



Empresa de Pesquisa Energética

NOTA TÉCNICA

Descarbonização do Setor de Transporte Rodoviário

Intensidade de carbono das fontes de energia

SETEMBRO DE 2022

Ministério de
Minas e Energia



Diretora

Heloisa Borges Bastos Esteves

Coordenação Técnica

Angela Oliveira da Costa

Equipe Técnica

Angela Oliveira da Costa

Marina Damião Besteti Ribeiro

Rachel Martins Henriques

Rafael Barros Araujo

Suporte Administrativo

Sergio Augusto Melo de Castro

Imagens da Capa

1. Desenvolvido por Racool_studio em Freepik.
2. Divulgação livre. Obtido em Pixabay.
3. Desenvolvido por master1305 em Freepik.
4. Divulgação livre. Obtido em Pixabay.

Ministério de
Minas e Energia 

Ministro de Estado

Adolfo Sachsida

Secretário-Executivo

Hailton Madureira de Almeida

**Secretário de Planejamento e Desenvolvimento
Energético**

José Guilherme de Lara Resende

Secretário de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

Rafael Bastos da Silva

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



Presidente

Thiago Vasconcelos Barral Ferreira

**Diretor de Estudos Econômico-Energéticos e
Ambientais**

Giovani Vitória Machado

Diretor de Estudos de Energia Elétrica

Erik Eduardo Rego

**Diretora de Estudos do Petróleo, Gás e
Biocombustíveis**

Heloisa Borges Bastos Esteves

Diretora de Gestão Corporativa

Angela Regina Livino de Carvalho

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

■ 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	20/09/2022	Envio da versão final da Nota Técnica à AEA
r1	22/11/2022	Publicação no site da EPE

■ Sumário

Glossário.....	1
Objetivo.....	2
Introdução	2
1. Metodologia	3
1.1. RenovaCalc.....	5
1.2. Outros energéticos.....	6
1.3. Demanda dos energéticos e suas propriedades físicas	6
2. Energéticos Finais.....	7
2.1. Derivados de Petróleo.....	7
2.2. Gás Metano Veicular.....	9
2.3. Etanol anidro e hidratado	10
2.4. Biodiesel.....	11
2.5. Eletricidade	12
3. Fontes de Energia – Resultados	17
3.1. Parâmetros Técnicos.....	17
3.2. Demanda de Combustíveis	19
3.3. Intensidade de Carbono Média da Matriz de Transporte	22
Considerações Finais.....	23
Apêndice	24
Referências bibliográficas	28

Glossário

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).

Nota de Eficiência Energético-Ambiental (NEEA)

No âmbito da Política Nacional de Biocombustíveis, o 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).

Objetivo

A presente Nota Técnica tem por objetivo contribuir para o debate acerca da descarbonização do setor de transporte rodoviário, em uma avaliação de ciclo de vida concentrada no poço-à-roda. Para isso, será apresentado um estudo sobre a determinação da intensidade de carbono das fontes de energia (ICE) para cada energético desse segmento, medida em (gCO₂eq/MJ). Oportuno destacar que o documento não aborda aspectos relativos à eficiência dos veículos, medida em MJ/km.

O estudo foi conduzido pela EPE em atendimento ao convite feito pela Associação Brasileira de Engenharia Automotiva (AEA), por indicação do Ministério de Minas e Energia (MME), para a coordenação do GT Intensidade de Carbono dos atuais e futuros combustíveis da matriz brasileira de transportes, no âmbito do Comitê de Combustíveis da AEA. Foram realizadas diversas reuniões com atores do setor, agentes públicos e privados, de forma a coletar contribuições para a elaboração do documento.

Introdução

As emissões antrópicas de gases que intensificam o efeito estufa 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. Recentemente, de forma ainda mais explícita, nas contribuições do Grupo de Trabalho sobre base científica para as alterações climáticas para o Sexto¹ Relatório de Avaliação do IPCC (AR6), que ressalta que a influência humana aqueceu o clima em uma taxa sem precedentes nos últimos 200 anos (IPCC, 2021).

O Quinto Relatório de Avaliação do IPCC (*Fifth Assessment Report – AR5*) (2013) já havia compilado dados científicos que confirmam que a influência humana nas mudanças climáticas é a principal causa do atual aquecimento global, de forma clara e crescente, com impactos observados nos continentes e oceanos. Entretanto, há meios de limitar esses efeitos e seus riscos, pelo contínuo desenvolvimento humano e crescimento econômico, sendo fundamental realizar ações para reduzir os gastos e os desafios econômicos, tecnológicos, sociais e institucionais.

As possibilidades elencadas no AR5 apontam iniciativas em adaptação, mitigação e desenvolvimento sustentável. As emissões de gases de efeito estufa (GEE) antropogênicos cresceram continuamente entre 1970 e 2010, sendo mais intensas no período de 2000 a 2010. Podem causar um aquecimento ainda maior e duradouro, além de alterações nos componentes do sistema climático, aumentando a probabilidade de impactos graves, generalizados e irreversíveis para as pessoas e os ecossistemas. Limitar as mudanças climáticas requer reduções substanciais e contínuas nas emissões de GEE, em conjunto com a adaptação.

Como as mudanças climáticas são direcionadas pelo tamanho da população, atividade econômica, estilo de vida, uso da energia, padrões de uso da terra, tecnologia e políticas ambientais, quaisquer alterações nesses vetores podem impactar diretamente nas concentrações finais de GEE. Neste sentido, estratégias que considerem as mitigações das emissões no setor de transportes, que foi responsável por 16,2% do total mundial em 2016, tornam-se medidas eficazes para reduzir os impactos das mudanças climáticas (OURWORLDINDATA, 2020).

¹ Esse relatório ainda não foi publicado integralmente (IPCC, 2021).

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 2021, foi firmado um novo compromisso, o Pacto Climático de Glasgow, discutido na COP 26, que incluiu todos os países participantes do Acordo de Paris, quando o Brasil se comprometeu a reduzir suas emissões em 50% em 2030 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, 2022).

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). Por outro lado, a análise da eficiência energética dos veículos é regulada pelo INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia) e faz parte das diretrizes do Programa Rota 2030 (BRASIL, 2018).

Em 2021, foi lançado o Programa Combustível do Futuro, que tem por objetivo aumentar a participação de combustíveis sustentáveis e de baixa intensidade de carbono, integrando diversas políticas públicas, como o RenovaBio, o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel, o Programa Nacional de Etiquetagem Veicular e o Rota 2030. O uso do bioquerosene de aviação e de alternativas sustentáveis no setor marítimo também foram contemplados. Adicionalmente, medidas para a captura de carbono na produção de biocombustíveis e de hidrogênio foram propostas por esse programa (CASA CIVIL, 2021; CNPE, 2021).

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 propor uma avaliação das emissões de GEE para as diferentes fontes de energia que impulsionam as tecnologias veiculares, seja combustão interna, híbridos ou elétricos, considerando as características e peculiaridades do mercado brasileiro e a análise 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 2019, 2020, 2027 e 2032. Além disso, são apresentados os valores relativos aos combustíveis de referência² (gasolina E22 e diesel B7) no Apêndice desse documento.

1. Metodologia

Para avaliar o nível de emissões da matriz energética de transporte rodoviário é necessário determinar a intensidade de carbono (IC), em $\text{gCO}_{2\text{eq}}/\text{MJ}$, 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,

² 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, 2021d). 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*; 10% de biodiesel no diesel B).

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 1 ilustra as etapas relacionadas ao ciclo de vida das fontes de energia, nos termos adotados nessa análise.

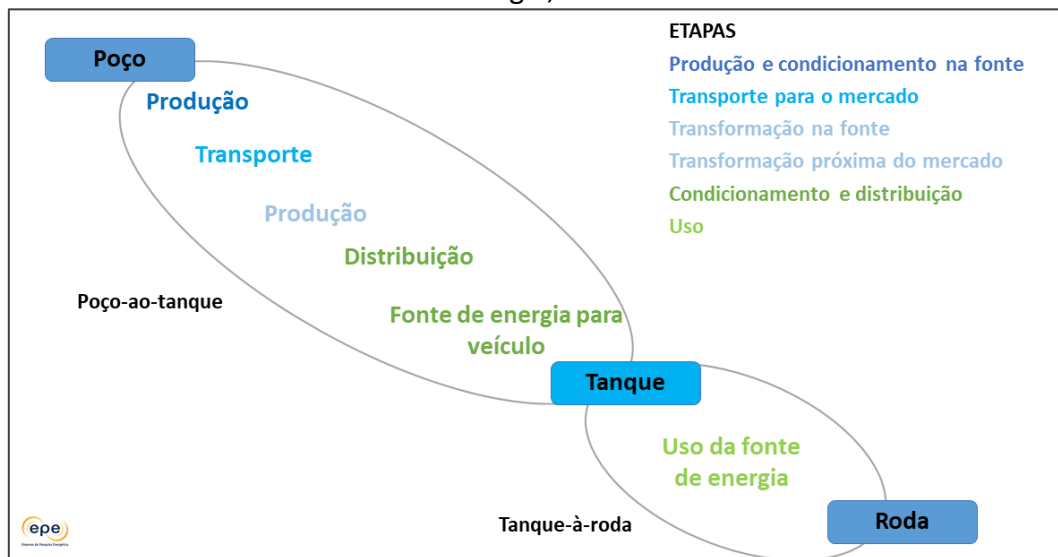


Figura 1: Ciclo de vida das fontes de energia

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. Importante ressaltar que a combinação da intensidade de carbono dos energéticos (gCO_{2eq}/MJ), aqui apresentada, com a eficiência dos veículos (MJ/km) resulta na emissão de gCO_{2eq}/km, com abrangência do poço-à-roda. Entretanto, como mencionado, não serão abordados nesse estudo os aspectos relativos à eficiência dos veículos (MJ/km), objeto de estudo de outra comissão técnica da AEA.

