



NOTA TÉCNICA

Descarbonização do Setor de Transporte Rodoviário

Intensidade de carbono das fontes de energia

JUNHO DE 2025

MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA



Diretora

Heloisa Borges Bastos Esteves

Coordenação Técnica

Angela Oliveira da Costa

Equipe Técnica

Angela Oliveira da Costa

Arthur Cortez Pires de Campos

Danilo Perecin

João Pedro Rachid Braga (estagiário)

Marina Damião Besteti Ribeiro

Rachel Martins Henriques

Rafael Barros Araujo

Técnica em Secretariado

Raquel Couto

Imagem da Capa

1. Desenvolvido por [NoName_13 em PixaBay](#).



Ministro de Estado

Alexandre Silveira de Oliveira

Secretário-Executivo

Arthur Cerqueira Valério

Secretário de Transição Energética e Planejamento

Thiago Vasconcelos Barral Ferreira

Secretário de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

Pietro Adamo Sampaio Mendes

<http://www.mme.gov.br>



Presidente

Thiago Guilherme Ferreira Prado

Diretor de Estudos Econômico-Energéticos e Ambientais

Thiago Ivanoski Teixeira

Diretor de Estudos de Energia Elétrica

Reinaldo da Cruz Garcia

Diretora de Estudos do Petróleo, Gás e Biocombustíveis

Heloisa Borges Bastos Esteves

Diretora de Gestão Corporativa

Carlos Eduardo Cabral Carvalho

<http://www.epe.gov.br>

VALOR PÚBLICO

A EPE REALIZA ESTUDOS E PESQUISAS PARA SUBSIDIAR A FORMULAÇÃO, IMPLEMENTAÇÃO E AVALIAÇÃO DA POLÍTICA E DO PLANEJAMENTO ENERGÉTICO BRASILEIRO.

ESTA NOTA TÉCNICA CONTRIBUI COM ESTIMATIVAS PARA A EVOLUÇÃO DA INTENSIDADE DE CARBONO DAS FONTES DE ENERGIA (ICE) E SUAS RESPECTIVAS DEMANDAS ENERGÉTICAS, COM O OBJETIVO DE SUBSIDIAR AS DECISÕES DO CONSELHO NACIONAL DE POLÍTICA ENERGÉTICA, QUANTO ÀS DEFINIÇÕES DAS METAS DO PROGRAMA MOBILIDADE VERDE E INOVAÇÃO (MOVER). TAL PROGRAMA ESTÁ RELACIONADO À LEI DO COMBUSTÍVEL DO FUTURO, QUE BUSCA A INTEGRAÇÃO DE INICIATIVAS E MEDIDAS ADOTADAS EM POLÍTICAS PÚBLICAS COMO O RENOVA BIO, O PROGRAMA MOVER, O PBEV E O PROCONVE, A FIM DE PROMOVER A MOBILIDADE SUSTENTÁVEL DE BAIXO CARBONO.

AO DIVULGAR ESTUDOS QUE EXPLICITEM AS POSSIBILIDADES DE DESCARBONIZAÇÃO DA MATRIZ DE TRANSPORTE RODOVIÁRIO DO BRASIL, FUNDAMENTADAS EM AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO POÇO-À-RODA, A EPE BUSCA AMPLIAR A CAPACIDADE DE PLANEJAMENTO DO SETOR ENERGÉTICO, COM O OBJETIVO DE PROMOVER UMA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA ALINHADA ÀS POTENCIALIDADES, DESAFIOS E VANTAGENS COMPETITIVAS DO BRASIL. ESSA ABORDAGEM BUSCA GARANTIR SEGURANÇA ENERGÉTICA, COMPETITIVIDADE E SUSTENTABILIDADE, CONSOLIDANDO O PAÍS COMO PROTAGONISTA NO CENÁRIO ENERGÉTICO NACIONAL E INTERNACIONAL.

■ Identificação do Documento e Revisões



Área de estudo

Diretoria de Estudos do Petróleo, Gás e Biocombustíveis (DPG)

Superintendência de Derivados de Petróleo e Biocombustíveis (SDB)

Estudo

Intensidade de Carbono das Fontes de Energia

Revisão	Data de emissão	Descrição
r0	27/06/2025	Publicação no site da EPE
r1	04/07/2025	Ajustes: Gráfico 1 e Tabelas 1 e 2 (manutenção dos resultados finais)
r2	23/12/2025	Ajustes na tabela A11 e inserção das tabelas A13 a A14
r3	30/04/2026	Descrição do cálculo de <i>market share</i> do etanol hidratado na frota de veículos <i>flex fuel</i> (sem alteração de valores)

■ Sumário

Glossário.....	1
Objetivo.....	2
Introdução	2
Caracterização dos energéticos	5
Derivados de Petróleo	5
Gás Natural Veicular	7
Biometano.....	8
Etanol anidro e hidratado	8
Biodiesel.....	9
Eletricidade	11
Metodologia	13
Parâmetros Técnicos.....	13
Avaliação de Ciclo de Vida (ACV)	14
Demanda dos energéticos	23
Fontes de Energia – Resultados	28
Intensidade de Carbono Média da Matriz de Transporte	29
Considerações Finais	31
Apêndice	32
A1) Propriedades físicas dos energéticos – Programa Mover	32
A2) Fatores de emissão no uso (queima) dos energéticos	32
A3) Metodologia para o cálculo da intensidade de carbono do gás natural.....	32
A4) Efeito Corona.....	37
A5) Consumo energético dos veículos elétricos	38
A6) Demandas dos energéticos (volume) (2022 – 2034).....	40
A7) Metodologia para cálculo da Intensidade de carbono das misturas de combustíveis nacionais	42
A8) Evolução da intensidade de carbono (gCO ₂ eq/MJ) dos energéticos (2022 – 2034).....	42
A9) Intensidade de Carbono Média da Matriz de Transporte (2022 – 2034)	42
A10) Demandas dos energéticos (volume) (2022 – 2034) de veículos leves (inclui motocicletas).....	43
A11) Participação na demanda dos energéticos na demanda total (em energia) (2022 – 2034) de veículos leves (inclui motocicletas).....	45
A12) Intensidade de Carbono Média da Matriz de Transporte (2022 – 2034) (inclui motocicletas)	46
Referências bibliográficas	47

■ Lista de Gráficos

Gráfico 1: Injeção de energia elétrica para o SIN – Brasil.....	12
Gráfico 2: Intensidade de carbono dos energéticos (poço-à-roda).....	29
Gráfico 3: Intensidade de carbono média das fontes de energia da matriz de transporte rodoviário	29
Gráfico 4: Intensidade de carbono do setor de transporte rodoviário (leves e pesados)	30

■ Lista de Figuras

Figura 1 : Fluxos logísticos de produção, transporte e armazenagem de gasolina e óleo diesel.	5
Figura 2: Cadeia dos derivados de petróleo (gasolina e diesel)	7
Figura 3: Cadeia do gás natural veicular	7
Figura 4: Cadeia do etanol (cana e milho)	9
Figura 5: Cadeia do biodiesel éster (FAME)	11
Figura 6: Ciclo de vida das fontes de energia	14
Figura 7: Cadeia da geração elétrica	19
Figura 8: Perdas de energia elétrica	20

Figura A 1: <i>Fluxograma das etapas produtivas do GN e seu uso final como combustível veicular (GNV) no Brasil. As áreas tracejadas indicam a fonte utilizada para as estimativas das emissões de GEE de cada etapa produtiva. Adaptado de EPE (2024)</i> ¹	33
Figura A 2: <i>Valores de emissão de GEE por etapa de produção do GN. Para essa estimativa, os resultados utilizam GWP do CH₄ de 34 e o PCS (poder calorífico superior) do GN.</i>	35
Figura A 3: Pontos de medição do carregamento de veículos elétricos a bateria	39

■ Lista de Tabelas

Tabela 1: Participação das fontes na matriz elétrica nacional injetada no SIN	12
Tabela 2: Propriedades físicas médias dos energéticos	13
Tabela 3: Intensidade de carbono das fontes de geração elétrica	19
Tabela 4: Demandas dos energéticos (volume).....	25
Tabela 5: Demandas dos energéticos (energia - MJ).....	26
Tabela 6: Participação na demanda dos energéticos na demanda total (em energia)	27
Tabela 7: Evolução da intensidade de carbono (gCO _{2eq} /MJ) dos energéticos	28
Tabela A 1: Propriedades físicas dos energéticos – Programa Mover	32
Tabela A 2: Fatores de emissão no uso (queima) dos energéticos, conforme a RenovaCalc	32
Tabela A 3: Oferta Interna de GN - <i>Valores médios consolidados da exploração e oferta de GN no Brasil, por origem</i>	33
Tabela A 4: Oferta Interna - <i>Valores consolidados de IC do GN, por origem, referentes às etapas de exploração, escoamento, processamento e importação.</i>	34
Tabela A 5: IC das etapas de transporte e distribuição, segregada entre valor reportado no estudo SGI (2015) e valor ajustado com GWP do CH ₄ de 27 e PCI do GN.	35
Tabela A 6: IC da etapa de combustão móvel por tipo de combustível.	36
Tabela A 7: IC das etapas da cadeia de produção e uso do GNV no Brasil e resultado estimado.	37
Tabela A 8: Parcelas que compõem o cálculo do efeito Corona (em gCO ₂ /MJ).....	38
Tabela A 9: Demanda dos energéticos (volume) para 2022; 2024 - 2034	40
Tabela A 10: Evolução da intensidade de carbono (gCO _{2eq} /MJ) dos energéticos.....	42
Tabela A 11: IC do setor de transporte rodoviário e segmentos (leves e pesados)	42
Tabela A 12: Demanda dos energéticos (volume) para 2022; 2024 – 2034 de veículos leves (inclui motocicletas).....	43
Tabela A 13: Participação na demanda dos energéticos na demanda total (em energia) de veículos leves (inclui motocicletas).....	45
Tabela A 14: IC do setor de transporte rodoviário e segmentos (leves e pesados)	46

Glossário

Avaliação do ciclo de vida

Metodologia abrangente e padronizada internacionalmente para quantificar todas as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e o consumo de energia de produto ou serviço, incorporados todos os recursos relevantes consumidos e os impactos gerados até a utilização do produto ou serviço produzido.

Poço-ao-tanque (*well-to-tank*, WTT)

Refere-se às emissões envolvidas nos processos de extração (poço), processamento, armazenamento e distribuição, até o ponto final de uso (tanque). Os seus valores variam conforme a fonte de energia, método de produção e os modos de transporte, até ser disponibilizada ao mercado (SMART FREIGHT CENTRE, 2019).

Tanque-à-roda (*tank-to-wheel*, TTW)

Refere-se às emissões oriundas do uso dos combustíveis, para geração de energia. A eficiência referente a cada tecnologia veicular não foi considerada neste documento (JEC, 2020; SMART FREIGHT CENTRE, 2019).

Poço-à-roda (*well-to-wheel*, WTW)

Compreende as emissões do ciclo de vida dos combustíveis, sendo equivalente ao somatório das etapas poço-ao-tanque e tanque-à-roda (SMART FREIGHT CENTRE, 2019).

Intensidade de Carbono da Fonte de Energia (ICE)

Relação entre a emissão de gases de efeito estufa, com base em avaliação do ciclo de vida, computada no processo produtivo do combustível ou fonte energética e seu uso, expressa em gramas de dióxido de carbono equivalente por megajoule ($\text{gCO}_2\text{eq/MJ}$).

Nota de Eficiência Energético-Ambiental (NEEA)

No âmbito da Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) refere-se à diferença entre as intensidades de carbono do combustível fóssil substituto e a do biocombustível, que é estabelecida no processo de certificação das unidades produtoras (ANP, 2018a).

Crédito de Descarbonização (CBIO)

Instrumento registrado sob a forma escritural, para fins de comprovação da meta individual do distribuidor de combustíveis, no âmbito do RenovaBio, de que trata o art. 7º da Lei nº 13.576/2017 (BRASIL, 2017).

Objetivo

A Lei do Combustível do Futuro, Lei nº 14.993/2024, dispõe em seu artigo 5º que o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) fixará os valores de intensidade de carbono das fontes de energia (ICE) e a participação dos combustíveis líquidos ou gasosos ou da energia elétrica, para fins de apuração do cumprimento das metas do Programa Mobilidade Verde e Inovação (Mover) (BRASIL, 2024a).

Nesse sentido, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) empreendeu os esforços necessários para a atualização da Nota Técnica "*Descarbonização do Setor de Transporte Rodoviário: Intensidade de carbono das fontes de energia*" (EPE, 2022), a pedido do Ministério de Minas e Energia (MME).

A presente Nota Técnica tem por objetivo apresentar uma trajetória para a intensidade de carbono das fontes de energia (ICE) para cada energético do setor de transporte rodoviário, em uma avaliação de ciclo de vida concentrada no poço-à-roda, medida em gramas de CO₂-equivalente por megajoule (gCO₂eq/MJ), de forma a subsidiar o CNPE na definição das metas do Mover. Oportuno destacar que o documento não aborda aspectos relativos à eficiência dos veículos, medida em megajoule por quilômetro (MJ/km).

O estudo revisita a primeira edição, publicada em 2022, conduzida pela EPE em atendimento ao convite da Associação Brasileira de Engenharia Automotiva (AEA), por indicação do Ministério de Minas e Energia (MME), para coordenar o GT Intensidade de Carbono dos atuais e futuros combustíveis da matriz brasileira de transportes, no âmbito do Comitê de Combustíveis da AEA (EPE, 2022).

Introdução

As emissões antrópicas de gases de efeito estufa (GEE) têm sido cada vez mais discutidas em âmbito mundial e a amplificação deste tema ocorre em virtude das consequências potencializadas das mudanças climáticas, como vêm destacando os relatórios periódicos do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas – IPCC. No Sexto e mais recente Relatório de Avaliação (AR6), o IPCC ressalta que é inequívoco que a influência humana tem causado o aquecimento global, com a década de 2011-2020 registrando um aumento de 1,1°C na temperatura média da superfície global em relação ao período de 1850 a 1900. O IPCC afirma que a escala das mudanças recentes no sistema climático como um todo e o estado atual de muitos aspectos desse sistema não tem precedentes ao longo de muitos séculos a muitos milhares de anos (IPCC, 2023).

Entretanto, há meios de limitar esses efeitos e seus riscos, por meio do contínuo desenvolvimento humano e do crescimento econômico sustentável, sendo fundamental realizar ações concretas e ambiciosas em mitigação e adaptação, o que passa pela superação de desafios econômicos, tecnológicos, sociais e institucionais.

O setor de transportes é um dos principais causadores das emissões globais de GEE, com contribuição ainda maior nas emissões de CO₂ relacionadas à energia, das quais respondeu por 23% em 2019. Dentro do transporte, o modo rodoviário foi responsável por 69% das emissões de GEE. Neste sentido, o IPCC considera que o atendimento às metas climáticas exigiria mudanças transformadoras no setor (IPCC, 2022), tornando-se necessário e eficaz colocar os transportes no centro das estratégias de mitigação dos países. No Brasil, dentro do escopo do setor energético, as

emissões do transporte são ainda mais significativas que a média global, alcançando 50% em 2024 (EPE, 2025a).

O Brasil participa ativamente das discussões internacionais sobre mudanças climáticas. Na sua Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) na Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), durante a 21ª Conferência das Partes (COP 21), como signatário do Acordo de Paris, o país assumiu o compromisso de reduzir, em 2025, as emissões de GEE em 37% e em 2030, fez a indicação de diminuir em 43%, tendo o ano de 2005 como referência. Em 2024, foi firmado um novo compromisso, discutido na COP 29, quando o Brasil se comprometeu a reduzir suas emissões de 59% a 67% em 2035 e, como objetivo de longo prazo, almeja atingir a neutralidade de carbono em 2050. Tais medidas continuam englobando todos os setores da economia, como agricultura e energia, nesse último contido o transporte (BRASIL, 2009, 2024b).

A Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) estabelece metas de redução da intensidade de carbono (IC) para a matriz de transportes, com avaliação centrada na eficiência energético-ambiental dos diferentes biocombustíveis, em comparação com os combustíveis fósseis (BRASIL, 2017), visando ampliar a produção e o uso de biocombustíveis na matriz energética brasileira e contribuir para a segurança energética e a previsibilidade do mercado. Os principais instrumentos para a sua implementação podem ser sintetizados em 3 eixos estratégicos: Metas nacionais de redução de emissões de GEE; Certificação da produção de biocombustíveis e Crédito de Descarbonização (CBIO). A adesão dos produtores de biocombustíveis ao RenovaBio é voluntária. Aqueles que certificam sua produção com base na Avaliação de Ciclo de Vida (ACV)¹, conforme estabelecido pela Resolução ANP nº 758/2018, recebem, como resultado, as notas de eficiência energético-ambiental (NEEA) (ANP, 2018a). Maiores detalhamentos sobre o RenovaBio e suas ferramentas estão descritas no Item 3.

A Lei nº 14.902, de 27 de junho de 2024, instituiu o Programa Mobilidade Verde e Inovação (Programa Mover) e revogou dispositivos da Lei nº 13.755/2018, incluindo o que estabeleceu o Programa Rota 2030 (BRASIL, 2018, 2024c). Dentre suas diretrizes, o Mover visa ao incremento da eficiência energética dos veículos comercializados no País, ao aumento dos investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação no Brasil, à promoção do uso de biocombustíveis, de outros combustíveis de baixo teor de carbono e de formas alternativas de propulsão e valorização da matriz energética brasileira, assim como à promoção do uso de sistemas produtivos mais eficientes, com vistas ao alcance da neutralidade de emissões de carbono. O Mover está alinhado com os compromissos do Brasil em relação à descarbonização e ao enfrentamento das mudanças climáticas. Em 15 de abril de 2025, o Decreto nº 12.435² regulamentou o Programa Mover, estabelecendo parâmetros técnicos e ambientais de eficiência energética, reciclabilidade e segurança, que fabricantes e importadores de veículos devem seguir para comercialização no Brasil a partir de junho desse ano (BRASIL, 2025).

¹ Somente a fração da produção de biocombustível de cada produtor que se enquadrar nos critérios de elegibilidade do RenovaBio poderá fazer jus à geração de CBIO. Para isso, este deverá preencher dados referentes à produção agrícola - primários ou padrão (penalizado) - na RenovaCalc (ferramenta do programa que calcula a intensidade de carbono dos biocombustíveis), registrando apenas os dados relativos aos produtores de biomassa que possuem imóveis rurais elegíveis (ANP, 2021a).

² Para efeitos do Decreto 12.435/2025, o conceito de eficiência energética dos veículos é entendido conforme o disposto na Portaria nº 169, de 3 de maio de 2023, do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia – Inmetro (INMETRO, 2023).

A Lei do Combustível do Futuro, sancionada pelo Presidente Luís Inácio Lula da Silva em 08 de outubro de 2024, traz uma série de iniciativas para promover a mobilidade sustentável de baixo carbono e consolidar a posição do Brasil como líder da transição energética global. Para que isto ocorra, as iniciativas e medidas adotadas no âmbito do RenovaBio, do Programa Mover, do Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV) e do Programa de Controle de Emissões Veiculares (Proconve) deverão ocorrer de forma integrada. Tal integração será feita pela adoção da metodologia de avaliação de ciclo de vida com objetivo de mitigar as emissões de CO₂eq com melhor custo-benefício, empregados os conceitos do poço-à-roda e do berço-ao-túmulo (BRASIL, 2024a).

Considerando o nível de emissão de GEE das diferentes opções, é fundamental uma avaliação sistêmica e completa do potencial de descarbonização dessas rotas. Além disso, o direcionamento de políticas públicas e de estratégias empresariais exige a uniformização das fontes e metodologias de cálculo dos fatores envolvidos nessa análise.

Dessa forma, o presente estudo objetiva estimar uma trajetória de evolução das intensidades de carbono para as diferentes fontes de energia que impulsionam as tecnologias veiculares, seja combustão interna, híbridos ou elétricos, e suas respectivas participações na matriz energética do setor de transportes rodoviário, em um horizonte de dez anos. Serão consideradas as características e peculiaridades do mercado brasileiro e a avaliação de ciclo de vida do poço-à-roda. Os combustíveis comerciais considerados foram: gasolina C (gasolina A e etanol anidro), etanol hidratado, diesel B (diesel A e biodiesel) e gás natural veicular (GNV), bem como novos entrantes, como o biometano e a eletricidade, para os anos de 2022, 2024, 2027, 2032 e 2034. Além disso, são apresentados os valores relativos aos combustíveis de referência³ (gasolina E22 e diesel B7).

Reitera-se que a análise da eficiência veicular não faz parte do escopo deste documento, sendo o Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços o responsável pela definição e fiscalização das metas do consumo energético em MJ/km e da emissão de CO₂eq no ciclo de vida corporativo em CO₂eq/km, com base nos valores de ICE, conforme artigo 5º, § 1º da Lei 14.993/2024 (BRASIL, 2024a). Este indicador traz a possibilidade de se realizar uma análise sistêmica e comparativa entre as soluções de descarbonização do transporte rodoviário e de seu potencial.

³ Os combustíveis de referência são estabelecidos pela Resolução ANP nº 864/2021 e empregados nos ensaios de consumo e emissões veiculares. Nesses casos, a gasolina tem adição de 22% de etanol anidro (E22), e o diesel possui um percentual de 7% de biodiesel (B7) (ANP, 2021b). Esses teores de biocombustíveis diferem daqueles disponíveis nos postos de revenda na ocasião de publicação deste documento (27% de anidro para a gasolina C comum e 25% para a *premium*; 14% de biodiesel no diesel B).

