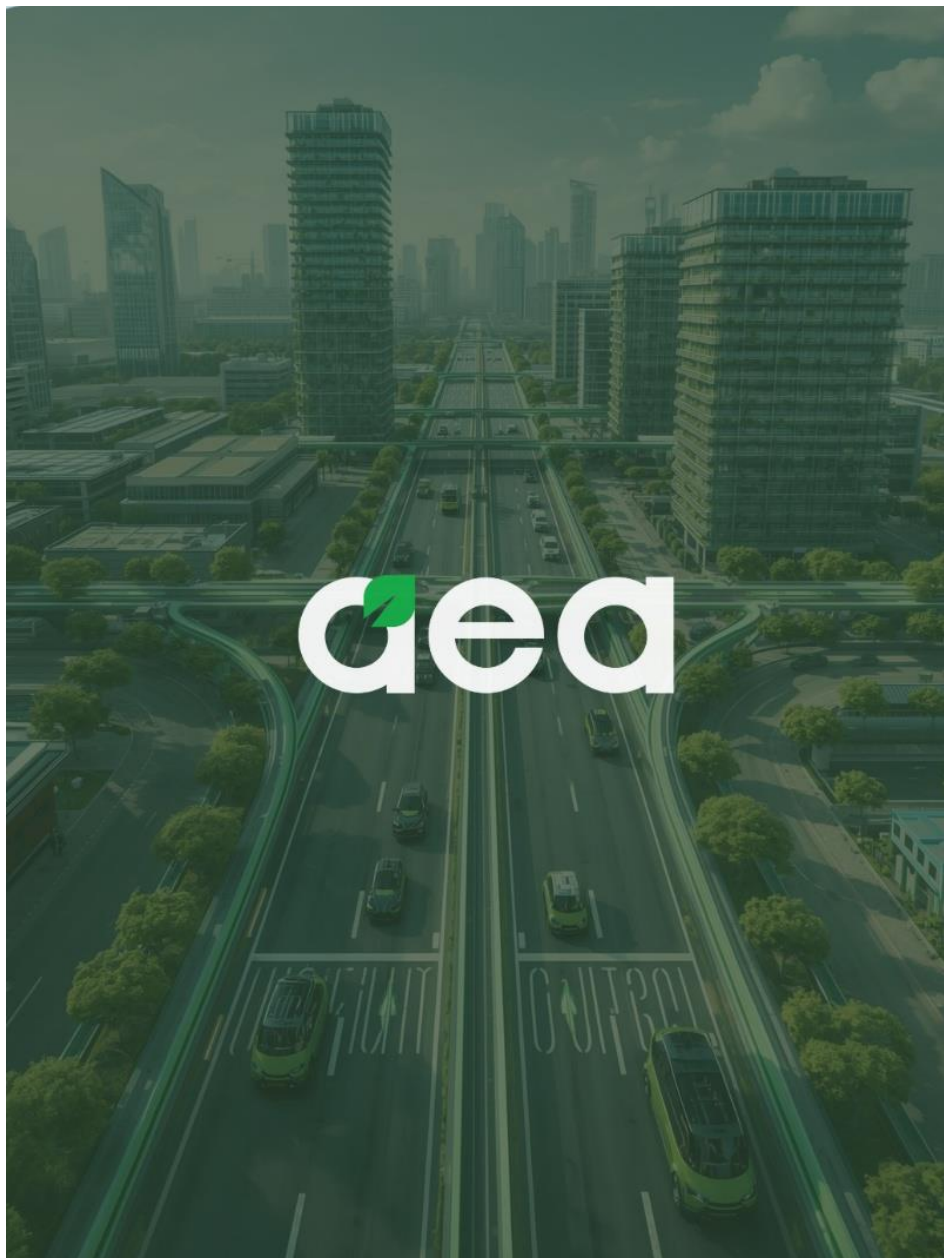




NOTA TÉCNICA: INTENSIDADE DE CARBONO DOS ENERGÉTICOS PARA VEÍCULOS PESADOS

Sumário

Glossário	1
Objetivo	2
Introdução	2
1. Metodologia	3
1.1. Propriedades físicas dos energéticos.....	4
2. Energéticos avaliados	5
2.1. Gasolina e Diesel	5
2.2. Gás Natural Veicular	5
2.3. BioGNV (biometano)	6
2.4. Etanol Anidro e Hidratado	7
2.5. Biodiesel (B100)	7
2.6. HVO	8
2.7. Eletricidade	10
2.8. Gasolina C e Diesel B.....	12
2.9. Hidrogênio.....	13
Dados consolidados	14
Considerações finais	14
2.10. Considerações Finais	14
Apêndice	15
Referências bibliográficas	17

Ciclo de vida

Estágios consecutivos e encadeados de um sistema de produto usado para a mobilidade, desde a produção da matéria-prima ou de sua geração a partir de recursos naturais até sua disposição final.

Intensidade de Carbono da Fonte de Energia

Relação entre a emissão de gases de efeito estufa, com base em avaliação do ciclo de vida, computada no processo produtivo do combustível ou da fonte energética e em seu uso, expressa em gramas de dióxido de carbono equivalente por megajoule (gCO_{2eq}/MJ).

RenovaBio

Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), parte integrante da política energética nacional de que trata o art. 1º da Lei nº 9.478, de 6 de agosto de 1997.

RenovaCalc

A RenovaCalc é a ferramenta oficial do RenovaBio, utilizada para calcular a intensidade de carbono dos biocombustíveis (gCO_{2eq}/MJ) por meio da Avaliação de Ciclo de Vida Atribucional, com alocação por critério energético.

Poço-ao-tanque (*well-to-tank*, WTT)

Refere-se às emissões envolvidas nos processos de extração, 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.

Tanque-à-roda (*tank-to-wheel*, TTW)

Ciclo de vida que contabiliza consumo energético envolvido no uso de veículos leves e pesados dentro de um ciclo de uso padronizado.

Poço-à-roda (*well-to-wheel*, WTW)

Ciclo de vida que contabiliza as emissões de GEE oriundas dos processos de cultivo e extração de recursos e da produção dos combustíveis líquidos ou gasosos ou da energia elétrica, sua distribuição e utilização em veículos leves e pesados de passageiros e comerciais

¹ Essas definições foram retiradas das Leis 13.576/2017, 14.993/2024 e 14.902/2024.

