houver mudança direta no uso do solo, porém a dLUC em terras com altos estoques de carbono é proibida.

2 MJ: Megajoule – unidade de medida de energia.

Na mesma linha, valendo-se da definição utilizada pela UE, as matérias-primas com elevado risco de iLUC são proibidas no Canadá.

Já o Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA), da Associação Internacional de Aviação Civil (ICAO, na sigla em inglês), requer o cálculo e relato de dLUC individualizado no caso de conversão direta de terras para produção de biomassas para SAFs. Valores-padrão de iLUC são estimados por meio de dois modelos agroeconômicos de mudança no uso da terra (GTAP-BIO e GLOBIOM), que simulam a expansão da matéria-prima para o biocombustível em análise. O maior valor entre dLUC e iLUC é utilizado pelo programa, e biocombustíveis obtidos de terras com alto estoque de carbono são proibidos.

Os coeficientes de iLUC do CORSIA para as diferentes rotas de biocombustíveis sustentáveis de aviação que usam o milho como matéria-prima nos EUA variam entre 17,1 e 25,1 g CO₂ eq./MJ, enquanto os que usam cana-de-açúcar no Brasil variam entre 7,3 e 14,9 g CO₂ eq./MJ. Recentemente, após cerca de cinco anos de discussões e debates técnicos, adicionaram-se ao CORSIA coeficientes de iLUC para combustíveis à base de milho oriundo de áreas de segunda safra no Brasil, no valor de 9,3 g CO₂ eq./MJ, porém, de forma provisória (até 31 de dezembro de 2029), até futuros avanços nos modelos utilizados para tal cálculo, que, por enquanto, não representam explicitamente a produção conjunta de soja e milho em uma mesma área.

Adotando diretrizes mais próximas daquelas sugeridas pelo IPCC (2022), o RenovaBio não considera o cálculo de iLUC, mas evita as emissões associadas à dLUC por meio de critérios de elegibilidade. Esses critérios incluem a exigência de cumprimento da legislação ambiental brasileira e a proibição do uso de biomassa proveniente de áreas onde a vegetação nativa foi suprimida (política de “desmatamento zero”) — ambas comprovadas a partir de certificações realizadas por empresas de auditoria externa, com publicação dos dados para acesso irrestrito pela sociedade e validação pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).

A Associação Internacional de Transporte Marítimo (IMO, na sigla em inglês) também considera as emissões de biocombustíveis associadas ao ciclo de vida dos produtos, porém não impõe valores quantitativos de iLUC. Em vez disso, a IMO está desenvolvendo uma abordagem de “gestão de risco de iLUC”, em que pretende definir critérios para enquadrar diferentes tipos de combustíveis renováveis de acordo com o risco de eles gerarem iLUC.

Em síntese, é possível concluir que o uso de coeficientes de iLUC em políticas de biocombustíveis tem se mostrado uma abordagem limitada, marcada por incertezas metodológicas e com influência restrita aos agentes responsáveis

pelo uso da terra. Em vez de se apoiar em estimativas incertas, políticas públicas mais efetivas deveriam priorizar abordagens baseadas em risco e mecanismos que fortaleçam a governança fundiária, aumentem a produtividade agrícola e incentivem sistemas de baixo impacto. Exemplos incluem o uso de áreas degradadas, matérias-primas de segunda safra, resíduos e coprodutos, bem como práticas de intensificação sustentável da produção.

Experiências recentes reforçam essa perspectiva. No Brasil, a combinação de políticas de combate ao desmatamento com compromissos assumidos pelas cadeias de soja e pecuária demonstrou eficácia na redução de pressões sobre a floresta. Na Indonésia, a articulação entre o mecanismo Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal (REDD+, na sigla em inglês) e regulamentos nacionais de uso da terra produziu resultados semelhantes. Esses exemplos evidenciam que a bioenergia deve ser inserida em estratégias territoriais mais amplas, em vez de ser regulada de forma isolada a partir de parâmetros estimados por modelos que não foram desenhados para essa finalidade ou não retratam de maneira adequada os diferentes sistemas de produção de biocombustíveis.

2.2 O debate “*food vs. fuel*” e suas limitações conceituais

Assim como no caso das emissões associadas ao uso indireto da terra, as discussões acerca da suposta competição entre alimentos e energia também evidenciam fundamentos questionáveis e incompletos na imposição de barreiras à bioenergia.

A segurança alimentar depende de múltiplos fatores além do preço e da quantidade de alimentos ofertada, relacionando-se com dimensões interdependentes, como disponibilidade, acessibilidade, estabilidade e utilização. Nesse contexto, as abordagens usadas para avaliar impactos dos biocombustíveis sobre a segurança alimentar raramente capturam o conjunto dessas dimensões. Ademais, fatores distributivos e contextuais — como desigualdade de renda, choques macroeconômicos e conflitos — moldam a vulnerabilidade e a fome (von Grebmer *et al.*, 2014; FAO *et al.*, 2023; Allee *et al.*, 2021; Pawlak & Kołodziejczak, 2020; Frelat *et al.*, 2016) e costumam ser negligenciados em estudos quantitativos sobre o dilema “*food vs. fuel*”.

Elementos associados à produção de alimentos, à balança comercial e à estabilidade política, por exemplo, figuram entre os componentes mais influentes de indicadores de segurança alimentar, segundo Hernández-Pérez *et al.* (2025), mas as estimativas do impacto dos biocombustíveis sobre a segurança alimentar tendem a focar em poucos vetores — por exemplo, variações de preços de alimentos e/ou competição por terra (Searchinger *et al.*, 2015; Nazlioglu & Soytaş,

2012; Qiu *et al.*, 2012; Chen & Khanna, 2012; Chakravorty *et al.*, 2011; Hertel *et al.*, 2010).

Nessas análises, as interações e realimentações entre agricultura, energia, fatores primários (terra, trabalho e capital) e outros mercados são frequentemente omitidas, embora afetem oferta e preços, renda das famílias e seu poder de compra. Quando tais elementos são considerados, os biocombustíveis têm sido, inclusive, associados a efeitos positivos sobre a atividade econômica e a renda das famílias (Nkolo *et al.*, 2018; Gurgel *et al.*, 2024).

Em revisão sistemática realizada por Ahmed *et al.* (2021), é possível notar que os impactos dos biocombustíveis sobre a segurança alimentar dependem de localização geográfica, infraestrutura, tecnologia, políticas públicas, condições de mercado e matéria-prima. Dos 224 estudos analisados pelos autores, 56% reportaram algum impacto negativo; entre os que avaliaram preços ($n = 61$), 79% identificaram efeitos indesejáveis. Já impactos negativos sobre disponibilidade ($n = 26$) e produção de alimentos ($n = 66$) foram observados em apenas 31% e 44%, respectivamente.

Por outro lado, no nível domiciliar — onde efetivamente se decide renda e consumo —, 57% dos estudos avaliados por Ahmed *et al.* (2021) apontaram efeitos positivos associados à bioenergia. Em conjunto, esses achados sugerem que a percepção de competição entre alimentos e bioenergia é enviesada por avaliações centradas em preços e perde sustentação quando outras variáveis e dimensões são consideradas.

A ênfase em variações de preços como “termômetro” do dilema “*food vs. fuel*” também carece de respaldo nos estudos estatísticos e econométricos sobre determinantes da segurança alimentar. Kline *et al.* (2017), por exemplo, evidenciam fraca aderência entre índices de preços e segurança alimentar, assim como a insuficiência do uso de índices de preços ao consumidor como medidas de insegurança, pois estes dependem de mercados formais, que usualmente não são acessados de maneira adequada pelas populações mais vulneráveis.

Correlações de curto prazo entre biocombustíveis e preços — notadamente, nos picos de 2008 e 2011 — também foram indevidamente tratadas como causalidade. Estudos apontam determinantes alternativos para aqueles picos: preços do petróleo, crescimento econômico, câmbio, políticas comerciais e especulação financeira. No longo prazo, a produção e o consumo de biocombustíveis continuaram a crescer, ao passo que os preços de cereais seguiram trajetórias distintas, reforçando que causalidade não pode ser inferida de correlação (Kline *et al.*, 2017).

Outra constatação relevante do estudo de Kline *et al.* (2017) diz respeito ao horizonte temporal das análises de preço de alimentos x biocombustíveis, pois

muitos estudos críticos aos biocombustíveis apoiam-se em janelas temporais curtas, o que aumenta a chance de conclusões espúrias. A literatura sugere que os impactos sobre a segurança alimentar sejam mais bem avaliados por vetores estruturais — infraestrutura física, acumulação de ativos, capacidade institucional, capacitação, tecnologias que aumentam resiliência e segurança, estabilidade ecossistêmica, bem-estar cultural e outros mecanismos de enfrentamento —, usualmente ausentes dos índices de preços.

Em síntese, apesar dos sistemas de produção de biocombustíveis e a sua ligação com outras atividades econômicas variarem notadamente em função do tipo de matéria-prima, da localização geográfica e da organização da cadeia produtiva, muitas das pesquisas que associam biocombustíveis à segurança alimentar ignoram os efeitos da produção de biocombustíveis no crescimento econômico e seu consequente efeito na renda e no consumo das famílias.

Uma vez que limitam sua análise ao efeito do preço, essas análises negligenciam o papel do sistema de bioenergia na geração de renda e emprego e no aquecimento da atividade econômica via efeitos diretos e indiretos nos mercados de insumos e de fatores produtivos (terra, trabalho e capital). Quando a incorporação desses efeitos acontece, a expansão dos biocombustíveis tem sido associada a impactos positivos sobre a atividade econômica (Martínez *et al.*, 2013; Moraes *et al.*, 2015, 2016; Nkolo *et al.*, 2018; Brinkman *et al.*, 2018; Moreira *et al.*, 2020; Gurgel *et al.*, 2024).

Em outras palavras, análises científicas apuradas e de credibilidade do dilema “*food vs. fuel*” deveriam considerar que os sistemas de energia alimentar podem afetar os retornos econômicos do trabalho, capital e terra e, como consequência, impactar indiretamente outros mercados e escolhas do consumidor.

Assim como no caso da iLUC, esta breve revisão de literatura sobre o tema evidencia que os impactos da produção de bioenergia sobre a segurança alimentar podem variar de acordo com a localização geográfica, a infraestrutura nacional, a tecnologia e as políticas, o mercado global e a classe de matéria-prima para biocombustíveis, além de como as matérias-primas são distribuídas e processadas. Esses elementos reiteram a impossibilidade de generalizações indiscriminadas como forma efetiva de controle no desenho das políticas climáticas e de segurança alimentar.

3. REGULAÇÃO, POLÍTICAS PÚBLICAS E RESTRIÇÕES À BIOENERGIA TROPICAL

Nos últimos anos, a agenda climática introduziu novas exigências ambientais, que, embora apresentadas como instrumentos de sustentabilidade, funcionam, muitas vezes, como barreiras climáticas ao comércio e ao desenvolvimento das tecnologias tropicais de baixo carbono. No âmbito da política comercial, o Acordo Geral de Tarifas e Comércio (GATT, na sigla em inglês), de 1947, admite restrições com base na conservação ambiental desde que não configurem discriminação arbitrária e sejam igualmente aplicadas à produção doméstica. Quando esse critério não é atendido, a justificativa ambiental tende a se converter em uma roupagem para práticas essencialmente protecionistas, similar a uma barreira comercial não tarifária.

É nesse contexto que este capítulo expande os exemplos de políticas e regulações que restringem o uso de bioenergia. Sem a pretensão de desenvolver uma análise conceitual sobre barreiras climáticas, a proposta é reunir exemplos de políticas públicas que limitam o uso de biocombustíveis — seja ao proteger produtores de determinadas regiões, seja ao gerar distorções competitivas que favorecem tecnologias concorrentes da bioenergia, mesmo quando tais escolhas não se baseiam no efetivo potencial de descarbonização de cada alternativa.

Diante disso, a análise apresentada foi organizada a partir de três perguntas-chave: (i) a medida impõe proibições diretas ao uso de bioenergia? (ii) Gera custos adicionais e assimétricos quando comparada às alternativas? (iii) Concede benefícios desproporcionais a tecnologias concorrentes, comprometendo a neutralidade tecnológica?

Nesse contexto, a primeira iniciativa apresentada é o Regulamento da União Europeia nº 2019/631 (EU, 2019a), que define padrões de emissões de GEE para novos veículos de passageiros e comerciais leves, considerando apenas as emissões do escapamento (abordagem “tanque à roda”, como será detalhada no próximo capítulo). O limite de referência de 95 g CO₂/km, calculado em 2021, será progressivamente reduzido para 81 g CO₂/km em 2025 (-15%), 43 g CO₂/km em 2030 (-55%) e zero a partir de 2035. O desempenho de cada fabricante é avaliado pelo portfólio de vendas, e o descumprimento implica multa de € 95 por g CO₂ excedente por veículo.

Esse regulamento apresenta méritos, como a integração entre eficiência energética e eficiência ambiental em uma métrica única (emissões em g CO₂/km). Entretanto, ao considerar apenas as emissões de uso do veículo, desconsidera impactos relevantes em uma visão mais ampla do ciclo de vida para a mobilidade.

Assim, pode favorecer veículos elétricos, cujas emissões ocorrem na geração elétrica, especialmente quando utilizada de fontes fósseis, e na produção e reciclagem de baterias. Até 2035, essa condição cria uma vantagem assimétrica frente aos veículos com motores a combustão interna — ainda que movidos por combustíveis de baixo carbono — e, após essa data, implica sua exclusão do mercado europeu, mesmo quando as emissões sejam biogênicas.

Em seu histórico, o mencionado regulamento também continha um dispositivo que se apoiava em reduções artificiais de CO₂. Nos três primeiros anos de vigência (2020 a 2022), o regulador concedia os chamados “supercréditos”, que permitiam a aplicação de um multiplicador no cálculo das emissões específicas dos fabricantes para os veículos com emissão inferior a 50 g CO₂/km. Dessa forma, ao calcular a emissão média do portfólio de venda, os veículos dessa categoria usufruíram de um fator de majoração de 2 vezes em 2020, de 1,67 vez em 2021 e 1,33 em 2022. Com isso, os resultados subestimavam as emissões por quilômetro para os veículos elétricos e criavam incentivo adverso ao deslocamento das emissões para outras etapas da cadeia. O benefício na forma de multiplicadores era lastreado em uma contribuição positiva inexistente quanto ao enfrentamento do aquecimento global.

Na mesma linha, a Diretiva de Energias Renováveis da União Europeia (EU RED, 2024) estabelece que, até 2030, 40% da energia consumida no bloco deve ser proveniente de fontes renováveis. Para o setor de transportes, a meta é de 29%, acompanhada de uma redução de 14,5% na intensidade das emissões de GEE. No caso dos biocombustíveis elegíveis para atendimento da Diretiva, exige-se a comprovação de pelo menos 65% de redução de emissões frente ao combustível fóssil equivalente.

Embora reconheça o papel dos biocombustíveis no cumprimento das metas, a EU RED impõe restrições relevantes: (i) a exclusão de matérias-primas cultivadas em áreas de alta biodiversidade após 2008; (ii) a preferência por biocombustíveis fabricados a partir de resíduos e outras rotas dispostas no Anexo IX da RED (EU, 2024); (iii) o estabelecimento de um limite de 7% para biocombustíveis produzidos a partir de culturas alimentares, com base no nível observado em 2020, admitindo apenas um acréscimo marginal, além de incentivos para redução voluntária; (iv) a classificação como de alto risco de iLUC para os biocombustíveis cuja área de cultivo da matéria-prima tenha aumentado mais de 1% ao ano e 100.000 hectares, após 2008, e cuja expansão se deu em áreas de alto estoque de carbono em mais de 10%; e, (v) a eliminação gradual, até 2030, dos biocombustíveis classificados como de alto risco de iLUC. Contudo, os biocombustíveis com alto risco de iLUC podem submeter-se à possibilidade de certificação de baixo risco de iLUC, conforme o Regulamento Delegado (UE) 2019/807 (EU, 2019b), que prevê auditoria

detalhada de práticas agrícolas e uso da terra. Uma empresa que obtém a certificação tem seu produto isento dos limites estabelecidos.

A abordagem da RED possui a virtude de se afastar das controvérsias relacionadas à estimativa da iLUC e de empregar uma avaliação do seu risco de ocorrência. Concomitantemente, a certificação de baixo risco de iLUC incentiva práticas de aumento de produtividade e aproveitamento de áreas degradadas. Todavia, se o objetivo declarado para emprego dessas restrições é mitigar as externalidades negativas da iLUC, o procedimento adotado é também assimétrico. Ao basear-se em critérios amplos de expansão agrícola global, a Diretiva pode impor custos desproporcionais aos produtores de biocombustíveis, sem estabelecer exigências equivalentes a outras fontes energéticas também relacionadas a alterações no uso da terra, como energias solar e hidrelétrica (van de Ven *et al.*, 2021; Alsaleh, Abdulwakil & Abdul-Rahim, 2021).