Caracterização dos energéticos

Esta seção apresentará dados gerais sobre a produção e a caracterização da cadeia produtiva das fontes de energia utilizadas no setor de transporte rodoviário.

Derivados de Petróleo

Em 2024, o parque de refino brasileiro possuía 18 refinarias⁴ em operação, com capacidade de processamento de 2,3 milhões de barris por dia (bpd), ou 133,5 bilhões de litros por ano, sendo a Petrobras responsável por 82% do total. A gasolina e o óleo diesel são produzidos na maior parte das refinarias nacionais (ANP, 2025a).

As produções de gasolina e óleo diesel foram de 30,8 bilhões de litros e 47,3 bilhões de litros, respectivamente, em 2024. No setor de transporte rodoviário, o consumo de gasolina A foi de 32,3 bilhões de litros e de 46,5 bilhões de litros para o diesel A naquele ano. As importações corresponderam a uma média de 12% e 25%, respectivamente, com base nos últimos cinco anos (EPE, 2025a).

A cadeia dos derivados de petróleo considera as etapas de produção de petróleo (*onshore* e *offshore*, denominada de *upstream*), o transporte para as refinarias e outros produtores (dutos e cabotagem, *midstream*), o processamento e o armazenamento e distribuição para os postos revendedores (*downstream*), vide Figura 1. O petróleo chega às refinarias predominantemente por dutos e a movimentação para os terminais também é majoritariamente feita por esse modo de transporte. Dos terminais para as bases de distribuição, utilizam-se os modos dutoviário, rodoviário, aquaviário e ferroviário. O transporte para os postos revendedores é em maior parte rodoviário.

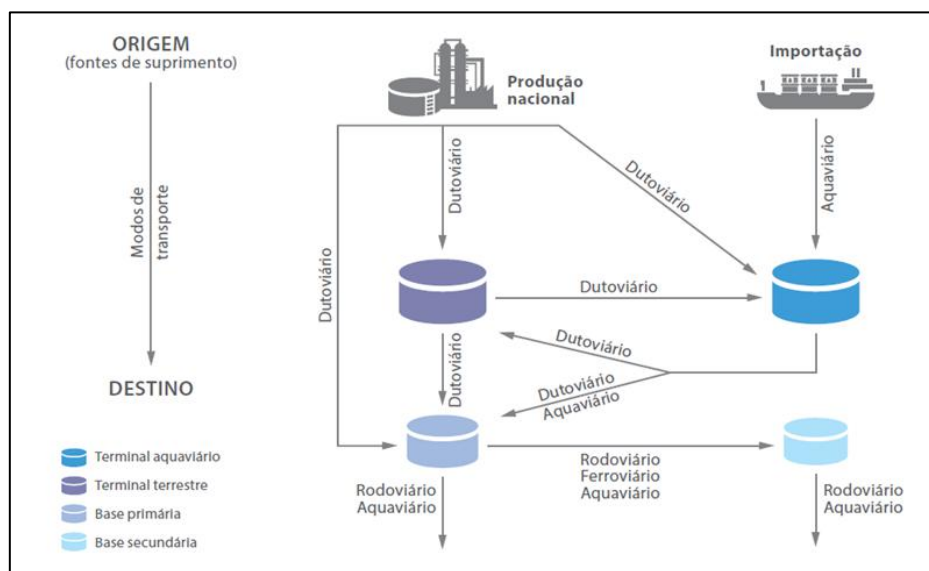


Figura 1 : Fluxos logísticos de produção, transporte e armazenagem de gasolina e óleo diesel.

Fonte: ANP (2015)

⁴ Há ainda a unidade Univen Petróleo, em Itupeva/SP, cujas operações se encontram suspensas desde março de 2014.

A gasolina é obtida nas refinarias, centrais petroquímicas e formuladores a partir da mistura de correntes da destilação atmosférica, craqueamento catalítico, reforma catalítica e alquilação. Também é produzida uma gasolina de maior octanagem⁵ (*premium*), com maiores proporções de correntes desses dois últimos processos. O diesel é obtido pela destilação atmosférica e do hidrotratamento de correntes oriundas de outras unidades de processo, como a de Craqueamento Catalítico (FCC), de Coqueamento Retardado, entre outras.

Em termos de emissões de GEE, estima-se que, em 2022, as operações da indústria de petróleo e gás natural tenham sido responsáveis por 5,1 GtCO₂eq, ou cerca de 15% das emissões globais associadas à energia, sendo 3,5 GtCO₂eq vinculadas ao petróleo (IEA, 2023). Apesar de serem significativas as emissões da cadeia de produção até a obtenção e distribuição dos derivados, cabe ressaltar que a parcela com maior peso na intensidade de carbono da gasolina A e do diesel A reside na etapa de uso desses combustíveis, isto é, resulta da queima dos hidrocarbonetos de origem fóssil que os constituem.

Note-se que a redução de emissões na cadeia de petróleo e derivados é parte da agenda climática nacional e internacional, e em particular das empresas de óleo e gás.

Nas etapas de exploração e produção relata-se grande variabilidade entre o petróleo produzido em função da região, do método de exploração e das características do óleo disponível, entre outros fatores. As iniciativas para mitigação das emissões envolvem o aumento da eficiência e a eletrificação das plataformas, bem como a busca por redução de emissões de metano fugitivas ou oriundas de ventilação e combustão incompleta. Algumas das medidas têm custo de abatimento negativo, ou seja, geram mais benefício econômico para o agente do que custos em sua implementação (IEA, 2023; EPE, 2024a). No Brasil, a ANP divulga o Painel Dinâmico de Emissões de GEE, com as emissões e intensidades de emissão de todas as bacias de produção de petróleo e gás natural brasileiras (ANP, 2025b). Estudos internacionais indicam que a produção no país tem emissões por barril em patamar intermediário ou abaixo da média global, podendo se consolidar como um elemento de competitividade da indústria nacional na transição energética (EPE, 2024a).

No caso das refinarias, há a busca constante por melhorias em seus processos, de forma a aproveitar as correntes de menor valor agregado, reduzir emissões e gerar produtos de qualidade superior. Como exemplo, a produção de uma gasolina *premium* necessita de uma maior participação de processos com gasto energético superior e, por outro lado, o seu uso pode ser mais eficiente em determinados modelos de veículos e em determinadas condições de alta potência. É importante observar que, atualmente, o uso desta gasolina *premium* impacta apenas uma pequena parcela da frota do ciclo Otto, dada a diversidade de características dos motores que compõem a frota nacional e das condições de uso dos veículos (em cidades, congestionamentos, estradas). Além disso, possui preço mais elevado, o que tende a dificultar a sua utilização pela população em geral.

Existe ainda a possibilidade de produção de diesel coprocessado⁶, que se refere à transformação de biomassa renovável simultaneamente com frações médias de petróleo, como o diesel, em refinarias para produção de combustíveis (PETROBRAS, 2025).

⁵ Nesse caso, o teor de etanol anidro é de 25% e o RON é de 97, e para a gasolina C comum, o RON é de 93 (ANP, 2020).

⁶ Este processo envolve a hidrogenação catalítica de uma mistura de frações de óleo diesel e óleo vegetal em um reator de hidrotratamento (HDT), sob condições controladas de alta temperatura e pressão de hidrogênio. A regulamentação vigente permite a comercialização do diesel coprocessado como diesel A, desde que atenda aos critérios de especificação e qualidade (ANP, 2010, 2013). A Petrobras divulgou projetos de baixo carbono no seu Plano Estratégico 2025-2029, visando a produção de diesel com 5% de conteúdo renovável (Diesel R5) (PETROBRAS, 2025).

Nessa etapa do estudo, a intensidade de carbono da gasolina e do diesel serão consideradas constantes, conforme o valor fornecido pela RenovaCalc. A Figura 2 apresenta as etapas envolvidas até o uso desses combustíveis líquidos fósseis.

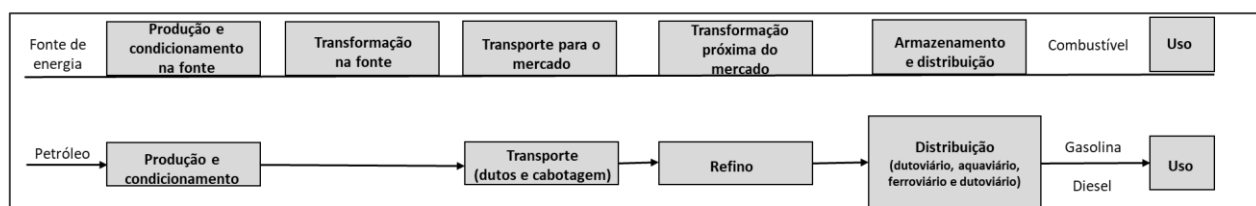


Figura 2: Cadeia dos derivados de petróleo (gasolina e diesel)

Fonte: Elaboração própria com base em JEC (2020)

Gás Natural Veicular

O Brasil possui 12 unidades de processamento de gás natural (UPGN) e a extensão da malha de transporte é de 9.420 km (EPE, 2024b). Além disso, as importações são feitas por meio de três gasodutos internacionais ou como gás natural liquefeito (GNL), recebido em terminais de regaseificação. Em 2024, a produção nacional foi de 55,8 bilhões de m³, sendo 30,3 bilhões de m³ reinjetados. Somada à oferta importada, a oferta total nacional foi de 32,1 bilhões de m³, e o consumo no setor de transporte rodoviário foi de 1,7 bilhão de m³ (12% do consumo final energético de gás natural) (EPE, 2024b).

A cadeia do gás natural, ilustrada na Figura 3, segue um fluxo similar ao observado nos combustíveis líquidos derivados do petróleo, detalhado anteriormente. Após a sua extração dos reservatórios, o gás natural é enviado por meio de gasodutos de escoamento para as UPGN, nas quais passa por separação de contaminantes ácidos (CO₂ e H₂S) e de componentes mais pesados (condensados, como C₂ a C₅+). As UPGN se conectam a gasodutos de transporte, que podem alimentar grandes consumidores e as redes de distribuição, que chegam até a maioria dos usuários finais.

O abastecimento de veículos é uma das diversas aplicações do gás natural, sendo a adoção em automóveis mais consolidada em nichos regionais e frotas de elevada utilização. Já nos veículos pesados, o uso de gás ainda é incipiente, porém promissor como alternativa de transição. Isso se deve aos múltiplos desafios da eletrificação direta com baterias, particularmente em caminhões pesados e que percorrem longas distâncias, e a alternativa dos veículos a gás ganha impulso a partir da combinação do gás de origem fóssil com o biometano de origem renovável para a substituição do diesel, com ganhos para a diversificação e interiorização do suprimento e para a redução de emissões.

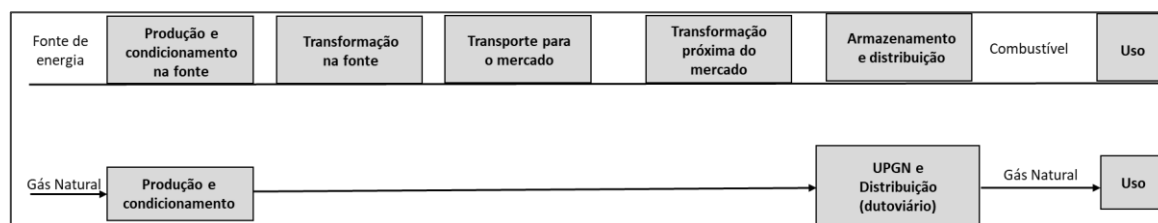


Figura 3: Cadeia do gás natural veicular

Fonte: Elaboração própria com base em JEC (2020)

Biometano

O biometano é obtido pela purificação do biogás gerado via digestão anaeróbia, processo de conversão de material orgânico realizado por microrganismos em um ambiente com ausência de oxigênio. Diferentes substratos podem ser utilizados e a quantidade de biogás produzida depende, principalmente, da tecnologia empregada na digestão e do substrato. No Brasil, o maior potencial de biogás resulta das atividades do setor agropecuário, por exemplo, de resíduos agroindustriais, da produção agrícola e da pecuária confinada. Além de dar origem ao biometano, que é considerado intercambiável ao gás natural⁷, o biogás também pode ser aplicado diretamente para a geração de energia elétrica e térmica, dentre outros usos locais.

A capacidade nacional de produção de biometano ainda é limitada, porém está em processo acelerado de expansão. Em abril de 2025, havia 12 unidades de produção autorizadas a operar pela ANP, sendo que metade destas obtiveram a primeira autorização em 2024 ou no primeiro trimestre de 2025. Adicionalmente, caso os registros de unidades em construção na ANP se efetivem e confirmem seus cronogramas, 35 novas usinas podem se somar ao parque nacional até 2027, levando a capacidade de produção total a mais de 2,1 milhões de m³/dia ou 0,8 bilhão de m³/ano (ANP, 2025a).

O biometano pode ser utilizado nos veículos aproveitando a infraestrutura logística e de postos de abastecimento disponíveis para o gás natural, porém, a produção descentralizada a partir de resíduos também pode fazer com que o abastecimento local e de frotas cativas se dissemine, compondo uma cadeia independente do gás fóssil.

Etanol anidro e hidratado

No Brasil, o etanol de primeira geração (E1G) é produzido em grande escala a partir da cana-de-açúcar e do milho. A produção de etanol pelas usinas sucroenergéticas já está consolidada, com um total de 29,7 bilhões de litros em 2024, concentrada principalmente na região Centro-Sul (responsável por mais de 90% desse total) (MAPA, 2025). O Brasil possui também duas⁸ unidades comerciais de etanol de segunda geração, a partir do bagaço da cana. Por outro lado, as usinas a partir do milho (*full* ou *flex*)⁹ vêm apresentando um crescimento considerável, tendo produzido 7,7 bilhões de litros nesse mesmo ano, com destaque ao estado do Mato Grosso (MAPA, 2025; UNICA, 2025a).

Segundo a ANP (2025c), em abril de 2025, existiam 361 unidades autorizadas a comercializar etanol, sendo que 290 já estavam certificadas no RenovaBio, o que corresponde a 80% do total. Desse montante, 275 produzem o biocombustível a partir da cana (1G e 2G), com volume elegível de aproximadamente 90% da capacidade de produção. Para o etanol de milho¹⁰, o volume elegível era de cerca de 70% nas 7 unidades *full*, e de 65% no caso das 7 usinas *flex*.

⁷ O biometano é um biocombustível padronizado, cujas especificações são regulamentadas pela ANP nas Resoluções nº 886 e nº 906 de 2022 (ANP, 2022a, 2022b).

⁸ Em 2025, a Raízen anunciou que a unidade Costa Pinto da Raízen, a partir da safra 2025/26 será dedicada para testes e futuros desenvolvimentos do biocombustível (NOVACANA, 2025).

⁹ Unidade de milho *full* produz o biocombustível apenas a partir do grão, enquanto a *flex* utiliza também a cana.

¹⁰ A cultura do milho possui uma dificuldade de rastreamento, em função do alto número de fornecedores desse grão para as unidades produtoras do biocombustível.

O etanol, independentemente da matéria-prima que o origina, pode ser produzido e comercializado pelas usinas em duas condições principais que se diferenciam pela especificação do produto. Segundo a regulamentação estabelecida pela ANP, entre outros parâmetros específicos, o etanol anidro deve ter maior teor de etanol (mínimo de 98% em volume) do que o hidratado (mínimo de 94,5% em volume), o que requer uma etapa adicional de separação etanol-água nas unidades produtivas. A diferenciação é exigida, pois enquanto o hidratado é destinado à comercialização nos postos como “etanol” para utilização direta em motores a combustão interna, o anidro é misturado à gasolina A para compor a gasolina C, em formulação efetuada pelas distribuidoras de combustíveis na composição regulamentada, atualmente em 27% em volume (E27).

No transporte rodoviário, o etanol é destinado para os veículos leves, entre os quais predomina o uso de combustíveis do ciclo Otto. O etanol hidratado pode abastecer os veículos exclusivamente a etanol, com reduzida participação na frota, e os veículos *flex*, que dominam o licenciamento de novos veículos leves desde meados da década de 2000 e chegaram a 2024 compondo cerca de 80% da frota. Já o anidro participa, por meio da gasolina C, do atendimento à demanda dos veículos *flex* e dos veículos exclusivos a gasolina, sendo estes minoritários na frota e no licenciamento (EPE, 2025b).

A Figura 4 apresenta as etapas da cadeia do etanol de cana e milho.

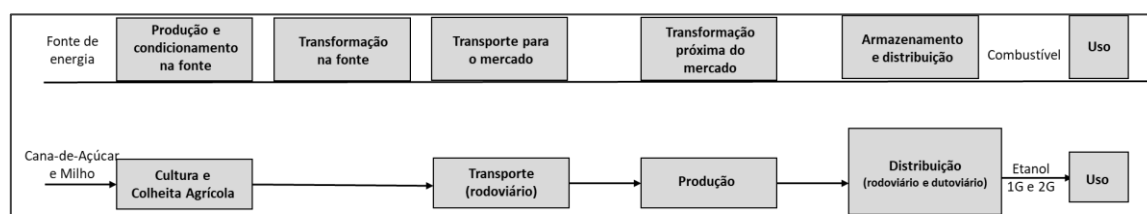


Figura 4: Cadeia do etanol (cana e milho)

Fonte: Elaboração própria com base em JEC (2020)

Biodiesel

O biodiesel é comumente produzido a partir da reação entre triglicerídeos e ácidos graxos com álcool, na presença de um catalisador, resultando em ésteres metílicos ou etílicos de ácidos graxos, denominados de FAME (*Fatty Acid Methyl Ester*) ou FAEE (*Fatty Acid Ethyl Esters*), respectivamente. No país, o metanol é o álcool mais utilizado no processo. Diversas matérias-primas podem ser usadas nessas reações e a soja tem apresentado uma participação majoritária ao longo dos anos, de cerca de 70%, seguida de gordura animal (10%) e de outros insumos, como demais óleos de origem vegetal, óleo de fritura e outros materiais graxos.

O setor nacional de biodiesel FAME registrou um total de 58 usinas produtoras em abril de 2025, mantendo a concentração nas regiões Centro-Oeste e Sul do país. Em 2024, foram consumidos 9,1 bilhões de litros desse biocombustível (ANP, 2025d). Observa-se que, em abril de 2025, o percentual vigente de adição obrigatória do biodiesel é de 14% ao diesel comercializado no país (B14), mantendo-se nesse patamar desde março de 2024 (CNPE, 2023).

Cabe diferenciar o biodiesel FAME do diesel verde, que é um combustível renovável formado por uma mistura de hidrocarbonetos parafínicos com composição química análoga à do combustível fóssil (*drop in*¹¹). O diesel verde pode ser produzido a partir de diferentes rotas, como o hidrotratamento de óleo vegetal e animal, síntese de Fischer-Tropsch a partir de fontes renováveis, bem como processos fermentativos e oligomerização de álcoois (EPE, 2020).

A Resolução ANP nº 842/2021 apresentou a especificação e obrigações quanto ao controle de qualidade do diesel verde (ANP, 2021c). Desta forma, a regulamentação passou a incorporar os avanços tecnológicos e permitiu o uso de outros biocombustíveis do ciclo Diesel, além do biodiesel (FAME). A Lei do Combustível do Futuro criou o Programa Nacional do Diesel Verde (PNDV), o qual define que sua participação volumétrica mínima obrigatória ao diesel B comercializado ao consumidor final deverá ser feita pelo CNPE e não poderá exceder o limite de 3%. Atualmente há projetos para a produção de diesel verde, especificamente o HVO (*Hydrotreated Vegetable Oil*), em produção consorciada com combustíveis sustentáveis de aviação, conforme detalhado em EPE (2024c, 2025b). Estima-se que os volumes produzidos sejam destinados ao mercado externo, onde tal produto tem demanda representativa. Até o momento, não há previsão para a regulamentação do percentual de mistura obrigatório, portanto, o biodiesel parafínico não será considerado neste estudo.

Atualmente, a certificação no RenovaBio das unidades produtoras de biodiesel possui uma dificuldade adicional, uma vez que a matéria-prima, em particular aquela de origem não residual, é proveniente de diversos fornecedores e pode ser custodiada por inúmeros intermediários, o que dificulta seu rastreamento¹² e o processo de certificação.

Das 58 usinas de biodiesel, 37 estavam certificadas¹³ no RenovaBio, correspondente a 64% do total de usinas, com volume elegível de 40% de sua produção (ANP, 2025c). Como consequência do desafio de rastreamento da matéria-prima, a parcela elegível à geração de CBIO correspondeu a cerca de 40% do volume produzido nas unidades certificadas. O desafio do rastreamento da produção também se reflete na incapacidade dos produtores de se certificarem usando dados próprios (primários) referentes à fase agrícola, que contempla o uso de insumos e a produtividade das matérias-primas vegetais das quais se extrai o óleo. Assim, a intensidade de carbono do biodiesel sofre impactos significativos pela adoção do perfil padrão, que usa dados médios da produção nacional acrescidos de penalização, conforme previsto na Lei nº 13.576/2017 (BRASIL, 2017).

Para o transporte rodoviário, em regra, o biodiesel é comercializado apenas como parte da mistura que compõe o diesel B, atualmente como B14. O diesel B é o combustível com maior demanda energética no país, majoritariamente em veículos pesados. Assim, exerce uma função essencial no transporte de cargas, que é dependente de um sistema predominante rodoviário, sendo fundamental no abastecimento de bens em todo o País e em cadeias chave da economia nacional, como o agronegócio.