Objetivo

Esta nota técnica tem por objetivo indicar a intensidade de carbono (IC) dos energéticos que podem ser utilizados para abastecimento de veículos pesados, como parte do trabalho previsto pelo Programa MOVER (Lei 14.902/2024). O Ministério de Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC) solicitou apoio técnico à Associação de Engenharia Automotiva (AEA) para estabelecimento de procedimentos de medição de emissões de gases de efeito estufa (GEE) para veículos pesados, abordando inicialmente avaliação “do poço à roda”, em busca de avanço rumo ao ciclo completo (do berço ao túmulo), conforme diretrizes da Lei do Combustível do Futuro (Lei 14.993/2024), que no seu Capítulo II dispõe sobre “da mobilidade sustentável de baixo carbono”.

Para atendimento ao pedido do MDIC, a AEA constituiu diferentes grupos de trabalhos (GTs), sendo o GT 5 VECTO responsável pela indicação das ICs dos energéticos utilizados em veículos pesados. Os dados indicados nesta nota são fruto de reuniões e debates realizados pelo GT 5 de julho de 2024 a novembro de 2025.

Introdução

A transição energética no setor de transportes representa um dos maiores desafios e oportunidades para o Brasil no contexto da descarbonização da economia. O país, signatário do Acordo de Paris desde 2016, comprometeu-se a reduzir suas emissões de gases de efeito estufa (GEE) em 37 % até 2025 e 43 % até 2030, em relação aos níveis de 2005, com vistas à neutralidade climática até 2050. O setor de transportes é fundamental para o cumprimento dessas metas.

Nesse contexto, o Brasil tem adotado políticas públicas robustas para promover a mobilidade de baixo carbono. O Programa Mobilidade Verde e Inovação (Mover), instituído pela Lei 14.902/24, criou incentivos para a redução de emissões veiculares, com foco na eficiência energética, na reciclagem de materiais e na medição da intensidade de carbono dos veículos pela avaliação do ciclo de vida. Em alguns aspectos, o Mover dá continuidade ao programa Rota 2030, criado em 2018, e a seu antecessor, o Inovar Auto, de 2012. Todos esses programas têm como meta reduzir em 50 % as emissões de carbono até 2030, em relação às emissões de 2011 (MDIC, 2024).

O Mover aumenta os requisitos obrigatórios de sustentabilidade para os veículos novos comercializados no país. Entre as novidades está o cálculo das emissões de carbono “do poço à roda”, ou seja, considerando todo o ciclo da fonte de energia utilizada. Posteriormente, o Mover prevê um cálculo ainda mais amplo, conhecido como “do berço ao túmulo” e abrangendo a pegada de carbono de todos os componentes e de todas as etapas de produção, uso e descarte do veículo.

Complementarmente, a Lei nº 14.993/2024, conhecida como Lei do Combustível do Futuro, estabelece programas nacionais para o desenvolvimento e uso de combustíveis sustentáveis, como o diesel verde, o combustível sustentável de aviação (SAF) e o biometano. A legislação também prevê o aumento gradual da mistura de biodiesel no diesel fóssil, de 14 % em 2024 para 20 % até 2030 e 25 % a partir de 2031, sujeitas a avaliação de viabilidade técnica, e da mistura de etanol na gasolina, podendo chegar a 35 %, desde que aprovado tecnicamente (Planalto, 2024).

Considerando o nível de emissão de gases de efeito estufa (GEE) das diferentes alternativas energéticas disponíveis no Brasil, é fundamental uma avaliação sistêmica e completa do potencial de redução de emissões desses energéticos. 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 foi construído alinhado a números apresentados em estudos da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), complementados com dados obtidos pelo GT 5.

Ao longo das discussões, o GT propôs-se a analisar a intensidade de carbono dos energéticos que podem ser utilizados no abastecimento de veículos pesados. Os combustíveis comerciais considerados na presente nota técnica foram: gasolina A, etanol anidro, etanol hidratado, diesel B (diesel A e biodiesel), gás natural veicular (GNV), bem como novos entrantes, como o bioGNV (biometano), HVO e a eletricidade, com dados médios nacionais do ano de 2024.

1. Metodologia

Como destacado anteriormente, os dados utilizados para composição desta nota técnica são em grande parte baseados nos relatórios da EPE, para fins de uniformidade da informação que norteia as políticas públicas envolvendo a intensidade de carbono dos energéticos utilizados em veículos automotores. A EPE foi parceira e atuante nas discussões do GT 5 VECTO, conduzidos pela AEA. As propriedades físicas (massa específica, PCI e conteúdo energético) e a intensidade de carbono da gasolina C (gasolina A e etanol anidro), diesel A, biodiesel (B100), GNV, biometano e eletricidade foram reproduzidos a partir da Nota Técnica EPE intitulada **“Descarbonização do Setor de Transporte Rodoviário Intensidade de carbono das fontes de energia”**, publicada em junho de 2025. Para bioGNV, os dados foram adaptados e para o HVO foram utilizados dados obtidos junto à Petrobras em apresentação realizada pela empresa para o GT 5 VECTO.

Para avaliar a intensidade de carbono (IC), em $\text{gCO}_{2\text{eq}}/\text{MJ}$, dos vários energéticos que podem ser usados para abastecimento de veículos pesados, a EPE emprega 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, transporte, distribuição e uso no veículo. Tal abordagem foi mantida na composição da presente nota técnica. 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 dióxido de carbono equivalente ($\text{CO}_{2\text{eq}}$) emitida em todas as etapas por unidade de energia relativa a cada combustível.

Os dados são apresentados segmentados em dois grandes blocos, uma do poço-ao-tanque e outra do tanque-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), delimitando seu escopo ao cálculo da intensidade de carbono das fontes de energia. A

Figura 1 ilustra o resumo do ciclo de vida adotado nessa análise.

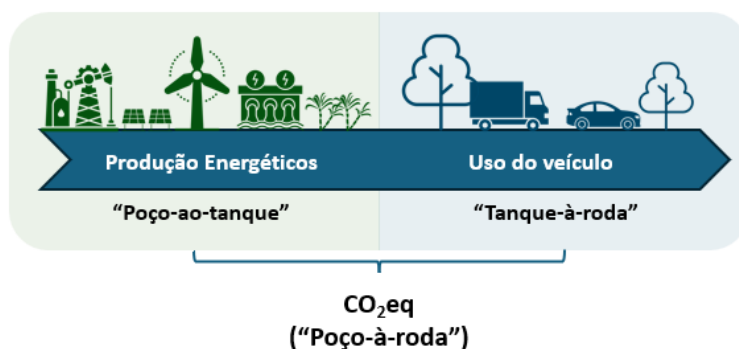


Figura 1: Etapas do ciclo de vida adotados na análise

Importante registrar que não serão abordados aspectos relativos à eficiência dos veículos (MJ/t.km). O período de análise considera dados médios do ano de 2024, para os energéticos que podem ser utilizados no setor de transporte rodoviário pesado, que são gasolina C (gasolina A e etanol anidro), etanol hidratado, diesel B (óleo diesel e biodiesel), HVO, gás natural veicular (GNV), biometano e eletricidade. Importante ressaltar que se trata de uma “fotografia pontual” do ciclo de vida dos energéticos e que os números poderão mudar ao longo do tempo, sendo importante prever na política pública uma periodicidade de reavaliação deles. A periodicidade, contudo, deve levar em consideração a previsibilidade necessária para que ocorram os investimentos, desenvolvimentos tecnológicos e atendimento de metas do Programa Mover por parte de todos os envolvidos. Dados estimados das ICs para 2027, em linha com os dados da EPE e com a Resolução Nº 14 de 01 de outubro de 2025 do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), são disponibilizados no Apêndice.