Outro aspecto crítico é a aplicação de multiplicadores ao conteúdo energético de determinadas fontes: 2 vezes para biocombustíveis avançados e combustíveis renováveis não biológicos, 4 vezes para eletricidade em transporte rodoviário, 1,5 vez para ferroviário e bônus menores para aviação e navegação. Esse mecanismo amplia artificialmente a contribuição de certas fontes no cumprimento das metas, sem corresponder a reduções efetivas de emissões, criando vantagens assimétricas frente aos biocombustíveis convencionais, mesmo quando certificados como de baixo risco de iLUC.

Complementarmente, a ReFuelEU (EU, 2023) estabelece mandatos progressivos de mistura de combustíveis sustentáveis de aviação (SAFs, na sigla em inglês) ao querosene fóssil utilizado nos voos do bloco: 2% em 2025, 6% em 2030 e 70% em 2050. Embora adote princípios de sustentabilidade da RED, essa regulação restringe ainda mais o espaço dos biocombustíveis convencionais, ao excluí-los integralmente de sua definição de SAF. Não há proibição direta de uso físico dessas moléculas, mas sua exclusão do cálculo regulatório impede que contribuam para o cumprimento das metas de descarbonização dos voos europeus. A justificativa recai sobre riscos de desmatamento direto e indireto, ainda que permaneça a possibilidade de certificação de baixo risco de iLUC como condição de elegibilidade. Diferentemente da RED, a ReFuelEU não adota multiplicadores, mas cria uma subquota exclusiva para combustíveis sintéticos, válida a partir de 2030 e crescente até 2050, assegurando mercado preferencial a essa tecnologia.

No plano internacional da aviação, destaca-se o Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA), conduzido pela Associação Internacional de Aviação Civil (ICAO, na sigla em inglês). O programa iniciou em caráter voluntário (2021-2026) e se tornará obrigatório em 2027, cobrindo praticamente todo o tráfego aéreo internacional, com exceção de países de baixa

representatividade. Entre 2024 e 2035, o CORSIA estabelece como meta a redução de 15% das emissões em relação a 2019, priorizando o uso de rotas de SAF aceitas pelo programa. A elegibilidade depende de certificação que avalia o ciclo de vida completo (“poço à queima”), incluindo emissões de iLUC, e requer redução mínima de 10% em comparação ao querosene fóssil (ICAO, 2025a).

O caso do etanol de milho brasileiro ilustra as controvérsias associadas a esse critério. Até 2025, o fator-padrão atribuído pelo CORSIA (26,2 g CO₂ eq./MJ) penalizava severamente essa rota. Após revisão metodológica, reconheceu-se a especificidade do milho de segunda safra, cultivado em rotação com a soja, resultando em fator de 9,3 g CO₂ eq./MJ (ICAO, 2025b). Esse reconhecimento foi possível, entre outros aspectos, graças à certificação de baixo risco de iLUC obtida por um produtor brasileiro, revelando como critérios excessivamente conservadores podem impor custos assimétricos que atuam como barreiras climáticas.

No contexto norte-americano, o Renewable Fuel Standard (RFS) estabelece metas obrigatórias de substituição de combustíveis fósseis, cumpridas com o uso dos Renewable Identification Numbers (RINs), certificados emitidos a cada volume de biocombustível produzido (EPA, 2025a). Esses créditos podem ser negociados no mercado regulado, configurando um mecanismo de descarbonização baseado em incentivos. Os biocombustíveis são classificados de acordo com sua redução mínima de emissões frente ao fóssil: 20% para convencionais, 50% para avançados e 60% para celulósicos.

Embora os biocombustíveis importados sejam formalmente elegíveis, as regras de contabilização criam assimetrias. O etanol de cana brasileiro, por exemplo, é classificado como “avançado”, mas o etanol de milho, mesmo produzido sob uma dinâmica agrícola distinta da norte-americana, recebe a mesma penalização de iLUC do etanol norte-americano e permanece na categoria “convencional”.

Mais recentemente, surgiram restrições adicionais aos biointermediários, insumos renováveis parcialmente processados destinados à produção de biocombustíveis finais. A regulação norte-americana exige segregação física durante o transporte e documentação rigorosa para rastreamento das movimentações, gerando custos logísticos e criando restrições operacionais que afetam, sobretudo, os exportadores de produto para o mercado americano, cuja segregação do volume físico é exigida durante o transporte marítimo.

A proposta da EPA para 2026-2027 (EPA, 2025b) reforça essa assimetria ao estabelecer que a emissão de RINs por volume de biocombustível importado represente apenas metade do valor daquela concedida ao equivalente nacional, mesmo quando os importados apresentam desempenho ambiental superior. Essa

medida, explicitamente adotada como forma de apoiar a indústria doméstica e reduzir a dependência externa, abandona qualquer retórica climática e assume natureza de barreira comercial clássica.

Em síntese, os exemplos analisados revelam que a regulação internacional da bioenergia tem oscilado entre avanços relevantes no reconhecimento de seu papel climático e a adoção de critérios que, sob a justificativa ambiental, impõem custos assimétricos e funcionam como barreiras comerciais. Seja pela adoção de métricas parciais de emissões, pelo uso de multiplicadores artificiais ou pela aplicação assimétrica do risco de iLUC, observa-se um padrão de políticas que frequentemente ignora as especificidades produtivas e contextuais de países tropicais.

Para que a bioenergia possa contribuir de forma plena e eficiente à transição energética, será necessário repensar tais instrumentos regulatórios, de modo a impor um tratamento adequado às soluções energéticas. Isso passa pela definição de um escopo de emissões que não permita o vazamento para outras etapas da cadeia, pelo fim do uso de multiplicadores que tenham como princípio a superioridade inerente de uma solução frente à outra e pelo reconhecimento das especificidades locais de cada sistema produtivo. Dessa forma, a regulação deve premiar as tecnologias que atestem maior contribuição para redução das emissões de GEE, alinhando o atendimento de metas climáticas à segurança energética e justiça no comércio internacional.

Nesse contexto, o capítulo seguinte examina minuciosamente o papel da bioenergia brasileira na descarbonização da matriz de combustíveis leves e mostra como essa alternativa — ainda pouco reconhecida — se situa frente às estratégias e tecnologias privilegiadas em países desenvolvidos, cuja disponibilidade de recursos financeiros favorece a aceleração de suas opções energéticas.

4. A MOBILIDADE DE BAIXO CARBONO COM BIOENERGIA AGROPECUÁRIA

Para avaliar os resultados das emissões de GEE do modelo brasileiro de biomobilidade (deslocamento veicular com o uso de biocombustíveis) e atestar a efetividade de soluções tropicais baseadas em bioenergia, a análise desenvolvida neste capítulo baseia-se em estudos de Análise do Ciclo de Vida (ACV) e em parâmetros consolidados por dezenas de pesquisas científicas, tendo como referência comparativa os mercados dos EUA, da China e da UE (UE-27), conforme detalhado nas próximas seções.

4.1 Abordagem metodológica e estratégia empírica

4.1.1 Definição das classes de veículos e Análise do Ciclo de Vida (ACV)

O presente exame concentra-se no mercado de combustíveis leves, notadamente os veículos do chamado “ciclo Otto”³. Embora exista ampla diversidade de classificações para as rotas de motorização e tecnologias automotivas, adota-se, para fins analíticos e didáticos, a delimitação em quatro tipologias: **(i)** veículos com motor a combustão interna com ignição por centelha (*internal combustion engines* – ICEs); **(ii)** veículos híbridos completos (*hybrid electric vehicles* – HEVs); **(iii)** veículos híbridos recarregáveis (*plug-in hybrid electric vehicles* – PHEVs); e **(iv)** veículos elétricos a bateria (*battery electric vehicles* – BEVs).

A taxonomia utilizada segue as diretrizes estabelecidas pela norma NBR 16567 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Tal referência foi selecionada por manter correspondência direta com as categorias reconhecidas na política brasileira de mobilidade e, simultaneamente, preservar convergência com conceitos consolidados mundialmente.

Nesse enquadramento, o **veículo híbrido recarregável (PHEV, na sigla em inglês)** é definido como aquele que integra um sistema de tração elétrica com tecnologia de recarga externa, podendo operar de forma conjunta ou independente de um motor de pistão alternativo. Nessa configuração, o motor elétrico deve possuir capacidade de propulsionar o veículo autonomamente, sem a assistência do motor a combustão interna.

De modo análogo, o **veículo híbrido completo (HEV, na sigla em inglês)** caracteriza-se pela presença de tração elétrica, mas sem tecnologia de recarga externa. Nesse caso, o motor elétrico pode funcionar em conjunto ou separadamente de um motor de pistão alternativo. Os modelos do tipo HEV distinguem-se claramente dos **veículos híbridos leves (*mild hybrid vehicles*)**, nos quais a propulsão exige necessariamente a participação do motor a combustão interna. Para os fins desta análise, os híbridos leves são incorporados na ponderação de frota do grupo de veículos convencionais a combustão (ICEs, também em inglês)⁴.

³O termo “ciclo Otto” refere-se ao ciclo termodinâmico associado ao funcionamento dos motores de combustão interna com ignição por centelha e remete ao engenheiro alemão Nikolaus August Otto, responsável pela implementação com sucesso desse sistema.

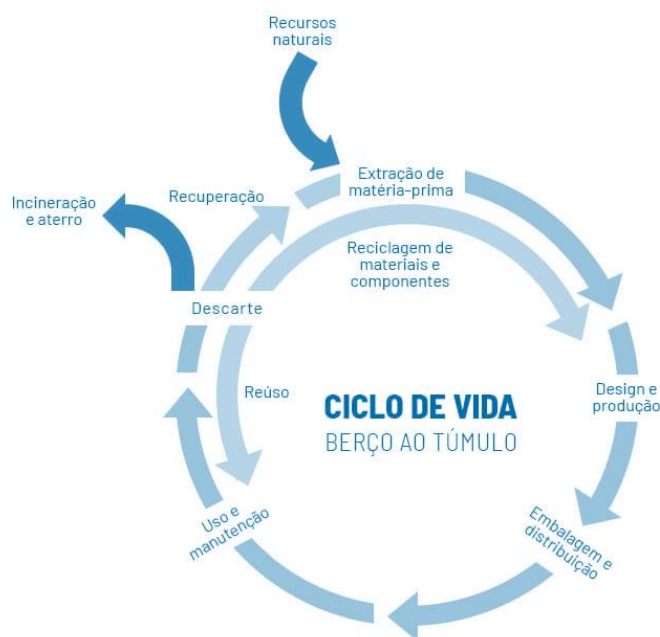
⁴Os veículos híbridos leves (MHEV, na sigla em inglês) não possuem capacidade de tração exclusivamente elétrica. O sistema elétrico auxilia o motor principal em situações específicas, como partidas, acelerações transitórias e subsistemas auxiliares. Essa configuração tecnológica, de menores custo e complexidade,

Por fim, o **veículo elétrico a bateria (BEV, na sigla em inglês)** tem a sua operação exclusivamente a partir da energia armazenada em baterias recarregáveis, as quais são abastecidas por fonte externa e responsáveis pela alimentação integral dos motores elétricos de tração.

No contexto brasileiro, a frota de combustíveis leves é composta predominantemente por ICEs com tecnologia *flex-fuel*, além de BEVs, PHEVs movidos a gasolina e HEVs em versões *flex-fuel* ou dedicadas exclusivamente a gasolina.

Delimitadas as categorias de veículos, adotou-se a metodologia consolidada internacionalmente para a avaliação quantitativa dos impactos ambientais associados a um produto, processos ou serviços, conhecida como Análise do Ciclo de Vida (ACV). Esse ferramental propõe contabilizar e interpretar fluxos de matéria e energia associados a todas as etapas da vida útil de um bem, desde a extração dos recursos naturais até o descarte ou reaproveitamento final (ISO⁵, 2006a; ISO, 2006b), conforme a **Figura 2**.

Figura 2. Diagrama conceitual da avaliação do ciclo de vida do “berço ao túmulo”



Fonte: adaptado a partir de UNEP (2004).

A visão abrangente da ACV é comumente descrita pela expressão “berço ao túmulo” (*cradle-to-grave*), embora etapas intermediárias, como “berço ao portão”

proporciona ganhos de eficiência energética usualmente entre 5% e 15% na comparação com os ICEs (IEA, 2022; ICCT, 2023).

⁵ International Organization for Standardization.

(*cradle-to-gate*) e “berço ao berço” (*cradle-to-cradle*), também sejam aplicadas conforme o escopo do estudo (Baumann & Tillman, 2004).

Sob a perspectiva *cradle-to-grave*, a análise inicia-se na extração de recursos naturais, frequentemente associada a elevados impactos ambientais, como a degradação de ecossistemas, as emissões decorrentes do uso de combustíveis fósseis e a poluição hídrica (Guinée *et al.*, 2002). A etapa subsequente, de produção e processamento, demanda elevada quantidade de energia e resulta em emissões de poluentes e geração de resíduos sólidos. Já transporte e logística adicionam impactos relacionados ao consumo de combustíveis fósseis e às emissões de dióxido de carbono e óxidos de nitrogênio, variando de acordo com o modal, a eficiência e a distância percorrida (Cherubini *et al.*, 2009).

Conforme ilustrado na **Figura 3**, no contexto da mobilidade, a etapa “**berço ao portão**” compreende as emissões associadas à extração e ao processamento das matérias-primas, à produção de componentes e à montagem dos veículos. Já a análise “**poço à roda**” foca na avaliação dos combustíveis e da eficiência energética dos veículos, abrangendo desde a produção e transporte das fontes energéticas (petróleo, gás, eletricidade, biocombustíveis) até sua conversão em energia mecânica para movimentar o veículo. A fase de “**fim de vida**” (*end-of-life*), por sua vez, considera o destino do veículo após o término de seu uso, incluindo a desmontagem, a reciclagem de materiais (como aço, alumínio e baterias), o tratamento de resíduos e a disposição em aterros.

Essa perspectiva sistêmica proporcionada pela análise do “**berço ao túmulo**” é amplamente reconhecida na literatura científica e por organismos internacionais, como a Agência Internacional de Energia (IEA, na sigla em inglês), que apontam a ACV como ferramenta essencial para fundamentar políticas de descarbonização do transporte. Os estudos de Russo *et al.* (2023), Hawkins *et al.* (2013), Ellingsen *et al.* (2016), Cox *et al.* (2018), Marini *et al.* (2023), Ribeiro *et al.* (2024), entre outros, reiteram que somente a avaliação completa no escopo “berço ao túmulo” permite capturar integralmente os impactos ambientais associados a cada estágio do ciclo de vida dos veículos — da extração de matérias-primas ao descarte final.

Figura 3. Diagrama conceitual das diferentes etapas da ACV aplicada à mobilidade leve



Fonte: adaptado a partir de Rodrigues (2024) e UNICA (2025)

Isso posto, de forma didática e objetiva, o diagrama apresentado na **Figura 3** pode ser representado a partir da seguinte equação:

$$C2G = CTG + WTW + EOL \quad (1.0)$$

em que:

C2G = representa as emissões em gramas de dióxido de carbono equivalente (g CO₂ eq.) por quilômetro rodado (km) no ciclo “berço ao túmulo” ou “*cradle-to-grave*”;

CTG = representa as emissões em g CO₂ eq./km do “berço ao portão” ou “*cradle-to-gate*”;

WTW = representa as emissões em g CO₂ eq./km do “poço à roda” ou “*well-to-wheel*”;

EOL = representa as emissões em g CO₂ eq./km no “fim de vida” ou “*end-of-life*”.

Cada um desses elementos pode ser decomposto e calculado conforme as equações (2.0) a (4.0) a seguir:

$$CTG_{\left(\frac{g \text{ CO}_2 \text{ eq.}}{km}\right)} = \frac{GHGE_{(g \text{ CO}_2 \text{ eq.})}}{LT_{(km)}} \quad (2.0)$$

em que:

CTG = representa as emissões em g CO₂ eq./km do “berço ao portão” ou “*cradle-to-gate*”;

GHGE = representa as emissões, em g CO₂ eq., incorporadas na produção dos veículos, peças e componentes;

LT = representa os quilômetros rodados durante a vida útil do veículo.

$$WTW_{\left(\frac{g \text{ CO}_2 \text{ eq.}}{km}\right)} = \sum_{i \in FE} \frac{IC_i(g \text{ CO}_2/MJ) \times UF_i(\%)}{EE_i(MJ/km)} \quad (3.0)$$

em que:

WTW = representa as emissões em g CO₂ eq./km do “poço à roda” ou “*well-to-wheel*”;

IC_i = representa a intensidade de carbono da fonte energética i pertencente ao conjunto de fontes energéticas FE = {etanol, gasolina, energia elétrica}, medida em gramas de dióxido de carbono equivalente por megajoule (g CO₂ eq./MJ);

UF_i = representa o fator de uso de cada fonte energética i para os veículos aptos a utilizarem mais do que um tipo de combustível, sendo $\sum_{i \in FE} UF_i = 100\%$;

EE_i = representa a eficiência energética do veículo para uso de cada fonte energética i para os veículos aptos a utilizarem mais do que um tipo de combustível.

$$EOL_{\left(\frac{g \text{ CO}_2 \text{ eq.}}{km}\right)} = \frac{GHGR_{(g \text{ CO}_2 \text{ eq.})}}{LT_{(km)}} \quad (4.0)$$

em que:

EOL = representa as emissões em g CO₂ eq./km no “fim de vida” ou “*end-of-life*”;

GHGR = representa as emissões, em g CO₂ eq., associadas aos descartes e reciclagem dos veículos, peças e componentes;

LT = representa os quilômetros rodados durante a vida útil do veículo.