¹¹ Os biocombustíveis *drop-in* são hidrocarbonetos funcionalmente equivalentes aos de origem petroquímica e totalmente compatíveis com a infraestrutura de petróleo existente (EPE, 2020).

¹² Em junho de 2022, a ANP elaborou o Informe Técnico nº 06/SBQ v.0, que estabelece os procedimentos para implementação e verificação da cadeia de custódia de grãos e óleos vegetais no âmbito do RenovaBio (ANP, 2022c).

¹³ A produção de biodiesel tem uma dificuldade de certificação associada à rastreabilidade da produção de soja, que é a principal matéria-prima empregada (da mesma forma ao que acontece com o milho, como colocado anteriormente).

O transporte rodoviário de cargas em longas distâncias, realizado por caminhões, pode ser considerado um setor de difícil abatimento devido aos desafios da eletrificação com baterias nesses veículos, como o peso elevado e/ou a baixa autonomia e os longos tempos de recarga, bem como particularidades do país, como no desenvolvimento de infraestrutura interiorizada para abastecimento. Por isso, os biocombustíveis que podem ser utilizados em conjunto ou em substituição ao diesel A, como o biodiesel e o diesel verde, desempenham papel relevante na redução de emissões desse setor.

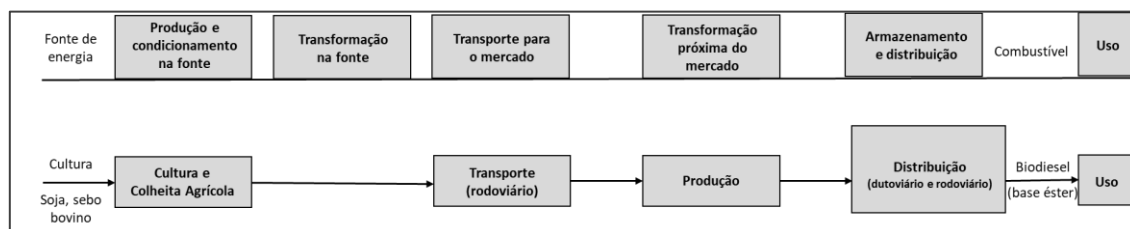


Figura 5: Cadeia do biodiesel éster (FAME)

Fonte: Elaboração própria com base em JEC (2020)

Eletricidade

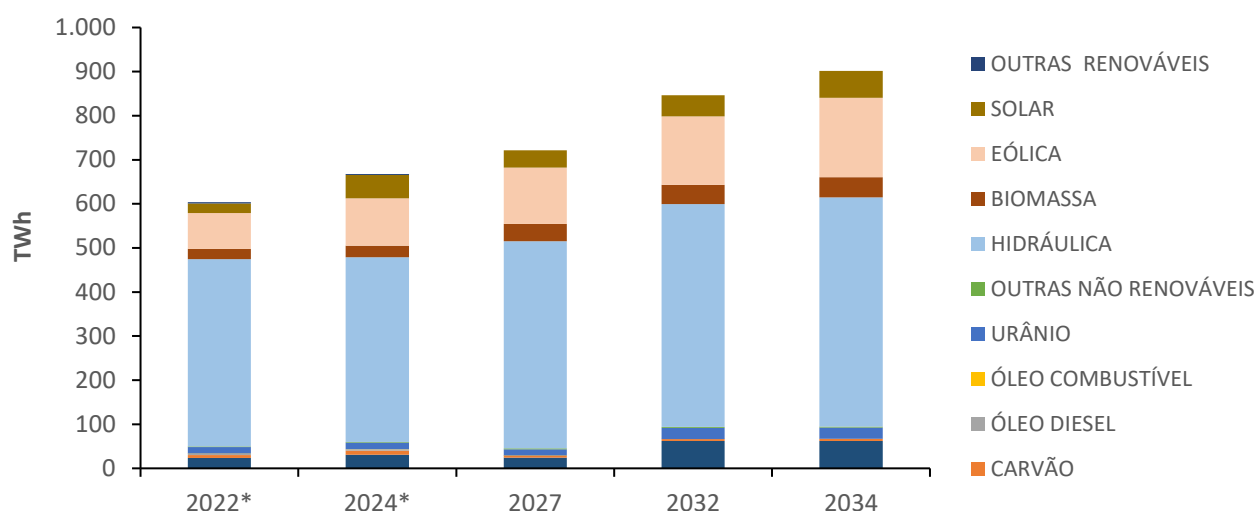
Em um contexto de transição energética, a eletrificação do transporte rodoviário surge como alternativa preponderante em diversos países. Fazem parte desse movimento os veículos híbridos e micro-híbridos, que recebem a adição de sistemas elétricos e baterias, mas mantêm o abastecimento externo exclusivo a combustíveis e a propulsão primariamente baseada em motores a combustão interna, tendo o aumento da eficiência energética como resultado da eletrificação. Já os veículos híbridos *plug-in* e os elétricos a bateria podem ser ou são exclusivamente supridos por energia elétrica, que realiza a propulsão em parte ou totalmente. O crescimento significativo da participação destas categorias no licenciamento de novos veículos no Brasil, em particular entre os automóveis (EPE, 2024d), faz com que a eletricidade ganhe importância como energético para o transporte rodoviário, embora ainda haja tímida participação na frota.

A matriz de geração elétrica brasileira conta com hidroelétricas de grandes reservatórios, capazes de armazenar energia e proporcionar flexibilidade para o atendimento da demanda. Entretanto, por questões diversas, a matriz vem se alterando nos últimos anos e esta mudança de perfil caminha no sentido de reduzir a participação da fonte hídrica e ampliar a geração por fontes não controláveis, o que amplia os desafios para assegurar a confiabilidade operativa e a segurança do suprimento energético do sistema interligado nacional (SIN). O setor elétrico nacional tem promovido, no decorrer do tempo, diversas iniciativas que vêm contribuindo para manter a elevada participação de renováveis, aproveitamento de recursos que o Brasil dispõe em abundância e com características que tornam competitiva a geração por essas fontes.

Em 2024, a injeção elétrica na rede foi de 668,1 TWh, com mais de 90% do total da energia renovável, incluindo as fontes de origem hídrica, seguida de eólica, biomassa e solar (EPE, 2025a). A elevada participação de renováveis se mantém ao longo da próxima década, conforme Gráfico 1, de acordo com os dados do PDE 2034 (EPE, 2025b). A participação percentual das fontes da matriz de geração elétrica injetada no SIN (exclui autoprodução e geração distribuída)¹⁴ está apresentada na Tabela 1.

¹⁴ Para maiores detalhes das projeções de geração elétrica, sugere-se consultar o Capítulo 3 do PDE 2034 (EPE, 2025b).

Gráfico 1: Injeção de energia elétrica para o SIN – Brasil



Nota: Dados do ano de 2022 e 2024 são referentes ao histórico do BEN.

Fonte: EPE (2025a; 2025b)

Tabela 1: Participação das fontes na matriz elétrica nacional injetada no SIN

	2022	2024	2027	2032	2034
Gás Natural	4%	5%	3%	7%	7%
Carvão	1%	1%	1%	1%	1%
Óleo Diesel	1%	0%	0%	0%	0%
Óleo Combustível	0%	0%	0%	0%	0%
Urânio	2%	2%	2%	3%	3%
Outras não renováveis	0,2%	0,2%	0%	0%	0%
Não renováveis	8%	9%	6%	11%	10%
Hidráulica	70%	63%	65%	60%	58%
Biomassa	4%	4%	5%	5%	5%
Eólica	14%	16%	18%	18%	20%
Solar	4%	8%	5%	6%	7%
Outras renováveis	0,4%	0,4%	0%	0%	0%
Renováveis	92%	91%	94%	89%	90%

Nota 1: A participação da biomassa, para o ano de 2024 foi determinado conforme o Balanço Energético Nacional (EPE, 2025a). Para 2027, 2032 e 2034 é composta por 80% daquela oriunda da cana-de-açúcar e 20% de lixo.

Fonte: EPE (2025a, 2025b)

Metodologia

Esta seção descreverá os parâmetros técnicos dos energéticos considerados neste estudo, assim como a abordagem da avaliação de ciclo de vida (ACV) e os fatores utilizados para estimativa das respectivas intensidades de carbono. Também serão apresentadas as demandas estimadas no horizonte decenal que, quando relacionadas às ICEs, resultarão na intensidade de carbono média do setor de transporte rodoviário do Brasil.

Parâmetros Técnicos

A Tabela 2 sumariza as principais propriedades dos combustíveis, a massa específica e o poder calorífico inferior (PCI), que foram considerados constantes no horizonte de estudo e que estão de acordo com o disponibilizado no Balanço Energético Nacional, ANP e RenovaCalc.

Tabela 2: Propriedades físicas médias¹⁵ dos energéticos¹⁶

COMBUSTÍVEIS	Massa Específica	PCI		Conteúdo Energético
LÍQUIDOS	(kg/litro)	(kcal/kg)	(MJ/kg)	(MJ/litro)
Etanol Anidro¹	0,791	6.750	28,26	22,36
Etanol Hidratado¹	0,809	6.300	26,38	21,34
Gasolina A¹	0,742	10.400	43,54	32,31
Biodiesel	0,88	9.000	37,68	33,16
Diesel A¹	0,84	10.100	42,29	35,52
GASOSOS	(kg/m ³)	(kcal/m ³)	(MJ/kg)	(MJ/m ³)
GNV¹	0,74	8.800	49,79	36,84
Biometano (96,5% de metano)	0,76	8.758	48,25	36,67

Nota 1: Registra-se a diferença entre os valores dessas propriedades físicas (principalmente para o etanol hidratado e o GNV) em relação ao considerado no Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV/INMETRO) (INMETRO, 2016, 2020, 2023), que são apresentados no Apêndice A1 (Tabela A1).

Nota 2: De acordo com o Balanço Energético Nacional, para a eletricidade, o PCI é de 860 kcal/kWh (EPE, 2025a).

Fonte: ANP (2018a, 2018b, 2024), EPE (2025a)

¹⁵ Os valores de PCI utilizados na RenovaCalc são os mesmos adotados para esse estudo, com exceção do GNV.

¹⁶ Vide nota de rodapé 3 sobre combustíveis de referência.

Avaliação de Ciclo de Vida (ACV)

Para avaliar o nível de emissões da matriz energética de transporte rodoviário é necessário determinar a intensidade de carbono (IC), em $\text{gCO}_2\text{eq/MJ}$, dos vários energéticos que podem ser usados. Será empregada a metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), que corresponde a todas as etapas relacionadas à produção, como a extração e processamento da matéria-prima, distribuição, uso, reuso, manutenção e a disposição final no meio ambiente. A ACV é uma ferramenta, padronizada por normas técnicas internacionais, que avalia as consequências ambientais e para a saúde humana associadas a um produto ou processo, determinando a quantidade de CO_2eq emitida em todas as etapas por unidade de energia relativa a cada combustível (ABNT, 2014).

O escopo do presente estudo está delimitado ao cálculo da intensidade de carbono das fontes de energia (ICE), e terá como referência o conceito do poço-à-roda, não sendo tratadas as emissões envolvidas na construção das unidades fabris e na fabricação dos veículos (quando todas essas etapas são consideradas, utiliza-se a denominação berço-ao-túmulo). A Figura 6 ilustra as etapas relacionadas ao ciclo de vida das fontes de energia, nos termos adotados nessa análise.

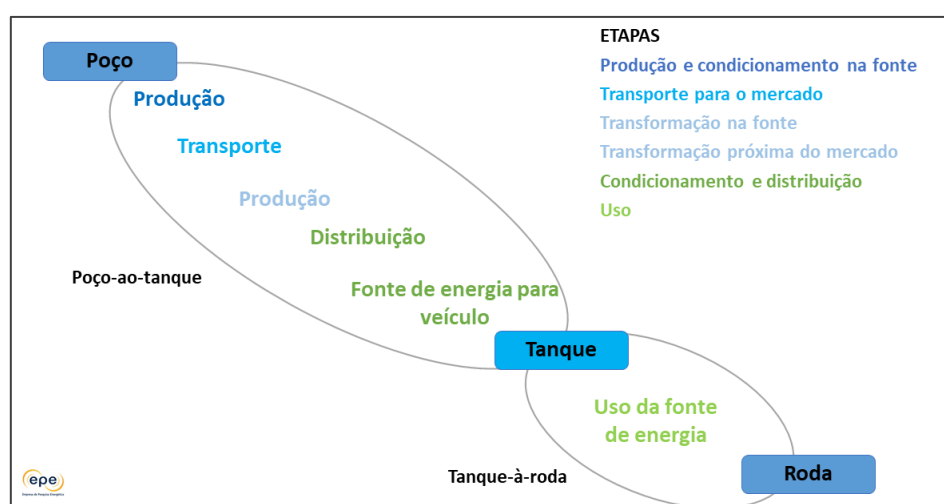


Figura 6: Ciclo de vida das fontes de energia

Fonte: EPE (Elaboração própria) com base em JEC (2020)

Dessa forma, esse estudo apresentará a intensidade de carbono das fontes de energia do setor de transporte rodoviário, englobando os processos de produção, armazenamento, distribuição e uso nos veículos.

O período de análise considera o horizonte até 2034, para os energéticos que podem ser utilizados no setor de transporte rodoviário, que são gasolina C (gasolina A e etanol anidro), etanol hidratado, diesel B (óleo diesel e biodiesel), gás natural veicular, biometano e eletricidade. Os resultados serão apresentados para 2022, 2024, 2027, 2032 e 2034. Uma análise similar foi conduzida para a gasolina e o diesel de referência.

No âmbito do RenovaBio, a ferramenta denominada de RenovaCalc determina a intensidade de carbono dos biocombustíveis, além de apresentar, para efeitos comparativos, valores fixos para os combustíveis fósseis, como será detalhado a seguir. Para a eletricidade, foi conduzida uma análise adicional, considerando outras fontes de referência.

A RenovaCalc é a ferramenta oficial do RenovaBio, utilizada para calcular a intensidade de carbono dos biocombustíveis ($\text{gCO}_{2\text{eq.}}/\text{MJ}$)¹⁷ por meio da Avaliação de Ciclo de Vida Atribucional¹⁸, com alocação por critério energético. Possui a abrangência do poço-à-roda, ou seja, contabiliza as emissões desde a extração de recursos naturais, a aquisição ou produção e tratamento da biomassa, sua conversão em biocombustível, até sua combustão em motores, incluindo todas as fases de transporte (ANP, 2018a). Observa-se que, atualmente, a RenovaCalc não contempla nos cálculos das intensidades de carbono os impactos relacionados à mudança de uso da terra, assim como as emissões fugitivas¹⁹.

A ferramenta apresenta as intensidades de carbono das fases agrícola, industrial, de distribuição e de uso, de forma separada. Na fase agrícola de produção, tem-se a opção de “perfil específico” (dados primários do produtor) ou “perfil padrão” (perfil médio da produção nacional, acrescido de penalização)²⁰. Na fase industrial, sempre são solicitados dados primários referentes ao processo de produção dos biocombustíveis de cada unidade. Na etapa de distribuição, a ferramenta adota uma distância média²¹, da usina ao consumidor, para todos os modos²² (rodoviário; dutoviário; ferroviário e marítimo²³), cujo valor para o etanol de cana é de 700 km. Para o etanol de milho nacional e importado, biodiesel e bioquerosene, é de 1500 km, enquanto para o biometano é de 43 km. Por fim, com relação ao uso do biocombustível, foram adotadas estimativas de gases de efeito estufa para fontes intersetoriais (ANP, 2018a).

As rotas de produção de biocombustíveis²⁴ consideradas na RenovaCalc são:

- Biodiesel;
- Biometano;
- Combustíveis alternativos sintetizados por ácidos graxos e ésteres hidroprocessados;
- Etanol Combustível.
 - a) primeira geração de cana-de-açúcar;
 - b) primeira e segunda geração em usina de cana integrada;
 - c) segunda geração;
 - d) primeira geração de cana-de-açúcar e milho em usina integrada (*flex*);
 - e) primeira geração de milho; e
 - f) primeira geração de milho importado.

¹⁷ Os gases de efeito estufa considerados estão detalhados no Apêndice A2 (Tabela A2).

¹⁸ Técnica descritiva ou contábil que tem como objetivo atribuir a um produto, fabricado em dado momento, parcela das emissões totais de poluentes e do consumo de recursos na economia (WEIDEMA & EKVALL, 2009).

¹⁹ A Resolução CONAMA nº 501/2021 define emissão fugitiva como o lançamento difuso na atmosfera de qualquer forma de matéria sólida, líquida ou gasosa, efetuado por uma fonte desprovida de dispositivo projetado para dirigir ou controlar seu fluxo (CONAMA, 2021).

²⁰ A Resolução ANP nº 758/2018 também apresenta os valores típicos para a produção nacional de biocombustíveis, os quais buscam representar a quantidade média de insumos aportados aos sistemas de produção agrícola brasileiros (ANP, 2018a).

²¹ As distâncias médias adotadas na RenovaCalc correspondem a uma aproximação (ANP, 2018b).

²² Para maiores detalhes, sugere-se consultar a Tabela 2 da Nota Técnica “RenovaCalc: método e ferramenta para a contabilidade da intensidade de carbono de biocombustíveis no Programa RenovaBio”. Coloca-se que os sistemas logísticos dutoviário, ferroviário e marítimo também contemplam o modo rodoviário em sua composição (ANP, 2018b).

²³ Apenas para o etanol de milho importado.

²⁴ Os dados de inventário dos processos a montante do processo agrícola provêm da base de dados Ecoinvent v.3.1 (WERNET *et al.*, 2016). Priorizou-se a adoção de inventários de produção e processamento para o Brasil (BR), globais (GLO2) e, na indisponibilidade desses, utilizaram-se os inventários 'RoW3' (ANP, 2018a).

A RenovaCalc também apresenta valores fixos para as intensidades de carbono dos combustíveis fósseis²⁵ substitutos, que são gasolina A, diesel A, gás natural e querosene de aviação, determinados com base em dados da literatura, os quais foram adotados nesse estudo. A diferença entre a intensidade de carbono do combustível fóssil substituto e a do biocombustível corresponde à Nota de Eficiência Energético-Ambiental (NEEA), resultante do processo de certificação das unidades produtoras.

As unidades produtoras e importadores que decidem participar do RenovaBio e obter o Certificado da Produção Eficiente de Biocombustíveis, devem atender a uma série de critérios de elegibilidade como, por exemplo, não haver supressão vegetal na área do imóvel com Cadastro Ambiental Rural (CAR) ativo ou pendente na qual a biomassa energética é plantada, a partir de dezembro de 2017, e que estão detalhados nas Resoluções ANP nº 758/2018 e nº 802/2019 (ANP, 2018a, 2019) e Informe Técnico ANP nº 02/SBQ (ANP, 2021a).

Para a estimativa das intensidades de carbono dos energéticos que compõem a análise deste estudo, foram utilizados os valores certificados no RenovaBio e a caracterização dos sistemas típicos de produção de soja, milho e cana, conforme publicado recentemente pela Embrapa (2023, 2024a, 2024b), na versão mais recente da RenovaCalc. A descrição dos cálculos e dos valores estimados para cada um dos energéticos serão detalhados a seguir.

Gasolina e Diesel

De acordo com a RenovaCalc, a intensidade de carbono da gasolina A é de 87,4 gCO₂eq/MJ e do diesel A é de 86,5 gCO₂eq/MJ, consideradas como valores representativos dos derivados disponibilizados no País. O fator de emissão relacionado ao uso é de 71,33 gCO₂eq/MJ e de 74,43 gCO₂eq/MJ, respectivamente (ANP, 2018a).

Dessa forma, e entendendo que não houve mudança significativa publicada nos valores para a gasolina e o diesel, as análises deste estudo utilizaram os valores supracitados.

Gás Natural Veicular (GNV)

Dentro do escopo do RenovaBio, não foi estabelecida diretamente uma intensidade de carbono para o gás natural (GN)²⁶. Com o objetivo de representar as emissões associadas ao GNV nacional, este documento apresenta uma proposta de metodologia para determinar um novo valor da intensidade de carbono desse combustível, conforme detalhado no Apêndice A3.

De forma geral, para a estimativa das emissões a montante (poço-ao-tanque) da cadeia do gás natural, foi considerado todo o perfil de sua produção e origem no Brasil (*offshore*, *onshore*, importação Gasbol e gás natural liquefeito - GNL), com atenção para inclusão das emissões fugitivas potenciais de metano de cada etapa. Diferentes bancos de dados e estudos específicos das emissões de GEE inerentes à cadeia desse combustível foram utilizados para compor uma IC mais compatível com a realidade brasileira. O valor da IC estimado da etapa do poço-ao-tanque foi de 19,04 gCO₂eq/MJ. Já as emissões do uso/queima (tanque-à-roda) são da ordem de 57,81 gCO₂eq/MJ,

²⁵ Os valores de intensidade de carbono dos combustíveis fósseis, fornecidos pela RenovaCalc, podem ser aprimorados por meio de dados dos processos de extração e processamento.

²⁶ O “combustível fóssil substituto” de origem fóssil para o cálculo da NEEA do biometano é uma referência à média entre diesel, gasolina e gás natural, refletindo a diversidade de utilização do gás renovável no transporte.

conforme prevista no RenovaBio. Dessa forma, a IC final do GNV estimada neste estudo foi de 76,85 gCO_{2eq}/MJ.