O período de análise considera o horizonte até 2032, 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 2019 (histórico), 2020 (histórico) e 2027 e 2032. Esses dois últimos anos foram selecionados por serem marcos do Programa Rota 2030. 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.

1.1. RenovaCalc

A RenovaCalc é a ferramenta oficial do RenovaBio, utilizada para calcular a intensidade de carbono dos biocombustíveis ($\text{g CO}_{2\text{eq.}}/\text{MJ}$)³ por meio da Avaliação de Ciclo de Vida Atribucional⁴, 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 as emissões relacionadas à mudança de uso da terra, assim como as emissões fugitivas⁵.

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)⁶. 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 média⁷, da usina ao consumidor, para todos os modos⁸ (rodoviário; dutoviário; ferroviário e marítimo⁹), 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 biocombustíveis¹⁰ consideradas 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.

³ Os gases de efeito estufa considerados estão detalhados no Apêndice (Tabela A1).

⁴ 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).

⁵ 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).

⁶ 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).

⁷ As distâncias médias adotadas na RenovaCalc correspondem a uma aproximação (ANP, 2018b).

⁸ 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).

⁹ Apenas para o etanol de milho importado.

¹⁰ 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 fósseis¹¹ 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, como 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).

1.2. Outros energéticos

Além dos combustíveis abordados no âmbito do RenovaBio, este estudo irá avaliar a participação da eletricidade no setor de transporte rodoviário. Para a determinação das intensidades de carbono das fontes que compõem a matriz elétrica nacional, utilizaram-se dados do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2013, 2021), da Ecoinvent 3.5 (2018), do Balanço Energético Nacional – BEN 2022 (EPE, 2022a) e dados de projeção do PDE 2031 (EPE, 2022b). Essas referências foram comparadas e avaliadas, de modo a verificar a aderência dos valores com a realidade brasileira.

1.3. Demanda dos energéticos e suas propriedades físicas

Os dados relativos ao histórico do consumo dos combustíveis fósseis (gasolina, diesel e GNV), dos biocombustíveis e da geração de eletricidade foram retirados do Balanço Energético Nacional (BEN/EPE) (EPE, 2022a). 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, 2022) e, para o biodiesel, da Agência Nacional de Petróleo Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2022c).

Em relação ao diesel, considera-se o consumo dos veículos comerciais leves e da frota de veículos pesados, que utilizam esse combustível. Para a eletricidade, abarcam-se todas as fontes de geração elétrica, fósseis e renováveis, que compõem a matriz nacional.

No horizonte futuro, foram usadas as projeções do PDE 2031, quanto ao aumento da demanda total, participação de cada energético na matriz de transporte rodoviário, penetração dos veículos híbridos e elétricos e à composição da matriz elétrica (EPE, 2022b). Especificamente, o ano de 2032 foi resultante de estudos conduzidos durante a elaboração do PDE 2031.

Para a massa específica e poder calorífico inferior, os dados foram obtidos no Balanço Energético Nacional e são iguais aos que constam na RenovaCalc^{12,13} e no Anuário Estatístico da ANP,

¹¹ 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.

¹² Os dados referentes ao biometano estão presentes apenas na RenovaCalc.

¹³ Registra-se que existe uma diferença entre esses parâmetros, quando comparados aos adotados no âmbito do Programa Rota 2030.

e foram considerados constantes em todo o horizonte dessa análise (ANP, 2018a, 2021b, 2022b; EPE, 2022a).

É importante ressaltar que esse estudo almeja fornecer dados e análises que sirvam como referência para as fontes de energia, relacionados ao transporte rodoviário, de forma que melhorias podem ser conduzidas pelos setores produtivos, visando reduzir a intensidade de carbono, melhorar a qualidade dos combustíveis e aumentar a eficiência dos veículos.

2. Energéticos Finais

Será apresentado neste item a avaliação de ciclo de vida das fontes de energia presentes no setor de transporte rodoviário, com o objetivo de estimar a sua intensidade de carbono.

2.1. Derivados de Petróleo

Em 2021, o parque de refino brasileiro possuía 17 refinarias¹⁴ em operação, com capacidade de processamento de 2,3 milhões de bpd, sendo a Petrobras responsável por 84% do total¹⁵. A gasolina e o óleo diesel são produzidos em praticamente todas as refinarias nacionais e, nos últimos anos, mudanças no teor de enxofre dos combustíveis exigiram investimentos em processos de hidrorrefino (ANP, 2022a).

As produções de gasolina e óleo diesel foram de 28,1 bilhões de litros e 42,8 bilhões de litros, respectivamente, em 2021. O consumo de gasolina A no setor de transporte rodoviário foi de 28,7 bilhões de litros e de 43,8 bilhões de litros para o diesel A naquele ano. As importações corresponderam a uma média de 15% e 30%, respectivamente, com base nos últimos cinco anos (EPE, 2022a).

A análise do ciclo de vida 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*). O petróleo chega nas refinarias por dutos e a movimentação para os terminais também é feita por esse modo de transporte. Dos terminais para as bases de distribuição primárias, são utilizados os modos dutoviário e aquaviário. E, para as bases secundárias, podem ser usados os modos rodoviário, ferroviário ou aquaviário. O transporte para os postos revendedores é majoritariamente rodoviário. A Figura 2 ilustra essas etapas.

¹⁴ Existem ainda duas unidades, que estão inativas: a Univen (Ituoeva/SP) e a SSOil (Coroados/SP).

¹⁵ Devido ao Termo de Compromisso de Cessação (TCC), celebrado com o Conselho Administrativo de Defesa Econômica (Cade), a participação da estatal pode diminuir, com o compromisso de venda de oito de suas refinarias, incluindo os ativos logísticos relacionados (CADE, 2019).

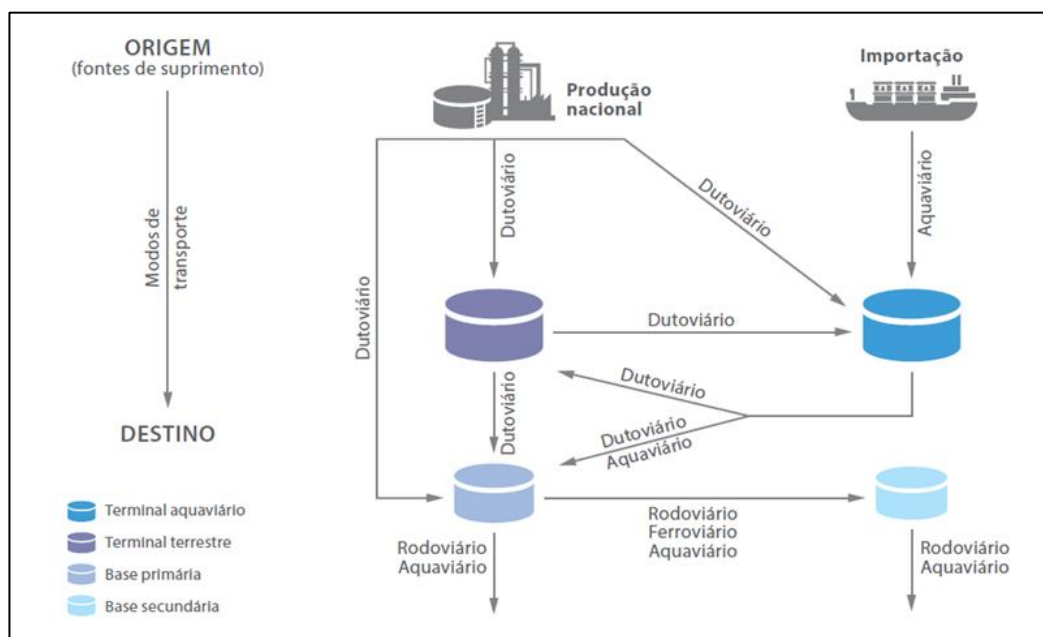


Figura 2: Fluxos logísticos de produção, transporte e armazenagem de gasolina e óleo diesel.

Fonte: ANP (2015)

A gasolina é obtida através da mistura de correntes da destilação atmosférica, craqueamento catalítico, reforma catalítica e alquilação. Também é produzida uma gasolina de maior octanagem¹⁶ (*premium*), com maiores proporções de correntes desses dois últimos processos. O diesel é obtido pela destilação atmosférica e do hidrotreatamento de correntes oriundas de outras unidades de processo, como a de Craqueamento Catalítico (FCC), de Coqueamento Retardado, entre outras.

De acordo com a RenovaCalc, a intensidade de carbono da gasolina é de 87,4 gCO_{2eq}/MJ e do diesel é de 86,5 gCO_{2eq}/MJ, sem haver distinção entre o nacional e o importado. O fator de emissão relacionado ao uso é de 71,33 gCO_{2eq}/MJ e de 74,43 gCO_{2eq}/MJ, respectivamente (ANP, 2018a).

Note-se que as refinarias buscam constantemente melhorias em seus processos, de forma a aproveitar as correntes de menor valor agregado e a redução das emissões. 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 coprocessado¹⁷, que se refere à transformação de biomassa renovável simultaneamente com frações médias de petróleo, como o diesel, em refinarias para produção de combustíveis (PETROBRAS, 2021).