As equações apresentadas requerem a definição explícita dos parâmetros previstos no cálculo das emissões em cada rota tecnológica. A determinação desses parâmetros baseou-se na construção de uma base de dados consolidada a partir de extensa revisão bibliográfica. Trata-se, assim, de um esforço metodológico voltado à identificação de valores de referência representativos de cada mercado.

A avaliação, portanto, não se destina à realização de cálculos de engenharia específicos ou à estimativa de parâmetros individualizados para cada situação de produção, já que o nível de emissões nas diferentes etapas do ciclo produtivo é condicionado por variáveis contextuais, tais como a tipologia e massa veicular, a matriz energética empregada nos processos industriais, entre outras.

Com o intuito de reduzir esses efeitos associados à agregação por classes de veículos e mercados, o estudo também incorpora análises de sensibilidade e intervalos de variação nos cálculos envolvendo parâmetros com maior heterogeneidade. Assim, a despeito dessas limitações, os resultados obtidos permitem uma avaliação comparativa consistente do desempenho climático da biomobilidade no Brasil em relação às rotas tecnológicas observadas nos três mercados de referência.

4.1.2 Parâmetros utilizados no cálculo das emissões no ciclo “berço ao portão”

Seguindo o detalhamento da equação (2.0), a estimativa das emissões de GEE na etapa “berço ao portão” requer a contabilização do CO₂ emitido ao longo da produção dos veículos, peças e componentes, incluindo a extração de matérias-primas. Para esta avaliação, foram consolidados estudos e relatórios que avaliaram mais de uma centena de análises e cenários sobre o tema.

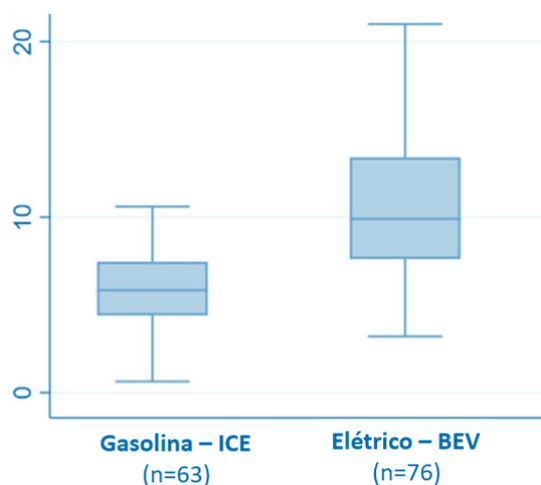
Nessa linha, Hankins (2012) identificou valores em torno de 6 tCO₂eq. para as emissões na etapa de produção dos veículos para tecnologias ICE, 9 tCO₂eq. para os HEV e emissões próximas de 9,5 tCO₂eq. para os veículos PHEV. Gan et al. (2020), utilizando as características produtivas da China, chegou a valores superiores para todas as categorias, atingindo 12,8 tCO₂eq. para os veículos ICE, 13 tCO₂eq. para os HEV e 20,8 tCO₂eq. no caso dos BEV.

Tang et al. (2023), por sua vez, em análise similar utilizou parâmetros atingindo 7.948 Kg CO₂eq. para veículos ICE, 9.447 Kg CO₂eq. para veículos HEV, 10.324 Kg CO₂eq. para veículos PHEV e 10.167 Kg CO₂eq. para veículos BEV. Utilizando metodologia padronizada aplicada a diferentes tipos de veículos, Green NCAP (2025) indicam emissões para os veículos ICE variando de 5 a 7 tCO₂eq., para os HEV entre 6 a 8 tCO₂eq., para os PHEV variando de 7 a 9 tCO₂eq. e para os BEV valores no intervalo de 10 e 16 tCO₂eq. por veículo.

Bothe e Steingort (2020), a partir de meta análise com 63 estudos para veículos ICE e 76 trabalhos para a rota BEV, identificaram valor médio em torno de 6 tCO₂eq. por veículo para veículos ICE, com intervalo interquartil de 4,5 a 7,5 tCO₂eq. (**Gráfico 1**). No caso do BEV, a mediana atingiu cerca de 10 tCO₂eq., com intervalo entre 7,5 e 14 tCO₂eq.

Em análise similar, Dillman et al. (2020) avaliou quase cinquenta diferentes cenários, com as emissões na etapa de produção dos veículos variando entre 3 e 12,5 tCO₂eq. para tecnologia ICE, com valores mais recorrentes em torno de 6,5 tCO₂eq. por veículo. Para os BEV, os autores registraram emissões mais elevadas, variando de 6,5 a 16 tCO₂eq. ao longo da primeira etapa de análise do ciclo de vida (**Gráfico 2**).

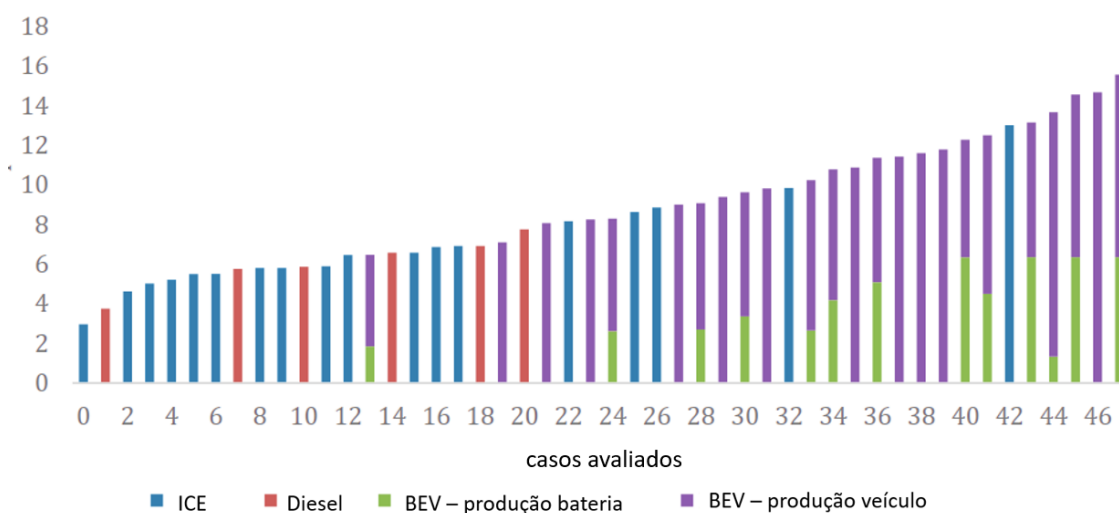
Gráfico 1. Emissões associadas à fabricação dos veículos ($tCO_{2eq}/veículo$).



Nota: ICE (veículo com motor a combustão interna), BEV (veículo elétrico a bateria).

Fonte: Bothe e Steingort (2020).

Gráfico 2. Estimativa de emissões associadas à fabricação dos veículos ($tCO_{2eq}/veículo$).



Nota: ICE (veículo com motor a combustão interna), BEV (veículo elétrico a bateria).

Fonte: Dillman et al. (2020).

A avaliação conduzida por esses e outros estudos sobre o tema evidencia que as estimativas apresentam dispersão não desprezível, em razão da influência de

múltiplos fatores, tais como o modelo veicular, o sistema produtivo empregado, os componentes utilizados e a matriz energética adotada na fabricação, entre outros

Não obstante essa variabilidade, é convergente o entendimento de que os veículos com motor a combustão interna (ICEs) apresentam emissões iniciais inferiores às alternativas elétricas na etapa denominada “berço ao portão”. Os dados disponíveis reforçam a correlação direta entre o aumento da capacidade da bateria e a elevação proporcional das emissões no processo de produção.

Tal resultado era esperado, considerando as particularidades produtivas dos veículos eletrificados e, sobretudo, a elevada intensidade de carbono associada à cadeia de suprimento das baterias. Em média, observa-se que os BEVs apresentam emissões iniciais cerca de duas vezes superiores às dos ICEs, o que impõe a necessidade de compensação em etapas subsequentes do ciclo de vida — especialmente na fase “poço à roda” — para que o benefício ambiental se concretize.

Nesse contexto, para fins da análise ora proposta, foram definidos valores de referência para as diferentes rotas de descarbonização veicular, a saber: 6.500 kg CO₂eq para veículos com motor a combustão interna (ICEs), 8.000 kg CO₂eq para híbridos completos (HEVs), 10.000 kg CO₂eq para híbridos plug-in (PHEVs) e 12.500 kg CO₂eq para veículos elétricos a bateria (BEVs). Associados a esses valores médios identificados na literatura, estabeleceu-se um intervalo de variação para cada categoria, de modo a assegurar representatividade adequada na análise de sensibilidade dos resultados (**Tabela 1**).

O segundo parâmetro considerado para a estimativa das emissões de GEE no ciclo “berço ao portão” refere-se à quilometragem definida para a vida útil dos veículos. Alinhado com os valores adotados pelos estudos apresentados na **Tabela 2**, estabeleceu-se o valor de 200 mil quilômetros como referência aplicável a todos os tipos de veículos e mercados avaliados.

Tabela 1. Estimativa de emissões na produção dos veículos (kg CO₂ eq.)

Tipo de tecnologia	Referência	Intervalo
ICE	6.500	5.500-7.500
HEV	8.000	7.000-9.000
PHEV	10.000	8.000-12.000
BEV	12.500	10.000-15.000

Nota: ICE (veículo com motor a combustão interna), HEV (veículo híbrido completo), PHEV (veículo híbrido recarregável), BEV (veículo elétrico a bateria).

Fonte: elaborada pelos autores.

Tabela 2. Estimativa para a vida útil do veículo (km)

Referência	Quilometragem
Gan (2023)	200.000
Oda et al. (2022)	150.000
Joshi, Sharma e Baral (2022)	200.000
Zheng e Peng (2021)	150.000
Bothe e Steingort (2020)	150.000
Bekel e Pauliuk (2019)	150.000
Kawamoto et al. (2019)	200.000
Li et al. (2019)	260.000
Wu et al. (2018)	150.000
Bauer et al. (2015)	240.000
Tagliaferri et al. (2015)	150.000
Message et al. (2014)	230.500
Hawkins et al. (2013)	150.000
Hawkins et al. (2012)	200.000
Gao e Winfield (2012)	256.000

Fonte: elaborada pelos autores.

4.1.3 Parâmetros utilizados no cálculo das emissões no ciclo “poço à roda”

4.1.3.1 Intensidade de carbono da fonte de energia

O cálculo das emissões de GHG no ciclo “poço à roda” exige a definição da intensidade de carbono (IC) das diferentes fontes de energia utilizadas no setor de transportes. Essa medida é usualmente expressa em gramas de CO₂ equivalente por megajoule (g CO₂ eq./MJ), avaliadas todas as etapas de produção do combustível.

Para a gasolina pura, os valores de referência adotados em políticas internacionais situam-se entre 87 e 95 g CO₂ eq./MJ (**Tabela 3**). A baixa dispersão decorre do fato de que a maior parte das emissões do derivado de petróleo ocorre na própria combustão, reduzindo a influência relativa das fases de extração, refino e distribuição.

Tabela 3. Intensidade de carbono da gasolina adotada internacionalmente (g CO₂ eq./MJ)

	Intensidade de carbono
RenovaBio (Brasil)	87,4
LCFS (EUA)	89,1
RFS (EUA)	93,0

Fonte: elaborada a partir do regulamento das políticas RenovaBio (ANP, 2018), LCFS (CARB, 2020), RFS (EPA, 2010) e RED II (UNIÃO EUROPEIA, 2018)

O etanol, por sua vez, apresenta perfil distinto: sua principal fonte de emissões concentra-se na etapa agrícola, notadamente pelo uso de corretivos, fertilizantes nitrogenados e diesel nas operações de campo e no transporte da biomassa. Consequentemente, a IC do biocombustível varia significativamente conforme as características de cada sistema produtivo, que diferem entre países e regiões.

Assim, para a definição da IC do etanol, foram apurados valores registrados nas legislações e sistemas regulados de certificação. No Brasil, a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) já certificou mais de 290 unidades produtoras, todas com pegada de carbono auditada. De forma semelhante, o Low Carbon Fuel Standard (LCFS) da Califórnia conta com mais de 190 unidades certificadas. Em contraste, tanto o Renewable Fuel Standard (RFS), dos EUA, quanto a Renewable Energy Directive II (RED II), da UE, não publicam resultados individualizados por produtor, mas estimaram valores de referência representativos de diferentes rotas tecnológicas.

No RFS, a mediana da IC do etanol é de aproximadamente 36 g CO₂ eq./MJ, com baixa dispersão, reflexo da predominância de rotas baseadas no processamento de milho com baixo teor de umidade e no uso de gás natural como principal insumo energético. Na RED II, a mediana situa-se em torno de 30 g CO₂ eq./MJ, mas com maior amplitude interquartil (28 a 45 g CO₂ eq./MJ). Essa maior variabilidade sugere a incorporação de diferentes rotas de produção na UE, incluindo cenários em que o uso de insumos fósseis no processo industrial eleva a IC final.

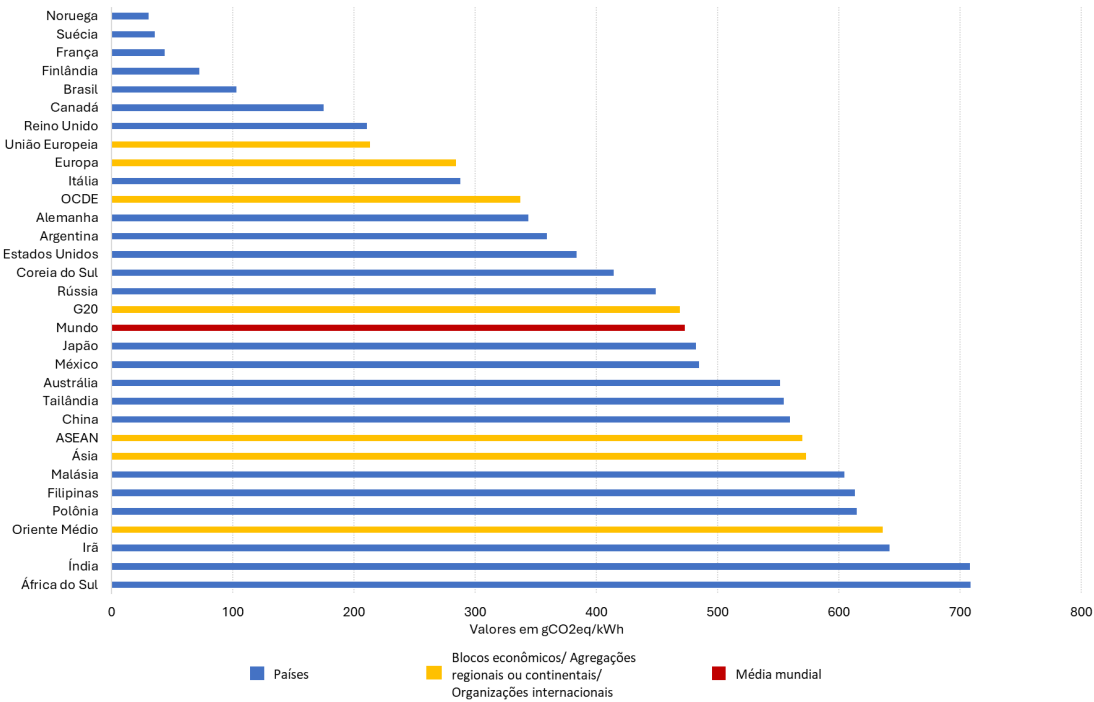
Para garantir uma estimativa homogênea e, ao mesmo tempo, conferir maior transparência e robustez à análise dos resultados, adotou-se como referência para a IC do etanol o valor médio obtido a partir de dados primários das empresas certificadas no RenovaBio, correspondente a 23,0 g CO₂ eq./MJ (Embrapa, 2024).

Adicionalmente, com o propósito de contemplar uma abordagem conservadora — ainda que se reconheçam as controvérsias metodológicas amplamente discutidas na literatura e detalhadas no capítulo 2 —, foi aplicado um fator médio de iLUC de 10 g CO₂ eq./MJ, o que possibilitou a construção de dois cenários analíticos: um sem (referência) e outro com a incorporação desse componente. O valor de iLUC adotado situa-se no intervalo de 7 a 14 g CO₂ eq./MJ, comumente empregado por programas internacionais que integram esse parâmetro em suas avaliações.

No caso da IC para a energia elétrica, o parâmetro, expresso em gramas de CO₂ equivalente por quilowatt-hora (g CO₂ eq./kWh), é determinado essencialmente pela participação das diferentes fontes na matriz elétrica de cada país. Conforme dados apresentados no **Gráfico 3** a seguir, o Brasil situa-se de forma persistente entre os países de menor emissão específica, em torno de 100 g CO₂ eq./kWh. Esse resultado decorre da expressiva dominância histórica da hidroeletricidade e, mais recentemente, da expansão de fontes eólicas e fotovoltaicas.