1.1. Propriedades físicas dos energéticos

A tabela 1 indica as principais propriedades físicas que embasam a ACV dos combustíveis. De acordo com o Balanço Energético Nacional, para a eletricidade, o poder calorífico inferior (PCI) é de 860 kcal/kWh (EPE, 2025).

Tabela 1: Propriedades físicas médias dos energéticos

COMBUSTÍVEIS	Massa Específica	PCI	PCI	Conteúdo Energético
LÍQUIDOS	(kg/litro)	(kcal/kg)	(MJ/kg)	(MJ/litro)
Etanol Anidro ¹	0,791	6.750	28,26	22,36
Etanol Hidratado ¹	0,809	6.300	26,38	21,34
Gasolina A ¹	0,742	10.400	43,54	32,31
Biodiesel (B100)	0,880	9.000	37,68	33,16
Óleo Diesel A ¹	0,840	10.100	42,29	35,52
GASOSOS	kg/m ³	kcal/m ³	MJ/kg	MJ/m ³
GNV ¹	0,74	8.800	49,79	36,84
Biometano (96,5% de metano)	0,76	8.758	48,25	36,67

Fonte: Nota Técnica EPE/DPG/SDB/2025/03 (EPE, 2025)

Nota 1: Registra-se que existe 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)

2. Energéticos avaliados

Será apresentado neste item um resumo da avaliação de ciclo de vida das fontes de energia presentes no setor de transporte rodoviário pesado, bem como estimativas das intensidades de carbono dessas fontes.

2.1. Gasolina e Óleo Diesel

Gasolina A e Óleo diesel A são combustíveis produzidos a partir do refino de petróleo. A IC destes combustíveis considera a extração do petróleo, transporte, refino, distribuição e uso do combustível final. A intensidade de carbono, do poço-à-roda, para a gasolina A é de 87,4 gCO_{2eq}/MJ e do óleo diesel é de 86,5 gCO_{2eq}/MJ, sem haver distinção entre o produto nacional e o importado. O fator de emissão relacionado ao uso especificamente (tanque-à-roda) é de 71,3 gCO_{2eq}/MJ e de 74,4 gCO_{2eq}/MJ (Tabela 2), respectivamente (EPE, 2025). O detalhamento do fator de emissão de uso está disponível no Apêndice. A intensidade de carbono do poço-ao-tanque é calculada pela diferença entre a IC do poço-à-roda e o fator de emissão do uso (tanque-à-roda).

Tabela 2 – Intensidade de carbono da Gasolina A e Óleo Diesel A

Energético	IC poço-ao-tanque (gCO _{2eq} /MJ)	IC tanque-à-roda (gCO _{2eq} /MJ)	IC poço-à-roda (gCO _{2eq} /MJ)
Gasolina A	16,1	71,3	87,4
Óleo Diesel A	12,1	74,4	86,5

Fonte: elaborado a partir da Nota Técnica EPE/DPG/SDB/2025/03 (EPE, 2025)

2.2. Gás Natural Veicular

O gás natural utilizado em veículos pode ser oriundo de unidades de produção nacional terrestres (*onshore*) ou marítimas (*offshore*) ou através de importações. O gás natural utilizado em veículos automotores é usualmente comprimido e armazenado em cilindros de alta pressão (Gás Natural Comprimido – GNC). De forma geral, para a estimativa das emissões a montante (poço-ao-tanque) da cadeia do gás natural, a EPE considera 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. O valor da IC estimada da etapa do poço-ao-tanque, englobando exploração, compressão, transporte, refino, distribuição e abastecimento, para o ano de 2024, é de 19,04 gCO_{2eq}/MJ. Já as emissões do uso/queima (tanque-à-roda) são da ordem de 57,81 gCO_{2eq}/MJ (Tabela 3).

Tabela 3 – Intensidade de carbono do GNV

Energético	IC poço-ao-tanque (gCO _{2eq} /MJ)	IC tanque-à-roda (gCO _{2eq} /MJ)	IC poço-à-roda (gCO _{2eq} /MJ)
GNV (GNC)	19,04	57,81	76,85

Fonte: elaborado a partir da Nota Técnica EPE/DPG/SDB/2025/03 (EPE, 2025)

O uso de GNL (Gás Natural Liquefeito) em pequena escala para abastecimento de caminhões e ônibus já é uma realidade no Brasil, especialmente em projetos voltados para transporte rodoviário de longa distância, onde a autonomia ampliada é um diferencial frente ao GNC. A tecnologia permite maior densidade energética e, consequentemente, maior alcance por abastecimento, sendo vista como uma alternativa para reduzir custos e emissões em relação ao diesel. No entanto, até o fechamento deste relatório, não existiam dados consolidados sobre a intensidade de carbono do GNL utilizado em veículos pesados no Brasil em comparação ao GNC tradicional.

2.3. BioGNV (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 natural, o biogás também pode ser aplicado diretamente para a geração de energia elétrica e térmica, dentre outros usos locais. 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.