Nessa etapa do estudo, a intensidade de carbono da gasolina e do diesel serão consideradas constantes, conforme o valor fornecido pela RenovaCalc. A Figura 3 apresenta as etapas da análise de ciclo de vida desses combustíveis líquidos fósseis.

¹⁶ Nesse caso, o teor de etanol anidro é de 25% e o RON é de 97, e a gasolina C comum é de 93 (ANP, 2020).

¹⁷ Este processo envolve a hidrogenação catalítica de uma mistura de frações de óleo diesel e óleo vegetal em um reator de hidrotreatamento (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 2022-2026, visando a produção de diesel com conteúdo renovável (5% a 7%) (PETROBRAS, 2021).

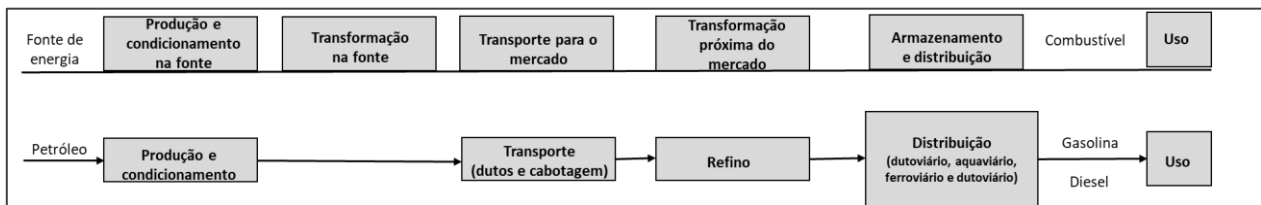


Figura 3: ACV dos derivados de petróleo (gasolina e diesel)

Fonte: Elaboração própria com base em JEC (2020)

2.2. Gás Metano Veicular

O Brasil possuiu 16 pólos de processamento de gás natural e a extensão da malha é de mais de 9.000 km (EPE, 2022b). Além disso, as importações são feitas por meio de três gasodutos internacionais ou como gás natural liquefeito (GNL). Em 2021, a produção nacional foi de 48,8 bilhões de m³ e o consumo no setor de transporte rodoviário foi de 2,2 bilhões de m³ (12% do consumo final energético) (EPE, 2022a). O ciclo de vida do gás natural segue um fluxo similar ao observado nos combustíveis líquidos fósseis, detalhado anteriormente. Após a sua extração dos reservatórios, o gás natural é enviado para a unidade de processamento (UPGN), por meio de gasodutos e, em seguida passa pela separação de seus componentes, seguindo para as suas aplicações, sendo a utilização em automóveis uma delas.

Similarmente ao adotado para a gasolina e diesel, a intensidade de carbono do GNV é aquela disponível na RenovaCalc, no valor de 86,7 gCO_{2eq}/MJ¹⁸, com a etapa referente ao uso sendo de 78,13 gCO_{2eq}/MJ (ANP, 2018a).

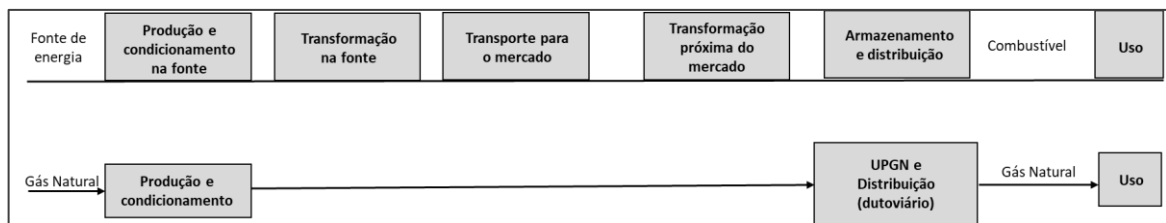


Figura 4: ACV do gás natural veicular

Fonte: Elaboração própria com base em JEC (2020)

Nos últimos anos, o biogás, que possui elevado conteúdo de biometano, tem mostrado um grande potencial de aplicação em diversos setores, como geração de eletricidade, uso veicular e injeção nas malhas de gás natural. Este biocombustível pode ser obtido através do processo de digestão anaeróbica, definida como a conversão de material orgânico, através de bactérias, em metano, dióxido de carbono, alguns gases inertes e compostos sulfurosos, em um ambiente com ausência de oxigênio. Diferentes substratos podem ser utilizados para sua produção e a quantidade de biogás obtida depende, principalmente, da tecnologia empregada na digestão e do substrato. No Brasil, o maior potencial de biogás encontra-se no setor agropecuário, como por exemplo, resíduos agrícolas e pecuária confinada.

¹⁸ Segundo a Resolução ANP nº 758/2018, esse valor corresponde a uma média dos dados referentes à gasolina, diesel e GNV (ANP, 2018a).

Apesar da relevante capacidade de produção brasileira de biometano, não foi projetada uma penetração significativa na matriz de transporte rodoviário, no horizonte desse estudo. Registra-se que, de acordo com a ANP, ao final de 2021 havia três unidades produtoras de biometano certificadas (de um total de quatro) pelo RenovaBio (100% de volume elegível), com uma intensidade de carbono média de 9,32 gCO_{2eq}/MJ (ANP, 2022b).

2.3. Etanol anidro e hidratado

No Brasil, o etanol de primeira geração (E1G) pode ser produzido a partir da cana-de-açúcar e do milho. A produção de etanol pelas usinas sucroenergéticas já está consolidada, com um total de 29,9 bilhões de litros em 2021¹⁹, concentrada principalmente na região Centro-Sul (responsável por mais de 90% desse total) (MAPA, 2022). O Brasil possui também duas 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*)²⁰ vêm apresentando um crescimento considerável, tendo produzido 3,3 bilhões de litros nesse mesmo ano (UNICA, 2022).

Segundo a ANP (2022b), em junho de 2022, existiam 357 unidades autorizadas a comercializar etanol, sendo que 267 já estavam certificadas, o que corresponde a 75% do total. Desse total, 257 produzem o biocombustível a partir da cana (1G e 2G), com volume elegível de cerca de 90% da capacidade de produção. Para o etanol de milho²¹, o volume elegível era de 43% nas 4 unidades *full*, e de 65% no caso das 6 usinas *flex*. Em relação à produção total de etanol em 2021, de 29,9 bilhões de litros, o volume elegível produzido pelas unidades certificadas correspondeu a cerca de 80% (ANP, 2022b; EPE, 2022c).

Para os anos de 2019 e 2020, a intensidade de carbono de cada uma dessas rotas de produção de etanol de cana (1G e 2G) e milho teve como base o valor apresentado nas certificações do RenovaBio até 2021, considerando uma segmentação por tipo de matéria-prima empregada na produção e, ainda, a proporção de unidades que utilizam dados primário e padrão. No restante do período analisado, considerou-se uma redução da IC, em função de investimentos para eficiência do processo produtivo das usinas (tendo o RenovaBio como indutor) e de um maior número de certificações com dados primários, o qual passará de 63% para 85% ao final do período de estudo (ANP, 2018a, 2022b; EPE, 2022b, 2022c; UNICA, 2021). Os valores referentes à emissão pela queima foram de 0,66 gCO_{2eq}/MJ para o hidratado e de 0,44 gCO_{2eq}/MJ para o anidro (ANP, 2018a). A Figura 5 apresenta as etapas da análise de ciclo de vida do etanol de cana e milho.

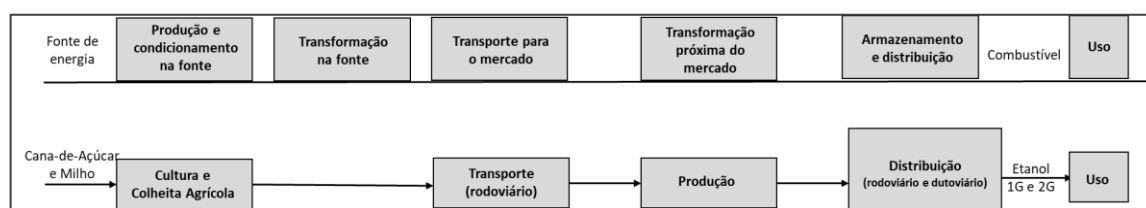


Figura 5: ACV do etanol (cana e milho)

Fonte: Elaboração própria com base em JEC (2020)

¹⁹ A safra 2021/22 da cana-de-açúcar foi impactada pelo *déficit* hídrico e geadas, levando a uma queda nos indicadores de produtividade.

²⁰ Unidade de milho *full* produz o biocombustível apenas a partir do grão, enquanto a *flex* utiliza também a cana-de-açúcar.

²¹ A cultura do milho possui uma dificuldade de rastreamento, em função do alto número de fornecedores desse grão para as unidades produtoras do biocombustível.

2.4. Biodiesel

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 apresentado uma participação majoritária ao longo dos anos, de cerca de 70%, seguida do sebo bovino (9%) e de outros insumos, como materiais graxos, gordura suína e óleo de fritura.

O setor nacional de biodiesel (FAME) registrou um total de 53 usinas produtoras em dezembro de 2021, mantendo a concentração nas regiões Centro-Oeste e Sul do país. Nesse mesmo ano, foram consumidos 6,8 bilhões de litros desse biocombustível (ANP, 2022c). Observa-se que o percentual de adição obrigatória do biodiesel é de 10% em 2022, conforme determinação do CNPE (CNPE, 2021).

O diesel verde é um combustível renovável formado por uma mistura de hidrocarbonetos parafínicos com composição química análoga à do combustível fóssil (*drop in*²²), podendo ser produzido a partir de diferentes rotas, como o hidrotreatamento 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 verde²³ (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). Até o momento, não há previsão da implantação de unidades comerciais no Brasil²⁴ (EPE, 2020), portanto, o biodiesel parafínico não será considerado neste estudo.