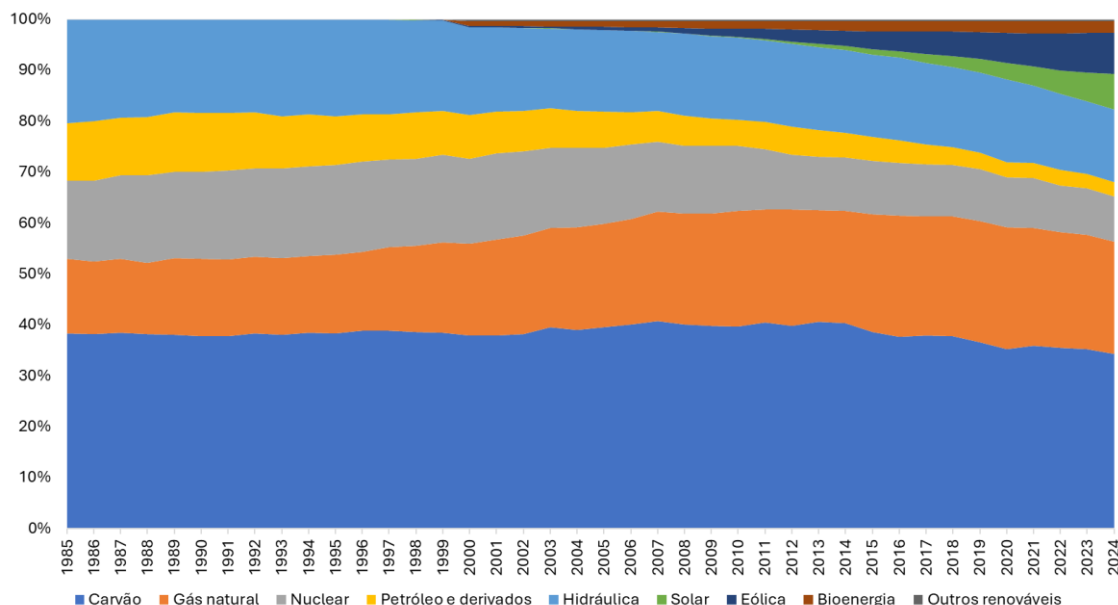
Em contraste, a média mundial permanece quatro vezes acima, na faixa de 400 a 450 g CO₂ eq./kWh, reflexo da elevada dependência de carvão e gás natural em grandes sistemas elétricos, com apenas cerca de 30% da geração global advinda de fontes renováveis (**Gráfico 4**).

Gráfico 3. Intensidade de carbono da matriz elétrica em 2024 (g CO₂ eq./kWh)



Fonte: Ember e Energy Institute — Statistical Review of World Energy (2025)

Gráfico 4. Composição da matriz elétrica mundial por fonte de energia (%)

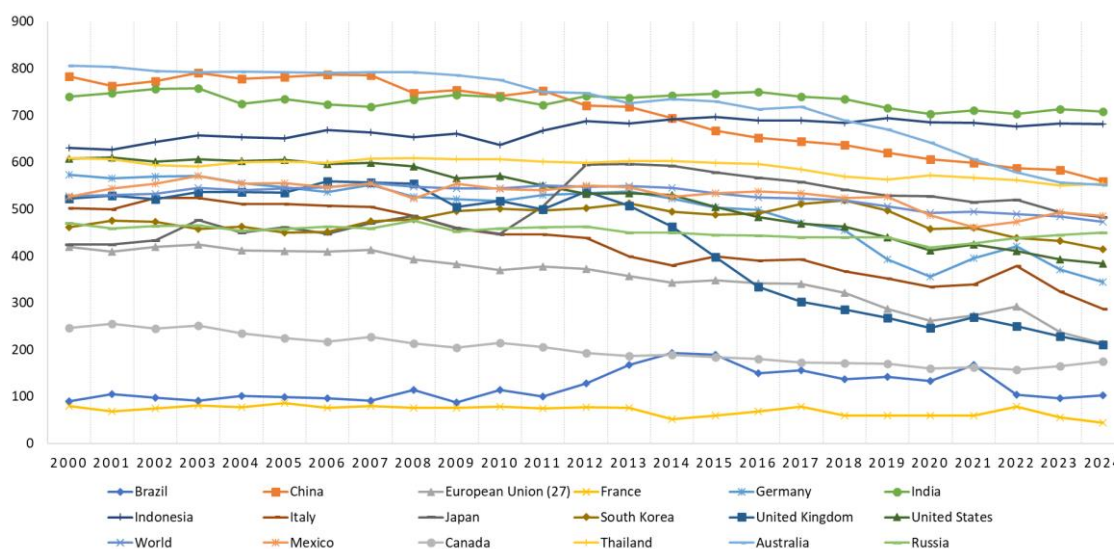


Fonte: Ember e Energy Institute — Statistical Review of World Energy (2025)

Entre as principais economias mundiais, observa-se elevada heterogeneidade. A França exibe uma das intensidades mais baixas do mundo (40 a 60 g CO₂ eq./kWh), sustentada por uma base elétrica composta em 70% de energia nuclear. A Alemanha, após a redução da participação do carvão e a forte penetração de eólicas e solares, apresenta valores intermediários (300 a 400 g CO₂ eq./kWh). Os EUA também ocupam patamar intermediário (380 a 450 g CO₂ eq./kWh), com predominância do gás natural e cerca de 25% de renováveis, liderados pelas energias eólica e fotovoltaica.

Nos países de maior população mundial, a intensidade permanece nos patamares mais elevados devido à forte dependência do carvão. A China registra valores acima de 550 g CO₂ eq./kWh, mas com trajetória de queda (*vide Gráfico 5*). A Índia, por sua vez, mantém índices de pegada de carbono superiores a 700 g CO₂ eq./kWh, refletindo uma matriz ainda dependente do carvão (75%) e com renováveis restritas a cerca de 20% da oferta interna.

Gráfico 5. Evolução da intensidade de carbono da matriz elétrica nos últimos 25 anos (g CO₂ eq./kWh)



Fonte: Ember e Energy Institute — Statistical Review of World Energy (2025)

Diante desse panorama comparativo, evidencia-se que a descarbonização do setor elétrico constitui elemento central para o avanço da mobilidade de baixo carbono via eletrificação.

Cabe ressaltar, ainda, que a trajetória de redução das emissões na matriz elétrica observada em vários países no **Gráfico 5**, fortemente impulsionada pela expansão das fontes eólica e solar, tende a enfrentar resistência adicional à medida que sua participação relativa se eleva. Em estágios iniciais de penetração, essas fontes renováveis conseguem deslocar com eficiência a geração fóssil marginal, promovendo reduções expressivas de emissões. Contudo, quando atingem parcelas mais elevadas do *mix* energético, o caráter intermitente intensifica os desafios de integração ao sistema, ampliando a ocorrência de *curtailment*, aumentando a necessidade de investimentos em armazenamento e demandando maior flexibilidade da rede elétrica, entre outros aspectos.

Por fim, para os propósitos deste estudo, a IC da energia elétrica apresentada no **Gráfico 3** — originalmente vinculada apenas à etapa de geração — foi ajustada mediante a incorporação de um acréscimo de 17%, correspondente às perdas médias associadas às etapas de transmissão e distribuição da energia elétrica, além do carregamento dos veículos.

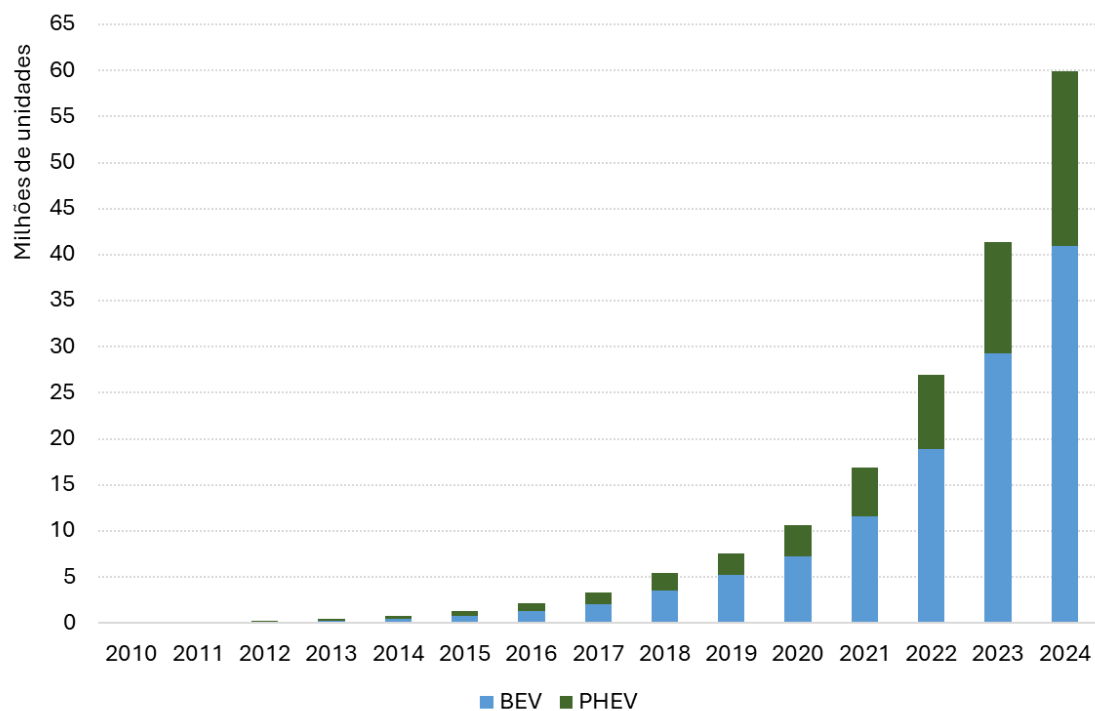
Esse valor se apoiou em parâmetros adotados por diversos estudos e reportados por agências reguladoras do setor, que evidenciam perdas entre 6 e 9% nas etapas de transmissão e distribuição, além de perdas entre 8 e 12% no processo de carregamento (HAWKINS et al., 2012; HAWKINS et al., 2013; ANEEL, 2015; CEER, 2020; LOMBARDI et al., 2017; EPE, 2025; FARIA et al., 2013). É importante destacar que tais perdas podem apresentar valores superiores em situações de carregamento rápido, em virtude das menores eficiências típicas desse tipo de operação.

4.1.3.2 Composição e eficiência energética da frota veicular

A quantificação das emissões nesta etapa requer a definição de parâmetros de eficiência energética dos veículos — isto é, a quantidade de energia necessária para o deslocamento de um quilômetro —, bem como a consideração da participação relativa das diferentes tecnologias nas frotas e nas vendas de veículos em cada país, de modo a permitir o cálculo das emissões médias reportadas nos resultados.

Historicamente dominada pelos veículos equipados com motores a combustão interna (ICEVs, na sigla em inglês), a frota global passou a incorporar, de forma progressiva, tecnologias alternativas de propulsão. Dados da IEA (2025) indicam que o estoque mundial de veículos elétricos experimentou um crescimento relevante na última década (**Gráfico 6**): partindo de bases marginais no início da década de 2010, o acumulado de veículos eletrificados já se encontra acima de 60 milhões de unidades. A despeito dessa condição, esse montante ainda representa fração pouco expressiva da frota total de veículos leves, que ultrapassa 1,3 bilhão de unidades (**Gráfico 7**).

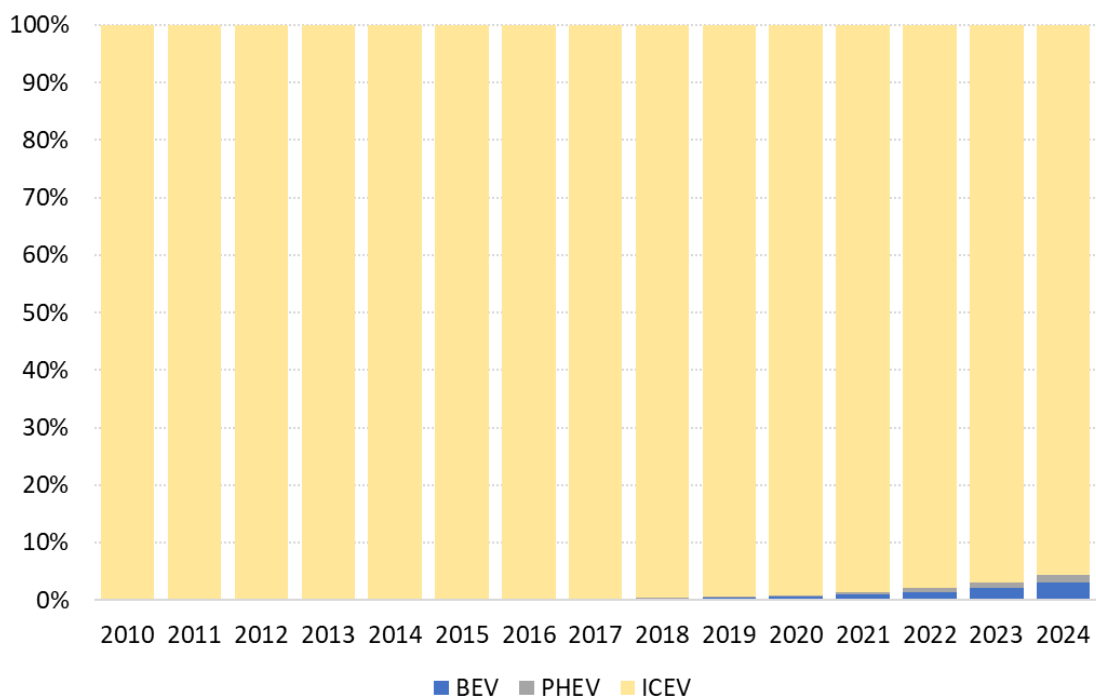
Gráfico 6. Frota mundial de veículos leves elétricos por tipo de tecnologia (milhões de unidades)



Nota: PHEV (veículo híbrido recarregável), BEV (veículo elétrico a bateria).

Fonte: Global EV Outlook 2025 (IEA)

Gráfico 7. Distribuição da frota mundial de veículos por tipo de tecnologia (%)

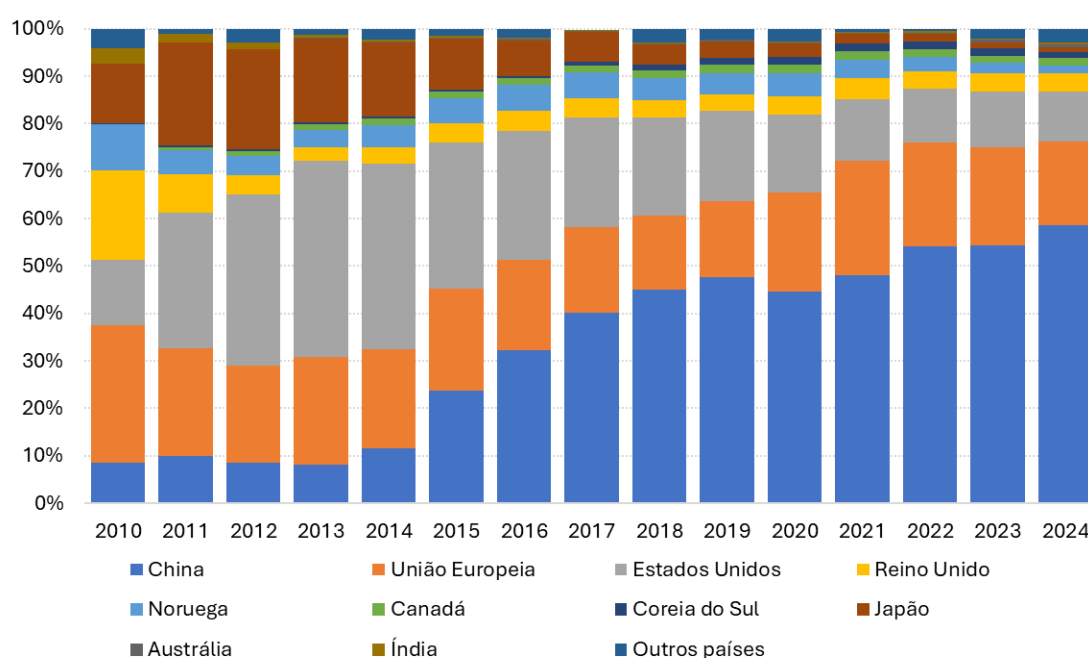


Nota: PHEV (veículo híbrido recarregável), BEV (veículo elétrico a bateria), ICEV (veículos equipados com motores a combustão interna).