A intensidade de carbono do biometano indicada pela EPE baseou-se nas certificações vigentes do programa 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 gCO_{2eq}/MJ (incluídas as emissões de uso neste número). Assumiu-se esse valor a partir de 2024. Importante ressaltar que a IC do biometano obtida diretamente da RenovaCalc não considera as emissões fugitivas nas etapas de transporte, distribuição e abastecimento. O GT 5 VECTO deliberou que seria pertinente considerar para o bioGNV o mesmo valor das emissões fugitivas de abastecimento utilizadas para o GNV na NT da EPE, de 1,80 gCO_{2eq}/MJ. Dado que não há conhecimento a respeito de como o bioGNV será transportado e distribuído até as estações de abastecimento dos veículos, as emissões fugitivas desta etapa não foram consideradas, sendo importante detalhar/medir este número no futuro. Assim, as emissões do poço-ao-tanque, ficaram em 6,67 gCO_{2eq}/MJ (número obtido considerando o valor médio de intensidade de carbono de 8,35 gCO_{2eq}/MJ, menos 3,48 gCO_{2eq}/MJ de emissões de uso, mais 1,80 gCO_{2eq}/MJ de emissões fugitivas de abastecimento). As emissões da fase de uso/queima (tanque-à-roda) são estimadas em 3,48 gCO_{2eq}/MJ. As emissões do poço-à-roda totalizam em 10,15 gCO_{2eq}/MJ.

Tabela 4 – Intensidade de carbono do bioGNV

Energético	IC poço-ao-tanque (gCO _{2eq} /MJ)	IC tanque-à-roda (gCO _{2eq} /MJ)	IC poço-à-roda (gCO _{2eq} /MJ)
bioGNV (biometano)	6,67	3,48	10,15

Fonte: elaborado a partir da Nota Técnica EPE/DPG/SDB/2025/03 (EPE, 2025)

2.4. Etanol Anidro e Hidratado

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.

No transporte rodoviário, o etanol é destinado para os veículos leves, entre os quais predomina o uso de combustíveis do ciclo Otto. Existem também aplicações de etanol para veículos pesados, embora em menor volume. A IC do etanol considera as emissões de GEE do cultivo da biomassa, transporte, produção do biocombustível nas usinas, distribuição e uso.

A intensidade de carbono do etanol é estimada pela EPE 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. Foi considerada também a participação proporcional da cana-de-açúcar e do milho na oferta interna de etanol total, de 79 % e 21% em 2024, respectivamente. Dessa forma, as ICs do ano de 2024, do poço-à-roda, foram estimadas em 22,39 gCO_{2eq}/MJ para etanol anidro e 22,73 gCO_{2eq}/MJ para etanol hidratado. O fator de emissão relacionado ao uso especificamente (tanque-à-roda) é de 0,44 gCO_{2eq}/MJ para o anidro e de 0,66 gCO_{2eq}/MJ para o hidratado (EPE, 2025). A intensidade de carbono do poço-ao-tanque é calculada pela diferença entre a IC do poço-à-roda e o fator de emissão do uso (tanque-à-roda).

Tabela 5 – Intensidade de carbono do etanol anidro e hidratado

Energético	IC poço-ao-tanque (gCO _{2eq} /MJ)	IC tanque-à-roda (gCO _{2eq} /MJ)	IC poço-à-roda (gCO _{2eq} /MJ)
Etanol anidro	21,95	0,44	22,39
Etanol hidratado	22,07	0,66	22,73

Fonte: elaborado a partir da Nota Técnica EPE/DPG/SDB/2025/03 (EPE, 2025)

2.5. Biodiesel (B100)

No Brasil, 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 tido uma participação majoritária ao longo dos anos, de cerca de 70 %, seguida do sebo bovino (10 %) e de outros insumos, como materiais graxos, gordura suína e óleo de fritura.

A intensidade de carbono do biodiesel éster (FAME) é determinada pela RenovaCalc com base na matéria-prima empregada para a sua obtenção (óleo de soja, de palma, algodão, fritura, residuais e gordura animal). As etapas de distribuição e de uso apresentam valores fixos, da mesma forma que

para os outros biocombustíveis. Atualmente, a certificação das unidades produtoras de biodiesel possui uma dificuldade adicional, uma vez que a matéria-prima é oriunda de diversos fornecedores e pode ser custodiada por inúmeros intermediários, o que dificulta seu rastreamento e o processo de certificação no RenovaBio.

Dessa forma, a EPE aplica 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; 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 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 poço-à-roda, do biodiesel foi de 28,40 gCO_{2eq}/MJ (Tabela 6) no ano de 2024. Essa IC considera as emissões de GEE do cultivo da biomassa, transporte, produção do biocombustível nas usinas, distribuição e uso. As emissões da fase de uso/queima (tanque-à-roda) são da ordem de 0,44 gCO_{2eq}/MJ. A intensidade de carbono do poço-ao-tanque é calculada pela diferença entre a IC do poço-à-roda e o fator de emissão do uso (tanque-à-roda).

Tabela 6 – Intensidade de carbono do biodiesel

Energético	IC poço-ao-tanque (gCO _{2eq} /MJ)	IC tanque-à-roda (gCO _{2eq} /MJ)	IC poço-à-roda (gCO _{2eq} /MJ)
Biodiesel	27,96	0,44	28,40

Fonte: elaborado a partir da Nota Técnica EPE/DPG/SDB/2025/03

2.6. HVO

O HVO (*Hydrotreated Vegetable Oil*) é um biocombustível avançado produzido a partir de óleos vegetais ou gorduras animais, que passa por um processo de hidrotreatamento. Este processo resulta em um combustível com características muito semelhantes ao diesel fóssil, podendo ser utilizado puro ou em misturas sem a necessidade de adaptações nos motores. Embora o documento da EPE consultado não forneça dados específicos de intensidade de carbono para o HVO, a sua disponibilidade no Brasil, via Diesel R (diesel com conteúdo renovável da Petrobras), ensejou sua indicação na presente nota técnica.

No âmbito do GT 5, a Petrobras apresentou dados da intensidade de carbono da fração renovável do Diesel R5 (óleo diesel com 5 % de HVO) produzido pela rota de coprocessamento. Segundo a Petrobras, a análise do ciclo de vida do HVO presente no Diesel R5 foi feito em parceria com a empresa LNBR e envolveu um acordo de cooperação. Foi feita uma revisão de terceira parte como manda a boa prática do ACV com a empresa EnCiclo. A análise foi feita usando uma versão da Renovacalc adaptada para refletir a operação de coprocessamento. O trabalho foi feito com objetivo de solicitar a inclusão do coprocessamento no RenovaBio.

Para efeitos do ACV do coprocessamento, a parcela fóssil não é avaliada. O que entrou na análise é somente a parcela renovável (Fração R5), incluído: cultivo, transporte da soja, a extração do óleo do grão, o transporte do óleo até a refinaria, os coprodutos que são gerados, distribuição, revenda e uso. Se a matéria-prima for o sebo, a Renovacalc não considera a carga ambiental do sebo a montante da cadeia. O RenovaBio parte da premissa de que o sebo é um resíduo, portanto, sua intensidade de carbono é zero. Para o HVO derivado de óleo de soja, foram considerados dados agrícolas regionalizados do perfil típico do cultivo da soja no Brasil, tal qual o do biodiesel. Para o hidrogênio: produzido por reforma a vapor, foi adotado o fator de missão de 11,2 kg CO_{2eq}/kg H₂. Não foram consideradas emissões relacionadas às mudanças de uso da terra (ILUC). Os dados apresentados pela Petrobras ao GT 5 VECTO são reproduzidos nas tabelas 7 e 8.