A intensidade de carbono do biodiesel éster (FAME) foi 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 rastreamento²⁵ e o processo de certificação.

²² Os biocombustíveis *drop-in* são hidrocarbonetos, funcionalmente equivalentes aos de origem petroquímica e totalmente compatíveis com a infraestrutura de petróleo existente (EPE, 2020).

²³ As rotas e matérias-primas regulamentadas são: I) hidrotreatamento de óleo vegetal (in natura ou residual), óleo de algas, óleo de microalgas, gordura animal e ácidos graxos de biomassa, bem como de hidrocarbonetos bioderivados pelas microalgas *Botryococcus braunii*; II) gás de síntese proveniente de biomassa, via processo Fischer-Tropsch; III) fermentação de carboidratos presentes em biomassa; IV) oligomerização de álcool etílico (etanol) ou isobutílico (isobutanol); e V) hidrotérólise catalítica de óleo vegetal (in natura ou residual), óleo de algas, óleo de microalgas, gordura animal e ácidos graxos de biomassa.

²⁴ Em 9 de dezembro de 2020, por meio da Resolução CNPE nº 13, foi instituído um Grupo de Trabalho para avaliar a inserção de biocombustíveis para uso no ciclo Diesel na Política Energética Nacional (EPE, 2020), que tem por objetivo abordar as formas de inserção do diesel verde na matriz de combustíveis.

²⁵ A ANP, em conjunto com Embrapa e MME, possui iniciativas para melhorar o desempenho das biomassas de grãos (soja e milho) no RenovaBio, através de projeto no âmbito do Brazil Energy Programme - BEP (ANP, 2021e).

Em junho de 2022, 56 plantas estavam autorizadas a produzir biodiesel. Dessas, existiam 32 certificadas²⁶ no RenovaBio, correspondente a cerca de 60% do total de usinas, com volume elegível de 44% de sua produção (ANP, 2022b). Em relação à produção de biodiesel em 2021, de 6,8 bilhões de litros, o volume elegível produzido pelas unidades certificadas correspondeu a cerca de 30%. Destaca-se que as unidades que realizaram a certificação da etapa agrícola o fizeram com dados padrão (penalizado), ou seja, não foi possível a utilização de dado primário.

Para avaliar a intensidade de carbono das unidades produtoras de biodiesel e a sua evolução ao longo do período de estudo, foi feito um levantamento das certificações que ocorreram até junho de 2022, com uma segmentação por tipo de matéria-prima empregada na produção, considerando também o preenchimento dos dados da etapa agrícola, e fazendo uma diferenciação das unidades que certificaram somente com a etapa industrial.

Para os anos de 2019 e 2020, a intensidade de carbono teve como base o valor das unidades certificadas até 2022, levando-se em conta a média ponderada da IC por tipo de matéria-prima certificada e a participação de cada uma na produção de biodiesel. No restante dos anos, considerou-se também uma evolução na IC, com base na recertificação da parte agrícola com dados típicos das unidades produtoras de biodiesel, base soja, que já fazem a declaração desta etapa. Assim, admitiu-se que parte das unidades que já declararam em 2020 a etapa agrícola com dado padrão irá realizar gradualmente a certificação com dado primário, atingindo 50% até 2032 (por falta de informação disponível, utilizou-se neste estudo o valor típico como base). Além disso, fez-se a ponderação pela participação das matérias-primas. A emissão referente ao uso foi de 0,44 gCO_{2eq}/MJ. A Figura 6 apresenta as etapas da análise de ciclo de vida do biodiesel éster (ANP, 2018a).

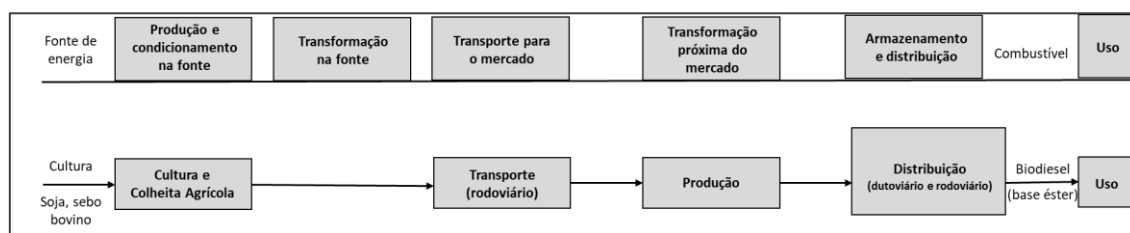


Figura 6: ACV do biodiesel éster (FAME)

Fonte: Elaboração própria com base em JEC (2020)

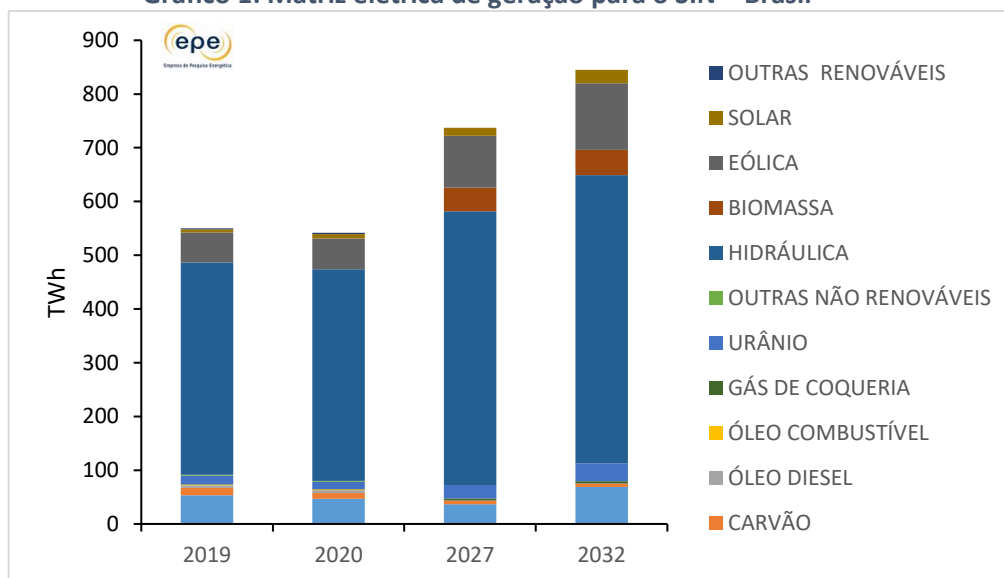
2.5. Eletricidade

A matriz de geração elétrica brasileira foi construída por meio de grandes reservatórios, capazes de armazenar energia e promover a flexibilidade necessária 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 aumentar a flexibilidade e a diversidade, com maior participação ativa do consumidor. O setor elétrico nacional tem acompanhado, ao longo dos anos, diversas iniciativas para manter a elevada participação de renováveis, dada a alta disponibilidade brasileira destes recursos, através de programas e políticas públicas, como o PROINFA e o PROEÓLICA, leilões específicos para biomassa, eólica e solar, ProGD (para geração distribuída), entre outros.

²⁶ 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).

Historicamente, a matriz elétrica brasileira tem uma considerável participação de renováveis, e em 2021, teve uma geração de 656,1 TWh, 55,3% do total da energia sendo de origem hídrica, seguida de eólica, bagaço de cana-de-açúcar e solar. Essa tendência também se mantém ao longo dos anos dessa análise, conforme Gráfico 1, de acordo com os dados do PDE 2031 (EPE, 2022b). A participação percentual das fontes da matriz de geração elétrica injetada no SIN (exclui autoprodução e geração distribuída)²⁷ está apresentada na Tabela 1 a seguir.

Gráfico 1: Matriz elétrica de geração para o SIN – Brasil



Fonte: EPE (2022a; 2022b)

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

	2019	2020	2027	2032
Gás Natural	9,3%	8,2%	5,0%	8,1%
Carvão	2,4%	1,9%	0,9%	0,8%
Óleo Diesel	0,8%	0,9%	0,0%	0,0%
Óleo combustível	0,2%	0,3%	0,0%	0,0%
Gás de Coqueria	0,0%	0,0%	0,5%	0,4%
Urânio	2,8%	2,5%	3,4%	4,0%
Outras não renováveis	0,3%	0,3%	0,0%	0,0%
Não renováveis	15,9%	14,2%	9,8%	13,4%
Hidráulica	68,5%	69,3%	69,1%	63,4%
Biomassa	4,5%	4,6%	6,0%	5,5%
Eólica	9,7%	10,0%	13,1%	14,7%
Solar	1,0%	1,5%	2,1%	3,0%
Outras Renováveis	0,3%	0,4%	0,0%	0,0%
Renováveis	84,1%	85,8%	90,2%	86,6%

Nota 1: A participação da biomassa, para os anos de 2019 e 2020, é conforme o Balanço Energético Nacional (EPE, 2022a). Para 2027 e 2032 é composta por 80% daquela oriunda da cana-de-açúcar e 20% de lixo.

Nota 2: Como já colocado, as projeções do PDE 2031 aqui apresentadas e estudos internos consideram apenas a energia elétrica injetada na rede, ou seja, não englobam a autoprodução e geração distribuída.

Fonte: EPE (2022a, 2022b)

²⁷ Para maiores detalhes das projeções de geração elétrica, sugere-se consultar o Capítulo 11 do PDE 2031 (EPE, 2022b).