Fonte: Global EV Outlook 2025 (IEA)

Embora a participação dos veículos elétricos no estoque global ainda seja minoritária, a aceleração observada a partir de 2020 destaca-se e foi impulsionada por políticas de estímulo mais ambiciosas em grandes economias, com concentração geográfica na UE (UE-27), nos EUA e, especialmente, na China (**Gráfico 8**). Esta consolidou-se como o maior mercado, tanto em termos absolutos, quanto em ritmo de expansão, resultado de uma estratégia regulatória e industrial que coloca a eletrificação como eixo central de competitividade.

Gráfico 8. Proporção da frota eletrificada (veículo elétrico a bateria (BEV) e híbridos) nos países (%)



Fonte: Global EV Outlook 2025 (IEA)

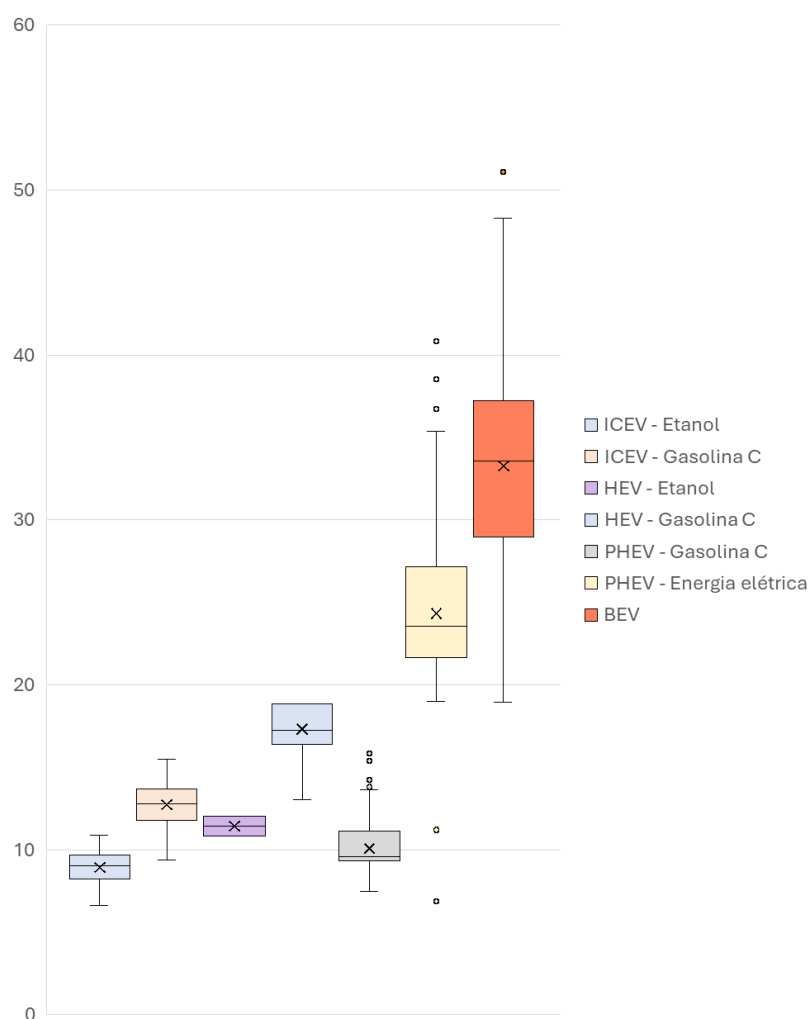
Na definição dos parâmetros de eficiência veicular, diante da inexistência de bases de dados homogêneas e consistentes que representem, de forma comparável, as diferentes regiões do globo, optou-se por parametrizar os valores de referência a partir da base do Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV), mantido pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro). Conforme o **Gráfico 9**, esses parâmetros são expressos em litros equivalente por quilômetro (l_{eq}/km) e, posteriormente, convertidos em megajoules por quilômetro (MJ/km).

Esse repositório público reúne resultados de ensaios padronizados de consumo energético, que abrangem diferentes categorias de veículos e constituem uma das principais fontes empíricas para estudos de avaliação comparativa no

setor. A adoção dessa base assegura alinhamento metodológico com protocolos internacionais e, simultaneamente, garante representatividade frente às particularidades da frota e das condições de uso no Brasil.

É fundamental assinalar, contudo, que a aplicação dos parâmetros brasileiros de eficiência veicular para o cálculo das emissões em mercados externos tende a gerar valores subestimados para UE, China e EUA. Isso porque, nesses contextos, os veículos da mesma categoria são, em média, de maior porte e apresentam maior consumo energético por quilômetro rodado. Para mitigar esse viés, adotou-se o procedimento de utilizar os valores médios de eficiência energética por categoria veicular e, adicionalmente, construir intervalos de resultados a partir dos extremos registrados na base brasileira — representados pelos percentis 10% e 90%.

Gráfico 9. Distribuição em *box plot* do consumo veicular por rota tecnológica para 2024 (l/km)



Nota: HEV (veículo híbrido completo), PHEV (veículo híbrido recarregável), BEV (veículo elétrico a bateria), ICEV (veículos equipados com motores a combustão interna).

Fonte: PBEV/Inmetro (2025).

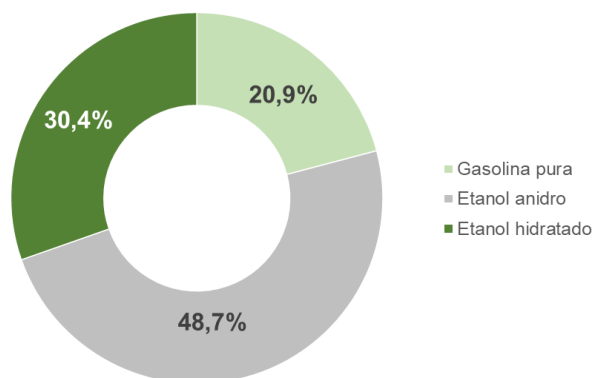
No caso específico dos PHEVs, os índices de eficiência são determinados pela proporção relativa entre o uso de energia elétrica proveniente de carregamento externo e o uso de combustível líquido — essa relação é comumente denominada como “fator de utilização” (FU) na literatura internacional.

Embora os ciclos regulatórios de homologação considerem que os PHEVs operem entre 70% e 85% em modo elétrico, evidências empíricas demonstram que, em uso real, a fração elétrica é significativamente menor. Estudos baseados em dados de consumo monitorados em larga escala, registros de telemetria, plataformas de autorrelato e modelos de simulação calibrados apontam que a participação da eletricidade no total de energia utilizada para a locomoção desses veículos costuma ser inferior a 50% entre usuários privados, e ainda mais reduzida em frotas corporativas (PLÖTZ et al., 2017; PLÖTZ et al., 2022; ISENSTADT et al., 2022; MANDEV et al., 2024; DAUPHIN et al., 2023; HAMZA et al., 2024).

Diante desse contexto, o presente estudo adota a proporção 50% eletricidade / 50% combustível como cenário de referência, utilizando a proporção 30%/70% como alternativa para representar condições de mercados com infraestrutura de recarga menos consolidada ou padrões de uso mais dependentes do motor a combustão.

A mesma lógica de parametrização foi aplicada aos ICEs e HEVs dotados da tecnologia *flex-fuel* no contexto brasileiro. Nesse caso, a proporção entre o consumo de gasolina e o de etanol hidratado foi estimada a partir dos dados de frota do ciclo Otto publicados pelo Sindicato Nacional da Indústria de Componentes para Veículos Automotores (Sindipeças, 2025) e pelas informações de consumo disponibilizadas pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2025) para 2024. Os resultados utilizados para ponderar as emissões médias no mercado brasileiro são apresentados no **Gráfico 10**.

Gráfico 10. Proporção de combustíveis líquidos no consumo da frota *flex-fuel* no mercado brasileiro em 2024 (%)



Fontes: Sindipeças (2025); ANP (2025)

4.1.4 Parâmetros utilizados no cálculo das emissões para o “fim de vida”

Conforme destacado por Hawkins et al. (2012), Dillman et al. (2020), Gauto et al. (2023) e outros autores, as emissões associadas à etapa de fim de vida dos veículos apresentam elevada variabilidade metodológica e figuram entre as fases menos convergentes da literatura internacional. Por esse motivo, muitos estudos optam por não contabilizar explicitamente os impactos decorrentes do descarte, da reutilização ou da reciclagem de veículos e de seus componentes.

Nesse contexto, Bothe e Steinfort (2020) realizaram uma meta-análise abrangendo 38 análises de veículos elétricos a bateria (BEV) e 22 de veículos a combustão interna (ICE), identificando resultados contrastantes: valores negativos para os ICE, em função dos créditos gerados pela reciclagem, e valores positivos para os BEV, principalmente relacionados à destinação das baterias. Esses resultados sugerem que a decisão de excluir as emissões de “fim de vida” pode minimizar o impacto associado aos veículos com maior bateria nesse momento, apesar de contribuir para reduzir incertezas acerca dos principais resultados.

Diante desse cenário, e em consonância com uma abordagem metodológica conservadora na avaliação dos impactos da bioenergia sobre a mobilidade sustentável, o presente estudo optou por não incluir as emissões da fase de fim de vida em sua análise, reconhecendo que essa decisão pode resultar na subestimação das emissões em uma perspectiva “do berço ao túmulo” - sobretudo para os veículos elétricos ou para situações nas quais o descarte, a reutilização ou a reciclagem dos equipamentos não sejam conduzidos de forma adequada.

4.2 Resultados para as emissões por quilômetro rodado no ciclo de vida dos veículos

Com o intuito de tornar a apresentação dos resultados mais didática, a análise a seguir concentra-se inicialmente nas diferentes tecnologias veiculares presentes no mercado brasileiro, conforme ilustrado no **Gráfico 11**.

Embora a discussão, para manter-se direta e objetiva, concentre-se nos resultados obtidos a partir dos valores de referência dos parâmetros, os gráficos apresentados incluem intervalos que expressam a análise de sensibilidade definida nos tópicos anteriores. Essa abordagem confere maior robustez e confiabilidade aos resultados e, em grande medida, evidencia que, mesmo diante da amplitude dos cenários considerados, a consistência das conclusões fundamentadas nos valores de referência permanece inalterada.

Em linhas gerais, os resultados permitem destacar dois pontos fundamentais: (i) a tecnologia veicular, por si só, não é determinante para o desempenho ambiental das distintas alternativas analisadas; e (ii) as rotas tecnológicas que utilizam biocombustíveis no Brasil apresentam, sistematicamente, melhor desempenho ambiental quando comparadas às suas equivalentes sem uso do biocombustível.

Ao se analisar os veículos *flex-fuel* com motor de combustão interna (ICEs), observa-se que a adição de 30% de etanol à gasolina (E30), prática obrigatória no Brasil (CNPE, 2025), resulta em uma redução de emissões próxima a 15% quando comparada ao uso de gasolina pura com oxigenantes de origem fóssil (E0). As emissões médias dessa categoria com E30 atingem cerca de 200 g CO₂ eq./km, frente aos 232 g CO₂ eq./km observados no cenário hipotético com o uso exclusivo de gasolina pura.

Na sequência, destaca-se o expressivo potencial de descarbonização dos veículos ICE *flex-fuel* quando abastecidos integralmente com etanol hidratado (E100), cujas emissões médias se reduzem para aproximadamente 85 g CO₂ eq./km — no caso da gasolina pura, o valor supera em mais 2,5 vezes esse montante.

É importante ressaltar que os cenários com gasolina (E30) e com etanol hidratado (E100) representam extremos dentro do contexto brasileiro. Em 2024, o consumo agregado de etanol (anidro e hidratado) representou, em média, 50% do total de combustíveis utilizados pela frota *flex* — equivalente a E50 —, com emissões estimadas em 171 g CO₂ eq./km. Essa proporção, no entanto, varia significativamente entre as regiões, sendo mais elevada em estados como São Paulo e Minas Gerais e substancialmente inferior em estados do Norte e Sul do País.

A comparação entre tecnologias veiculares indica que a substituição da tecnologia ICE pelo híbrido tipo HEV, com uso dos mesmos combustíveis, proporciona uma redução de emissões entre 8% e 24%. Tal benefício decorre,

sobretudo, da maior eficiência energética dos HEVs na conversão de energia em deslocamento, compensando as emissões mais elevadas no ciclo “berço ao portão”.

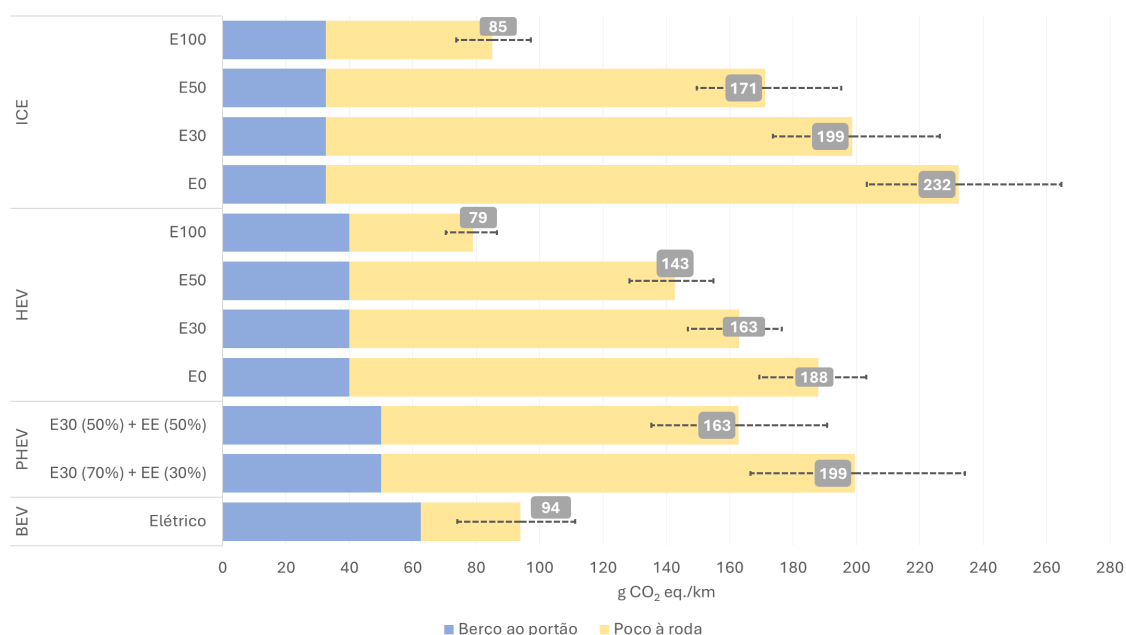
As tecnologias que requerem baterias de maior capacidade e sistemas elétricos de alta voltagem, como os veículos híbridos *plug-in* (PHEVs) e elétricos a bateria (BEVs), apresentam maior intensidade de emissões na etapa inicial do ciclo de vida.

No caso dos PHEVs, não há, atualmente, modelos disponíveis no mercado brasileiro com motor *flex-fuel*; ademais, os modelos disponíveis são de maior porte. Em razão disso, e devido às emissões elevadas nos estágios de produção dos veículos e componentes, os PHEVs apresentam desempenho ambiental pior do que os ICEs e HEVs, independentemente da proporção de energia elétrica utilizada (50% ou 30% do total consumido).

Em contrapartida, os BEVs beneficiam-se da baixa IC da matriz elétrica brasileira, o que compensa parcialmente suas maiores emissões no ciclo “berço ao portão”. Ainda assim, os BEVs não superam o desempenho ambiental dos ICEs e HEVs abastecidos exclusivamente com etanol hidratado nos resultados baseados nos parâmetros de referência. No caso dos HEVs, o uso de 65% de etanol hidratado e 35% de gasolina brasileira já permitiria desempenho climático similar ao dos BEVs no Brasil.

Ressalte-se, por fim, que os HEVs possuem a vantagem adicional de escalabilidade imediata, uma vez que não requerem infraestrutura adicional para distribuição e recarregamento, o que reforça sua atratividade no contexto brasileiro de transição energética com a presença de bioenergia.

Gráfico 11. Mercado brasileiro: emissões de GEE por etapa do ciclo de vida para diferentes tecnologias e fonte de energia (g CO₂ eq./km)



Nota 1: As linhas tracejadas representam os resultados para os intervalos da análise de sensibilidade descritos nos tópicos anteriores

Nota 2: ICE (veículo com motor a combustão interna), HEV (veículo híbrido completo), PHEV (veículo híbrido recarregável), BEV (veículo elétrico a bateria).

Fonte: elaboração pelos autores

Ao expandir a análise para a comparação entre o mercado brasileiro e os mercados dos EUA, da UE e da China, torna-se evidente a vantagem competitiva do Brasil em todas as categorias de veículos. Essa superioridade decorre, sobretudo, da ampla participação dos biocombustíveis na matriz de combustíveis líquidos e da elevada presença de fontes renováveis na geração de energia elétrica nacional.

No caso dos veículos com motor de combustão interna (ICEs), as emissões médias registradas no Brasil, considerando a matriz E50 (50% de etanol e 50% de gasolina em 2024), apresentam reduções expressivas em relação às médias observadas em outros mercados: 60 g CO₂ eq./km em comparação aos EUA, que operam majoritariamente com E10 (USDA, 2025a); 64 g CO₂ eq./km em relação à UE, que adota E6,5 (USDA, 2025b); e 69 g CO₂ eq./km frente ao cenário chinês, baseado em E2 (USDA, 2025c).