Tabela 7 – Intensidade de carbono do HVO de soja, via Diesel R5 Petrobras

Renovacalc HDTs	Emissões Soja* (gCO _{2eq} /MJ)	Transporte Soja** (gCO _{2eq} /MJ)	Emissões Produção HVO (gCO _{2eq} /MJ)	Transporte HVO (gCO _{2eq} /MJ)	Emissões ILUC (gCO _{2eq} /MJ)	Emissões de uso (gCO _{2eq} /MJ)	Total (gCO _{2eq} /MJ)
Média	17,2	0,57	11,4	1,21	-	1,1	31,5

Fonte: a partir de (LNBR, Petrobras, 2023)

*Fase agrícola + extração do óleo; **Transporte da fase agrícola até a extratora de óleo (transporte até a refinaria está nas emissões de produção do HVO)

Tabela 8 – Intensidade de carbono do HVO de sebo, via Diesel R5 Petrobras

Renovacalc HDTs	Emissões Sebo* (gCO _{2eq} /MJ)	Transporte Sebo BR (gCO _{2eq} /MJ)	Emissões Produção HVO (gCO _{2eq} /MJ)	Transporte HVO (gCO _{2eq} /MJ)	Emissões ILUC (gCO _{2eq} /MJ)	Emissões de uso (gCO _{2eq} /MJ)	Total (gCO _{2eq} /MJ)
Média	-	0,21	8,88	1,21	-	1,1	11,4

Fonte: a partir de (LNBR, Petrobras, 2023)

A representação dos dados do poço-ao-tanque, do tanque-à-roda e do poço-à-roda são indicadas nas tabelas 9 e 10.

Tabela 9 – Intensidade de carbono do HVO de soja, via Diesel R Petrobras

Energético	IC poço-ao-tanque (gCO _{2eq} /MJ)	IC tanque-à-roda (gCO _{2eq} /MJ)	IC poço-à-roda (gCO _{2eq} /MJ)
HVO (Fração R5)	30,4	1,1	31,5

Fonte: elaborado a partir dos dados da tabela 7

Tabela 10 – Intensidade de carbono do HVO de sebo, via Diesel R Petrobras

Energético	IC poço-ao-tanque (gCO _{2eq} /MJ)	IC tanque-à-roda (gCO _{2eq} /MJ)	IC poço-à-roda
------------	---	--	----------------

			(gCO ₂ eq/MJ)
HVO (Fração R5)	10,3	1,1	11,4

Fonte: elaborado a partir dos dados da tabela 7

A disponibilidade de dados mais detalhados sobre a intensidade de carbono da fração renovável do Diesel R no contexto brasileiro são aspectos importantes para futuras análises no âmbito do Programa MOVER, bem como das políticas públicas de incentivo aos biocombustíveis no Brasil. A intensidade de carbono do Óleo Diesel R5 (contendo 95 % de óleo diesel A e 5 % de HVO) é apresentada na tabela 11.

Tabela 11 – Estimativa da intensidade de carbono do Diesel R5 Petrobras

Energético	IC poço-ao-tanque (gCO₂eq/MJ)	IC tanque-à-roda (gCO₂eq/MJ)	IC poço-à-roda (gCO₂eq/MJ)
Diesel R5 (base soja)	13,0	70,8	83,8
Diesel R5 (base sebo)	12,0	70,8	82,7

Fonte: elaborado a partir de dados das tabelas 2, 9 e 10

2.7. Eletricidade

A intensidade de carbono da energia elétrica é função da participação das fontes de produção que compõem a matriz elétrica brasileira, da intensidade de carbono de cada fonte, das perdas de energia na transmissão e distribuição e do efeito corona. No ano de 2024, o percentual de utilização cada fonte no Brasil, considerando apenas o sistema integrado nacional (SIN), é indicado na tabela 12. Sistemas isolados de produção e autoprodução de energia elétrica não foram considerados.

Tabela 12: Participação das fontes na matriz elétrica nacional injetada no SIN

Fontes	2024
Gás Natural	5%
Carvão	1%
Óleo Diesel	0%
Óleo combustível	0%
Urânio	2%
Outras não renováveis	0,2%
Não renováveis	9%
Hidráulica	63%
Biomassa	4%
Eólica	16%
Solar	8%
Outras Renováveis	0,4%
Renováveis	91%

Fonte: (EPE, 2025)

A análise 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, a EPE considerou os valores dos fatores de emissão apresentados pelo IPCC (mediana) e Ecoinvent 3.11, para cada fonte que compõe a matriz nacional, conforme detalhado na tabela 13. Ressalta-se que para essa análise é considerada somente a energia injetada na rede, desconsiderando a autoprodução não-injetada.

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 não técnicos. 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.

Nesse contexto, esse estudo considerou somente as perdas técnicas, que correspondem a uma média de 11,5 %. 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 (“efeito corona”), provocada pelo campo eletromagnético das linhas de alta tensão, no valor de 3,9 gCO_{2eq}/MJ (EPE, 2025). Nesse estudo, não foram contabilizadas as perdas no carregamento de veículos elétricos, que podem variar de 5 % a 25 % a depender do tipo de sistema de recarga (Apostolaki-Iosifidou et al., 2017; Kostopoulos et al., 2020). A intensidade de carbono ponderada pela participação de cada fonte, somadas com as perdas, são indicadas na tabela 14.