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 3.5 (2018), para cada fonte que compõe a matriz nacional²⁸, conforme detalhado na Tabela 2. A Figura 7 apresenta as etapas da análise de ciclo de vida da geração de eletricidade.

Tabela 2: 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 3.5
Lenha	12,67	Ecoinvent 3.5
Lixívia	36,42	Ecoinvent 3.5
Outras fontes renováveis	7,72	IPCC/Ecoinvent 3.5
Nuclear	3,31	Ecoinvent 3.5
Carvão Vapor	227,78	IPCC
Gás Natural	136,11	IPCC
Gás de Coqueria	234,00	Ecoinvent 3.5
Óleo Combustível	294,59	Ecoinvent 3.5
Óleo Diesel	200,11	Ecoinvent 3.5
Outras fontes não renováveis	146,44	IPCC/Ecoinvent 3.5

Nota: Refere-se às intensidades de carbono das fontes de energia, conforme IPCC e Ecoinvent 3.5, ponderadas pela participação das fontes de energia na matriz elétrica (2012 a 2021), conforme dados apresentados por EPE (2022a).

Fonte: EPE (2022a); Ecoinvent 3.5 (2018); IPCC (2013, 2021); Schlömer et al. (2014); WERNET et al. (2016)

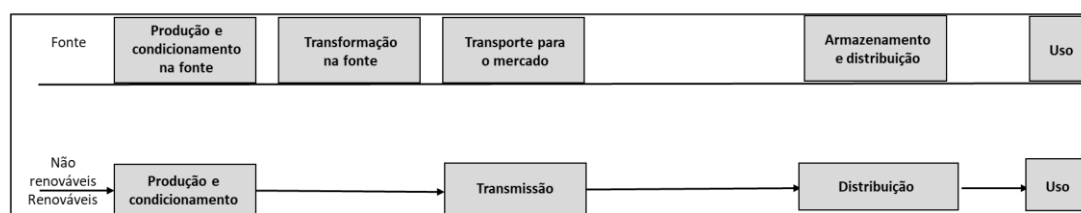


Figura 7: ACV da geração elétrica

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 comerciais²⁹ (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

²⁸ Os fatores utilizados foram baseados principalmente no IPCC e, quando não disponível, utilizaram-se os da Ecoinvent 3.5, exceto para a nuclear, cujo valor é similar em ambas as bases.

²⁹ As perdas comerciais médias não foram contempladas neste estudo por se observar, historicamente, uma discrepância considerável entre os estados brasileiros.

equipamentos associados é realizado através de um método adequado de fluxo de potência para redes de distribuição (COSTA, 2019).

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)³⁰. 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 carregadores³¹ indicados pelo fabricante do veículo. Nesse estudo, não foram contabilizadas as perdas no carregamento de veículos elétricos³².

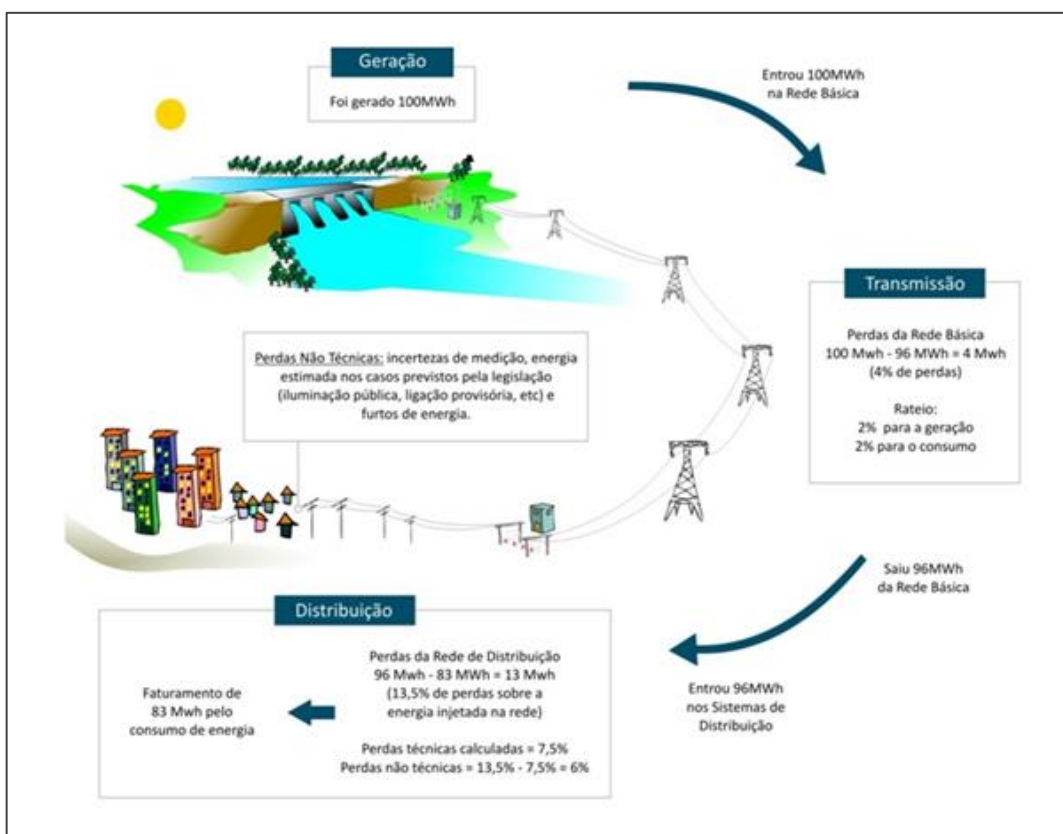


Figura 8: Perdas de energia elétrica

Fonte: ANEEL (2022)

³⁰ Maiores detalhes sobre as emissões associadas ao efeito corona estão apresentadas no Apêndice.

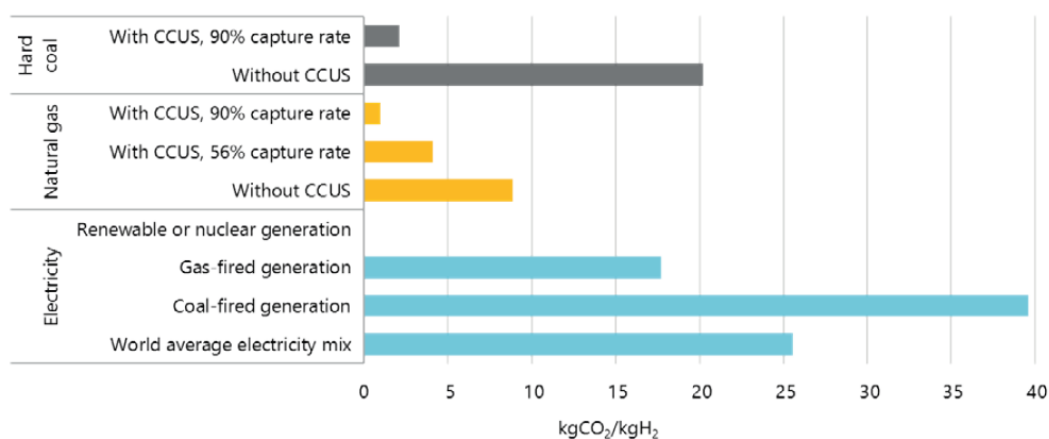
³¹ Caso estas perdas relativas ao carregamento não sejam medidas, por se tratar de um cálculo genérico de avaliação de ciclo de vida e que não se refira a um veículo específico, poderá ser utilizado o valor médio de 16%, de acordo com DOE (2018).

³² Detalhes acerca do carregamento de veículos elétricos estão no Apêndice (Consumo energético dos veículos elétricos, Figura A1).

Hidrogênio

O uso de hidrogênio como fonte de energia para o transporte rodoviário apresenta-se como possibilidade para além do horizonte deste estudo. Algumas ações em curso almejam identificar as barreiras e o potencial nacional, tal como o Programa Nacional de Hidrogênio (PNH2), iniciativa do MME divulgada em 2021. São diversos os processos e fontes que viabilizam a produção de hidrogênio, sendo usualmente feita uma identificação por cores. Assim, tem-se o hidrogênio verde, resultado de eletrólise da água via fontes eólica ou solar e o verde musgo, obtido através da reforma a vapor, gaseificação ou digestão anaeróbica de biomassa ou biocombustíveis. Também são considerados o cinza (reforma a vapor de metano), azul (reforma a vapor de metano com CCUS), turquesa (pirólise de metano sem CO₂), branco (extração natural ou geológica, dentre outros). Apesar de amplamente difundida, esta abordagem por cores de acordo com a fonte está sendo substituída pela intensidade de carbono do processo de obtenção. Estudo divulgado pela IEA (2019), classifica as rotas de produção de acordo com a intensidade de carbono, conforme ilustrado a seguir.

Figure 17. CO₂ intensity of hydrogen production



Notes: Capture rate of 56% for natural gas with CCUS refers to capturing only the feedstock-related CO₂, whereas for 90% capture rate CCUS is also applied to the fuel-related CO₂ emissions; CO₂ intensities of electricity taking into account only direct CO₂ emissions at the electricity generation plant: world average 2017 = 491 gCO₂/kWh, gas-fired power generation = 336 gCO₂/kWh, coal-fired power generation = 760 gCO₂/kWh. The CO₂ intensities for hydrogen also do not include CO₂ emissions linked to the transmission and distribution of hydrogen to the end users, e.g. from grid electricity used for hydrogen compression. More information on the underlying assumptions is available at www.iea.org/hydrogen2019.

Source: IEA 2019. All rights reserved.