Etanol Anidro e Hidratado

A intensidade de carbono do etanol foi estimada por meio de simulações na RenovaCalc V7, utilizando-se: (i) dados agrícolas regionalizados dos perfis típicos no Brasil do cultivo da cana-de-açúcar e do milho, disponibilizados pela Embrapa (2024a, 2024b); e (ii) dados industriais médios a partir dos valores mais recentes publicados nas certificações do RenovaBio. A partir disso, foi possível aferir uma IC compatível com a realidade de cada uma dessas cadeias produtivas agrícolas, que foi considerada a mesma para os anos 2022 e 2024.

Foi considerada também a participação proporcional da cana-de-açúcar e do milho na oferta interna de etanol total, de 79% e 21% em 2024²⁷, respectivamente. Dessa forma, as IC do ano de 2024 foram estimadas em 22,39 gCO_{2eq}/MJ para etanol anidro e 22,73 gCO_{2eq}/MJ para etanol hidratado. Para 2022, os valores são, respectivamente, 22,26 gCO_{2eq}/MJ e 22,65 gCO_{2eq}/MJ.

Vale registrar também que, caso a metodologia de cálculo da IC do etanol fosse baseada nas Notas de Eficiência Energético-Ambiental (NEEA) das certificações mais recentes registradas no RenovaBio, os valores estimados seriam superiores, devido à penalização imposta aos dados não primários (padrão) dos produtores. Para o ano de 2024, a IC considerando-se os valores certificados no RenovaBio e a participação proporcional da cana-de-açúcar e do milho na oferta interna de etanol, seria de 27,95 gCO_{2eq}/MJ para etanol anidro e 28,37 gCO_{2eq}/MJ para etanol hidratado.

Para traçar as trajetórias de redução das IC do etanol anidro e hidratado nos próximos anos, foi considerada a implementação de melhores práticas agrícolas, como o uso de biometano na frota agrícola da cana-de-açúcar (UNICA, 2025b), resultando em uma taxa de redução anual das IC de 0,9% ao ano para o etanol de cana e 0,5% ao ano para o etanol de milho²⁸.

Biodiesel

As certificações das usinas de biodiesel no RenovaBio, principalmente aquelas que processam óleo de soja e outros óleos/gordura animal, possuem uma variação significativa nas NEEA e na elegibilidade das matérias-primas utilizadas, o que apresenta desafios no tratamento desses dados.

Dessa forma, foi aplicada a mesma metodologia de cálculo descrita para o etanol, sendo a IC do biodiesel também determinada por meio de simulação na RenovaCalc V7, utilizando-se: (i) dados agrícolas regionalizados do perfil típico do cultivo da soja no Brasil (EMBRAPA, 2023); e (ii) dados industriais referentes aos valores mais recentes publicados nas certificações do RenovaBio. A partir do banco de dados das certificações compartilhado pela ANP (2025e) foi possível representar na RenovaCalc um *mix* médio de processamento das diferentes matérias-primas utilizadas na produção do biodiesel nacional. O perfil de processamento de matérias-primas resultante foi cerca de 68% de óleo de soja, 9% de outros óleos vegetais (palma, algodão e outros) e 23% de óleos e gorduras residuais (óleo de fritura usado, gordura animal e outros). A escolha de se utilizar valores típicos agrícolas da soja em detrimento dos valores agrícolas certificados no RenovaBio e um *mix* médio de matérias-primas na fase industrial, além de garantir a utilização da mesma metodologia aplicada ao

²⁷ Em 2022, a participação do etanol de cana era de 86% e de milho, 14%.

²⁸ Caso fosse realizada uma análise baseada nas IC das certificações, que contém valores penalizados, outra possível via de melhoria da IC seria o aumento do uso de dados primários em detrimento de dados padrão. Isto levaria a uma menor penalização, principalmente no caso do milho que ainda possui baixo uso de dados primários.

etanol, se deu também pela lógica de que parte do setor não consegue rastrear toda a cadeia de matérias-primas requeridas pela política e praticamente não utiliza dados primários. Dessa forma, as certificações apresentam uma performance em emissões não compatível com a realidade do setor.

Diante do descrito, a IC estimada do biodiesel foi de 28,4 gCO₂eq/MJ. Já a trajetória de redução da IC do biodiesel para os próximos anos seguiu a mesma lógica aplicada ao etanol, considerando melhores práticas agrícolas e ganhos de produtividade. Dessa forma, foi estimada uma redução anual média da IC do biodiesel de 0,5% ao ano²⁹.

Biometano

A intensidade de carbono do biometano baseou-se nas certificações vigentes do RenovaBio. Registra-se que, ao final de março de 2025, quatro unidades produtoras de biometano estavam certificadas, com 100% de volume elegível, apresentando uma intensidade de carbono média de 8,35 gCO₂eq/MJ. Assumiu-se esse valor a partir de 2024, e que permanecerá constante ao longo do período. Para 2022, a intensidade de carbono das usinas de biometano certificadas era de 9,32 gCO₂eq/MJ.

Eletricidade

A análise dos impactos das emissões relacionadas à geração elétrica incorpora os consumos energéticos decorrentes das etapas de extração das fontes primárias, transformação, transmissão, distribuição e uso. Para a determinação da sua intensidade de carbono, foram considerados os valores dos fatores de emissão apresentados pelo IPCC (mediana) e Ecoinvent 3.11 (2018), para cada fonte que compõe a matriz nacional, conforme detalhado na Tabela 3. A Figura 7 apresenta as etapas da cadeia da geração de eletricidade.

²⁹ Vale ressaltar que, caso a IC de referência fosse estimada a partir dos valores certificados no RenovaBio, uma via importante de melhoria da IC seria novamente o aumento do uso de dados primários, o que faria com que os valores médios da IC do biodiesel de soja se afastassem de valores penalizados e convergissem para patamares mais próximos do perfil típico analisado.

Tabela 3: Intensidade de carbono das fontes de geração elétrica

Fontes de geração elétrica	IC (gCO _{2eq} /MJ)	Fonte
Hidroelétrica	6,67	IPCC
Eólica	3,06	IPCC
Solar	11,39	IPCC
Bagaço de Cana	13,68	Ecoinvent 3.11
Lenha	16,56	Ecoinvent 3.11
Lixívia	45,28	Ecoinvent 3.11
Outras fontes renováveis	6,90	IPCC/Ecoinvent 3.11
Nuclear	3,31	IPCC
Carvão Vapor	227,78	IPCC
Gás Natural	136,11	IPCC
Gás de Coqueria	525,00	Ecoinvent 3.11
Óleo Combustível	208,89	Ecoinvent 3.11
Óleo Diesel	204,72	Ecoinvent 3.11
Outras fontes não renováveis	133,50	IPCC/Ecoinvent 3.11

Nota: Refere-se às intensidades de carbono das fontes de energia, conforme IPCC e Ecoinvent 3.11, ponderadas pela participação das fontes de energia na matriz elétrica (2014 a 2023), conforme dados apresentados por EPE (2025a).

Fonte: EPE (2025a); Ecoinvent 3.11 (2018); IPCC (2013, 2023); Schlömer et al. (2014); WERNET et al. (2016)

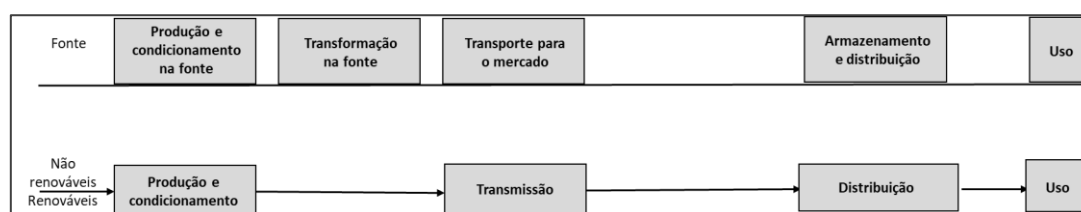


Figura 7: Cadeia da geração elétrica

Fonte: Elaboração própria com base em JEC (2020)

As perdas referem-se à contabilidade da energia elétrica gerada, que passa pelas linhas de transmissão (rede básica) e redes da distribuição, mas que não é comercializada, seja por motivos técnicos ou comerciais³⁰ (não técnicas). Estas são verificadas nos diversos segmentos do sistema, além dos sistemas de transmissão, distribuição de média e baixa tensão, e em transformadores de distribuição, ramais de ligação, medidores, entre outros. O cálculo das perdas de energia nas redes e equipamentos associados é realizado através de um método adequado de fluxo de potência para redes de distribuição (COSTA, 2019).

³⁰ As perdas comerciais médias não foram contempladas neste estudo por se observar, historicamente, uma discrepância considerável entre os estados brasileiros.

Nesse contexto, esse estudo considerou somente as perdas técnicas, que correspondem a uma média de 11,5%, valor mantido constante ao longo do período. A Figura 8, a seguir, ilustra a alocação destas perdas nos sistemas de transmissão e distribuição. Note-se que as perdas técnicas relativas à transmissão somam 4,0% e as referentes ao sistema de distribuição, 7,5% (ANEEL, 2022). Além disso, foram contempladas as emissões de N₂O e ozônio, devido à ionização do ar na camada limítrofe (corona), provocada pelo campo elétrico-magnético das linhas de alta voltagem, no valor de 3,9 gCO_{2eq}/MJ (ARRUDA, 2012; Ecoinvent 3.5, 2018; IPCC, 2013). Observe-se que as emissões relativas ao denominado efeito corona são de complexa determinação, uma vez que estão associadas às condições locais e especificações de projeto (THE WORLD BANK, 2010)³¹. No que se refere às perdas do carregamento de veículos elétricos, as normas de ensaios específicas, que estão sendo definidas pela ABNT, deverão incluir todas as ineficiências e perdas elétricas a partir da tomada de corrente alternada da rede, incluindo as dos carregadores³² indicados pelo fabricante do veículo. Nesse estudo, não foram contabilizadas as perdas no carregamento de veículos elétricos³³.

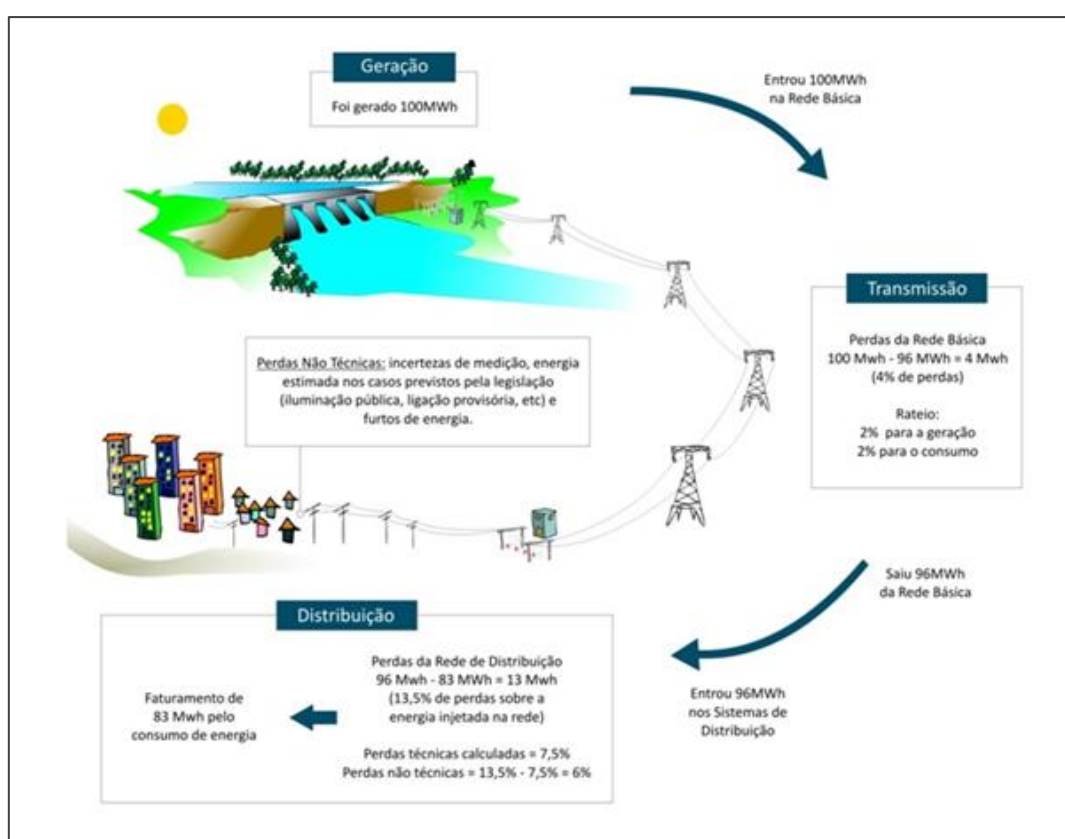


Figura 8: Perdas de energia elétrica

Fonte: ANEEL (2022)

³¹ Maiores detalhes sobre as emissões associadas ao efeito corona estão apresentadas no Apêndice A4.

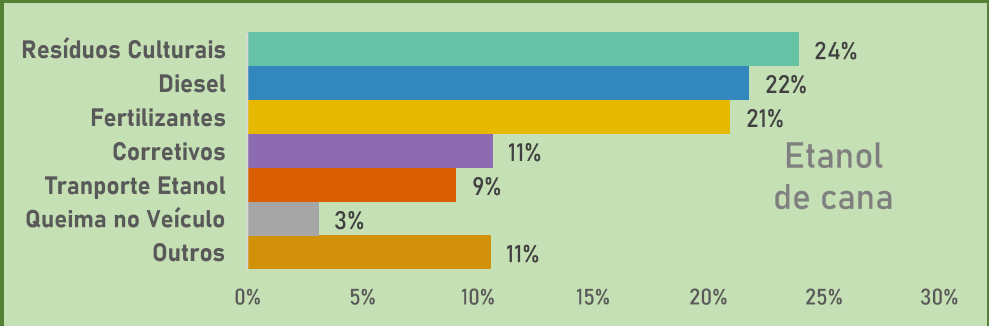
³² Caso estas perdas relativas ao carregamento não sejam medidas, por se tratar de um cálculo genérico de avaliação de ciclo de vida e que não se refira a um veículo específico, poderá ser utilizado o valor médio de 16%, de acordo com DOE (2018).

³³ Detalhes acerca do carregamento de veículos elétricos estão no Apêndice A5 (Consumo energético dos veículos elétricos, Figura A 3).

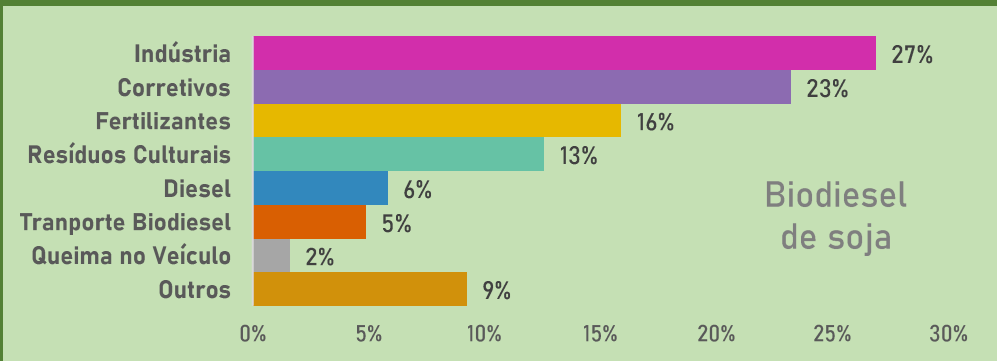
PERFIS DE INTENSIDADE DE CARBONO (IC) DO ETANOL E DO BIODIESEL:
PRINCIPAIS OFENSORES

O RenovaBio promove a certificação voluntária dos produtores de biocombustíveis com incentivo para a redução progressiva da IC, dado que resulta no aumento da geração de CBO e da remuneração na comercialização do produto. A partir dos dados inseridos individualmente na RenovaCalc, o produtor pode identificar quais etapas e insumos impactam as emissões do processo, iluminando as ações que podem ser realizadas para a sua redução.

O primeiro gráfico deste Box mostra uma estimativa da parcela do impacto de cada etapa/insumo na IC do etanol de cana-de-açúcar, com base em um perfil típico, representativo do setor. Fica evidente que a etapa agrícola tem impacto significativo na IC, destacando-se o uso de fertilizantes e o diesel utilizado em maquinários e no transporte da cana até as usinas. Dessa forma, é esperado que as iniciativas de mitigação foquem na eficientização ou substituição do uso desses insumos.



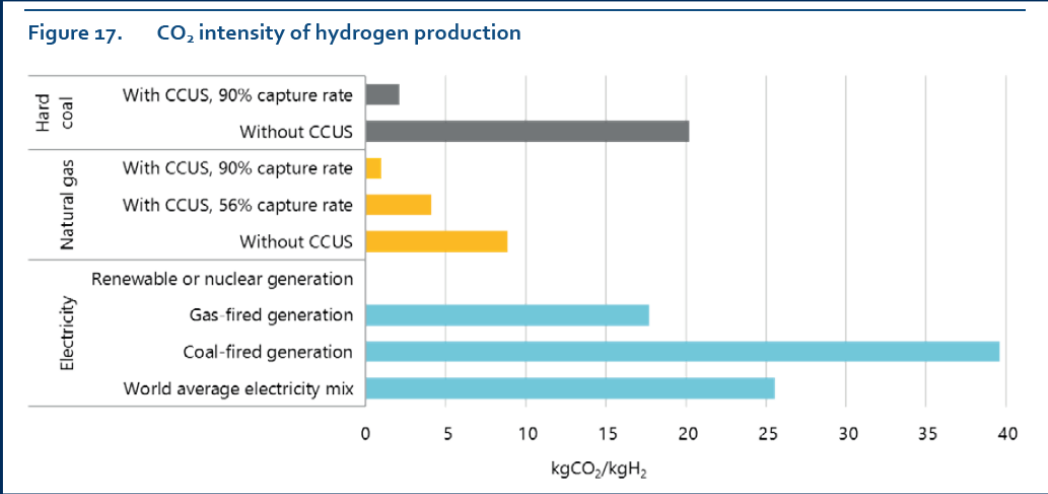
Já para o biodiesel de soja, conforme ilustrado no segundo gráfico deste Box, percebe-se que uma parcela representativa da sua IC é compreendida pela etapa agrícola, com ênfase na aplicação de corretivos (calcário e gesso). Porém, diferentemente do etanol, destaca-se um maior impacto da indústria, em parte relacionada ao uso do metanol. Para o biodiesel, pela construção da RenovaCalc, o transporte do grão até seu beneficiamento é considerado parte do escopo da fase industrial, com o cálculo das emissões baseado na informação do produtor sobre a distância média.



Sendo assim, as iniciativas visando a redução da IC dos biocombustíveis encontram no sistema criado pelo RenovaBio uma ferramenta para identificar as soluções mais efetivas e, ao menos em parte, ajudar a torná-las viáveis. Há uma série de medidas que podem contribuir com esse objetivo e tornar o uso de biocombustíveis ainda mais competitivo sob o ponto de vista de emissões, ao substituir ou melhorar a eficiência do uso dos insumos de maior impacto aqui destacados.

HIDROGÊNIO DE BAIXA EMISSÃO DE CARBONO

São diversos os processos e fontes que viabilizam a produção de hidrogênio de baixa emissão de carbono. Tem-se a eletrólise da água a partir de geração elétrica primordialmente renovável ou nuclear, assim como processos baseados na biomassa, tais quais a reforma a vapor do etanol e do biometano e a gaseificação de material lignocelulósico. Também são consideradas as rotas de produção que convertem o gás natural via reforma com CCUS ou pela pirólise, a extração natural ou geológica, dentre outros. Tem se tornado consenso, defendido por instituições como a IEA, que a intensidade de carbono é o parâmetro adequado para caracterizar o hidrogênio, em vez da referência ao processo de obtenção e da identificação por cores. Uma estimativa da IEA (2019) para a intensidade de carbono das principais rotas de produção de hidrogênio é ilustrada a seguir.



O uso de hidrogênio como fonte de energia para o transporte rodoviário não foi considerado como possibilidade relevante, em escala, para o horizonte deste estudo. A aplicação para essa finalidade é praticamente inexistente, e sua evolução permanece incerta no longo prazo. Por um lado, o hidrogênio permite uma operação livre de emissões de CO₂ de escapamento e pode contornar desafios pertinentes a outras soluções de descarbonização, em particular a eletrificação em veículos puros a bateria (BEV), que pode se inviabilizar em certas funções devido ao tempo de recarga e por restrições de capacidade de armazenamento das baterias, que resultam em baixas autonomias sob as tecnologias atualmente dominantes. Por outro lado, a viabilidade do uso do hidrogênio em veículos dependerá de uma série de desenvolvimentos que melhorem a competitividade desse sistema. São relevantes os custos das células a combustível e da estocagem de hidrogênio a bordo, bem como da produção do próprio hidrogênio de baixo carbono de forma descentralizada e/ou sua disponibilização de forma ampla no território, necessária a qualquer solução abrangente para o transporte rodoviário. Uma alternativa seria converter o hidrogênio em outros combustíveis, tal como metano, metanol e amônia, ou ainda em hidrocarbonetos sintéticos líquidos, que, por serem *drop in*, podem utilizar a estrutura já existente. Nota-se que as perdas relacionadas à eficiência constituem uma significativa desvantagem da produção de hidrogênio para a mobilidade, que são intensificadas com a posterior conversão em outras moléculas. Segundo dados da IEA (2024), 15.400 novos veículos a hidrogênio passaram a operar no mundo em 2023, levando a frota a alcançar 87.600 unidades. Essa frota é composta majoritariamente por automóveis, mas nos últimos anos os veículos pesados passaram a representar a maior parte do crescimento.