Tabela 13: Intensidade de carbono das fontes de geração elétrica

Fontes de geração elétrica	IC (gCO _{2eq} /MJ)	IC (gCO _{2eq} /kWh)	Fonte
Hidroelétrica	6,67	24,01	IPCC
Eólica	3,06	11,02	IPCC
Solar	11,39	41,01	IPCC
Bagaço de Cana	13,68	49,26	Ecoinvent 3.11
Lenha	16,56	59,62	Ecoinvent 3.11
Lixívia	45,28	163,05	Ecoinvent 3.11
Outras fontes renováveis	6,90	24,85	IPCC/Ecoinvent 3.11
Nuclear	3,31	11,92	IPCC
Carvão Vapor	227,78	820,24	IPCC
Gás Natural	136,11	490,13	IPCC
Gás de Coqueria	525,00	1.895,3	Ecoinvent 3.11
Óleo Combustível	208,89	754,11	Ecoinvent 3.11
Óleo Diesel	204,72	737,20	Ecoinvent 3.11
Outras fontes não renováveis	133,50	480,73	IPCC/Ecoinvent 3.11

Fonte: (EPE, 2025)

Tabela 14: IC da energia elétrica do SIN Brasil com perdas técnicas e efeito corona

Fonte geradora	Part. (%)	IC (gCO _{2eq} /MJ)	IC Ponderado (gCO _{2eq} /MJ)
Gás	4,50%	136,11	6,125
Carvão	0,95%	227,78	2,164
Diesel	0,09%	204,72	0,174
OC	0,01%	208,89	0,021
Urânio	2,10%	3,31	0,070
Outras não renováveis	0,20%	133,5	0,267
Lenha	0,08%	16,56	0,013
Bagaço de cana	2,80%	13,68	0,383
Lixívia	0,56%	45,28	0,254
Hidro	62,50%	6,67	4,167
Eólica	15,98%	3,06	0,489
Solar	7,60%	11,39	0,866
Outras Renováveis	0,35%	6,9	0,024
PARCIAL SIN:			15,02
Efeito Corona			+3,9
4 % de perda de Transmissão			+0,76
7,5 % de perdas técnicas Distribuição			+1,17
TOTAL FINAL			20,85

Fonte: elaborado a partir de dados EPE, 2025

A representação dos dados na metodologia do poço-ao-tanque (que considera da geração da energia até a bateria do veículo), tanque-à-roda (emissões de uso) e poço-à-roda (emissões de todo ciclo de vida do energético) consta na tabela 15.

Tabela 15 – Intensidade de carbono da energia elétrica do SIN

Energético	IC poço-ao-tanque (gCO _{2eq} /MJ)	IC tanque-à-roda (gCO _{2eq} /MJ)	IC poço-à-roda (gCO _{2eq} /MJ)
Eletricidade (SIN)	21,3	0,0	21,3

Fonte: elaborado a partir de dados EPE, 2025

2.8. Gasolina C e Óleo Diesel B

A seguir, nas Figuras 2 e 3, são indicadas as intensidades de carbono da Gasolina C (Gasolina A + Etanol Anidro) e Óleo Diesel B (Diesel A + Biodiesel) ponderadas a partir de dados apresentados anteriormente (ano base: 2024) seguindo equações disponíveis no Apêndice. As faixas de misturas consideradas observam os ranges legais ou que possam ter alguma utilidade no âmbito das políticas públicas envolvendo esses energéticos. Para a Gasolina C, foram consideradas misturas variando do E22 (22 % de Etanol Anidro + 78 % de Gasolina A) até o E35 (35 % de Etanol Anidro + 65 % de Gasolina A). Para o Óleo Diesel B foram consideradas misturas variando do B13 (13 % de Biodiesel + 87 % de Óleo Diesel A) até o B25 (25 % de Biodiesel + 75 % de Óleo Diesel A). O B7 é referência Brasil, não é o mesmo utilizado em teste de homologação (B7 Europeu). A NOTA TÉCNICA

EPE/DPG/SDB/007/2025 traz a densidade energética do óleo diesel B7 Brasil², servindo como base para normalização em relação ao B7 Europeu. Estimativas para 2027 são apresentadas no Apêndice.

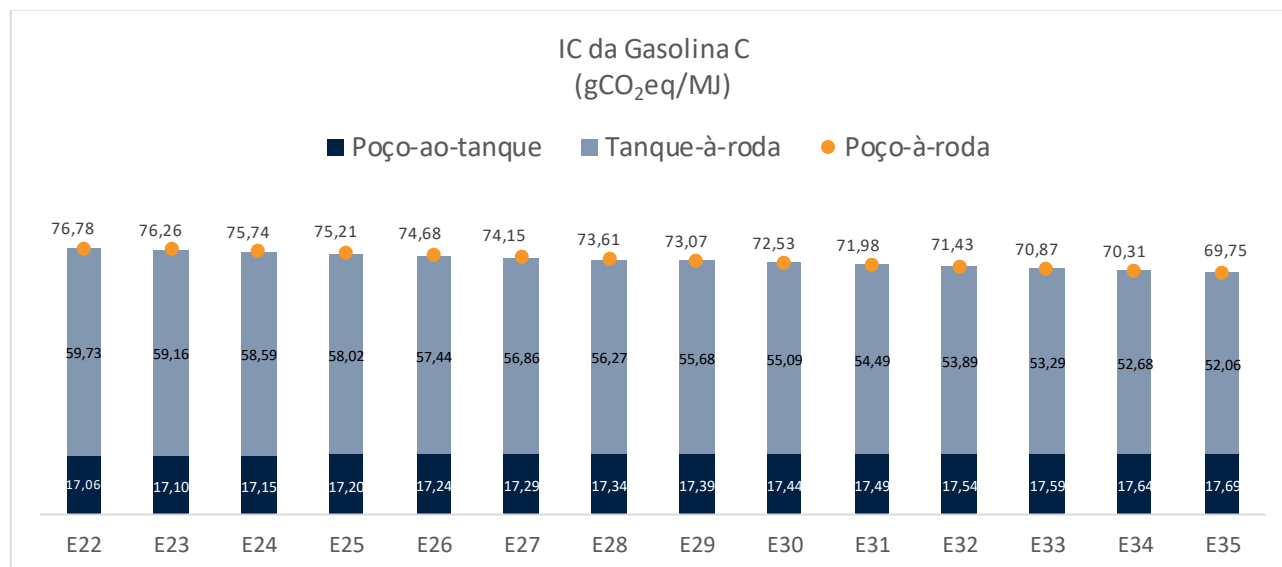


Figura 2: IC da Gasolina C em função do teor de Etanol Anidro na mistura (ano base: 2024)