The CO₂ intensity of hydrogen directly from natural gas is half of that from coal and nearly half that from gas-fired electricity; the CO₂ intensity of electrolysis depends on the CO₂ intensity of the electricity.

Fonte: (IEA, 2019)

O uso de hidrogênio em veículos leves dependerá da maior competitividade das células a combustível e da estocagem de hidrogênio a bordo. Deve competir com baterias elétricas e ter autonomia de 400 a 500 km, para se tornarem atraentes a consumidores que valorizam esta característica. Uma alternativa seria convertê-lo para combustível com base em hidrogênio, tal como metano, metanol e amônia e outros combustíveis sintéticos líquidos, que possuem grande potencial de uso em transporte e que, por serem *drop in*, podem utilizar a estrutura já existente. Apesar das vantagens identificadas na cadeia de valor, as perdas relacionadas à eficiência devem ser contabilizadas. Segundo dados da IEA (2019), foram vendidos 4.000 automóveis a célula combustível no mundo em 2018 e a frota alcançou 11.200 unidades.

3. Fontes de Energia – Resultados

3.1. Parâmetros Técnicos

Com base nas descrições efetuadas nas sessões anteriores, a Tabela 3 sumariza as principais propriedades dos combustíveis, para os anos de 2019, 2020, 2027 e 2032. Nesse período, a massa específica e o poder calorífico inferior (PCI) foram considerados constantes e conforme disponibilizado no Balanço Energético Nacional, ANP e RenovaCalc.

Tabela 3: Propriedades físicas médias³³ dos energéticos³⁴

COMBUSTÍVEIS	Massa Específica	PCI		Conteúdo Energético
		(kg/litro)	(kcal/kg) (MJ/kg)	
LÍQUIDOS				
Etanol Anidro	0,791	6.750	28,26	22,36
Etanol Hidratado	0,809	6.300	26,38	21,34
Gasolina A	0,742	10.400	43,54	32,31
Biodiesel	0,88	9.000	37,68	33,16
Diesel A	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^{1,2} (96,5% de metano)	0,76	11.524	48,25	36,67

Nota 1: De acordo com o Balanço Energético Nacional, para a eletricidade, o PCI é de 860 kcal/kWh (EPE, 2022a).

Nota 2: Registra-se a diferença entre os valores dessas propriedades físicas (principalmente para o etanol hidratado e o GNV) em relação ao considerado no Programa Rota 2030 e no Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV/INMETRO) (INMETRO, 2016, 2020), que são apresentados no Apêndice 1 (Tabela A2).

Fonte: ANP (2018a, 2021a) e EPE (2022a)

Para os biocombustíveis, foi proposta uma evolução da intensidade de carbono da fonte, com base em uma série de avaliações, que incluíram o levantamento das IC das unidades certificadas até junho de 2022, perspectivas de evolução das certificações com dados padrão para primário, participação das diversas matérias-primas na produção (cana, milho, soja, sebo bovino), além de perspectivas de melhorias em toda cadeia de produção. No caso dos combustíveis fósseis, foram adotados os valores apresentados na RenovaCalc e que permanecem fixos no período. Para as fontes de energia que compõem a matriz elétrica, a IC foi determinada a partir dos dados do IPCC e Ecoinvent 3.5 e pela participação de cada fonte. A Tabela 4 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 2019 e 2032.

³³ Os valores de PCI utilizados na RenovaCalc são os mesmos adotados para esse estudo. Esses dados estão sendo revisados pela ANP.

³⁴ Vide nota de rodapé 2 sobre combustíveis de referência.

Tabela 4: Evolução da intensidade de carbono (gCO_{2eq}/MJ) dos energéticos

	2019	2020	2027	2032
Etanol Anidro	27,00	26,88	23,13	20,31
Etanol Hidratado	28,45	28,52	24,63	21,61
Gasolina A	87,40	87,40	87,40	87,40
Gasolina C (E27)	75,09	75,07	74,30	73,73
GNV	86,70	86,70	86,70	86,70
Biodiesel	24,19	24,03	23,58	21,14
Diesel A	86,50	86,50	86,50	86,50
Diesel B ¹ (BX)	80,45	79,84	77,60	77,26
Eletricidade	34,22	31,77	22,58	26,62

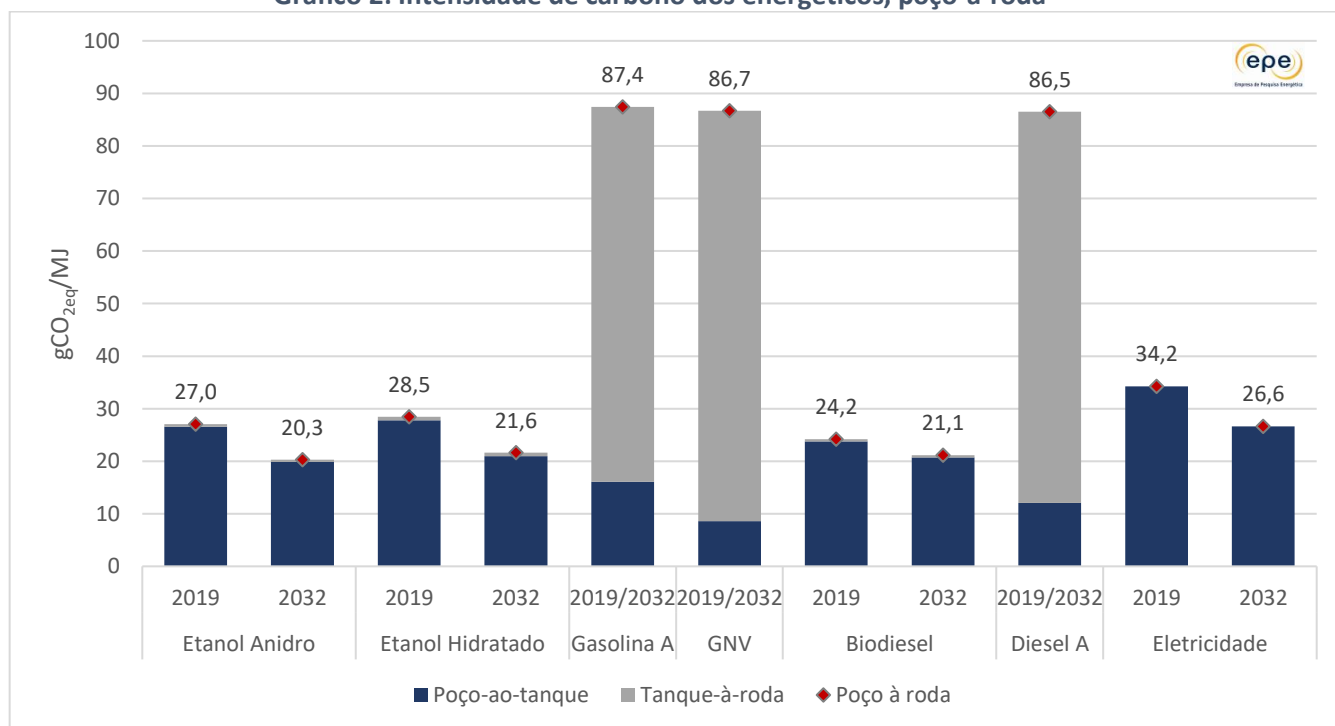
Nota 1: Teor de biodiesel de 10,3% (2019), 11,3% (2020) e 15% (2027 e 2032).

Nota 2: Para maiores detalhes da metodologia para a determinação das intensidades de carbono da gasolina (E22 e E27) e diesel B (B7 e BX), consultar Apêndice (Metodologia para cálculo da Intensidade de carbono das misturas de combustíveis nacionais).

Nota 3: As intensidades de carbono dos combustíveis de referência são apresentadas no Apêndice (Tabela A3).

Fonte: EPE (Elaboração própria) com base em ANP (2018a, 2022b) (histórico), EPE (2022a) (histórico) e UNICA (2021)

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



Fonte: EPE (Elaboração própria) com base em ANP (2018a, 2022b) (histórico), EPE (2022b) (histórico) e UNICA (2021)

3.2. Demanda de Combustíveis

A demanda do setor de transporte rodoviário contempla os veículos leves (automóveis e comerciais leves), destinados ao transporte individual, e os veículos pesados, utilizados no transporte de carga e coletivo de passageiros.

Quanto aos veículos leves, a frota de ciclo Otto totalizou 38 milhões de unidades em 2021, com a tecnologia *flex fuel* correspondendo a 80% do total. Em 2032, projeta-se que essa frota será de 49 milhões de unidades. Estima-se, ainda, que haverá uma crescente participação de uso dos biocombustíveis, em função dos sinais positivos de políticas públicas, como o RenovaBio, bem como melhorias nos processos produtivos, a serem conduzidos pelo setor. A frota de veículos leves do ciclo Diesel é composta, em sua maioria, de utilitários esportivos (ou SUV – *sport utility vehicle*), com 2,6 milhões de unidades em 2021 e que alcançará 5,0 milhões em 2032. Para os veículos leves, considera-se uma penetração tímida dos elétricos, com participação a partir de 2032.

Já a frota de veículos pesados (transporte de carga e de passageiros) totalizou 2,2 milhões de unidades em 2021, 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 coletivo³⁵, 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 2032 (EPE, 2022b).

As demandas dos energéticos do setor de transporte em 2019 e 2020, e as projeções para os anos de 2027 e 2032, estão sumarizadas na Tabela 5. A Tabela 6 e a Tabela 7 Tabela 6 apresentam as demandas em termos de energia e a participação na demanda dos energéticos na demanda total (em energia).