Demanda dos energéticos

A demanda de energia do setor de transporte rodoviário contempla os veículos leves (automóveis, comerciais leves e motocicletas), destinados ao transporte individual, e os veículos pesados, utilizados no transporte de carga e coletivo de passageiros. Os veículos leves, em sua maioria³⁴, são abastecidos com etanol hidratado e/ou gasolina C (compondo o ciclo Otto). Por outro lado, os veículos pesados e comerciais leves utilizam diesel B (compondo o ciclo Diesel). O GNV pode ser utilizado tanto em veículos leves quanto em veículos pesados. Em relação ao consumo de eletricidade no transporte rodoviário, abarcam-se todas as fontes de geração, fósseis e renováveis, que compõem a matriz nacional.

O Decreto nº 12.435/2025, que regulamenta o Programa Mover, define requisitos obrigatórios de metas de eficiência veicular e, conforme ANEXO II, não inclui a participação de motocicletas. Desta forma, neste estudo é apresentada a demanda energética veicular, exceto motos³⁵.

Os dados relativos ao histórico do consumo dos combustíveis fósseis (gasolina A, diesel A e GNV), dos biocombustíveis e da geração de eletricidade foram retirados do Balanço Energético Nacional (EPE, 2025a). Em relação à segregação por matéria-prima utilizada na obtenção do etanol (cana, milho), os valores foram obtidos do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2025) e, para o biodiesel, da Agência Nacional de Petróleo Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2025b). Registra-se que a segregação do consumo de eletricidade entre veículos leves e pesados foi estimada pelos modelos de demanda da EPE.

Para as projeções, foram usados dados de demanda do ciclo Otto e do ciclo Diesel do PDE 2034, penetração dos veículos híbridos e elétricos, evolução da eficiência dos novos veículos e a composição da matriz elétrica (EPE, 2025b). Adicionalmente, foram incluídos aspectos relacionados ao Combustível do Futuro (BRASIL, 2024a), tais como o aumento do teor de etanol anidro na gasolina C de 27% para 30% a partir de 2026; aumento do percentual de mistura de biodiesel no diesel B alcançando 20% em 2034; e a participação do biometano em substituição ao GNV fóssil, a partir de 2026, em até 15% no final do período (mesma proporção para leves e pesados).

Quanto aos veículos leves, a frota de ciclo Otto totalizou 37 milhões de unidades em 2024 (incluindo híbridos e elétricos), com a tecnologia *flex fuel* correspondendo a cerca de 80% do total. Em 2034, projeta-se que essa frota será de 45,4 milhões de unidades, com a participação dos *flex fuel* variando de 85% para 82%. Estima-se, ainda, que haverá uma crescente participação de uso dos biocombustíveis, em função dos sinais positivos de políticas públicas, como o RenovaBio e o Combustível do Futuro, bem como melhorias nos processos produtivos, a serem conduzidos pelo setor. O Programa Mover também impulsionará a adoção de tecnologias veiculares mais eficientes quanto à emissão de CO₂eq / km, o que inclui também os veículos eletrificados. A frota de veículos leves do ciclo Diesel é composta, em sua maioria, de utilitários esportivos (ou SUV – *sport utility vehicle*), com 2,8 milhões de unidades em 2024 e que alcançará 4,4 milhões em 2034. Para os veículos leves, considera-se que a participação dos veículos híbridos e elétricos na frota total será de 5% no final do período, decorrente de um incremento de sua participação no licenciamento que atinge 28% ao fim do período.

³⁴ Existe uma parcela dos veículos leves (7%), denominados de comerciais leves, que é abastecida por diesel B.

³⁵ Para o caso da eletricidade, a demanda não excluiu a participação das motocicletas, uma vez que a sua participação nesse segmento é ainda pequena.

O *market share* do etanol hidratado na frota de veículos *flex fuel* foi calculado da seguinte forma:

$$\text{Market share EH (flex fuel)} = \frac{EH}{(EH + GAS_flex\ fuel)}$$

Sendo:

EH – demanda de etanol hidratado

GASC_*flex fuel* – demanda de gasolina C nos veículos *flex fuel*

A participação de veículos movidos exclusivamente a etanol hidratado corresponde a cerca de 1% da frota. Assim, por simplificação, considerou-se que todo o etanol hidratado será consumido pelos veículos *flex fuel*. O *market share* do etanol hidratado foi determinado tanto em volume como em energia, conforme indicado nas Tabelas 4 e 5, respectivamente. Importante ressaltar que a demanda energética indicada exclui os motocicletas, por não estarem contemplados na regulamentação do Mover, conforme indicado anteriormente. Para fins de informação, as demandas (volume e energia) da frota com motocicletas estão apresentadas nos Apêndices A10 e A11.

A relação entre a demanda de etanol hidratado e o volume total do ciclo Otto (etanol hidratado + gasolina C), sem a segmentação dos veículos *flex fuel*, reflete a participação desse biocombustível na matriz energética de transporte brasileira e não o *market share*, determinado acima.

Já a frota de veículos pesados (transporte de carga e de passageiros) totalizou 2,3 milhões de unidades em 2024, com participação de 80% para o transporte de carga e 20% para o transporte coletivo. No horizonte de estudo, projeta-se que a frota de pesados atingirá 2,8 milhões de unidades. Para o transporte rodoviário de cargas e coletivo³⁶, estima-se que a penetração de elétricos, principalmente no curto prazo, será dada pelas estratégias empresariais de importantes grupos, correspondendo a 0,1% da frota em 2034 (EPE, 2025b).

Para a massa específica e poder calorífico inferior, Tabela 2, foram utilizados dados do Balanço Energético, que são iguais aos da RenovaCalc^{37,38} e no Anuário Estatístico da ANP, além de serem considerados constantes em todo o horizonte dessa análise (ANP, 2018a, 2018b, 2024; EPE, 2025a).

As demandas dos energéticos do setor de transporte em 2022, 2023 e 2024 e as projeções para os anos de 2027, 2032 e 2034, estão sumarizadas na Tabela 4. A Tabela 5 e a Tabela 6 apresentam as demandas em termos de energia e a participação na demanda dos energéticos na demanda total (em energia).

³⁶ Nesse estudo, a energia elétrica a ser utilizada pelos veículos elétricos coletivos considera todas as fontes da geração. Entende-se que possam ocorrer acordos bilaterais entre as empresas de transporte e os geradores, visando a utilização de energias mais limpas, ocasionando a redução da IC da eletricidade utilizada para o carregamento desses veículos.

³⁷ Os dados referentes ao biometano estão presentes apenas na RenovaCalc.

³⁸ Registra-se que existe uma diferença entre esses parâmetros, quando comparados aos adotados no Programa Mover.

Tabela 4: Demandas dos energéticos (volume)³⁹

	2022	2023	2024	2027	2032	2034
CICLO OTTO (sem GNV)						
(bilhões de litros)	53,5	56,9	59,9	61,6	65,0	66,0
Gasolina C (bilhões de litros)	37,3	39,6	37,2	38,0	35,6	35,6
Gasolina A	26,8	28,6	26,9	26,6	25,0	24,9
Etanol anidro	10,4	10,9	10,3	11,4	10,7	10,7
Etanol de Cana 1G	9,1	9,0	8,2	7,9	6,4	6,2
Etanol de Cana 2G	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Etanol de Milho	1,3	2,0	2,1	3,5	4,3	4,5
Mistura (%)	27%	27%	27%	30%	30%	30%
Etanol hidratado (bilhões de litros)	16,2	17,3	22,7	23,5	29,3	30,4
Etanol de Cana 1G	13,7	14,0	17,8	17,0	21,1	21,8
Etanol de Cana 2G	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Etanol de Milho	2,5	3,3	4,9	6,5	8,2	8,6
Market share hidratado no <i>flex fuel</i> (% v/v)	36,7	35,7	43,9	43,7	52,2	54,6
CICLO DIESEL						
Diesel B transporte rodoviário (bilhões de litros)	50,6	52,2	53,8	58,6	63,3	65,0
Diesel	45,5	46,2	46,5	49,8	51,9	52,0
Biodiesel	5,1	6,0	7,3	8,8	11,4	13,0
Mistura (%)	10,0%	11,5%	13,6%	15,0%	18,0%	20,0%
Diesel B veículos leves	4,3	4,6	4,8	5,0	5,5	5,8
Biodiesel veículos leves	0,4	0,5	0,7	0,7	1,0	1,2
Diesel B veículos pesados	41,2	41,6	41,7	44,9	46,4	46,2
Biodiesel veículos pesados	4,6	5,5	6,7	8,0	10,4	11,8
GÁS						
GNV (bilhões m³)	2,3	2,0	1,7	2,5	2,9	3,1
GNV (fóssil)	2,3	2,0	1,7	2,4	2,7	2,6
Biometano	0,00	0,00	0,00	0,09	0,30	0,47
Participação vol. (%)	0,0%	0,0%	0,0%	3,7%	10,0%	15,0%
GNV (fóssil) veículos leves	2,3	2,0	1,6	2,3	2,4	2,4
Biometano veículos leves	0,00	0,00	0,00	0,09	0,27	0,42
GNV (fóssil) veículos pesados	0,02	0,03	0,04	0,09	0,21	0,27
Biometano veículos pesados	0,00	0,00	0,00	0,003	0,02	0,05
ELÉTRICO						
Eletricidade (GWh)	68	132	338	1.682	5.667	8.021
Leves	32	83	252	1.109	2.822	3.822
Pesados	36	49	86	573	2.844	4.199

Nota 1: Não foi considerado o consumo de etanol de segunda geração (E2G) no mercado interno.

Nota 2: A série completa para o período de 2022 e 2024 a 2034 está no Apêndice A6 (Tabela A6).

Nota 3: As motocicletas não estão consideradas na demanda do ciclo Otto. O cálculo do *market share* exclui a frota e o consumo de combustível por motocicletas.

Fonte: EPE (Elaboração própria) com base em EPE (2025a) (histórico) e EPE (2025b) (projeções)

³⁹ O Apêndice 10 (Tabela A 12) apresenta a demanda de veículos leves, incluindo motocicletas.

Tabela 5: Demandas dos energéticos (energia - MJ)

Bilhões MJ	2022	2023	2024	2027	2032	2034
CICLO OTTO (sem GNV)	1.446	1.539	1.583	1.618	1.671	1.692
Gasolina A	867	925	868	860	806	804
Etanol anidro	233	245	230	255	239	238
Etanol hidratado	346	370	485	502	626	649
*Market share hidratado no <i>flex fuel</i> (% e/e)	28,9%	28,7%	36,2%	36,1%	44,4%	46,8%
CICLO DIESEL (sem GNV)	1.784	1.840	1.893	2.062	2.221	2.278
Diesel	1.617	1.641	1.650	1.770	1.843	1.847
Biodiesel	168	200	243	292	378	431
Diesel veículos leves	152	163	171	176	195	206
Biodiesel veículos leves	14	18	22	25	33	38
Diesel veículos pesados	1.465	1.478	1.480	1.594	1.649	1.641
Biodiesel veículos pesados	153	182	221	267	345	393
ELÉTRICO						
Eleticidade	0	0	1	6	20	29
Leves	0	0	1	4	10	14
Pesados	0	0	0	2	10	15
GÁS						
GNV	84	73	61	90	109	115
GNV (fóssil)	84	73	61	87	98	97
Biometano	0	0	0	3	11	17
GNV (fóssil) veículos leves	83	72	60	84	90	88
Biometano veículos leves	0	0	0	3,2	10,0	15,4
GNV (fóssil) veículos pesados	1	1	1	3	8	10
Biometano veículos pesados	0	0	0	0,1	0,8	1,7

Fonte: EPE (Elaboração própria)

Nota 1: As motocicletas não estão consideradas na demanda do ciclo Otto. O cálculo do *market share* exclui a frota e o consumo de combustível por motocicletas.

Tabela 6: Participação na demanda dos energéticos na demanda total (em energia)⁴⁰

	2022	2023	2024	2027	2032	2034
CICLO OTTO						
Gasolina A	26,2%	26,8%	24,5%	22,8%	20,0%	19,5%
Etanol anidro	7,0%	7,1%	6,5%	6,8%	5,9%	5,8%
Etanol hidratado	10,4%	10,7%	13,7%	13,3%	15,6%	15,8%
CICLO DIESEL						
Diesel	48,8%	47,5%	46,6%	46,9%	45,8%	44,9%
Biodiesel	5,1%	5,8%	6,9%	7,7%	9,4%	10,5%
Diesel veículos leves	4,6%	4,7%	4,8%	4,7%	4,8%	5,0%
Biodiesel veículos leves	0,4%	0,5%	0,6%	0,7%	0,8%	0,9%
Diesel veículos pesados	44,2%	42,8%	41,8%	42,2%	41,0%	39,9%
Biodiesel veículos pesados	4,6%	5,3%	6,2%	7,1%	8,6%	9,5%
ELÉTRICO						
Elettricidade	0,0%	0,0%	0,0%	0,2%	0,5%	0,7%
Leves	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,3%	0,3%
Pesados	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,3%	0,4%
GÁS						
GNV (fóssil)	2,5%	2,1%	1,7%	2,3%	2,4%	2,4%
Biometano	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,3%	0,4%
GNV (fóssil) veículos leves	2,5%	2,1%	1,7%	2,2%	2,2%	2,1%
Biometano veículos leves	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,2%	0,4%
GNV (fóssil) veículos pesados	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,2%	0,2%
Biometano veículos pesados	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,02%	0,04%

Fonte: EPE (Elaboração própria)

⁴⁰ O Apêndice 11 (Tabela A 13) apresenta a participação da demanda dos energéticos na demanda total (em energia).

Fontes de Energia – Resultados

A Tabela 7 sumariza a evolução das intensidades de carbono para as fontes de energia do setor de transporte rodoviário. O Gráfico 2 ilustra a composição dessas IC, com as parcelas relativas do poço-ao-tanque e do tanque-à-roda, nos anos de 2024 e 2034.

Tabela 7: Evolução da intensidade de carbono (gCO_{2eq}/MJ) dos energéticos

	2022	2024	2027	2032	2034
Etanol Anidro	22,26	22,39	22,04	21,42	21,11
Etanol Hidratado	22,65	22,73	22,30	21,46	21,08
Gasolina A	87,40	87,40	87,40	87,40	87,40
Gasolina C ¹ (E27/E30)	73,61	73,78	72,45	72,31	72,24
Gasolina C (E22)	76,76	76,78	76,73	76,63	76,57
Biometano	9,32	8,35	8,35	8,35	8,35
GNV	76,85	76,85	76,85	76,85	76,85
Biodiesel	28,40	28,40	28,11	27,64	27,45
Diesel A	86,50	86,50	86,50	86,50	86,50
Diesel B ² (BX)	81,04	79,06	78,24	76,49	75,33
Diesel B (B7)	82,69	82,69	82,67	82,64	82,62
Eletricidade	21,78	20,85	19,89	25,00	24,31

Nota 1: Considera a adição de 27% de etanol anidro na gasolina C até o final de 2025. A partir de 2026, passa a ser 30%.

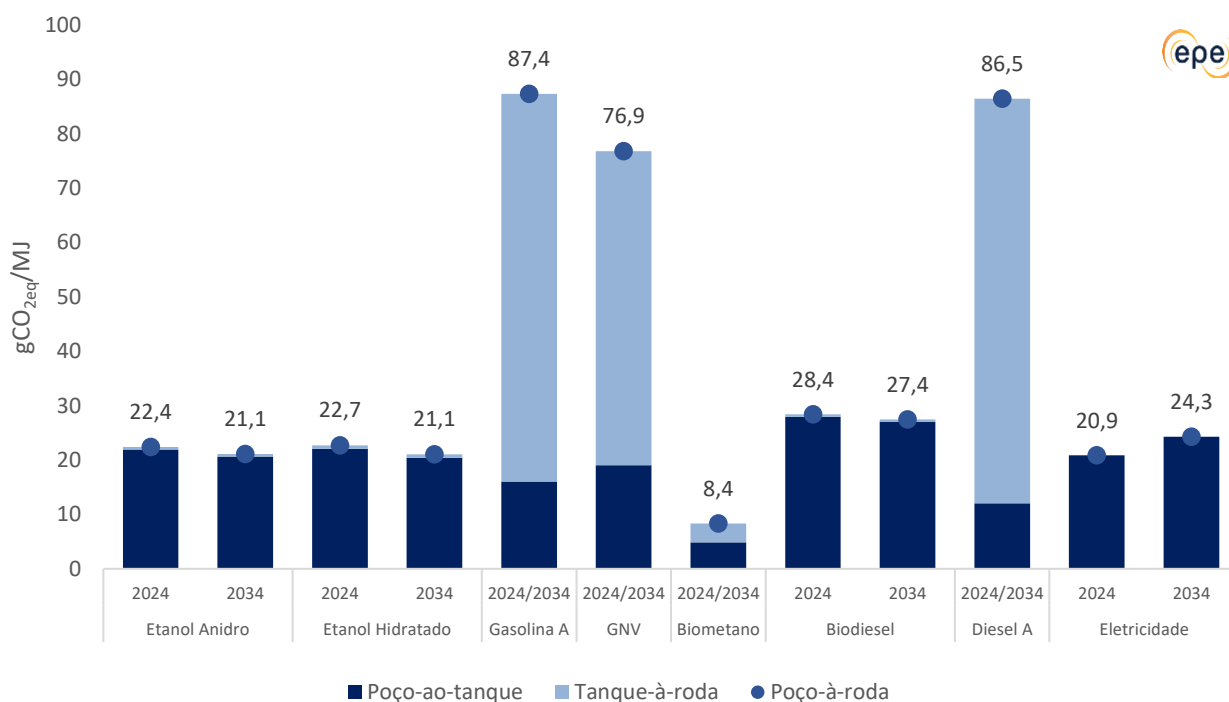
Nota 2: Teor de biodiesel de 14% com início em março de 2024. A partir de 2026, considera 15%, alcançando 20%.

Nota 3: A metodologia relativa às IC da gasolina (E22 e E27/E30) e diesel B (B7 e BX) estão dispostas no Apêndice A7.

Nota 4: A série completa para o período de 2024 a 2034 está no Apêndice A8 (Tabela A8).

Fonte: EPE (Elaboração própria) com base em ANP (2018a, 2018b, 2024, 2025e) (histórico), EPE (2025a) (histórico), EMBRAPA (2023, 2024a, 2024b) (histórico) e UNICA (2025b)

Gráfico 2: Intensidade de carbono dos energéticos (poço-à-roda)

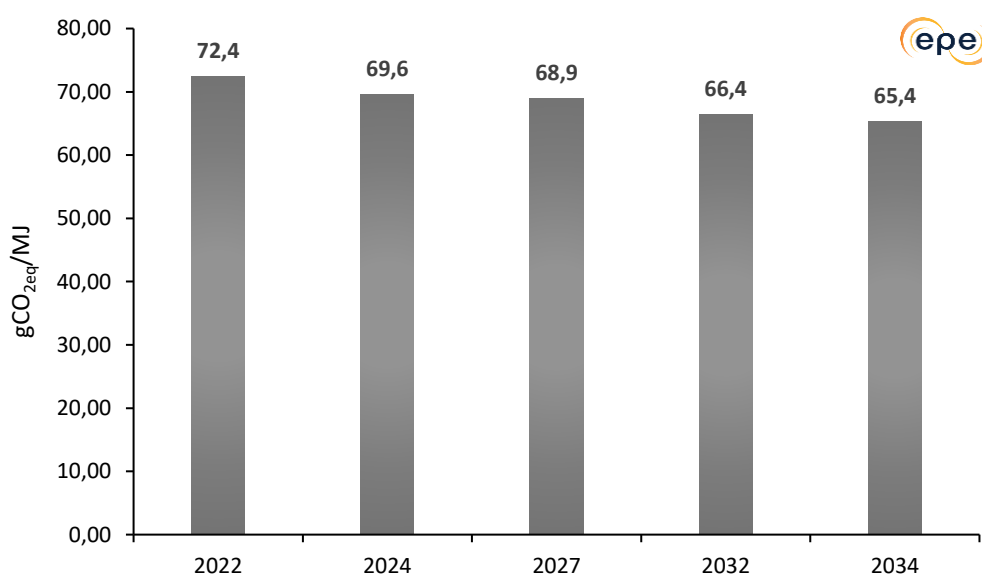


Fonte: EPE (Elaboração própria) com base em ANP (2018a, 2018b, 2024, 2025e) (histórico), EPE (2025a) (histórico), EMBRAPA (2023, 2024a, 2024b) (histórico) e UNICA (2025b)

Intensidade de Carbono Média da Matriz de Transporte

Dessa forma, com base na evolução da intensidade de carbono das fontes de energia e de suas respectivas demandas, foi determinada a intensidade de carbono média da matriz de transporte rodoviário (sem motocicletas), no escopo do poço-à-roda, conforme indicado no Gráfico 3.