Fonte: Elaboração própria a partir de dados EPE, 2025

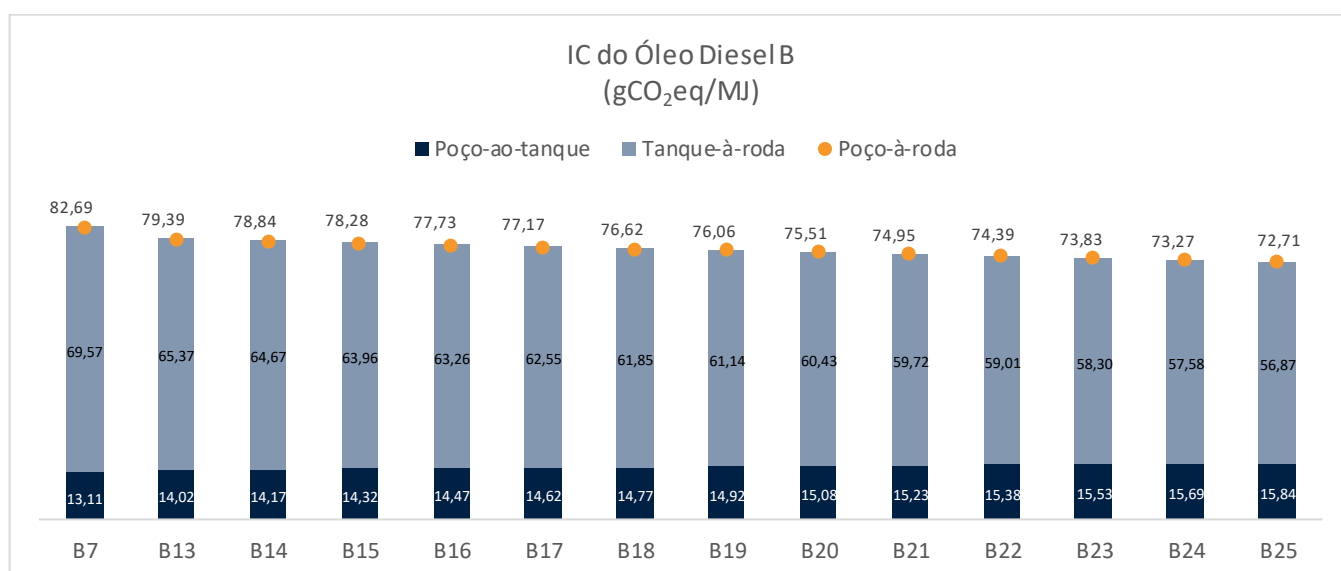


Figura 3: IC do Diesel B em função do teor de Biodiesel na mistura (ano base: 2024)

Fonte: Elaboração própria a partir de dados EPE, 2025

2.9. Hidrogênio

O hidrogênio como fonte de energia para o transporte rodoviário pesado foi discutido no GT VECTO na AEA, porém pela falta de informação a respeito da intensidade de carbono, relativo ao uso do hidrogênio no transporte rodoviário especialmente, impossibilitou a indicação de um número. A aplicação do hidrogênio para essa finalidade é praticamente inexistente no Brasil, e sua evolução permanece incerta no longo prazo.

² www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-908/NT-EPE-DPG-SDB-2025-07_Densidade%20Energética%20B7.pdf

A viabilidade do uso do hidrogênio em veículos dependerá de uma série de desenvolvimentos que melhorem a competitividade dele frente as demais opções de mercado. Ainda são relevantes os custos das células a combustível, do transporte e da estocagem de hidrogênio, 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.

Dados consolidados

A seguir são apresentados os dados consolidados das intensidades de carbono dos energéticos discutidos ao longo desta nota técnica (Figura 4).

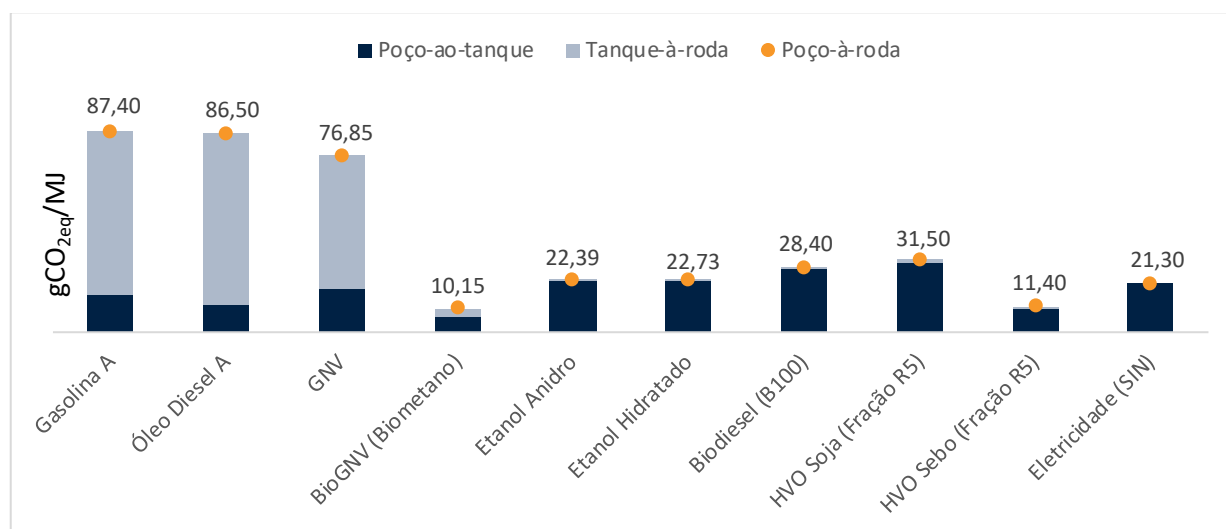


Figura 4: IC dos energéticos selecionados para veículos pesados (ano base: 2024)

Fonte: Elaboração própria a partir de dados EPE, 2025

Considerações finais

2.10. Considerações Finais

O presente estudo sobre a intensidade de carbono dos energéticos para veículos pesados no Brasil, desenvolvido pela AEA com colaboração da EPE, representa um marco fundamental para apoiar as políticas de redução de emissões de GEE no setor de transportes no Brasil. A análise da pegada de carbono de diferentes energéticos fornece uma base importante para a tomada de decisões estratégicas no contexto da transição energética brasileira.

O segmento de veículos pesados é um dos mais difíceis de desfossilizar na jornada da transição energética. Todas as alternativas existentes serão importantes, sendo a diversificação um pilar e vetor da transição. Para o Brasil, um país com vasta capacidade de produção de biocombustíveis e uma matriz elétrica predominantemente renovável, a transição energética é também uma oportunidade estratégica. O uso de energéticos de baixa intensidade de carbono não só contribui para o cumprimento das metas climáticas nacionais e internacionais, como o Acordo de Paris, mas também pode impulsionar o desenvolvimento econômico, a inovação e a segurança energética.

Políticas públicas são cruciais para apoiar a transição, por meio de incentivos à pesquisa e desenvolvimento, à infraestrutura de abastecimento e à adoção de tecnologias mais limpas. A colaboração entre o governo, a indústria e a academia, exemplificada neste estudo, é vital para superar os desafios e acelerar a jornada rumo a uma mobilidade de baixo carbono no Brasil.