³⁵ 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 intensidade de carbono da eletricidade utilizada para o carregamento desses veículos.

Tabela 5: Demandas dos energéticos (volume)

	2019	2020	2027	2032
CICLO OTTO				
com GNV (bilhões de litros gas. eq)	57,77	52,35	57,21	65,70
sem GNV (bilhões de litros gas. eq)	54,69	49,81	53,94	62,37
Gasolina C (bilhões de litros)	38,41	35,93	33,76	39,06
Gasolina A	27,86	26,15	24,64	28,52
Etanol anidro	10,55	9,78	9,11	10,55
Etanol de Cana 1G	10,16	9,14	7,24	8,00
Etanol de Cana 2G	0,00	0,00	0,13	0,51
Etanol de Milho	0,40	0,64	1,75	2,04
Mistura (%)	27,0%	27,0%	27,0%	27,0%
Etanol hidratado (bilhões de litros)	23,25	19,83	28,83	33,30
Etanol de Cana 1G	22,32	18,04	23,62	27,23
Etanol de Cana 2G	0,00	0,00	0,00	0,00
Etanol de Milho	0,93	1,79	5,21	6,07
Market share hidratado no flex fuel (% v/v)	41,7	39,4	47,7	47,3
GNV total (bilhões m³)	2,29	1,88	2,43	2,46
GNV	2,29	1,88	2,43	2,46
BioGás	0,00	0,00	0,00	0,00
Participação vol. (%)	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
CICLO DIESEL				
Diesel B transporte rodoviário (bilhões de litros)	45,11	45,09	55,48	61,91
Diesel	40,45	39,98	47,16	52,63
Biodiesel	4,66	5,11	8,32	9,29
Mistura (%)	10,3%	11,3%	15,0%	15,0%
Diesel B veículos leves (bilhões de litros)	5,52	3,77	7,47	9,84
Biodiesel veículos leves (bilhões de litros)	0,57	0,43	1,12	1,48
ELÉTRICO (MWh)				
Eletricidade	436	986	175.042	543.952

Fonte: EPE (Elaboração própria) com base em EPE (2022a, 2022b) (histórico)

Tabela 6: Demandas dos energéticos (energia - MJ)

Bilhões MJ	2019	2020	2027	2032
CICLO OTTO	1.632	1.487	1.615	1.868
Gasolina A	900	845	796	921
Etanol anidro	236	219	204	236
Etanol hidratado	496	423	615	711
CICLO DIESEL	1.591	1.590	1.951	2.177
Diesel	1.437	1.420	1.675	1.869
Biodiesel	155	169	276	308
Diesel veículos leves	196	134	265	350
Biodiesel veículos leves	19	14	37	49
ELÉTRICO				
Eletricidade	0	0	1	2
Leves	0	0	0	0
Pesados	0	0	1	2
GÁS				
GNV	84	69	89	91
BioGás	0	0	0	0

Nota 1: A demanda do ciclo Otto (energia) apresentada não considera o GNV.

Fonte: EPE (Elaboração própria)

Tabela 7: Participação na demanda dos energéticos na demanda total (em energia)

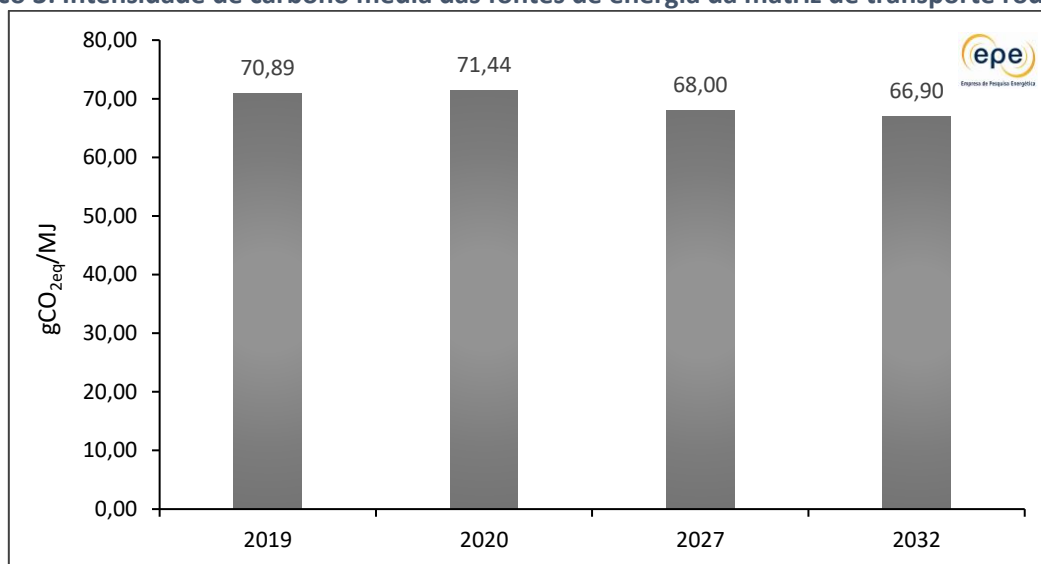
	2019	2020	2027	2032
CICLO OTTO				
Gasolina A	27,21%	26,86%	21,78%	22,27%
Etanol anidro	7,13%	6,95%	5,57%	5,70%
Etanol hidratado	15,00%	13,45%	16,82%	17,17%
CICLO DIESEL				
Diesel	43,44%	45,15%	45,82%	45,18%
Biodiesel	4,67%	5,39%	7,55%	7,44%
Diesel veículos leves	5,93%	4,26%	7,25%	8,45%
Biodiesel veículos leves	0,57%	0,45%	1,02%	1,18%
ELÉTRICO				
Eletricidade	0,00%	0,00%	0,02%	0,05%
Leves	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Pesados	0,00%	0,00%	0,02%	0,05%
GÁS				
GNV	2,55%	2,20%	2,44%	2,19%
BioGás	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Fonte: EPE (Elaboração própria)

3.3. 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, 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

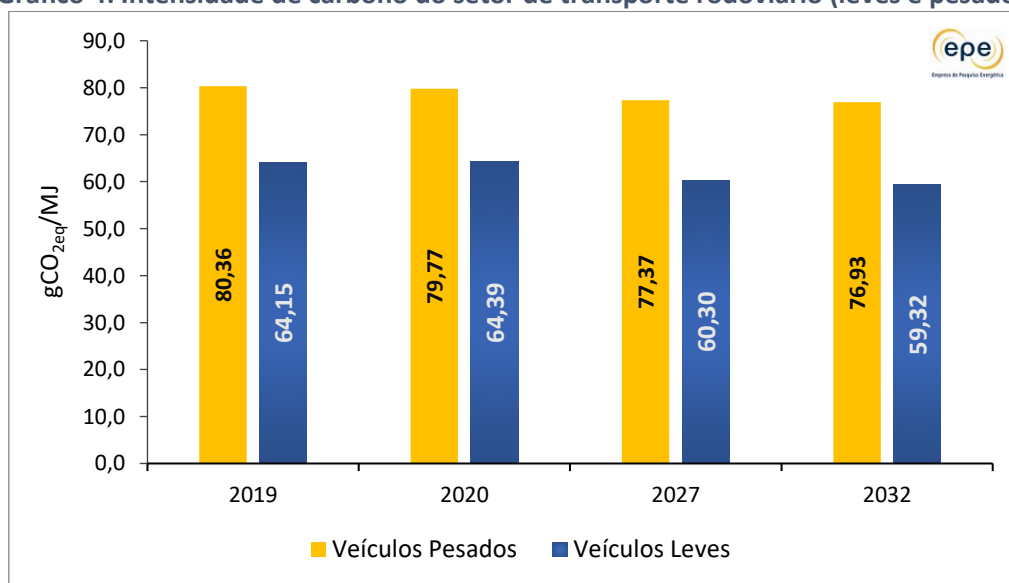


Fonte: EPE (Elaboração própria)

Quando se considera a matriz de transporte rodoviário, a intensidade de carbono apresentou valores similares em 2019 e 2020, uma média de 71,17 gCO_{2eq}/MJ. Para os anos de 2027 e 2032, esses valores são de 68,0 gCO_{2eq}/MJ e 66,9 gCO_{2eq}/MJ, respectivamente, representando uma redução de 4,1% e 5,6%, em relação a 2019, taxas de -0,5% a.a. e -0,4% a.a..

O Gráfico 4 apresenta as intensidades de carbono do setor de transporte rodoviário, segregando também em veículos leves e pesados.

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



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 de políticas públicas relacionadas, com destaque para o RenovaBio, Programa Rota 2030 e Combustível do Futuro.

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, de outros combustíveis renováveis do ciclo Diesel e do hidrogênio. 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.

Considerações Finais

O presente estudo teve como objetivo determinar, por meio da análise de ciclo de vida do poço-à-roda, a intensidade de carbono das fontes de energia que são utilizadas na matriz de transporte rodoviário, baseando-se nas estimativas do PDE2031: 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.

A metodologia adotada no estudo baseou-se no RenovaBio. A intensidade de carbono dos combustíveis fósseis permaneceu constante ao longo do horizonte de análise, no valor indicado por esse programa. Para os biocombustíveis, considerando cada matéria-prima empregada na sua obtenção, foi proposta uma redução dos valores médios de IC, com base em efficientização dos processos produtivos e em um maior número de certificações com dados primários.