Mais impressionante ainda é o resultado obtido quando se considera o uso exclusivo de etanol hidratado (E100), que reduz as emissões para apenas 85 g CO₂ eq./km, valor que representa um terço daquele verificado para os ICEs nos outros mercados internacionais (**Gráfico 12**).

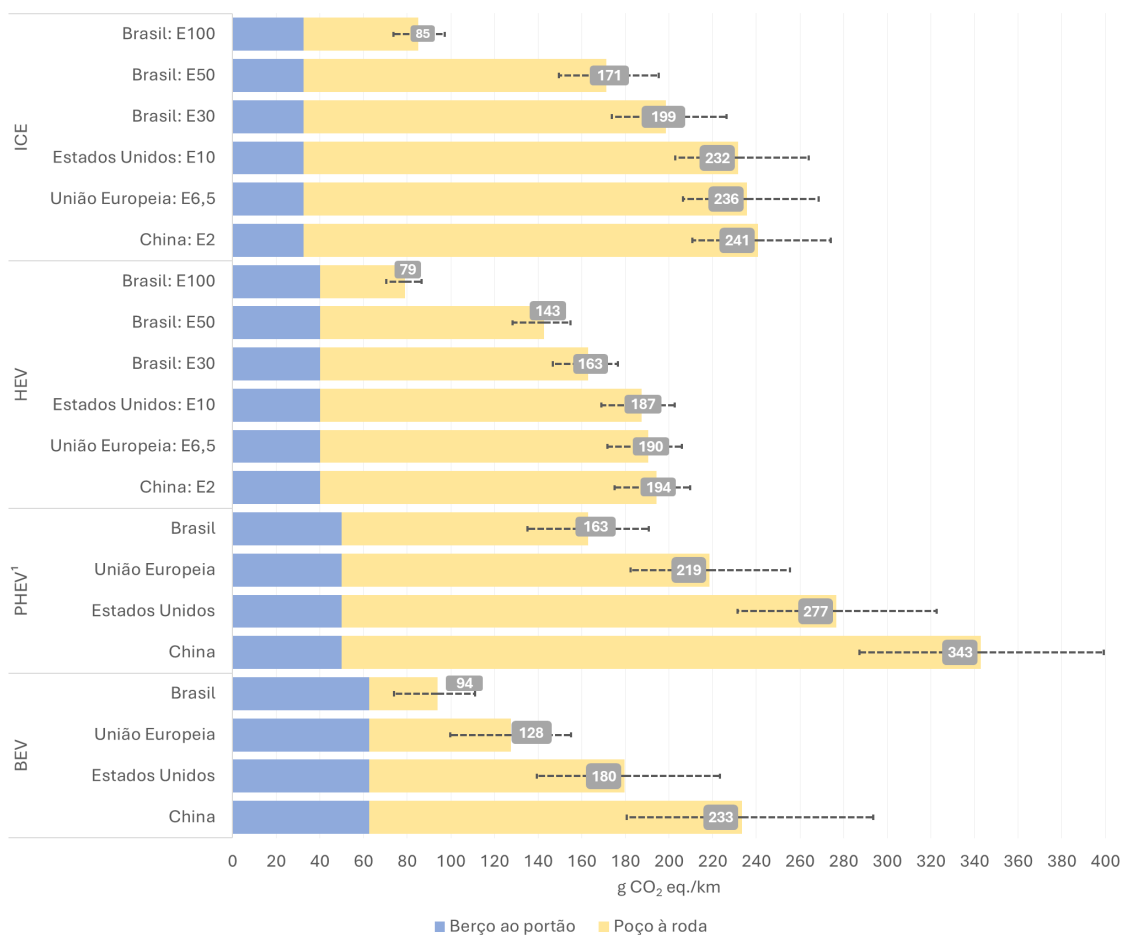
Esse padrão também se verifica nas tecnologias híbridas (HEVs) e híbridas *plug-in* (PHEVs). Em todos os cenários, os veículos brasileiros apresentam

emissões significativamente inferiores às observadas nos demais países. A diferença é tão expressiva que mesmo um ICE *flex-fuel* operando com a matriz média nacional (E50) supera, em desempenho ambiental, todas as opções de HEV e PHEV disponíveis nos EUA, na UE e na China. Isso significa que, mesmo adotando uma tecnologia que demanda mais energia para deslocamento, como o motor de combustão interna, o Brasil consegue alcançar resultados ambientais mais eficientes do que tecnologias tidas como superiores quando estas são sustentadas por matrizes com participação não desprezível de fósseis.

Entre todas as alternativas avaliadas, apenas três configurações apresentaram emissões abaixo de 120 g CO₂ eq./km: o HEV brasileiro operando com 100% de etanol hidratado, o ICE *flex-fuel* também abastecido integralmente com etanol e o veículo elétrico (BEV) considerando a matriz elétrica brasileira. Essa constatação reforça o papel central do etanol e da bioenergia na estratégia nacional de descarbonização.

Convém ressaltar que essas conclusões não apresentam alterações importantes mesmo quando em um cenário com a incorporação das emissões associadas à iLUC no cálculo da IC (Intensidade de Carbono) do etanol. Conforme evidenciado no **Gráfico 13**, ainda nesse cenário alternativo, as soluções brasileiras mantêm-se entre as mais eficientes do mundo, reafirmando a relevância estrutural dos biocombustíveis no processo de transição energética nacional.

Gráfico 12. Emissões de GEE por etapa do ciclo de vida para rotas tecnológicas e mercados (g CO₂ eq./km)

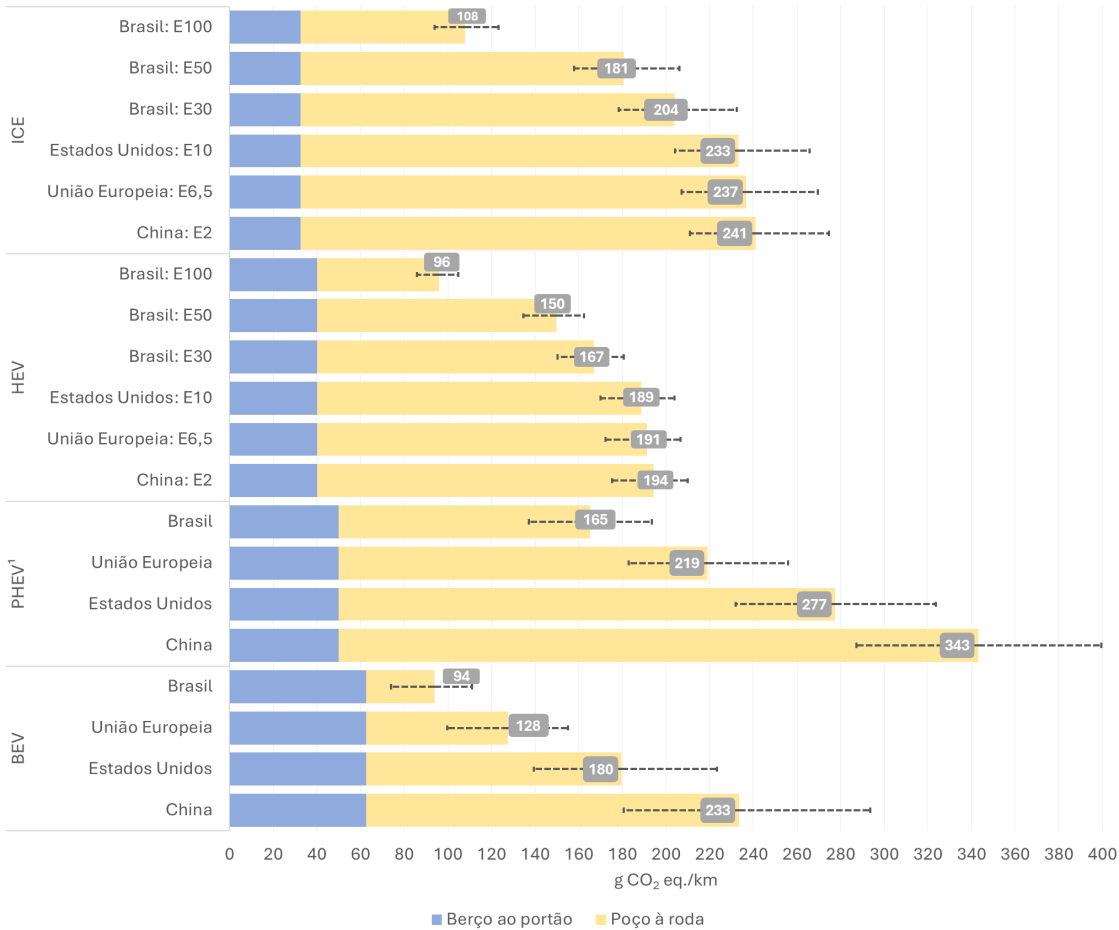


Nota 1: As emissões de PHEVs, para efeito de comparação, foram apresentadas neste gráfico considerando 50% do consumo advindo de combustível líquido e a outra metade de energia elétrica; ² As linhas tracejadas representam os resultados para os intervalos da análise de sensibilidade descritos nos tópicos anteriores.

Nota 2: ICE (veículo com motor a combustão interna), HEV (veículo híbrido completo), PHEV (veículo híbrido recarregável), BEV (veículo elétrico a bateria).

Fonte: elaboração pelos autores

Gráfico 13. Cenário alternativo: emissões de GEE por etapa do ciclo de vida para rotas tecnológicas e mercados, incluindo iLUC na IC do etanol (g CO₂ eq./km)



Nota 1: As emissões de PHEVs, para efeito de comparação, foram apresentadas neste gráfico considerando 50% do consumo advindo de combustível líquido e a outra metade de energia elétrica; ² As linhas tracejadas representam os resultados para os intervalos da análise de sensibilidade descritos nos tópicos anteriores.

Nota 2: ICE (veículo com motor a combustão interna), HEV (veículo híbrido completo), PHEV (veículo híbrido recarregável), BEV (veículo elétrico a bateria).

Fonte: elaboração pelos autores

O resultado desse cenário, avaliado por categoria de veículo e tipo de combustível, pode ser resumido pelo nível médio de emissões da frota entrante — isto é, dos veículos novos licenciados anualmente em cada mercado. No **Gráfico 14**, observa-se a representatividade das vendas de cada classe de veículos em 2024.

Em termos de participação de mercado, chama a atenção a elevada penetração dos veículos com maior grau de eletrificação (PHEVs e BEVs) na China,

que responderam por cerca de 48% das vendas de veículos novos em 2024. Já nos mercados europeu e norte-americano, a despeito dos consideráveis incentivos financeiros concedidos à mobilidade elétrica, a presença dessas tecnologias ainda é limitada.

O contraste é ainda mais evidente quando se observa o Brasil: em 2024, os ICEs representaram aproximadamente 94% das vendas, enquanto os HEVs responderam por 2% e os PHEVs e BEVs somaram apenas 4%. Em síntese, o licenciamento de veículos novos no País revela uma penetração bastante restrita de veículos eletrificados.

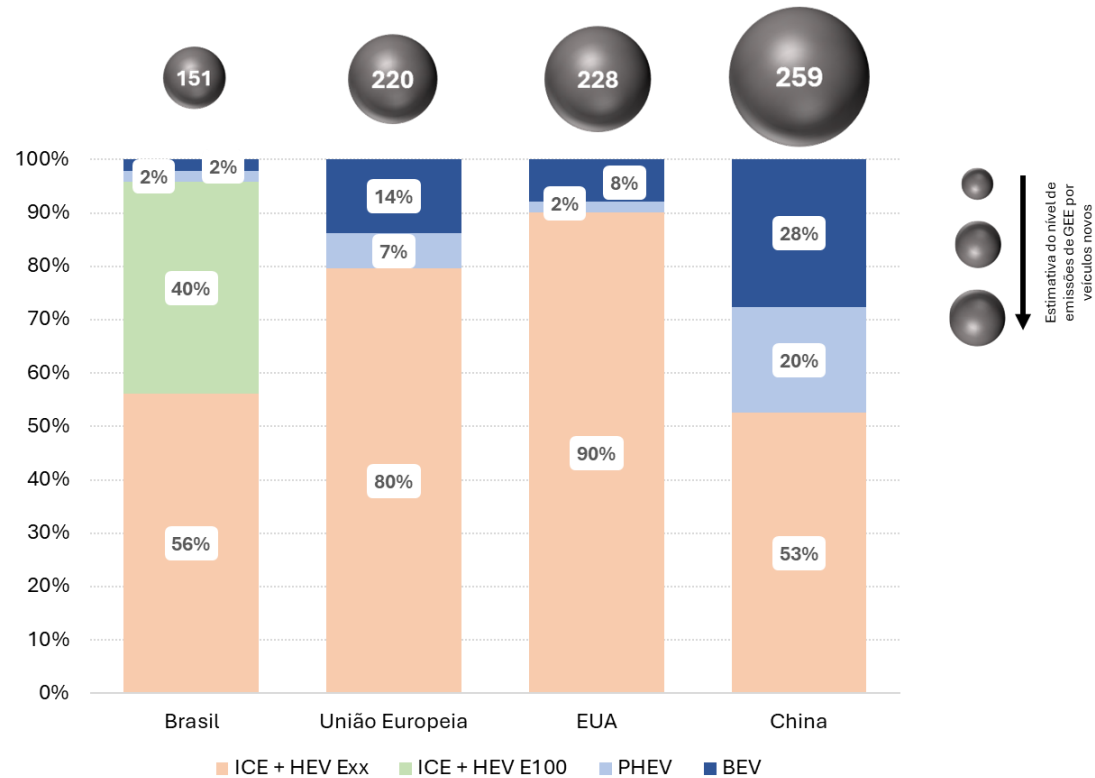
Todavia, essa análise se altera significativamente quando o foco recai sobre o nível de emissões por quilômetro rodado e não sobre a rota de tecnologia veicular. Apesar da predominância dos ICEs nas vendas brasileiras, a frota inserida no mercado em 2024 apresentou emissões médias de apenas 151 g CO₂ eq./km, resultado diretamente associado ao uso do etanol, seja puro ou em mistura com a gasolina.

Em outras palavras, ao se considerar conjuntamente os veículos elétricos e aqueles movidos a biocombustíveis, constata-se que as vendas de veículos de baixo carbono no Brasil atingiram proporção próxima à observada para os eletrificados na China. A diferença fundamental, entretanto, está no desempenho ambiental: enquanto os BEVs e PHEVs chineses apresentam emissões por quilômetro rodado elevadas em razão da matriz elétrica intensiva em carbono, os ICEs e HEVs brasileiros abastecidos com etanol garantem um desempenho significativamente melhor.

Como resultado, a presença da bioenergia no setor de transportes assegurou ao Brasil, em 2024, uma média de emissões de apenas 151 g CO₂ eq./km para a frota de veículos novos, em contraste com os 259 g CO₂ eq./km registrados na China. Em termos comparativos, a média brasileira apresenta um desempenho 32% superior ao observado na UE (220 g CO₂ eq./km), 34% em relação à média norte-americana (228 g CO₂ eq./km) e 42% na comparação ao índice chinês (259 g CO₂ eq./km).

A despeito das limitações inerentes a esse exercício — especialmente por não contemplar as especificidades da composição da frota em cada categoria veicular e região —, os resultados evidenciam que países que frequentemente impõem restrições ao uso da bioenergia têm adotado, neste momento, tecnologias incentivadas para a mobilidade cujo desempenho ambiental é inferior ao das alternativas já disponíveis no mercado brasileiro.

Gráfico 14. Participação das diferentes classes de veículos novos nas vendas em 2024 e nível médio de emissões de GEE no ciclo “berço à roda” pela frota nova (vendas em % e emissões em g CO₂ eq./km)



Nota: ICE (veículo com motor a combustão interna), HEV (veículo híbrido completo), PHEV (veículo híbrido recarregável), BEV (veículo elétrico a bateria).

Fonte: elaboração pelos autores

Nesse ponto, é pertinente observar que o cenário aqui apresentado constitui uma fotografia da situação atual e está sujeito a mudanças à medida que novos ganhos de eficiência e inovações tecnológicas sejam incorporados às diferentes rotas de descarbonização da mobilidade. Esses avanços podem abranger desde melhorias de eficiência e produtividade na produção e no uso de biocombustíveis até o desenvolvimento de baterias com maior densidade energética e menor impacto ambiental ao longo do ciclo de vida.

Ainda que se reconheçam as limitações inerentes a um exercício baseado em dados agregados, os valores evidenciam que, sob a perspectiva climática, os projetos futuros devem ser pautados pela neutralidade tecnológica. Isso significa adotar uma mensuração rigorosa e transparente das emissões em todas as etapas do ciclo de vida, levando em consideração as características específicas, o

potencial econômico de cada região e os diferentes tempos de maturação das soluções tecnológicas.