Gráfico 3: Intensidade de carbono média das fontes de energia da matriz de transporte rodoviário

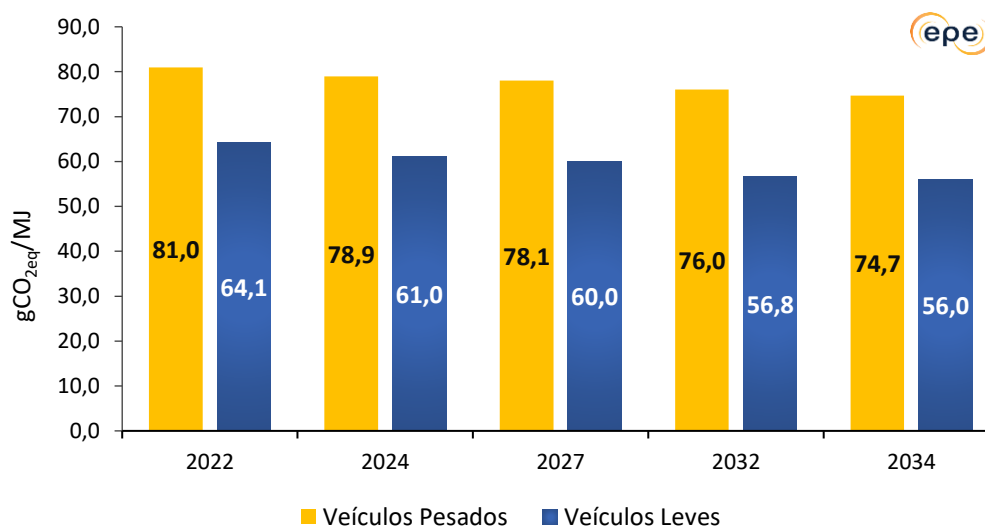


Fonte: EPE (Elaboração própria)

Quando se considera a matriz de transporte rodoviário (sem motocicletas), a intensidade de carbono média de 2024 foi estimada em 69,6 gCO_{2eq}/MJ. Para os anos de 2027, 2032 e 2034, esses valores são de 68,9 gCO_{2eq}/MJ, 66,4 gCO_{2eq}/MJ e 65,4 gCO_{2eq}/MJ, respectivamente, representando uma redução de 1,1%, 4,7% e 6,1% em relação a 2024, com taxas de -0,4% a.a., -0,6% a.a. e -0,6% a.a..

O Gráfico 4 apresenta as intensidades de carbono do setor de transporte rodoviário (sem motocicletas), com a segregação em veículos leves e pesados.

Gráfico 4: Intensidade de carbono do setor de transporte rodoviário (leves e pesados)



Nota: A série completa⁴¹ para o período de 2022 e de 2024 a 2034 está no Apêndice A9 (Tabela A9).

Fonte: EPE (Elaboração própria)

Dessa forma, pode-se observar a redução significativa da intensidade de carbono da matriz de transporte brasileira no horizonte de análise, sinalizando a importância das políticas públicas relacionadas, com destaque para o RenovaBio, Combustível do Futuro e Programa Mover.

Registra-se, ainda, que melhorias podem ser vislumbradas ao longo dos próximos anos, com a redução das emissões associadas aos processos de extração de petróleo e de refino, avanços nos processos produtivos dos biocombustíveis com maior aproveitamento de resíduos, bem como aumento de sua participação, além da entrada na matriz de transportes do biometano e eletricidade, de outros combustíveis renováveis do ciclo Diesel. Mudanças na qualidade de todos esses combustíveis também podem contribuir para diminuir as emissões associadas a esse setor.

Os compromissos internacionais assumidos pelo Brasil, em termos de redução de emissões de GEE, desdobram-se internamente em políticas públicas e investimentos privados que visam a descarbonização da economia doméstica.

⁴¹ O Apêndice 12 (Tabela A 14) apresenta a série completa da intensidade de carbono do setor de transporte rodoviário (leves e pesados), incluindo motocicletas.

Considerações Finais

O presente estudo teve como objetivo determinar, por meio da avaliação de ciclo de vida do poço-à-roda, a evolução da intensidade de carbono das fontes de energia que são utilizadas na matriz de transporte rodoviário: gasolina C (gasolina A e etanol anidro), etanol hidratado, diesel B (óleo diesel e biodiesel), gás natural veicular, além de novos entrantes, como a eletricidade e o biometano, assim como a intensidade de carbono média da matriz de transportes do setor rodoviário, de modo a subsidiar as decisões do Conselho Nacional de Política Energética, quanto às definições das metas do Programa Mover.

A metodologia adotada no estudo baseou-se no RenovaBio e em estudos contendo dados típicos agrícolas das principais culturas empregadas na produção de biocombustíveis. A intensidade de carbono dos combustíveis fósseis permaneceu constante ao longo do horizonte de análise. Para os biocombustíveis, considerando cada matéria-prima empregada na sua obtenção, foi proposta uma redução dos valores médios de IC, com base em eficientização dos processos produtivos.

O estudo evidenciou a necessidade de harmonização das propriedades físicas das fontes de energia utilizadas no RenovaBio, Mover e PBEV. Além disso, a metodologia aqui proposta permite a atualização desse documento, com base em cada ciclo de estudo do PDE, avanço das certificações dos biocombustíveis e maiores informações das intensidades de carbono dos combustíveis fósseis.

Agradecimentos

Agradecemos à equipe da ANP, Fabio Vinhado, Joana Borges e Maria Auxiliadora, ao Ricardo Abreu e à equipe da Unica, Luciano Rodrigues, Guilherme Belon e Lucas Rodrigues, à Marília Folegatti (Embrapa), ao pesquisador Mateus Chagas (LNBR) e aos colegas da EPE, Bruno Stukart, Caio Leocádio, Filipe de Pádua, Marcos Farinha e Rogério Matos, por suas contribuições na elaboração deste documento.

Apêndice

A1) Propriedades físicas dos energéticos – Programa Mover

Tabela A 1: Propriedades físicas dos energéticos – Programa Mover

	Massa Específica (kg/litro)	PCI (MJ/kg)	Conteúdo Energético (MJ/litro)
Etanol Hidratado	0,810	24,80	20,09
Gasolina A	0,735	43,06	31,65
Gasolina C (E22)	0,745	38,92	28,99
Diesel A	0,830	42,93	35,65
GNV (kg/Nm³)	0,723 kg/Nm ³	48,74	35,24 MJ/Nm ³

Nota 1: Como colocado anteriormente, adota-se um combustível de referência nos testes de consumo e emissões dos veículos. Para a gasolina C, tem-se a adição de 22% de etanol anidro (na comercial é de 27%). Para o biodiesel, o teor é de 7% (no comercial está atualmente em 10%).

Nota 2: A Tabela A 1 sumariza as principais propriedades dos combustíveis definidas e utilizadas na regulamentação para homologação dos veículos para o cálculo da Eficiência Energética declarada nos programas regulatórios, incluindo o Programa de Etiquetagem do INMETRO (PBEV).

Fonte: ANP (2021b); INMETRO (2015, 2020, 2023)

A2) Fatores de emissão no uso (queima) dos energéticos

Tabela A 2: Fatores de emissão no uso (queima) dos energéticos, conforme a RenovaCalc

	CO₂ Fóssil	CO₂ biogênico	CH₄ Fóssil	CH₄ Biogênico	N₂O	CO₂ eq/MJ
	g/kg					g/MJ
Diesel A (B0)	3.098,8	0,0	0,165	0,000	0,165	74,43
Biodiesel (B100)	0,0	2.762,5	0,000	0,377	0,023	0,44
Etanol Anidro	0,0	1.929,2	0,000	0,283	0,017	0,44
Etanol Hidratado	0,0	1.801,0	0,000	0,475	0,016	0,66
Gasolina A	2.981,1	0,0	1,089	0,000	0,348	71,33
GNV	2.701,4	0,0	4,595	0,000	0,149	57,81
Biometano	0,0	2.701,4	0,000	4,595	0,149	3,48

Fonte: ANP (2018a, 2018b)

A3) Metodologia para o cálculo da intensidade de carbono do gás natural

As emissões de gases de efeito estufa (GEE) a montante da cadeia do GNV (WtT), de forma simplificada, dizem respeito às cadeias de produção e logística do gás natural (GN), compreendendo desde sua extração até seu transporte e distribuição. As principais contribuições ao impacto climático dessas cadeias são provenientes das emissões de metano (CH₄) advindas da liberação do gás natural em diferentes etapas durante o processo produtivo (ex: emissões fugitivas, emissões ventiladas), de dióxido de carbono (CO₂) e de óxido nitroso (N₂O), quando existente.

Recentemente, a EPE (2024b) publicou uma nota técnica que aborda a temática de emissões de metano na cadeia do GN no Brasil. O estudo conclui que há uma carência significativa de valores regionais sobre o tema, que seriam relevantes para refletir o perfil de exploração do GN nacional, geralmente associado ao petróleo *offshore* e um sistema de transporte e distribuição em desenvolvimento. Diante desse cenário, é preciso utilizar fontes de informação internacionais para estimativa de tais emissões.

A Figura A 1 ilustra as etapas da cadeia produtiva do gás natural e seu destino para uso final como combustível veicular (GNV), no Brasil. As áreas coloridas tracejadas no fluxograma indicam as fontes de referência adotadas neste exercício, visando a estimativa das emissões de GEE de cada etapa produtiva.

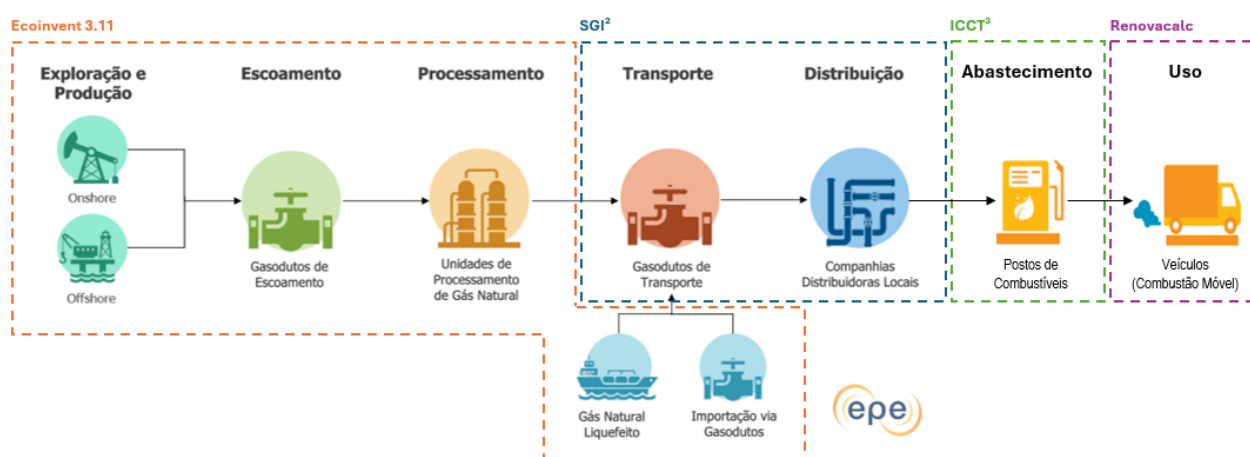


Figura A 1: Fluxograma das etapas produtivas do GN e seu uso final como combustível veicular (GNV) no Brasil. As áreas tracejadas indicam a fonte utilizada para as estimativas das emissões de GEE de cada etapa produtiva. Adaptado de EPE (2024)¹.

Fonte: EPE (2024b), ICCT (2015), SGI (2015)

Exploração, escoamento, processamento e importação

A oferta interna de GN no Brasil é composta por diferentes origens, como a exploração nacional de petróleo e gás *offshore* e *onshore*, importação de GN da Bolívia via Gasbol e importação marítima de gás natural liquefeito (GNL). A participação de gás natural de cada origem na oferta interna de GN varia anualmente, porém as maiores oscilações são observadas na importação do GNL. Para melhor representatividade dessas diferentes origens do GN na oferta interna, este estudo utilizou a média dos últimos anos, desde 2020 até 2023 (MME,2024).

Tabela A 3: Oferta Interna de GN - Valores médios consolidados da exploração e oferta de GN no Brasil, por origem

m³/dia	2020	2021	2022	2023	Total média	Participação média
Nacional	50,5	51,5	47,6	47,7	49,3	64%
GasBOL	17,9	19,9	17,5	15,4	17,7	23%
GNL [importação]	8,4	26,2	6,5	1,5	10,6	14%
Exploração Nacional						
<i>Offshore</i>	<i>Onshore</i>					
96,70%	3,30%					

Fonte: MME (2024)

Para estimativa das emissões de GEE na produção e oferta de GN por origem no Brasil, este estudo utilizou a base de dados Ecoinvent, maior banco de dados global de inventários de avaliação de ciclo de vida, na sua versão mais atual 3.11. Identificou-se que esse banco de dados é o único disponível que estima as emissões de GEE do GN no Brasil segregadas por origem, incluindo exploração *offshore* e *onshore*, até sua entrega na fase de transporte (incluindo, portanto, as etapas de escoamento e processamento), importação de GN da Bolívia e importação de GNL.

A Tabela A 4 mostra os valores de IC⁴² do GN disponíveis no Ecoinvent 3.11 segregados por origem, referente às etapas de exploração, processamento e importação, e identifica os valores referentes a cada componente da oferta interna e a representação de cada fonte na IC total do GN no contexto nacional. A partir desse balanço ponderado da oferta de GN por fonte e suas respectivas IC, estimou-se uma IC final de 12,8 gCO₂/MJ de GN no Brasil.

Tabela A 4: Oferta Interna - Valores consolidados de IC do GN, por origem, referentes às etapas de exploração, escoamento, processamento e importação.

		IC individual gCO ₂ /MJ	IC participação gCO ₂ /MJ
Nacional <i>Offshore</i>	61%	8,09	4,97
Nacional <i>Onshore</i>	2%	8,55	0,18
GasBOL	23%	15,31	3,48
GNL [importação]	14%	30,13	4,13
IC GN	100%		12,8

Fonte: MME (2024)

Transporte e distribuição

Conforme mencionado anteriormente, devido à carência de dados regionais do Brasil, a nota técnica da EPE (2024)¹ utilizou um outro estudo, desenvolvido pelo SGI (*Sustainable Gas Institute*)/*Imperial College London*², como base para estimativa das emissões de metano da cadeia de GN nacional, incluindo as etapas de transporte e distribuição. Entende-se que, na ausência de dados regionais, tal estudo apresenta resultados consistentes e mais similares à realidade brasileira em comparação a outras análises disponíveis na literatura.

Seguindo a mesma abordagem, este estudo utilizou as estimativas de GEE do transporte e distribuição do GN contidas no relatório do SGI (2015). Algumas adaptações foram realizadas, como a utilização do fator de GWP⁴³ mais atual reportado pelo IPCC (2021), que é 27 para o CH₄ fóssil, e a conversão da IC final utilizando o poder calorífico inferior (PCI) em vez do PCS (poder calorífico superior), para melhor compatibilidade com as políticas atuais de combustíveis. Para este ajuste, foram utilizados os fatores de 9400 kcal/m³ para o PCS e de 8800 kcal/m³ de PCI (relação ~1,1). A Figura A 2 ilustra as estimativas de GEE da cadeia de suprimento com as melhores tecnologias disponíveis aplicadas apresentadas pelo SGI (2015), separadas em emissões de metano e de CO₂ por etapas de produção de GN.

⁴² IC: intensidade de carbono, indicando a emissão de gases de efeito estufa por unidade de energia por fonte, normalmente em gCO₂eq/MJ

⁴³ O Potencial de Aquecimento Global (em inglês, Global Warming Potential - GWP) é utilizado para estimar, comparar e agregar os efeitos climáticos relativos de diferentes gases com efeito de estufa (GEE). É uma medida do efeito radiativo relativo de uma determinada substância em comparação com outra, tipicamente o CO₂, integrado ao longo de um horizonte de tempo escolhido (UNFCCC 2004).

FIGURE ES-4
Central estimates of greenhouse gas emissions across the supply chain where best available techniques are applied, split into methane and CO₂ emissions, reflecting an 'effective' operation during key supply chain stages
A value of 34 for GWP100 of methane is used. The category 'T, S & D' refers to the transmission, storage and distribution stages.

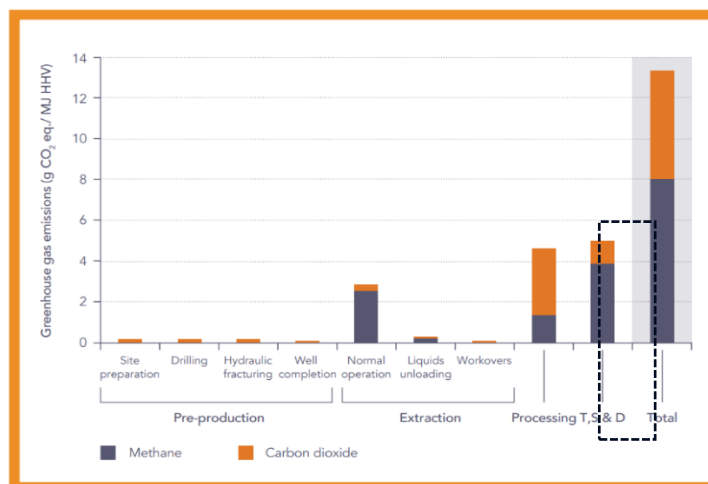


Figura A 2: Valores de emissão de GEE por etapa de produção do GN. Para essa estimativa, os resultados utilizam GWP do CH₄ de 34 e o PCS (poder calorífico superior) do GN.
Fonte: SGI (2015)

A Tabela A 5 a seguir contrasta os valores de emissões de metano, em gCO_{2eq}/MJ de GN, contidos no estudo do SGI² com os valores convertidos utilizando GWP de 27 e PCI do GN. Dessa forma, estima-se que a IC do GN referente às etapas de transporte e distribuição totalizam 4,47 gCO_{2eq}/MJ de GN.

Tabela A 5: IC das etapas de transporte e distribuição, segregada entre valor reportado no estudo SGI (2015) e valor ajustado com GWP do CH₄ de 27 e PCI do GN.

Emissões de metano (gCO ₂ /MJ)	GWP 34 e PCS	GWP 27 e PCI
	original	ajustado
Transporte e distribuição	5,27	4,47

Fonte: EPE a partir de SGI (2015)

Abastecimento

Ao destinar o GN para uso veicular, é necessário incluir a etapa de abastecimento nos postos de combustíveis, disponibilizando este produto como GNV ao consumidor final. Durante a etapa de abastecimento, entende-se que as emissões de GEE se limitam basicamente às emissões fugitivas de CH₄. O ICCT (2015) estima que a emissão da etapa de abastecimento é equivalente à perda aproximada de 0,3% de CH₄. A conversão dessa liberação de CH₄ resulta em um adicional de IC de 1,8 gCO₂/MJ de GNV.

Uso final/Queima móvel (TtW)

O uso final do GNV em veículos configura sua queima em motores, com a conversão do carbono presente no combustível em CO₂. As emissões de CH₄ associadas a esta etapa dizem respeito principalmente à combustão incompleta. O fator utilizado neste estudo de emissão de GEE da queima do GNV no setor de transportes foi ajustado em relação ao apresentado pelo RenovaBio, dentro da RenovaCalc⁴⁴, referente à combustão móvel, em um conjunto de dados reproduzidos na Tabela A 6. Este fator é de 57,81 gCO_{2eq}/MJ de GNV, e considera um impacto de 2,58 gCO_{2eq}/MJ referente às emissões de CH₄, baseado em uma perda média de 0,46% de CH₄ durante esse processo, valor este coerente com outros observados na literatura sobre o tema.

Tabela A 6: IC da etapa de combustão móvel por tipo de combustível.

Fatores de emissão da queima de combustíveis em fontes móveis

Combustível	Unidade	CO ₂ Fóssil	CO ₂ Biogênico	CH ₄ Fóssil	CH ₄ Biogênico	N ₂ O	CO ₂ eq/MJ
		g/unidade	g/unidade	g/unidade	g/unidade	g/unidade	g/MJ
Diesel A (B0)	kg	3.098,8	0,0	0,165	0,000	0,165	74,43
Biodiesel (B100)	kg	0,0	2.762,5	0,000	0,377	0,023	0,44
Etanol Anidro	kg	0,0	1.929,2	0,000	0,283	0,017	0,44
Etanol Hidratado	kg	0,0	1.801,0	0,000	0,475	0,016	0,66
Gasolina A	kg	2.981,1	0,0	1,089	0,000	0,348	71,33
Gasolina C	kg	2.140,9	546,3	0,782	0,080	0,255	56,77
GNV	kg	2.701,4	0,0	4,595	0,000	0,149	57,81
Biometano	Nm ³	0,0	2.701,4	0,000	4,595	0,149	3,48
Querosene de Aviação	kg	3.150,0	0,0	0,022	0,000	0,088	72,89
BioQav	kg	0,0	3.150,0	0,000	0,022	0,088	0,55
Gasolina renovável (HEFA)	kg	0,0	2.981,1	0,000	1,089	0,348	2,73
Diesel renovável (HEFA)	kg	0,0	3.098,8	0,000	0,165	0,165	1,10
Gás combustível renovável (HEFA)	kg	0,0	2.701,4	0,000	4,595	0,149	3,61

Fonte: RenovaCalc, adaptado de ANP (2025c).

Resultados

Por fim, somando-se as emissões a montante [WtT] do GNV, representadas pela exploração e processamento, importação, transporte, distribuição e abastecimento, com as emissões de queima/uso [TtW] utilizada na RenovaCalc/RenovaBio, chega-se ao resultado da IC do GNV no Brasil [WtW] de 76,85 gCO_{2eq}/MJ de GN. A Tabela A 7 resume as contribuições de cada etapa, compondo o resultado obtido.