Apêndice

Fatores de emissão no uso (queima) dos energéticos

Tabela A1: Fatores de emissão no uso (queima) dos energéticos, conforme a RenovaCalc

Energéticos	CO ₂ Fóssil	CO ₂ biogênico	CH ₄ Fóssil	CH ₄ Biogênico	N ₂ O	CO ₂ eq/MJ
	g/kg					g/MJ
Óleo 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: EPE, 2025

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

Equação 1: IC da Gasolina C:

$$\left[\frac{gCO_{2eq}}{MJ} \right]_{Exx} = \frac{\left[\frac{gCO_{2eq}}{MJ} * \frac{MJ}{l} * (100 - Exx) \right]_{E0} + \left[\frac{gCO_{2eq}}{MJ} * \frac{MJ}{l} * (Exx) \right]_{Etanol\ anidro}}{\left[\frac{MJ}{l} * (100 - Exx) \right]_{E0} + \left[\frac{MJ}{l} * (Exx) \right]_{Etanol\ anidro}}$$

Equação 2: IC do Óleo Diesel B:

$$\left[\frac{gCO_{2eq}}{MJ} \right]_{Bxx} = \frac{\left[\frac{gCO_{2eq}}{MJ} * \frac{MJ}{l} * (100 - Bxx) \right]_{B0} + \left[\frac{gCO_{2eq}}{MJ} * \frac{MJ}{l} * (Bxx) \right]_{Biodiesel\ B100}}{\left[\frac{MJ}{l} * (100 - Bxx) \right]_{B0} + \left[\frac{MJ}{l} * (Bxx) \right]_{Biodiesel\ B100}}$$

Fonte: VOLKSWAGEN (2022) apud EPE, 2025.

Intensidades de carbono estimadas para 2027

Ano base: 2027	IC (gCO _{2eq} /MJ)		
Energético	Poço ao tanque	Tanque à roda	Poço à roda
Gasolina A	16,07	71,33	87,40
Óleo Diesel A	12,07	74,43	86,50
GNV	19,04	57,81	76,85
BioGNV (Biometano)	6,67	3,48	10,15
Etanol Anidro	21,6	0,44	22,04
Etanol Hidratado	21,64	0,66	22,30
Biodiesel (B100)	27,67	0,44	28,11
HVO Soja (Fração R5)	30,4	1,1	31,50
HVO Sebo (Fração R5)	10,3	1,1	11,40
Eletricidade (SIN)	19,89	0	19,89

Fonte: elaboração própria, a partir de dados EPE (2025).

			Ano base: 2027		
			(gCO _{2eq} /MJ)		
Sigla	% Etanol	% Gasolina A	Poço-à-roda	Tanque-à-roda	Poço-à-roda
E22	22%	78%	16,97	59,75	76,73
E23	23%	77%	17,02	59,19	76,20
E24	24%	76%	17,06	58,62	75,68
E25	25%	75%	17,11	58,04	75,15
E26	26%	74%	17,15	57,46	74,62
E27	27%	73%	17,20	56,88	74,08
E28	28%	72%	17,24	56,30	73,54
E29	29%	71%	17,29	55,71	73,00
E30	30%	70%	17,33	55,11	72,45
E31	31%	69%	17,38	54,52	71,90
E32	32%	68%	17,43	53,91	71,34
E33	33%	67%	17,48	53,31	70,78
E34	34%	66%	17,52	52,70	70,22
E35	35%	65%	17,57	52,09	69,66

Fonte: elaboração própria, a partir de dados EPE (2025).

			Ano base: 2027		
			(gCO ₂ e/MJ)		
Sigla	% Biodiesel	% Diesel A	Poço-à-roda	Tanque-à-roda	Poço-à-roda
B7	7%	93%	13,09	69,57	82,67
B13	13%	87%	13,98	65,37	79,35
B14	14%	86%	14,13	64,67	78,80
B15	15%	85%	14,28	63,96	78,24
B16	16%	84%	14,43	63,26	77,68
B17	17%	83%	14,57	62,55	77,13
B18	18%	82%	14,72	61,85	76,57
B19	19%	81%	14,87	61,14	76,01
B20	20%	80%	15,02	60,43	75,45
B21	21%	79%	15,17	59,72	74,89
B22	22%	78%	15,32	59,01	74,33
B23	23%	77%	15,47	58,30	73,77
B24	24%	76%	15,62	57,58	73,21
B25	25%	75%	15,77	56,87	72,64

Fonte: elaboração própria, a partir de dados EPE (2025).

Referências bibliográficas

- ANEEL. (2022). *Perdas de Energia - Informações Técnicas - ANEEL*. <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/distribuicao/perdas-de-energia>
- Apostolaki-Iosifidou, E., Codani, P., & Kempton, W. (2017). Measurement of power loss during electric vehicle charging and discharging. *Energy*, 127, 730–742. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.015>
- Embrapa. (2024a, February). *Regionalização dos perfis “típicos” da produção de milho para uso no Renovabio. Relatório Final de Trabalho*. <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio/arq/arquivos-estudos-relatorio-e-seminarios/relatorio-final-regionalizacao-perfis-tipicos-producao-milho.pdf>
- Embrapa. (2024b, May). *Regionalização dos perfis “típicos” da produção de cana-de-açúcar para uso no Renovabio*. <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio/arq/arquivos-estudos-relatorio-e-seminarios/relatoriofinalcanadeacucar.pdf>
- EPE. (2025). *Nota Técnica: Descarbonização do Setor de Transporte Rodoviário Intensidade de carbono das fontes de energia*.
- Kostopoulos, E. D., Spyropoulos, G. C., & Kaldellis, J. K. (2020). Real-world study for the optimal charging of electric vehicles. *Energy Reports*, 6, 418–426. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.12.008>
- LNBR, P. (2023). *Avaliação do ciclo de vida (ACV) do coprocessamento de óleo vegetal e gordura animal no hidrotreatamento (HDT) - Relatório final, após revisão por terceira parte*.

MDIC. (2024, June 27). *Presidente sanciona lei do Programa Mover*. <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/noticias/2024/junho/Presidente-Sanciona-Lei-Do-Programa-Mover>.

Planalto. (2024, October 8). *Presidente Lula sanciona Lei do Combustível do Futuro para promover a mobilidade sustentável*. <https://www.gov.br/planalto/pt-br/acompanhe-o-planalto/noticias/2024/10/Presidente-Lula-Sanciona-Lei-Do-Combustivel-Do-Futuro-Para-Promover-a-Mobilidade-Sustentavel>.