Nos países tropicais em desenvolvimento, como é o caso do Brasil, um primeiro passo pode ser dado por meio da ampliação do uso de bioenergia nos segmentos em que essa solução já é viável, bem como por meio do incentivo à sua adoção em outras regiões com potencial produtivo. Nesse contexto, os veículos híbridos baseados em motores de combustão interna configuram-se como uma alternativa estratégica para a transição energética. Em um horizonte de médio e longo prazos, a tendência é que a hibridização das novas plataformas elétricas incorpore o uso de combustíveis biológicos ou sintéticos produzidos a partir de fontes renováveis de energia, combinados à tração elétrica, compondo soluções de baixo carbono mais eficazes e sustentáveis. Com o amadurecimento das tecnologias, a diversificação das aplicações e o uso adequado de cada solução no tempo certo, haverá espaço para a convivência harmônica entre diferentes rotas tecnológicas rumo à mobilidade sustentável.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise desenvolvida neste estudo permite afirmar que a bioenergia tropical — e, em especial, a experiência brasileira — constitui um componente estratégico na transição energética. Contudo, essa contribuição aparece com menor expressão nos fóruns internacionais, possivelmente em razão da ausência de condições edafoclimáticas e históricas equivalentes nos países centrais.

No caso da mobilidade, ao contrário de tecnologias emergentes, cuja eficácia climática depende da descarbonização prévia das matrizes energéticas e da mitigação dos impactos ambientais relacionados à produção de baterias e componentes eletrônicos, a biomobilidade brasileira já apresenta resultados concretos em termos de redução de emissões e competitividade econômica.

Os resultados obtidos reforçam a necessidade de políticas climáticas globais que reconheçam as especificidades regionais e as diferentes trajetórias históricas de desenvolvimento tecnológico. A comparação entre rotas de mobilidade de baixo carbono evidenciou que as soluções observadas no mercado brasileiro se posicionam como as mais eficientes entre todas aquelas avaliadas nos mercados norte-americano, chinês e europeu — seja em veículos híbridos abastecidos com etanol hidratado, veículos *flex-fuel* operando com etanol ou veículos elétricos alimentados por uma matriz elétrica predominantemente renovável.

Esse desempenho superior corrobora a hipótese de que a bioenergia produzida sob condições tropicais favoráveis oferece vantagens climáticas reais, mesmo em comparação com rotas hegemônicas de eletrificação, que, nos países desenvolvidos, ainda dependem de subsídios e investimentos significativos em infraestrutura.

Adicionalmente, a discussão também indica a necessidade de reavaliar críticas recorrentes à bioenergia, especialmente aquelas relacionadas às mudanças indiretas no uso da terra (iLUC, na sigla em inglês) e ao alegado conflito entre produção de alimentos e combustíveis (“*food vs. fuel*”). A literatura científica identifica significativa dispersão metodológica e incerteza nos modelos de iLUC. De forma semelhante, a segurança alimentar não se limita a preços agrícolas ou à disponibilidade de terras, mas está intrinsecamente ligada a fatores estruturais como renda, acesso, infraestrutura e estabilidade política.

Nesse contexto, boa parte das barreiras impostas à bioenergia tropical sustenta-se em fundamentos pouco robustos, que não se configuram como instrumentos efetivos de descarbonização e, por outro lado, resultam em regulações assimétricas.

À luz desses elementos, são necessárias reflexões críticas para o aperfeiçoamento da governança climática internacional. O primeiro ponto central está associado à neutralidade tecnológica, com ações orientadas por métricas transparentes de desempenho climático em ciclo de vida completo, evitando tanto a escolha arbitrária de “tecnologias campeãs”, quanto a adoção de multiplicadores artificiais que distorcem a competição entre alternativas, por exemplo.

A definição de biocombustíveis sustentáveis também carece de elementos tecnicamente fundamentados e facilmente mensuráveis. No caso da iLUC, os modelos atualmente utilizados precisam ser aperfeiçoados e complementados por mecanismos de incentivo a práticas sustentáveis de uso da terra, como intensificação produtiva, recuperação de áreas degradadas, sistemas agroflorestais e certificações independentes.

No âmbito nacional, é necessário consolidar e aperfeiçoar as políticas voltadas à bioenergia, como é o caso da Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), cujas metas de descarbonização ainda enfrentam questionamentos, da política para a mobilidade sustentável e dos programas de descarbonização para os mercados de gás e de aviação, atualmente em fase de regulamentação no Brasil.

Embora o País tenha avançado significativamente nos últimos anos na construção de um arcabouço institucional capaz de equacionar as externalidades associadas ao consumo de energia limpa e renovável, persistem, no nível

subnacional, políticas distorcidas — como, por exemplo, a concessão de desconto no imposto sobre veículos para modelos PHEV, sob o argumento de que esses modelos entregam menor emissão por quilômetro rodado, fato não comprovado na análise aqui apresentada.

Ainda no plano doméstico, o Brasil deve intensificar o desenvolvimento de biocombustíveis avançados — como os combustíveis sustentáveis de aviação (SAFs, na sigla em inglês) — e a estratégia de integração entre bioenergia e eletrificação no campo da mobilidade.

As políticas nacionais são o primeiro pilar para o desenho de estratégias adaptadas às condições locais. Entretanto, no âmbito internacional, são necessárias ações que valorizem o desempenho climático efetivo de cada solução energética, internalizem de forma isonômica os custos ambientais dos combustíveis fósseis e reconheçam as vocações nacionais como parte integrante da diversidade de caminhos possíveis rumo à neutralidade de carbono.

Nesse contexto, torna-se imperativo que o Brasil adote uma diplomacia climática proativa, com atuação firme na contestação de critérios regulatórios arbitrários e na defesa de padrões baseados em evidências científicas e no desempenho climático efetivo. O reconhecimento da bioenergia como combustível sustentável deve constituir prioridade em acordos comerciais e ambientais, funcionando como instrumento estratégico para fortalecer alianças, ampliar a legitimidade da bioenergia tropical e difundir seu modelo a outros países em desenvolvimento.

O Brasil dispõe de vantagens comparativas importantes, passíveis de conversão em vantagens competitivas duradouras. A bioenergia tropical não deve ser compreendida como solução marginal, mas como ativo estratégico capaz de aliar mitigação climática, segurança energética e desenvolvimento socioeconômico. O desafio reside em converter tais evidências em reconhecimento internacional e políticas públicas robustas que assegurem a plena valorização desse recurso.

6. REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). *Vendas de derivados de petróleo e biocombustíveis*. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/dados-estatisticos>. Acesso em: 23 ago. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). *Resolução ANP nº 758, de 23 de novembro de 2018*. Regulamenta a certificação da produção ou importação eficiente de biocombustíveis de que trata o art. 18 da Lei

nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-758-2018>. Acesso em: 23 ago. 2025.

AHMED, A. *et al.* Impacts of biofuels on food security: a systematic review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 145, p. 111-321, 2021.

ALLEE, A. *et al.* (2021). Cross-national analysis of food security drivers: comparing results based on the Food Insecurity Experience Scale and Global Food Security Index. *Food Security*, 13(5), 1245-1261.

ALSALEH, M., ABDULWAKIL, M. M.; ABDUL-RAHIM, A. S. (2021). Land-Use Change Impacts from Sustainable Hydropower Production in EU28 Region: An Empirical Analysis. *Sustainability*, 13. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13094599>.

AMBROSE, H.; KENDALL, A. Effects of battery chemistry and performance on the life cycle greenhouse gas intensity of electric mobility. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 47, p. 182-194, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 16567:2020 – Veículos rodoviários híbridos elétricos leves – Medição de emissão de escapamento e consumo de combustível e energia – Métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 21 set. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS FABRICANTES DE MOTOCICLETAS, CICLOMOTORES, MOTONETAS, BICICLETAS E SIMILARES (ABRACICLO). *Dados Estatísticos*. Disponível em: <https://abraciclo.com.br/dados-estatisticos>. Acesso em: 23 ago. 2025.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES (ANFAVEA). *Edições em Excel*. Disponível em: <https://anfavea.com.br/site/edicoes-em-excel/>. Acesso em: 23 ago. 2025.

BALUGANI, E. *et al.* Bridging modeling and certification to evaluate low-ILUC-risk practices for biobased materials with a user-friendly tool. *Sustainability*, v. 14, p. 2030, 2022.

BAUER, C.; HOFER, J.; ALTHAUS, H. J.; DEL DUCE, A.; SIMONS, A. The environmental performance of current and future passenger vehicles: life cycle assessment based on a novel scenario analysis framework. *Applied Energy*, v. 157, p. 871-883, 2015.

BEKEL, K.; PAULIUK, S. Prospective cost and environmental impact assessment of battery and fuel cell electric vehicles in Germany. *International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 24, p. 2220-2237, 2019.

BOTHE, D.; STEINFORT, T. Cradle-to-grave life-cycle assessment in the mobility sector: a meta-analysis of LCA studies on alternative powertrain technologies. Frankfurt am Main: FVV, 2020. Disponível em: https://www.fvv-net.de/fileadmin/Stories/020.30_Bilanz_gezogen/FVV_LCA_Life-cycle_analysis_Frontier_Economics_R595_final_2020-06_EN.pdf. Acesso em: 23 ago. 2025.

BRINKMAN, M. L. J. *et al.* (2018). Interregional assessment of socio-economic effects of sugarcane ethanol production in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 88, 347-362.

BROWN, L. Food versus Fuel: Competing Uses for Cropland. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 22(4), 32–40, 1980.

CALIFORNIA AIR RESOURCES BOARD (CARB). *Low Carbon Fuel Standard*. Sacramento: CARB, 2020. Disponível em: <https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs/low-carbon-fuel-standard>. Acesso em: 23 ago. 2025.

CALVIN, K., *et al.* (2021). Bioenergy for climate change mitigation: Scale and sustainability. *GCB Bioenergy*, 13(9), 1346-1371.

CHAKRAVORTY, U., *et al.* (2011). Do biofuel mandates raise food prices? Presentation at AERE Summer Conference, 9-10 June, Seattle, WA, USA.

CHEN, X.; KHANNA, M. (2012). Food vs. fuel: The effect of biofuel policies. *American Journal of Agricultural Economics*, 95(2), 289-295. (2008). The state of food and agriculture, 2008.

CHERUBINI, F. *et al.* Energy- and greenhouse gas-based LCA of biofuel and bioenergy systems: Key issues, ranges and recommendations. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 53, n. 8, p. 434-447, 2009.

CHERUBINI, F.; STRØMMAN, A. H. Life cycle assessment of bioenergy systems: state of the art and future challenges. *Bioresource Technology*, v. 102, p. 437–451, 2011.

CHUM, H. *et al.* Bioenergy. In: EDENHOFER, O. *et al.* (eds.). *IPCC special report on renewable energy sources and climate change mitigation*. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.

CONSELHO NACIONAL DE POLÍTICA ENERGÉTICA (CNPE). *Resolução CNPE nº 9, de 25 de junho de 2025*. Dispõe sobre a mistura obrigatória do etanol anidro à gasolina comercializada em todo o território nacional. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/cnpe/resolucoes-do-cnpe/2025/ResolucaoCNPE9publicada.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2025.

CORSIA – Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation. ICAO, 2024. Disponível em: <https://www.icao.int/corsia>. Acesso em: 19 set. 2025.

COX, B. *et al.* Uncertain environmental footprint of current and future battery electric vehicles. *Journal of Cleaner Production*, v. 181, p. 280-294, 2018.

DAIOGLOU, V. *et al.* Indirect land use change emissions for biofuels: a review of modeling results. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 120, 2020.

DAUPHIN, R.; *et al.* Evaluation of plug-in hybrid vehicles in real-world conditions by simulation. Concawe Report no. 12/23, Bruxelas, 2023.

DILLMAN, K. J. *et al.* Review and meta-analysis of electric vehicles: embodied emissions and environmental breakeven. *Sustainability*, v. 12, n. 22, art. 9390, 2020.

EFROYMNSON, R. A. *et al.* A causal analysis framework for land-use change and the potential role of bioenergy policy. *Land Use Policy*, v. 59, p. 516-527, 2016.

EHRENBERGER, S. *et al.* Land transport development in three integrated scenarios for Germany: Technology options, energy demand and emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 90, p. 102669, 2021.

ELGOWAINY, A. *et al.* Cradle-to-grave lifecycle analysis of U.S. light-duty vehicle-fuel pathways: a greenhouse gas emissions and economic assessment of current (2015) and future (2025–2030) technologies. Argonne National Laboratory, U.S. Department of Energy, 2016. (ANL/ESD-16/7 Rev. 1). Disponível em: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1254857>. Acesso em: 27 set. 2025.

ELGOWAINY, A. *et al.* Cradle-to-grave pathways for US light duty vehicles. *Environmental Science & Technology*, v. 52, n. 4, p. 2392-2399, 2018.

ELLINGSEN, L. A.-W.; SINGH, B.; STRØMMAN, A. H. The size and range effect: lifecycle greenhouse gas emissions of electric vehicles. *Environmental Research Letters*, v. 11, n. 5, 054010, maio 2016. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/5/054010>.

EMBER. *Ember: Accelerating the clean energy transition with data and policy*. Disponível em: <https://ember-energy.org/>. Acesso em: 23 ago. 2025.

EMBRAPA MEIO AMBIENTE. *Regionalização dos perfis “típicos” da produção de cana-de-açúcar para uso no RenovaBio*. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio/arq/arquivos-estudos-relatorio-e-seminarios/relatoriofinalcanadeacucar.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2025.

ENERGY INSTITUTE. *Energy Institute: Creating a better energy future for our members and society*. Disponível em: <https://www.energyinst.org/>. Acesso em: 23 ago. 2025.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). *Renewable Fuel Standard Program (RFS2) Regulatory Impact Analysis*. Chapter 2.5.8. Washington, DC: U.S. EPA, 2010. Disponível em: <https://19january2017snapshot.epa.gov/sites/production/files/2015-08/documents/420r10006.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2025.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). (2025a). Overview of the Renewable Fuel Standard Program. Fonte: United States Environmental Protection Agency. Disponível em: <https://www.epa.gov/renewable-fuel-standard/overview-renewable-fuel-standard-program>. Acesso em: 23 ago. 2025.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). (2025b). Renewable Fuel Standard (RFS) Program: Standards for 2026 and 2027, Partial Waiver of 2025 Cellulosic Biofuel Volume Requirement, and Other Changes. Disponível em: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2025-06-17/pdf/2025-11128.pdf>. Acesso em: 6 set. 2025.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Intensidade de carbono do transporte rodoviário: diagnóstico e perspectivas para a descarbonização do setor. Rio de

Janeiro: EPE, 2025. (Nota Técnica EPE-DPG-SDB-2025-03). Disponível em: <https://www.epe.gov.br>. Acesso em: 28 set. 2025

ESCOBAR, N.; et al. (2025). Understanding uncertainty in market-mediated responses to US oilseed biodiesel demand: sensitivity of ILUC emission estimates to GLOBIOM parametric uncertainty. *Environmental Science & Technology*, v. 59, n. 1, p. 302-314.

EU. (2024). Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources. Fonte: European Union. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02018L2001-20240716>. Acesso em: 23 ago. 2025.

EU. (2019a). Regulation (EU) 2019/631 of the European Parliament and of the Council of 17 April 2019 setting CO₂ emission performance standards for new passenger cars and for new light commercial vehicles. Fonte: European Union. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/631/oj/eng>. Acesso em: 23 ago. 2025.

EU. (2019b). Commission Delegated Regulation (EU) 2019/807. Fonte: European Union. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:32019R0807>. Acesso em: 23 ago. 2025.

EU. (2023). Regulation (EU) 2023/2405 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 on ensuring a level playing field for sustainable air transport (ReFuelEU Aviation). Fonte: European Union. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32023R2405>. Acesso em: 23 ago. 2025.

FAO; IFAD; UNICEF; WFP; WHO. The State of Food Security and Nutrition in the World 2023. Urbanization, agrifood systems transformation and healthy diets across the rural–urban continuum. Rome: FAO, 2023.

FARGIONE, J. E.; PLEVIN, R. J.; HILL, J. D. The ecological impact of biofuels. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, v. 41, p. 351-377, 2010.

FARIA, R. et al. Impact of the electricity mix and use profile in the life-cycle assessment of electric vehicles. *Energy and Sustainable Development*, v. 17, n. 6, p. 451-457, 2013.

FRELAT, R.; LOPEZ-RIDAURA, S.; GILLER, K. E.; HERRERO, M.; DOUXCHAMPS, S.; DJURFELDT, A. A.; ERENSTEIN, O.; HENDERSON, B.; KASSIE, M.; PAUL, B. K.; RIGOLOT, C.; RITZEMA, R. S.; RODRIGUEZ, D.; VAN ASTEN, P. J. A.; VAN WIJK, M. T. Drivers of household food availability in sub-Saharan Africa based on big data from small farms. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 113, n. 2, p. 458-463, 2016.

GAN, Y.; LU, Z.; HE, X.; WANG, M.; AMER, A. A. Cradle-to-grave lifecycle analysis of greenhouse gas emissions of light-duty passenger vehicles in China: towards a carbon-neutral future. *Sustainability*, v. 15, n. 3, p. 2627, 2023.

GAO, L.; WINFIELD, Z. C. Life cycle assessment of environmental and economic impacts of advanced vehicles. *Energies*, v. 5, p. 605-620, 2012.