⁴⁴ Valores constantes na RenovaCalc foram revisados e o utilizado para este Informe é resultado de atualizações.

Tabela A 7: IC das etapas da cadeia de produção e uso do GNV no Brasil e resultado estimado.

Etapa da cadeia do GNV	Origem	gCO ₂ /MJ GNV (individual)	Participação (%)	gCO ₂ e/MJ GNV (participação)	Fonte
Exploração, Importação e Processamento	Nacional Offshore	8,09	61%	4,97	<i>Ecoinvent 3.11</i>
Exploração, Importação e Processamento	Nacional Onshore	8,55	2%	0,18	<i>Ecoinvent 3.11</i>
Exploração, Importação e Processamento	Gasbol Importado	15,31	23%	3,48	<i>Ecoinvent 3.11</i>
Exploração, Importação e Processamento	GNL Importado	30,13	14%	4,13	<i>Ecoinvent 3.11</i>
Transporte e Distribuição	Oferta Interna Total	4,5	100%	4,47	<i>SGI¹</i>
Abastecimento	Oferta Interna Total	1,8	100%	1,80	<i>ICCT²</i>
Uso Queima	Oferta Interna Total	57,8	100%	57,81	<i>RenovaBio</i>
Total				76,85	

Fonte: EPE a partir de ANP (2025), [Ecoinvent \(2025\)](#), [SGI \(2015\)](#), [ICCT \(2015\)](#).

A4) Efeito Corona

Para determinação das emissões associadas ao efeito corona foi utilizado o dataset “*market for electricity, high voltage BR*” da base de dados Ecoinvent 3.5 (Wernet *et al.*, 2016; Ecoinvent, 2018), incluindo apenas as emissões relativas à distribuição da energia (emissões de N₂O e O₃ do efeito corona, e da infraestrutura de distribuição), calculado com o método de avaliação de impacto IPCC 2013 GWP 100a V1.03 (IPCC, 2013) do software de avaliação do ciclo de vida SimaPro.

As emissões da transmissão de energia elétrica, calculadas pelo LNBR (2021) no dataset “*Electricity, high voltage {BR} distribution, without losses | APOS, U*”, derivam do inventário original do Ecoinvent versão 3.5 “*market for electricity, high voltage BR*”

Ecoinvent inclui em seu dataset: (a) **insumos de eletricidade produzidos no país ou importados** (*electricity inputs produced in this country and from imports*); (b) **a rede de transmissão** (*the transmission network*); (c) **emissões diretas para o ar (ozônio e N₂O)** (*direct emissions to air (ozone and N₂O)*); e (d) **perdas elétricas durante a transmissão** (*electricity losses during transmission*).

Para isolar os efeitos da transmissão, no dataset de transmissão do LNBR (2021) foi feita uma modificação no dataset original do Ecoinvent de forma a considerar apenas:

(b) **a rede de transmissão** (*the transmission network*);

(c) **emissões diretas para o ar (ozônio e N₂O)** (*direct emissions to air (ozone and N₂O)*);

Ressalta-se que as emissões relativas ao ciclo de vida das fontes e as perdas relativas à transmissão de energia são consideradas isoladamente, conforme já descrito no documento.

De acordo com as referências do Ecoinvent, as emissões de N₂O e O₃ são citadas como:

a. *“Literature value/estimation. The electro-magnetic field near high voltage aerial lines can lead to the ionisation of air molecules and to the formation of nitrous oxide and ozone. This reaction happens in a boundary layer called corona. The formation of pollutants depends on the weather and the surface of the conductor. Therefore, only a few general assumptions can be made.*

b. Dinitrogen monoxide emissions:

Hill et al. 1984 report a nitrous oxide formation rate between 0.01 and 0.21 g per kWh of electricity transmitted, valid for North American conditions. The geometric mean of 0.05 g/kWh. This emission rate is overtaken for this country.

c. Ozone emissions:

Bohlin et al. 1991 and B+,'hringer et al. 1988 report very low ozone concentrations near the corona, which hardly can be measured. The value here is estimated from Swiss data:

- annual ozone emissions: 50-1250 tons (Knoepfel 1995, p. 99). The geometric mean of 250 t/year is used for calculations.

- annual amount of electricity transported in Switzerland: 60129 GWh.

S. Bohlin, K. Eriksson, G. Flisberg, 'Electrical transmission', World Clean Energy Conf., Geneva, Nov. 1991

A. B+,'hringer et al., 'Ozonbildung an Hochspannungsfreileitungen', Elektrizitätswirtschaft 87(1988) Nr. 21, S. 1017-1022”

$250\text{t O}_3 / 60129 \text{ GWh} = 4.157728 \times 10^{-6} \text{ kg O}_3/\text{kWh}$

Tabela A 8: Parcelas que compõem o cálculo do efeito Corona (em gCO₂/MJ)

Emissões diretas	Rede de transmissão – Alta voltagem	Rede de Transmissão – longa distância	Total
3,680556	0,163459	$3,95 \times 10^{-2}$	3,88

Fonte: (ECOINVENT 3.5, 2018; IPCC, 2013)

A5) Consumo energético dos veículos elétricos

Para a determinação do consumo energético dos veículos elétricos a bateria, utiliza-se a norma SAE J1634/2021. De acordo com essa norma, determina-se um fator chamado RAF (fator de alocação de recarga), que calcula a relação entre a energia fornecida pela rede elétrica AC (Eac – kWh), que é usada para carregar o veículo para o teste (inclui a parcela de energia usada para alimentar o carregador), e a energia consumida pelo motor elétrico do carro (Edc – kWh), para percorrer o percurso determinado pela norma.

O fator RAF é aplicado ao resultado de eficiência energética (MJ/km), publicado nos programas PBEV/INMETRO. Dessa forma, essa eficiência energética considera as perdas de eficiência do carregador utilizado no ensaio. A Figura 1A ilustra esses pontos de medição da alimentação **E_{dc}** e **E_a**.

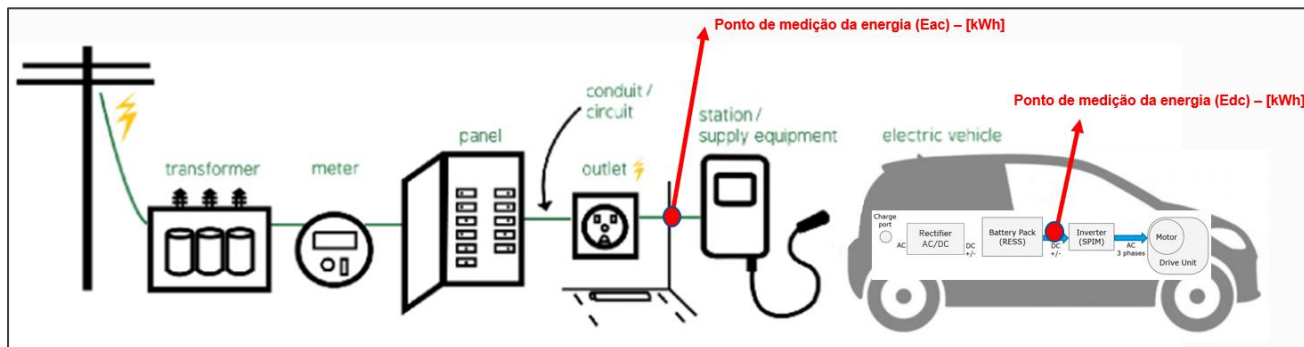


Figura A 3: Pontos de medição do carregamento de veículos elétricos a bateria

Fonte: GM (2022)

A6) Demandas dos energéticos (volume) (2022 – 2034)

Tabela A 9: Demanda dos energéticos (volume) para 2022; 2024 - 2034

	Unidades	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
CICLO OTTO														
sem GNV	10 ⁹ l gas. eq.	53,5	56,9	59,9	59,5	60,6	61,6	62,5	63,2	63,8	64,4	65,0	65,5	66,0
Gasolina C	10 ⁹ l	37,3	39,6	37,2	40,7	39,3	38,0	36,9	36,5	36,1	35,7	35,6	35,6	35,5
Gasolina A	10 ⁹ l	26,8	28,6	26,9	29,7	27,5	26,6	25,9	25,5	25,3	25,0	25,0	24,9	24,9
Etanol anidro	10 ⁹ l	10,4	10,9	10,3	11,0	11,8	11,4	11,1	10,9	10,8	10,7	10,7	10,7	10,7
Etanol de Cana 1G	10 ⁹ l	9,1	9,0	8,2	8,3	8,6	7,9	7,3	7,0	6,7	6,5	6,4	6,3	6,2
Etanol de Cana 2G	10 ⁹ l	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Etanol de Milho	10 ⁹ l	1,3	2,0	2,1	2,7	3,1	3,5	3,8	4,0	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5
Mistura (%)	%	28,0%	27,7%	27,7%	27,0%	30,0%	30,0%	30,0%	30,0%	30,0%	30,0%	30,0%	30,0%	30,0%
Etanol hidratado	10 ⁹ l	16,2	17,3	22,7	18,8	21,3	23,5	25,6	26,7	27,7	28,7	29,3	29,9	30,4
Etanol de Cana 1G	10 ⁹ l	13,7	14,0	17,8	13,9	15,5	17,0	18,4	19,2	19,9	20,7	21,1	21,4	21,8
Etanol de Cana 2G	10 ⁹ l	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Etanol de Milho	10 ⁹ l	2,5	3,3	4,9	4,9	5,8	6,5	7,2	7,5	7,8	8,0	8,2	8,4	8,6
Market share etanol hidratado no flex fuel (v/v%)	%	36,7%	35,7%	43,9%	36,4%	40,4%	43,7%	46,6%	48,1%	49,6%	51,1%	52,2%	53,3%	54,6%
CICLO DIESEL														
Diesel B Rodoviário	10 ⁹ l	50,6	52,2	53,8	56,0	57,3	58,6	59,6	60,6	61,5	62,4	63,3	64,2	65,0
Diesel	10 ⁹ l	45,5	46,2	46,5	48,1	48,7	49,8	50,1	50,9	51,1	51,8	51,9	52,0	52,0
Biodiesel	10 ⁹ l	5,1	6,0	7,3	7,8	8,6	8,8	9,5	9,7	10,5	10,6	11,4	12,2	13,0
Mistura (%)	%	10%	11,5%	13,6%	14%	15%	15%	16%	16%	17%	17%	18%	19%	20%
Diesel B veículos leves	10 ⁹ l	4,3	4,6	4,8	4,9	4,9	5,0	5,0	5,1	5,2	5,3	5,5	5,6	5,8
Biodiesel veículos leves	10 ⁹ l	0,4	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	1,1	1,2
Diesel B veículos pesados	10 ⁹ l	41,2	41,6	41,7	43,2	43,8	44,9	45,1	45,8	45,8	46,5	46,4	46,3	46,2
Biodiesel veículos pesados	10 ⁹ l	4,6	5,5	6,7	7,1	7,9	8,0	8,7	8,9	9,6	9,7	10,4	11,1	11,8

	Unidades	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
GÁS														
GNV total	10 ⁹ m ³	2,3	2,0	1,7	2,2	2,3	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	2,9	3,0	3,1
GNV Fóssil	10 ⁹ m ³	2,3	2,0	1,7	2,2	2,2	2,4	2,5	2,5	2,6	2,6	2,7	2,7	2,6
Biometano total	10 ⁹ m ³	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5
Mistura (%)	%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	3,0%	3,7%	4,5%	5,5%	6,7%	8,2%	10,0%	12,3%	15,0%
GNV leves	10 ⁹ m ³	2,26	1,96	1,63	2,10	2,17	2,27	2,36	2,42	2,44	2,45	2,44	2,42	2,38
Biometano leves	10 ⁹ m ³	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,09	0,11	0,14	0,18	0,22	0,27	0,34	0,42
GNV pesados	10 ⁹ m ³	0,02	0,03	0,04	0,06	0,07	0,09	0,11	0,13	0,16	0,18	0,21	0,24	0,27
Biometano pesados	10 ⁹ m ³	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,05
ELÉTRICO														
Eletricidade	GWh	68	132	338	702	1.147	1.682	2.302	3.013	3.815	4.697	5.667	6.759	8.021
Leves	GWh	32	83	252	524	811	1.109	1.417	1.736	2.070	2.427	2.822	3.276	3.822
Pesados	GWh	36	49	86	178	336	573	885	1.278	1.745	2.269	2.844	3.482	4.199

Fonte: EPE (2025a, 2025b)

A7) Metodologia para cálculo da Intensidade de carbono das misturas de combustíveis nacionais

Equação 1: IC da gasolina C:

$$\left[\frac{gCO_2eq}{MJ} \right]_{Exx} = \frac{\left[\frac{gCO_2eq}{MJ} \times \frac{MJ}{l} \times (100 - Exx) \right]_{E0} + \left[\frac{gCO_2eq}{MJ} \times \frac{MJ}{l} \times (Exx) \right]_{Anhydrous Ethanol}}{\left[\frac{MJ}{l} \times (100 - Exx) \right]_{E0} + \left[\frac{MJ}{l} \times (Exx) \right]_{Anhydrous Ethanol}}$$

Equação 2: IC do diesel B:

$$\left[\frac{gCO_2eq}{MJ} \right]_{Bxx} = \frac{\left[\frac{gCO_2eq}{MJ} \times \frac{MJ}{l} \times (100 - Exx) \right]_{B0} + \left[\frac{gCO_2eq}{MJ} \times \frac{MJ}{l} \times (Bxx) \right]_{Biodiesel B100}}{\left[\frac{MJ}{l} \times (100 - Exx) \right]_{B0} + \left[\frac{MJ}{l} \times (Bxx) \right]_{Biodiesel B100}}$$

Fonte: VOLKSWAGEN (2022)

A8) Evolução da intensidade de carbono (gCO₂eq/MJ) dos energéticos (2022 – 2034)

Tabela A 10: Evolução da intensidade de carbono (gCO₂eq/MJ) dos energéticos

	2022	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
Etanol Anidro	22,26	22,39	22,27	22,14	22,04	21,94	21,81	21,69	21,55	21,42	21,29	21,11
Etanol Hidratado	22,65	22,73	22,62	22,46	22,30	22,13	21,96	21,80	21,62	21,46	21,30	21,08
Gasolina A	87,40	87,40	87,40	87,40	87,40	87,40	87,40	87,40	87,40	87,40	87,40	87,40
Gasolina C (E27/E30)	73,61	73,78	74,13	72,47	72,45	72,43	72,40	72,37	72,34	72,31	72,28	72,24
Gasolina C (E22)	76,76	76,78	76,76	76,74	76,73	76,71	76,69	76,67	76,65	76,63	76,60	76,57
Biometano	9,32	9,32	8,35	8,35	8,35	8,35	8,35	8,35	8,35	8,35	8,35	8,35
GNV	76,85	76,85	76,85	76,85	76,85	76,85	76,85	76,85	76,85	76,85	76,85	76,85
Biodiesel	28,40	28,40	28,30	28,21	28,11	28,02	27,92	27,83	27,73	27,64	27,54	27,45
Diesel A	86,50	86,50	86,50	86,50	86,50	86,50	86,50	86,50	86,50	86,50	86,50	86,50
Diesel B (BX)	81,04	79,06	78,82	78,26	78,24	77,67	77,66	77,08	77,07	76,49	75,91	75,33
Diesel B (B7)	82,69	82,69	82,68	82,67	82,67	82,66	82,65	82,65	82,64	82,64	82,63	82,62
Elettricidade	21,78	20,85	21,15	19,13	19,89	22,06	24,82	25,39	25,14	25,00	24,88	24,31

Fonte: EPE (Elaboração própria)

A9) Intensidade de Carbono Média da Matriz de Transporte (2022 – 2034)

Tabela A 11: IC do setor de transporte rodoviário e segmentos (leves e pesados)

gCO ₂ eq/MJ	2022	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
Matriz de transporte	72,4	69,6	71,0	69,5	68,9	68,1	67,8	67,2	66,9	66,4	65,9	65,4
Veículos Leves	64,1	61,0	63,8	61,2	60,0	58,8	58,2	57,7	57,1	56,8	56,4	56,0
Veículos Pesados	81,0	78,9	78,7	78,1	78,1	77,4	77,4	76,7	76,7	76,0	75,4	74,7

Fonte: EPE (Elaboração própria)

A10) Demandas dos energéticos (volume) (2022 – 2034) de veículos leves (inclui motocicletas)

Tabela A 12: Demanda dos energéticos (volume) para 2022; 2024 – 2034 de veículos leves (inclui motocicletas)

	Unidades	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
CICLO OTTO														
sem GNV	10 ⁹ l	60,6	64,6	68,2	68,0	69,1	70,1	71,1	71,8	72,5	73,2	73,8	74,3	74,9
Gasolina C	10 ⁹ l	43,6	46,5	44,6	48,3	46,9	45,7	44,7	44,3	43,9	43,6	43,6	43,6	43,6
Gasolina A	10 ⁹ l	31,4	33,6	32,3	35,3	32,8	32,0	31,3	31,0	30,8	30,5	30,5	30,5	30,5
Etanol anidro	10 ⁹ l	12,2	12,9	12,4	13,0	14,1	13,7	13,4	13,3	13,2	13,1	13,1	13,1	13,1
Etanol de Cana 1G	10 ⁹ l	10,7	10,6	9,8	9,9	10,3	9,5	8,8	8,5	8,2	8,0	7,8	7,7	7,6
Etanol de Cana 2G	10 ⁹ l	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Etanol de Milho	10 ⁹ l	1,5	2,3	2,6	3,2	3,7	4,2	4,6	4,8	5,0	5,1	5,3	5,4	5,5
Mistura (%)	%	28,0%	27,7%	27,7%	27,0%	30,0%	30,0%	30,0%	30,0%	30,0%	30,0%	30,0%	30,0%	30,0%
Etanol hidratado	10 ⁹ l	16,9	18,1	23,6	19,6	22,2	24,4	26,4	27,6	28,6	29,6	30,2	30,8	31,3
Etanol de Cana 1G	10 ⁹ l	14,3	14,6	18,5	14,5	16,2	17,7	19,0	19,8	20,5	21,4	21,7	22,1	22,5
Etanol de Cana 2G	10 ⁹ l	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Etanol de Milho	10 ⁹ l	2,6	3,5	5,1	5,1	6,0	6,8	7,4	7,8	8,0	8,3	8,5	8,7	8,8
Market share etanol hidratado no flex fuel (v/v%)	%	33,8%	33,5%	40,8%	33,9%	37,5%	40,5%	43,2%	44,7%	46,0%	47,5%	48,5%	49,7%	51,0%
CICLO DIESEL														
Diesel B Rodoviário	10 ⁹ l	50,6	52,2	53,8	56,0	57,3	58,6	59,6	60,6	61,5	62,4	63,3	64,2	65,0
Diesel	10 ⁹ l	45,5	46,2	46,5	48,1	48,7	49,8	50,1	50,9	51,1	51,8	51,9	52,0	52,0
Biodiesel	10 ⁹ l	5,1	6,0	7,3	7,8	8,6	8,8	9,5	9,7	10,5	10,6	11,4	12,2	13,0
Mistura (%)	%	10,0%	11,5%	13,6%	14,0%	15,0%	15,0%	16,0%	16,0%	17,0%	17,0%	18,0%	19,0%	20,0%
Diesel B veículos leves	10 ⁹ l	4,3	4,6	4,8	4,9	4,9	5,0	5,0	5,1	5,2	5,3	5,5	5,6	5,8
Biodiesel veículos leves	10 ⁹ l	0,4	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	1,1	1,2
Diesel B veículos pesados	10 ⁹ l	41,2	41,6	41,7	43,2	43,8	44,9	45,1	45,8	45,8	46,5	46,4	46,3	46,2
Biodiesel veículos pesados	10 ⁹ l	4,6	5,5	6,7	7,1	7,9	8,0	8,7	8,9	9,6	9,7	10,4	11,1	11,8

	Unidades	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
GÁS														
GNV total	10 ⁹ m ³	2,3	2,0	1,7	2,2	2,3	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	2,9	3,0	3,1
GNV Fóssil	10 ⁹ m ³	2,3	2,0	1,7	2,2	2,2	2,4	2,5	2,5	2,6	2,6	2,7	2,7	2,6
Biometano total	10 ⁹ m ³	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5
Mistura (%)	%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	3,0%	3,7%	4,5%	5,5%	6,7%	8,2%	10,0%	12,3%	15,0%
GNV leves	10 ⁹ m ³	2,3	2,0	1,6	2,1	2,2	2,3	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4
Biometano leves	10 ⁹ m ³	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4
GNV pesados	10 ⁹ m ³	0,02	0,03	0,04	0,06	0,07	0,09	0,11	0,13	0,16	0,18	0,21	0,24	0,27
Biometano pesados	10 ⁹ m ³	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,05
ELÉTRICO														
Elettricidade	GWh	68	132	338	702	1.147	1.682	2.302	3.013	3.815	4.697	5.667	6.759	8.021
Leves	GWh	32	83	252	524	811	1.109	1.417	1.736	2.070	2.427	2.822	3.276	3.822
Pesados	GWh	36	49	86	178	336	573	885	1.278	1.745	2.269	2.844	3.482	4.199

Fonte: EPE (2025a, 2025b)

A11) Participação na demanda dos energéticos na demanda total (em energia) (2022 – 2034) de veículos leves (inclui motocicletas)

Tabela A 13: Participação na demanda dos energéticos na demanda total (em energia) de veículos leves (inclui motocicletas)

	2022	2023	2024	2027	2032	2034
CICLO OTTO						
Gasolina A	28,9%	29,6%	27,6%	25,7%	23,1%	22,6%
Etanol anidro	7,8%	7,8%	7,3%	7,6%	6,8%	6,7%
Etanol hidratado	10,3%	10,5%	13,3%	13,0%	15,1%	15,3%
CICLO DIESEL						
Diesel	46,0%	44,7%	43,7%	44,0%	43,1%	42,3%
Biodiesel	4,8%	5,4%	6,4%	7,3%	8,8%	9,9%
Diesel veículos leves	4,3%	4,4%	4,5%	4,4%	4,6%	4,7%
Biodiesel veículos leves	0,4%	0,5%	0,6%	0,6%	0,8%	0,9%
Diesel veículos pesados	41,6%	40,2%	39,2%	39,6%	38,6%	37,6%
Biodiesel veículos pesados	4,4%	5,0%	5,8%	6,6%	8,1%	9,0%
ELÉTRICO						
Eletricidade	0,0%	0,0%	0,0%	0,2%	0,5%	0,7%
Leves	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,2%	0,3%
Pesados	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,2%	0,3%
GÁS						
GNV (fóssil)	2,4%	2,0%	1,6%	2,2%	2,3%	2,2%
Biometano	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,3%	0,4%
GNV (fóssil) veículos leves	2,4%	2,0%	1,6%	2,1%	2,1%	2,0%
Biometano veículos leves	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,2%	0,4%
GNV (fóssil) veículos pesados	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,2%	0,2%
Biometano veículos pesados	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,02%	0,04%

Fonte: EPE (2025a, 2025b)

A12) Intensidade de Carbono Média da Matriz de Transporte (2022 – 2034) (inclui motocicletas)

Tabela A 14: IC do setor de transporte rodoviário e segmentos (leves e pesados)

gCO ₂ eq/MJ	2022	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
Matriz de transporte	72,2	69,7	71,0	69,4	68,9	68,1	67,8	67,3	67,0	66,5	66,1	65,5
Veículos Leves	64,7	62,0	64,5	62,0	60,9	59,9	59,4	58,9	58,4	58,1	57,8	57,4
Veículos Pesados	81,0	78,9	78,7	78,1	78,1	77,4	77,4	76,7	76,7	76,0	75,4	74,7

Nota: Inclui motocicletas
Fonte: EPE (Elaboração própria)

Referências bibliográficas

ABNT (2014). *Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura*. Versão corrigida 21.07.2014. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Disponível em: www.abnt.org.br. Acesso em: 04 fev. 2025.