O estudo evidenciou a necessidade de harmonização das propriedades físicas das fontes de energia utilizadas no RenovaBio, Programa Rota 2030 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 ao Ricardo Abreu, ao Luciano Rodrigues e à equipe técnica da Unica, à Marília Folegatti (Embrapa), ao Leonardo Zilio, ao pesquisador Mateus Chagas (LNBR) e ao colega da EPE, Marcos Farinha, por suas contribuições na elaboração deste documento.

A1) Fatores de emissão no uso (queima) dos energéticos

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

	CO ₂ Fóssil	CO ₂ biogênico	CH ₄ Fóssil	CH ₄ Biogênico	N ₂ O	CO ₂ 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	78,13

Fonte: ANP (2018a)

A2) 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"

$$250t O_3 / 60129 GWh = 4.157728 \times 10^{-6} \text{ kg } O_3/\text{kWh}$$

Tabela A2: 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	3,95x 10 ⁻²	3,88

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

A3) 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 e Rota 2030. 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**.

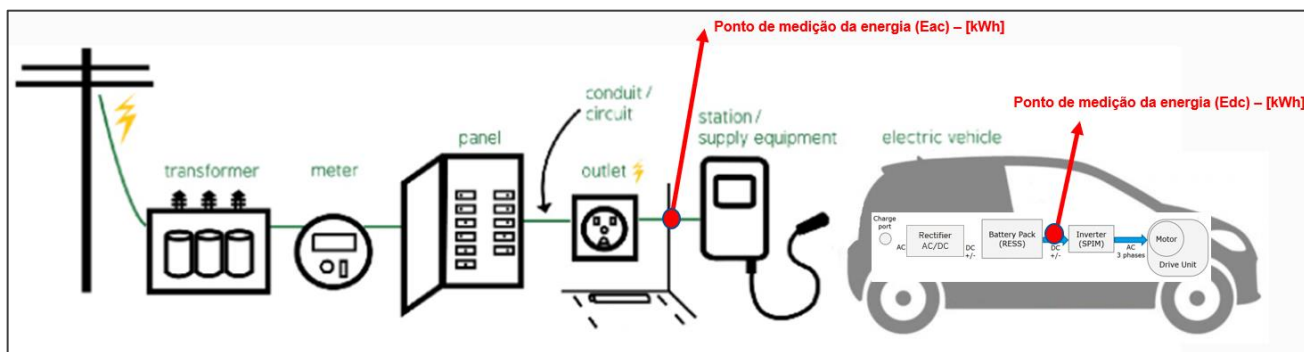


Figura 1A: Pontos de medição do carregamento de veículos elétricos a bateria

Fonte: GM (2022)

A4) Propriedades físicas dos energéticos – Rota 2030

Tabela A3: Propriedades físicas dos energéticos – Rota 2030

	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 A3 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) e ROTA 2030.

Fonte: ANP (2021d); INMETRO (2015, 2020)

A5) 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)

Tabela A4: Evolução da intensidade de carbono (gCO_{2eq}/MJ) dos energéticos de referência

	2019	2020	2027	2032
Gasolina C (E22)	77,54	77,52	76,90	76,44
Diesel B (B7)	82,41	82,40	82,37	82,21

Nota: Metodologia para cálculo da intensidade de carbono das misturas de combustíveis nacionais (VOLKSWAGEN, 2022).

Fonte: EPE (Elaboração própria) com base em ANP (2018a, 2022b) (histórico), EPE (2022a) (histórico) e UNICA (2021)

Referências bibliográficas

ABNT (2014). Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura*. Versão corrigida 21.07.2014. Disponível em: www.abnt.org.br. Acesso em: 03 fev. 2022.

ANEEL (2021). Agência Nacional de Energia Elétrica. *Perdas de Energia Elétrica na Distribuição – Edição 01/2021*. Disponível em: <https://antigo.aneel.gov.br/documents/654800/18766993/Relat%C3%B3rio+Perdas+de+Energia + Edi%C3%A7%C3%A3o+1-2021.pdf/143904c4-3e1d-a4d6-c6f0-94af77bac02a>. Acesso em: 13 jun. 2022.

_____(2022). *Perdas de Energia*. Versão atualizada em 11/03/2022. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/distribuicao/perdas-de-energia>. Acesso em: 13 de junho de 2022.

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: 02 set. 2022.

_____(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: 02 set. 2022.

_____(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: 09 nov. 2021.

_____(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: 23 nov. 2018.

_____(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: 01 fev. 2022.

_____(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: 02 set. 2022.

_____ (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: 25 jul. 2022.

_____ (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/arg/ocr/informe-tecnico-02-sbq.pdf>. Acesso em: 19 set. 2022.

_____ (2021b). Anuário Estatístico, 2021. *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: 25 jan. 2022.

_____ (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.

_____ (2021d). 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: 06 jul. 2022.

_____ (2021e). *RenovaBio: webinar apresenta resultados de projeto para melhorar desempenho de biomassas de grãos*. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/canal atendimento/imprensa/noticias-comunicados/renovabio-webinar-apresenta-resultados-de-projeto-para-melhorar-desempenho-de-biomassas-de-graos>. Acesso em: 24 mai. 2022.

_____ (2022a). *Dados Estatísticos*. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Rio de Janeiro. Disponível em <https://www.gov.br/anp/pt-br>. Acesso em: 02 fev. 2022.

_____ (2022b). *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.

_____ (2022c). *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.

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: 02 fev. 2022.

BRASIL (2005). *Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005. Dispõe sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira.* Disponível em: www.planalto.gov.br. Acesso em: 02 fev. 2022.

_____ (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: 02 dez. 2021.

_____ (2022). Nationally Determined Contribution (NDC) – Paris Agreement. Disponível em: <https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/Updated%20-%20First%20NDC%20-%20FINAL%20-%20PDF.pdf>. Acesso em: 02 set. 2022.

CADE (2019). Conselho Administrativo de Defesa Econômica. *Notícias.* Disponível em: <http://www.cade.gov.br/noticias/cade-e-petrobras-celebram-acordo-para-venda-de-refinarias-de-petroleo>. Acesso em: 09 nov. 2021.

CASA CIVIL (2021). *Aprovada a criação do Programa Combustível do Futuro.* Casa Civil. Disponível em: <https://www.gov.br/casacivil/pt-br/assuntos/noticias/2021/abril/aprovada-a-criacao-do-programa-combustivel-do-futuro#:~:text=O%20Programa%20Combust%C3%ADvel%20do%20Futuro%2C%20que%20tem%20como,um%20passo%20na%20lideran%C3%A7a%20da%20transi%C3%A7%C3%A3o%20.> Acesso em: 01 jun. 2021.

CCEE (2022). Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. Dados Gerais e Individuais para Download. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/web/guest/dados-e-analises/dados-mercado-mensal>. Acesso em 25 mai. 2022.

CNPE (2021). *Resolução CNPE nº 7, de 20 de abril de 2021. Institui o Programa Combustível do Futuro e dá outras providências.* Conselho Nacional de Política Energética. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/cnpe/resolucoes-do-cnpe/arquivos/2021/ResoluesCNPE7_2021.pdf. Acesso em: 14 mai. 2022.

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: 12 set. 2022.

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: 12 set. 2022.

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 11 jan. 2022.

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

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: 24 jan. 2022.

EPE (2021). Investimentos e custos operacionais e de manutenção no setor de biocombustíveis: 2022 – 2031. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-343/topico-606/Investimentos_Custos_O_e_M_Bios_2022-2031.pdf. Acesso em: 06 jul. 2022.

____ (2022a). *Balanco Energético Nacional 2022: Ano-base 2021*. Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>. Acesso em: 06 jul. 2022.

____ (2022b). *Plano Decenal de Expansão de Energia – PDE 2031*. 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-2031>. Acesso em 11 jan. 2022.

____ (2022c). *Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis – ano 2021*. Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/analise-de-conjuntura-dos-biocombustiveis-2021>. Acesso em: 02 set. 2022.

IEA (2019) International Energy Agency *The future of hydrogen – seizing today's opportunities*. Paris, junho 2019. Disponível <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>. Acesso em: 06 jul. 2022.

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: 06 jul. 2022.

INMETRO (2020). Portaria nº 16, de 07 de outubro de 2020. Proposta de alteração dos 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/RTAC002264.pdf>. Acesso em: 06 jul. 2022.

IPCC (2013). International Panel on Climate Change – *Fifth Assessment Report*. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar5/>. Acesso em: 03 nov. 2021.

____ (2021). International Panel on Climate Change – *Sixth Assessment Report*. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf. Acesso em: 03 nov. 2021.

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 nov. 2021.

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

MAPA (2022). *Sustentabilidade/Agroenergia*. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Brasília. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br>. Acesso em: 01 fev. 2022.

OURWORLDINDATA (2020). *Greenhuse gas emissions by sector*. Disponível em: <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions%27>. Acesso em: 01 fev. 2022.

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: 20 mai. 2022.

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.

PETROBRAS. Plano Estratégico 2022 – 2026. Disponível em: <https://petrobras.com.br/pt/quem-somos/plano-estrategico/>. Acesso em: 02 set. 2022.

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/10986/27755/632150WPOImpac00Box0361508B0PUBLIC0.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 02 set. 2022.

UNICA (2021). *Observatório da Cana*. União da Indústria de Cana-de-açúcar. Outubro 2021.

____ (2022) UNICADATA. Disponível em: www.unicadata.com.br. Acesso em: 01 fev. 2021.

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: 03 nov. 2021.

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=Y292ZXJQYWdlOzMwMTU2MTAzOTtBUzo5OTE1ODIyMzY5OTE0ODIAMTYxMzQyMzAzNjY2Mw%3D%3D&el=1_x_3&_esc=publicationCoverPdf?