GLOBAL CARBON BUDGET. *Global Carbon Budget 2024*. Disponível em: <https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/>. Acesso em: 19 set. 2025.

GUINÉE, J. B. *et al. Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002.

GURGEL, A. C.; SEABRA, J. E. A.; ARANTES, S. M.; MOREIRA, M. M. R.; LYND, L. R.; GALINDO, R. Contribution of double-cropped maize ethanol in Brazil to sustainable development. *Nature Sustainability*, 2024.

GUTSCHI, A. *End-of-life vehicle recycling in the European Union: challenges and opportunities*. Master's Thesis, Technische Universität Wien (TU Wien), 2022.

HAMZA, K.; LABERTEAUX, K.; CHU, K.-C. An approach for estimating the contributions of various real-world usage conditions towards the attained utility factor of plug-in hybrid electric vehicles. *World Electric Vehicle Journal*, v. 15, n. 10, p. 458, 2024.

HARVEY, M.; PILGRIM, S. The new competition for land: Food, energy, and climate change. *Food Policy*, v. 36, supl. 1, p. S40-S51, 2011.

HAWKINS, T. R. *et al.* Environmental impacts of hybrid and electric vehicles: a review. *International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 17, n. 8, p. 997-1014, 2012.

HAWKINS, T. R. *et al.* Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 17, p. 997-1014, 2013.

HERNÁNDEZ-PÉREZ, N.; CASTILLO-DÍAZ, F. J.; SOTO-DOMÍNGUEZ, A. P. Y; BELMONTE-UREÑA, L. J. Economic drivers of food security in Latin America: A composite indicator analysis. *Sustainable Development*, n/a(n/a), 2025.

HERTEL, T. W.; GOLUB, A.; JONES, A. D.; O'HARE, M.; PLEVIN, R. J.; KAMMEN, D. M. Global land use and greenhouse gas emissions impacts of U.S. maize ethanol: estimating market-mediated responses. *BioScience*, v. 60, n. 3, p. 223-231, 2010.

HUMALISTO, N. H. Climate policy integration and governing indirect land-use changes — Actors in the EU's biofuel policy-formulation. *Land Use Policy*, v. 45, p. 150-158, maio 2015. Acesso em: 28 abr. 2025.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). *Tabela de eficiência energética de veículos automotivos*. Disponível em: <https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/avaliacao-da-conformidade/programa-brasileiro-de-etiquetagem/tabelas-de-eficiencia-energetica/veiculos-automotivos-pbe-veicular>. Acesso em: 23 ago. 2025.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO). (2025a). *CORSIA Sustainability Criteria for CORSIA Eligible Fuels*. Disponível em: <https://www.icao.int/sites/default/files/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA%20Eligible%20Fuels/ICAO-document-05-Sustainability-Criteria-June-2025.pdf>. Acesso em: 5 set. 2025.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO). (2025b). *CORSIA Default Life Cycle Emissions Values for CORSIA Eligible Fuels*. Disponível em:

<https://www.icao.int/sites/default/files/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA%20Eligible%20Fuels/ICAO-document-06-Default-Life-Cycle-Emissions-June-2025.pdf>. Acesso em: 6 set. 2025.

INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION (ICCT). *Annual Report 2023*. Washington, DC: ICCT, 2023. Disponível em: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2024/12/ICCT-Annual-Report-2023-v5-1.pdf>. Acesso em: 19 set. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *Energy Efficiency 2022*. Paris: IEA, 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2022>. Acesso em: 19 set. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *Global EV Outlook 2025*. Paris: IEA, 2025. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025>. Acesso em: 23 ago. 2025.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 14040:2006 – Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. Genebra: ISO, 2006a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 14044:2006 – Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines. Genebra: ISO, 2006b.

IPCC. *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. 2022.

IPCC. *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, 2019.

ISENSTADT, A.; YANG, Z.; SEARLE, S.; GERMAN, J. Real-world usage of plug-in hybrid vehicles in the United States. International Council on Clean Transportation (ICCT) White Paper, Washington, dez. 2022. Disponível em: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/12/real-world-phev-us-dec22.pdf>. Acesso em: 28 set. 2025.

JOSHI, S. *et al.* Life cycle greenhouse gas emissions of vehicles in Nepal: a comparative study. *Journal of Cleaner Production*, v. 349, art. 131409, 2022.

KARABASOGLU, O.; MICHALEK, J. J. Cost-effective design of plug-in hybrid electric vehicles. *Energy Policy*, v. 61, p. 475-487, 2013.

KAWAMOTO, R.; MOCHIZUKI, H.; MORIGUCHI, Y.; NAKANO, T.; MOTOHASHI, M.; SAKAI, Y.; INABA, A. Estimation of CO₂ emissions of internal combustion engine vehicle and battery electric vehicle using LCA. *Sustainability*, v. 11, p. 2690, 2019

KLINE, K. L. *et al.* Biofuels and food prices: Assessing the linkage. *Environmental Science & Technology*, 2017.

LI, Y.; HA, N.; LI, T. Research on carbon emissions of electric vehicles throughout the life cycle assessment taking into vehicle weight and grid mix composition. *Energies*, v. 12, p. 3612, 2019.

LISKA, A. J.; PERRIN, R. The limits of biofuels for mitigating climate change. *Energy Policy*, 2009.

- LIU, Y.; SANTOS, J. R. A review of electric vehicle battery technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 42, p. 1-12, 2015.
- LOMBARDI, L. *et al.* Comparative life cycle assessment of conventional, hybrid, electric and fuel cell vehicles. *International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 22, p. 1989-2006, 2017.
- MANDEV, A.; PLÖTZ, P.; SPREI, F. Factors impacting real-world fuel economy of plug-in hybrid electric vehicles in Europe. *Environmental Research Communications*, v. 6, n. 5, p. 051001, 2024.
- MARINI, D. *et al.* Life Cycle Assessment of Fuel Cell Electric Vehicles for Long-Haul Transport. *Applied Sciences*, v. 13, n. 3, p. 1494, 2023.
- MARTÍNEZ, S. H.; VAN EIJCK, J.; DA CUNHA, M. P.; GUILHOTO, J. J. M.; WALTER, A.; FAAL, A. Analysis of socio-economic impacts of sustainable sugarcane–ethanol production by means of inter-regional Input–Output analysis: Demonstrated for Northeast Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 28, p. 290-316, 2013.
- MCDONOUGH, W.; BRAUNGART, M. *Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things*. New York: North Point Press, 2002.
- MELILLO, J. M.; REILLY, J. M.; KICKLIGHTER, D. W.; GURGEL, A. C.; CRONIN, T. W.; PALTSEV, S.; FELZER, B. S.; WANG, X.; SOKOLOV, A. P.; ADAM SCHLOSSER, C. Indirect emissions from biofuels: How important? *Science*, v. 326, n. 5958, 2009.
- MESSAGIE, M.; BOUREIMA, F. S.; COOSEMANS, T.; MACHARIS, C.; VAN MIERLO, J. A range-based vehicle life cycle assessment incorporating variability in the environmental assessment of different vehicle technologies and fuels. *Energies*, v. 7, p. 1467-1482, 2014
- MORAES, M. A. F. D., BACCHI, M. R. P., & CALDARELLI, C. E. Accelerated growth of the sugarcane, sugar, and ethanol sectors in Brazil (2000–2008): Effects on municipal gross domestic product per capita in the south-central region. *Biomass and Bioenergy*, 91, 116-125, 2016.
- MORAES, M. A. F. D.; OLIVEIRA, F. C. R.; DIAZ-CHAVEZ, R. A. Socio-economic impacts of Brazilian sugarcane industry. *Environmental Development*, v. 16, p. 31-43, 2015.
- NASSIF, S. E. B. *Harnessing renewable energy solutions: including electric vehicle disposal*. Master's Thesis, Politecnico di Milano, 2023.
- NAZLIOGLU, S.; SOYTAS, U. Oil price, agricultural commodity prices, and the dollar: A panel cointegration and causality analysis. *Energy Economics*, v. 34, p. 1098-1104, 2012.
- NJAKOU DJOMO, S.; CEULEMANS, R. A comparative analysis of the carbon intensity of biofuels caused by land use changes. *GCB Bioenergy*, v. 4, p. 392–407, 2012.
- NKOLO, J. C.; MOTEL, P. C.; DJIMELI, C. G. Income-generating effects of biofuel policies: A meta-analysis of the CGE literature. *Ecological Economics*, v. 147, p. 230-242, 2018.

NOSZCZYK, T. A review of approaches to land use changes modeling. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, v. 25, n. 6, p. 1377–1405, 2018.

ODA, H.; NOGUCHI, H.; FUSE, M. Review of life cycle assessment for automobiles: a meta-analysis-based approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 159, 112214, 2022.

PANICHELLI, L.; GNANSOUNOU, E. Impact of agricultural-based biofuel production on greenhouse gas emissions from land use change: key modelling choices. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 42, p. 344–360, 2015.

PAWLAK, K., & KOŁODZIEJCZAK, M. (2020). The Role of Agriculture in Ensuring Food Security in Developing Countries: Considerations in the Context of the Problem of Sustainable Food Production. In *Sustainability* (Vol. 12, Issue 13). <https://doi.org/10.3390/su12135488>

PLASSMANN, K. Direct and indirect land use change. In: KALTSCHMITT, M.; NEULING, U. (eds.). *Biokerosene: Status and Prospects*. Berlin: Springer, 2018. cap. 16, p. 375–402.

PLÖTZ, P.; FUNKE, S.Á.; JOCHEM, P.; WIETSCHER, M. CO₂ mitigation potential of plug-in hybrid electric vehicles larger than expected. *Scientific Reports*, v. 7, n. 16493, 2017.

PLÖTZ, P.; LINK, S.; RINGELSCHWENDNER, H.; KELLER, M.; MOLL, C.; BIEKER, G.; DORNOFF, J.; MOCK, P. Real-world usage of plug-in hybrid vehicles in Europe: A 2022 update on fuel consumption, electric driving, and CO₂ emissions. International Council on Clean Transportation (ICCT) White Paper, Berlin, jun. 2022. Disponível em: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/06/real-world-phev-use-jun22-1.pdf>. Acesso em: 28 set. 2025.

QIAO, Q.; ZHAO, F.; LIU, Z.; HAO, H. Life cycle greenhouse gas emissions of electric vehicles in China: The influence of the power generation mix. *Energy Procedia*, v. 105, p. 3584–3595, 2017.

QIU, C.; COLSON, G.; ESCALANTE, C.; WETZSTEIN, M. Considering macroeconomic indicators in the food before fuel nexus. *Energy Economics*, v. 34, n. 6, p. 2021–2028, 2012.

RAJAGOPAL, D.; PLEVIN, R. J. Indirect land use change from biofuels: overview of modeling approaches. *Energy Policy*, 2013.

RIBEIRO, A. P.; SILVA, C.; MARTINS, J.; GONÇALVES, G.; CARVALHO, A. Life Cycle Assessment of Emerging Mobility Technologies: Comparative Review and Policy Implications. *Sustainability*, v. 17, n. 17, p. 7604, 2024.

ROBLEDO-ABAD, C. et al. Bioenergy production and sustainable development: science base for policymaking remains limited. *GCB Bioenergy*, v. 9, p. 541–556, 2017.

RODRIGUES, L. et al. *Dinâmicas de demanda e oferta de energia pelo agronegócio*. Observatório de Conhecimento e Inovação em Bioeconomia, Fundação Getúlio Vargas - FGV, São Paulo, SP, Brasil. Disponível em:

<https://agro.fgv.br/observatorio-de-bioeconomia/publicacoes>. Acesso em: 23 ago. 2025.

RODRIGUES, L. ABREU, R.S.de. O papel da bioenergia na mobilidade sustentável de baixo carbono. *Agroanalysis*, v.43, n.6. jun. 2023.

ROSA, M. *et al.* A comparison of land use change models: challenges and future developments. *Journal of Cleaner Production*, v. 113, p. 183-193, 2016.

RUSO, F.; RINDONE, C.; PANUCCIO, P. Sustainability Assessment of Urban Mobility Technologies: A Life Cycle Perspective. *Sustainability*, v. 15, n. 14, p. 11027, 2023.

SEARCHINGER, T. *et al.* Use of U.S. croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change. *Science*, 2008.

SEARCHINGER, T. *et al.* Fixing a critical climate accounting error. *Science*, v. 326, p. 527, 2009.

SEARCHINGER, T. *et al.* Do biofuel policies seek to cut emissions by cutting food? *Science*, v. 347, n. 6229, p. 1420-1422, 2015.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE COMPONENTES PARA VEÍCULOS AUTOMOTORES (SINDIPEÇAS). *Frota circulante*. Área de atuação. Disponível em: <https://www.sindipecas.org.br/area-atuacao/?a=frota-circulante&co=s>. Acesso em: 19 set. 2025.

SWIETEK, A. R. Using automated design appraisal to model building-specific devaluation risk due to land-use change. *Sustainable Cities and Society*, v. 74, p. 105529, 2024.

TAGLIAFERRI, C.; EVANGELISTI, S.; ACCONCIA, F.; DOMENECH, T.; EKINS, P.; BARLETTA, D.; LETTIERI, P. Life cycle assessment of future electric and hybrid vehicles: a cradle-to-grave systems engineering approach. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 112, p. 298-309, 2016.

TAHERIPOUR, F. *et al.* Biofuels induced land use change emissions: the role of implemented land use emission factors. *Sustainability*, v. 16, p. 2729, 2024.

TANG, Chen; TUKKER, Arnold; SPRECHER, Benjamin; MOGOLLÓN, José M. Assessing the European electric-mobility transition: emissions from electric vehicle manufacturing and use in relation to the EU greenhouse gas emission targets. *Environmental Science & Technology*, v. 57, n. 1, p. 44-52, 2023.

UNEP – United Nations Environment Programme. *Why take a life cycle approach?* DTI/0585/PA. ISBN 92-807-24500-9. 2004.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR (UNICA). *Frota de veículos automotores e motocicletas*. Disponível em: <https://unicadata.com.br/listagem.php?idMn=147>. Acesso em: 23 ago. 2025.

UNIÃO EUROPEIA. Diretiva (UE) 2018/2001 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 11 de dezembro de 2018, relativa à promoção da utilização de energia de fontes renováveis (reformulação). *Jornal Oficial da União Europeia*, L 328, p. 82-209, 21 dez. 2018. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX:32018L2001>. Acesso em: 23 ago. 2025.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). Economic Research Service (ERS). *U.S. Bioenergy Statistics*. Atualizado em: 21 jul. 2025. Disponível em: <https://www.ers.usda.gov/data-products/us-bioenergy-statistics>. Acesso em: 23 ago. 2025. 2025a.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). *Foreign Agricultural Service (FAS)*. European Union: Biofuels Annual 2025. Haia, 12 ago. 2025. Disponível em: <https://www.fas.usda.gov/data/european-union-biofuels-annual-4>. Acesso em: 23 ago. 2025. 2025b.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). *Foreign Agricultural Service (FAS)*. China: Biofuels Annual 2025. Beijing, 27 ago. 2025. Disponível em: <https://www.fas.usda.gov/data/china-biofuels-annual-11>. Acesso em: 23 ago. 2025. 2025c.

van de VEN, DJ *et al.* (2021). The potential land requirements and related land use change emissions of solar energy. *Scientific Reports*, 11, p. 2907.

VON GREBMER, K. *et al.* 2014 *Global Hunger Index: the challenge of hidden hunger*. Bonn, Washington, DC, and Dublin: Welthungerhilfe, International Food Policy Research Institute, and Concern Worldwide, 2014.

WANG, N.; TANG, G. Environmental efficiency evaluation of new energy vehicles. *Sustainability*, v. 14, n. 6, art. 3371, 2022.

WICKE, B. *et al.* Indirect land use change: review of existing models and strategies for mitigation. *Biofuels*, v. 3, p. 87-100, 2012.

WITCOVER, J.; YEH, S.; SPERLING, D. Policy options to address global land use change from biofuels. *Energy Policy*, v. 56, p. 63-74, 2013.

WOHLSCHLAGER, P. *et al.* Energy efficiency and losses of bidirectional charging systems for EVs. *Advances in Applied Energy*, v. 8, 100095, 2024.

WOLFRAM, P.; LUTSEY, N. *Electric vehicles: literature review of technology costs and carbon emissions*. Washington, DC: International Council on Clean Transportation (ICCT), 2016.

WTO. (1947). *General Agreement on Tariffs and Trade (GATT 1947)*. Disponível em: https://www.wto.org/english/docs_e/legal_e/gatt47_e.htm. Acesso em: 9 ago. 2025.

WU, Z.; WANG, M.; ZHENG, J.; SUN, X.; ZHAO, M.; WANG, X. Life cycle greenhouse gas emission reduction potential of battery electric vehicle. *Journal of Cleaner Production*, v. 190, p. 462-470, 2018

ZHENG, G.; PENG, Z. Life cycle assessment (LCA) of BEVs' environmental benefits for meeting the challenge of ICExit (Internal Combustion Engine Exit). *Energy Reports*, v. 7, p. 2010-2021, 2021