ANEEL (2022). *Perdas de Energia*. Versão atualizada em 11/03/2022. Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/distribuicao/perdas-de-energia>. Acesso em: 04 fev. 2025.

ANP (2010). *Resolução ANP nº 16/2010. Regulamenta a atividade de refino de petróleo, que abrange a construção, modificação, ampliação de capacidade e operação de Refinaria de Petróleo*. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Rio de Janeiro. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-16-2010-2010-06-10-versao-original?origin=instituicao>. Acesso em: 04 fev. 2025.

____ (2013). *Resolução ANP nº 50/2013. Regulamenta as especificações do óleo diesel de uso rodoviário*. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Rio de Janeiro. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-50-2013?origin=instituicao&q=%C3%B3leo%20diesel%20rodovi%C3%A1rio>. Acesso em: 04 fev. 2025.

____ (2015). *Fluxos logísticos de produção, transporte e armazenagem de gasolina A e de óleo diesel A no Brasil*. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/livros-e-revistas/arquivos/fluxos-logisticos-producao-transporte-armazenamento.pdf>. Acesso em: 04 fev. 2025.

____ (2018a). *Resolução ANP nº 758/2018. 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, e o credenciamento de firmas inspetoras*. Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Rio de Janeiro. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-758-2018-regulamenta-a-certificacao-da-producao-ou-importacao-eficiente-de-biocombustiveis-de-que-trata-o-art-18-da-lei-no-13-576-de-26-de-dezembro-de-2017-e-o-credenciamento-de-firmas-inspetoras?origin=instituicao&q=Resolu%C3%A7%C3%A3o%20ANP%20n%C2%BA%20758/2018>. Acesso em: 03 fev. 2025.

____ (2018b). *Nota Técnica RenovaCalc: método e ferramenta para a contabilidade da intensidade de carbono de biocombustíveis no Programa RenovaBio*. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br>. Acesso em: 04 fev. 2025.

____ (2019). *Resolução ANP nº 802/2019. Estabelece os procedimentos para geração de lastro necessário para emissão primária de Créditos de Descarbonização*. Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-n-802-de-5-de-dezembro-de-2019-231852634>. Acesso em: 04 fev. 2025.

____ (2020). *Resolução ANP nº 807/2020. Estabelece a especificação da gasolina de uso automotivo e as obrigações quanto ao controle da qualidade a serem atendidas pelos agentes econômicos que comercializarem o produto em todo o território nacional*. Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Rio de Janeiro. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-807-2020>. Acesso em: 04 fev. 2025.

____ (2021a). *Informe Técnico nº 02/SBQ v. 4. Orientações gerais: procedimentos para a certificação da produção ou importação eficiente de combustíveis*. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio/arq/ocr/informe-tecnico-02-sbq.pdf>. Acesso em: 04 fev. 2025.

____ (2021b). *Resolução ANP nº 864, de 23 de dezembro de 2021. Estabelece as especificações dos combustíveis de referência utilizados nos ensaios de avaliação de consumo de combustível e de emissões veiculares para a homologação de veículos automotores novos e de máquinas agrícolas e rodoviárias novas*. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Rio de Janeiro. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-864-2021-estabelece-as-especificacoes-dos-combustiveis-de-referencia-utilizados-nos-ensaios-de-avaliacao-de-consumo-de-combustivel-e-de-emissoes-veiculares-para-a-homologacao-de-veiculos-automotores-novos-e-de-maquinas-agricolas-e-rodoviarias-novas>. Acesso em: 04 fev. 2025.

____ (2021c). *Resolução Nº 842, de 14 de maio de 2021. Estabelece a especificação do diesel verde, bem como as obrigações quanto ao controle da qualidade a serem atendidas pelos agentes econômicos que o comercializem em*

território nacional. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-anp-n-842-de-14-de-maio-de-2021-320059616>. Acesso em 27 abr. 2022.

____ (2022a). *Resolução nº 886, de 29 de setembro de 2022. Estabelece a especificação e as regras para aprovação do controle da qualidade do biometano oriundo de aterros sanitários e de estações de tratamento de esgoto destinado ao uso veicular e às instalações residenciais, industriais e comerciais, a ser comercializado no território nacional*. Disponível em: www.anp.gov.br. Acesso em: 04 mar. 2025.

____ (2022b). *Resolução nº 906, de 29 de setembro de 2022. Dispõe sobre as especificações do biometano oriundo de produtos e resíduos orgânicos agrossilvopastoris e comerciais destinado ao uso veicular e às instalações residenciais e comerciais a ser comercializado em todo o território nacional*. Disponível em: www.anp.gov.br. Acesso em: 04 mar. 2025.

____ (2022c). *Informe Técnico nº 06/SBQ v. 0 - Procedimentos para Implementação e Verificação da Cadeia de Custódia de Grãos e Óleos Vegetais*. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Rio de Janeiro. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio/arq/arquivos-orientacoes-certificacoes-renovabio/informe-tecnico-06-cadeia-de-custodia_v0.pdf. Acesso em: 28 abr. 2025.

____ (2024). *Anuário Estatístico, 2024. Fatores de conversão, densidades e poderes caloríficos inferiores*. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br>. Acesso em: 04 mar. 2025.

____ (2025a). *Dados Estatísticos*. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Rio de Janeiro. Disponível em <https://www.gov.br/anp/pt-br>. Acesso em: 04 mar. 2025.

____ (2025b). *Painel Dinâmico de Emissões de Gases de Efeito Estufa*. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/paineis-dinamicos-da-anp/paineis-dinamicos-sobre-exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/painel-dinamico-de-emissoes>. Acesso em: 28 abr. 2025.

____ (2025c). *RenovaBio*. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio>. Acesso em: 14 jun. 2022.

____ (2025d). *Informações de Mercado – Biodiesel*. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/biodiesel/biodiesel/informacoes-de-mercado>. Acesso em: 03 mar. 2022.

____ (2025e). *Dados das certificações da RenovaCalc* (comunicação pessoal).

ARRUDA, C. K. da C. (2012). *Modelagem de efeito coroa em linhas de transmissão em corrente contínua*. Tese de Doutorado. Programa de Engenharia Elétrica: UFRJ/COPPE. Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.pee.ufrj.br/index.php/pt/producao-academica/teses-de-doutorado/2012/2012033001-2012033001/file>. Acesso em: 04 fev. 2025.

BRASIL (2009). *Lei nº 12.187 de 29 de dezembro de 2009. Institui a Política Nacional sobre Mudanças Climáticas – PNMC e dá outras providências*. Disponível em: www.planalto.gov.br. Acesso em: 02 de dezembro de 2021.

____ (2017). *Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências*. Disponível em: www.planalto.gov.br. Acesso em: 02 dez. 2021.

____ (2018). *Lei nº 13.755, de 10 de dezembro de 2018. Institui o Programa Rota 2030 – Mobilidade e Logística e dá outras providências*. Disponível em: www.planalto.gov.br. Acesso em: 04 fev. 2025.

____ (2024a). *Lei nº 14.993, de 08 de outubro de 2024. Dispõe sobre a promoção da mobilidade sustentável de baixo carbono e a captura e a estocagem geológica de dióxido de carbono; institui o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV), o Programa Nacional de Diesel Verde (PNDV) e o Programa Nacional de Descarbonização do Produtor e Importador de Gás Natural e de Incentivo ao Biometano*. Disponível em: www.planalto.gov.br. Acesso em: 04 fev. 2025.

____ (2024b). *Nationally Determined Contribution (NDC), 2024b*. Disponível em: https://unfccc.int/sites/default/files/2024-11/Brazil_Second%20Nationally%20Determined%20Contribution%20%28NDC%29_November2024.pdf. Acesso em: 03 fev. 2025.

____ (2024c). *Lei nº 14.902, de 27 de junho de 2024. Institui o Programa de Mobilidade Verde e Inovação (Mover)*. Disponível em: www.planalto.gov.br. Acesso em: 04 fev. 2025.

_____. (2025). *Decreto nº 12.435, de 15 de abril de 2025. Regulamenta o Programa de Mobilidade Verde e Inovação (Mover)*. Disponível em: www.planalto.gov.br. Acesso em: 16 abr. 2025.

CNPE (2023). *Resolução CNPE nº 8, de 19 de dezembro de 2023. Reduz o prazo para os aumentos dos teores de biodiesel e dá outras providências* 20231. . Conselho Nacional de Política Energética. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/cnpe/resolucoes-do-cnpe/2023/ResolucaoCNPE8Publicada.pdf><https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/cnpe/resolucoes-do-cnpe/>. Acesso em: 04 fev. 2025.

CONAMA (2021). *Resolução CONAMA nº 501, de 21 de outubro de 2021. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas*. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-conama/mma-n-501-de-21-de-outubro-de-2021-353968637>. Acesso em: 04 fev. 2025.

COSTA, J.A. (2019). *Perdas de energia em sistemas de distribuição com integração ótima de geração distribuída fotovoltaica*. Rio de Janeiro, PPE/ UFRJ/COPPE, 2019. Disponível em: <http://www.ppe.ufrj.br/index.php/en/publicacoes/teses-e-dissertacoes/2019/1494-perdas-de-energia-em-sistemas-de-distribuicao-com-integracao-otima-de-geracao-distribuida-fotovoltaica>. Acesso em: 04 fev. 2025.

DOE (2018). U.S. Department of Energy and U.S. Environmental Protection Agency, Fuel Economy Guide website. Disponível em <https://www.energy.gov/eere/vehicles/articles/fotw-1045-september-3-2018-77-82-energy-put-electric-car-used-move-car-down>. Acesso em 04 fev. 2025.

ECOINVENT 3.5 (2018). *Database, versão 3.5*. Dados recebidos de LNBR e UNICA.

EMBRAPA (2023). *Regionalização dos perfis “típicos” da produção de soja para uso no Renovabio*. Relatório Final de Trabalho. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio/arq/regionalizacaosojarenovabio.pdf>. Acesso em: 04 fev. 2025.

_____. (2024a). *Regionalização dos perfis “típicos” da produção de milho para uso no Renovabio*. Relatório Final de Trabalho. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio/arq/arquivos-estudos-relatorio-e-seminarios/relatorio-final-regionalizacao-perfis-tipicos-producao-milho.pdf>. Acesso em: 04 fev. 2025.

_____. (2024b). *Regionalização dos perfis “típicos” da produção de cana-de-açúcar para uso no Renovabio*. Relatório Final de Trabalho. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio/arq/arquivos-estudos-relatorio-e-seminarios/relatoriofinalcanadeacucar.pdf>. Acesso em: 04 fev. 2025.

EPE (2020). *Combustíveis Alternativos para motores do ciclo Diesel*. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-467/NT_Combustiveis_renovaveis_em_%20motores_ciclo_Diesel.pdf. Acesso em: 04 fev. 2025.

EPE (2022). *Nota Técnica Descarbonização do setor de transporte rodoviário: intensidade de carbono das fontes de energia*. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro. Disponível em: [Descarbonização do Setor de Transporte Rodoviário Intensidade de carbono das fontes de energia](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-809/Bloco%206%20-%20Mercado%20Internacional%20Petr%C3%B3leo_Intensidade%20de%20Carbono.pdf). Acesso em: 04 fev. 2025.

_____. (2024a). *Mercado Internacional de Petróleo*. Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-809/Bloco%206%20-%20Mercado%20Internacional%20Petr%C3%B3leo_Intensidade%20de%20Carbono.pdf. Acesso em: 28 abr. 2025.

_____. (2024b). *Emissões de metano na cadeia do gás natural*. Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-837/EMISSIONES%20DE%20METANO%20NA%20CADEIA%20DO%20GAS%20NATURAL.pdf>. Acesso em: 28 abr. 2025.

_____. (2024c). *Combustíveis Sustentáveis de Aviação no Brasil – Perspectivas Futuras*. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/combustiveis-sustentaveis-de-aviacao-no-brasil-perspectivas-futuras>. Acesso em: 28 abr. 2025.

_____. (2024d). *Eletromobilidade: Transporte Rodoviário*. Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-804/topico-709/CA-EPE-DPG-SDB-2024-08_Eletromobilidade_2024.08.30%20\(1\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-804/topico-709/CA-EPE-DPG-SDB-2024-08_Eletromobilidade_2024.08.30%20(1).pdf). Acesso em: 28 abr. 2025.

____ (2025a). *Balanco Energético Nacional 2025: Ano-base 2024*. Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2025>. Acesso em: 29 maio 2025. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2025>. Acesso em: 29 maio 2025.

____ (2025b). *Plano Decenal de Expansão de Energia – PDE 2034*. Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2034>. Acesso em 28 abr. 2025.

GENERAL MOTORS (2022). Comunicação pessoal.

ICCT (2015). *Assessment of Heavy-Duty Natural Gas Vehicle Emissions: Implications and Policy Recommendations*. Disponível em: https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_NG-HDV-emissions-assessmnt_20150730.pdf. Acesso em: 20 mar. 2025.

IEA (2019). *The future of hydrogen – seizing today's opportunities*. International Energy Agency Paris, junho 2019. Disponível <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>. Acesso em: 28 abr. 2025.

____ (2023). *Emissions from Oil and Gas Operations in Net Zero Transitions*. International Energy Agency. Paris, maio 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/emissions-from-oil-and-gas-operations-in-net-zero-transitions>. Acesso em: 28 abr. 2025.

____ (2024). *Global EV Outlook 2024*. International Energy Agency. Paris, abril 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>. Acesso em: 28 abr. 2025.

INMETRO (2016). *Portaria nº 15, de 14 de janeiro de 2016. Requisitos de avaliação da conformidade para veículos leves de passageiros e comerciais leves*. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002358.pdf>. Acesso em: 04 mar. 2025.

____ (2020). *Portaria nº 16, de 07 de outubro de 2020. Proposta de alteração dos requisitos de avaliação da conformidade para veículos leves de de passageiros e comerciais leves*. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002264.pdf>. Acesso em: 04 mar. 2025.

____ (2023). *Portaria nº 169, de 03 de maio de 2023. Aprova os requisitos de avaliação da conformidade para veículos leves de passageiros e comerciais leves – consolidado*. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-n-169-de-3-de-maio-de-2023-485619287>. Acesso em: 04 mar. 2025.

IPCC (2013). *Fifth Assessment Report*. International Panel on Climate Change. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar5/>. Acesso em: 04 fev. 2025.

IPCC (2022). *Sixth Assessment Report - Mitigation of Climate Change (WGIII). Chapter 10, Transport*. Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_Chapter10.pdf. Acesso em: 29 abr. 2025.

____ (2023). *Sixth Assessment Report - Summary for Policymakers*. Intergovernmental Panel on Climate Change.. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/copy_of_IPCC_Longer_Report_2023_Portugues.pdf. Acesso em: 29 abr. 2025.

JEC (2020). *European Commission, Joint Research Centre, Prussi, M., Yugo, M., De Prada, L., et al., JEC well-to-tank report V5: JEC well-to-wheels analysis: well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context*, Publications Office, 2020. Disponível em: <https://data.europa.eu/doi/10.2760/959137>. Acesso em: 03 fev. 2025.

LNBR (2021). Comunicação pessoal. Laboratório Nacional de Biorrenováveis.

MAPA (2025). *Sustentabilidade/Agroenergia*. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Brasília. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br>. Acesso em: 04 mar. 2025.

MME (2024). *Boletim Mensal de Acompanhamento da Indústria de Gás Natural*. Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-bicombustiveis/publicacoes-1/boletim-mensal-de-acompanhamento-da-industria-de-gas-natural>. Acesso em: 20 mar. 2025.

NOVACANA (2025). *Raízen encerra operação de planta de etanol de 2ª geração em Piracicaba (SP)*. Disponível em: <https://www.novacana.com/noticias/raizen-encerra-operacao-planta-etanol-2-geracao-piracicaba-sp-200125>. Acesso em: 28 abr. 2025.

PETROBRAS (2025). *Plano Estratégico 2050 e Plano de Negócios 2025-2029*. Disponível em: [4c9eccc5-c298-081d-799f-217fff1a1c82](https://petrobras.com.br/pt/quem-somos/plano-estrategico/). Acesso em: 28 abr. 2025.

SGL (2015). *Methane and CO2 Emissions from the Natural Gas Supply Chain*. Sustainable Gas Institute. Disponível em: [Assessment of Heavy-Duty Natural Gas Vehicle Emissions: Implications and Policy Recommendations](#). Acesso em: 20 mar. 2025.

SMART FREIGHT CENTRE (2019). *Global logistics emissions council framework for logistics emissions accounting and reporting (version 2.0)*. Disponível em: <https://www.feport.eu/images/downloads/glec-framework-20.pdf>. Acesso em: 04 mai. 2025.

Schlömer S., T. Bruckner, L. Fulton, E. Hertwich, A. McKinnon, D. Perczyk, J. Roy, R. Schaeffer, R. Sims, P. Smith, and R. Wiser (2014). *Annex III: Technology-specific cost and performance parameters*. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. wPETROBRAS. *Plano Estratégico 2025 – 2029*. Disponível em: <https://petrobras.com.br/pt/quem-somos/plano-estrategico/>. Acesso em: 02 abr. 2025.

THE WORLD BANK (2010). *Impacts of transmissions and distributions projects on greenhouse gas emissions – review of methodologies and a proposed approach in the context of world bank lending operations*. Paper nº 21, November 2010. Disponível em: <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/27755/632150WP0Impac00Box0361508B0PUBLIC0.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 04 mar. 2025.

UNFCCC (2004). *Information on global warming potentials*. United Nations Framework on Climate Changes. Disponível em: <https://unfccc.int/resource/docs/tp/tp0403.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2025.

UNICA (2025a). *UNICADATA*. Disponível em: www.unicadata.com.br. Acesso em: 01 fev. 2021.

____ (2025b). *Comunicação pessoal*. União da Indústria de Cana-de-açúcar.

VOLKSWAGEN (2022). *Carbon Intensity (IC) of the Brazilian Gasoline (E22): Calculation Methodology; Carbon Intensity (IC) of the Brazilian Diesel (B15): Calculation Methodology*. *Comunicação pessoal*. Reunião realizada em 26 de julho de 2022.

WEIDEMA B. P., EKVALL T., HEIJUNGS R. (2009). *Guidelines for applications of deepened and broadened LCA*. Guidelines for applications of deepened and broadened LCA - 2.-0 LCA consultants. Disponível em: <https://lca-net.com/publications/show/guidelines-applications-deepened-broadened-lca/>. Acesso em: 04 fev. 2025.

WERNET et al., (2016). *THE ECOINVENTDATABASE V3: overview and methodology*. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/301561039_The_ecoinvent_database_version_3_Part_I_Overview_and_methodology?enrichId=rgreq-4dc6a024eee1155eba489c2677b22562-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdIOzMwMTU2MTAzMtBUzo5OTE1ODIyMzY5OTE0ODIAMTYxMzQyMzAzNjY2Mw%3D%3D&el=1_x_3&_esc=publicationCoverPdf?