



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO
CURSO DE BACHARELADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Levicktor Silva Dos Santos

Biocombustíveis e Motores a Combustão: Uma Revisão Bibliográfica

ANGICOS
2025

Levicktor Silva Dos Santos

Biocombustíveis e Motores a Combustão: Uma Revisão Bibliográfica

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Marcos Vinícius Cândido
Henriques, Prof. Dr.

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

SS237 Santos, Levicktor Silva Dos.
b Biocombustíveis e Motores a Combustão: Uma
Revisão Bibliográfica / Levicktor Silva Dos
Santos. - 2025.
46 f. : il.

Orientador: Marcos Vinícius Cândido Henriques.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2025.

1. biodiesel. 2. etanol. 3. eficiência
térmica. 4. sustentabilidade. 5. emissões. I.
Henriques, Marcos Vinícius Cândido, orient. II.
Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Biblioteca Campus Angicos
Bibliotecário: Helder Romero Maia Duarte
CRB: 15/673

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

Levicktor Silva Dos Santos

Biocombustíveis e Motores a Combustão: Uma Revisão Bibliográfica

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Defendida em: 21 / 7 / 2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcos Vinícius Cândido Henriques, (UFERSA)
Presidente

Prof^ª. Dra. Elisângela Lopes Galvão, (UFERSA)
Membro Examinador

Prof. Dr. Damilson Ferreira dos Santos, (UFERSA)
Membro Examinador

DEDICATÓRIA

Esta conclusão é dedicada às pessoas que,
com palavras, exemplos ou silêncio,
moldaram minha forma de pensar e de ver o mundo.
Esta conquista é para vocês.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me acompanhar em todos os momentos.

Agradeço a minha avó, Ilma, minha segunda mãe.

Agradeço aos meus pais, Levi e Rosilene, pela educação, amor e carinho.

Agradeço especialmente a minha noiva, Samira, por todo amor e apoio, sua presença foi fundamental.

Agradeço o orientador Prof. Dr. Marcos Vinícius Cândido Henriques, pelo apoio e orientação durante todo o processo.

Agradeço a Banca Examinadora pela contribuição e pela disponibilidade em avaliar este trabalho.

Agradeço ao meu avô Vitalzinho (*in memoriam*), que ensinou pelo exemplo e ficou marcado em mim de um jeito que até hoje penso: ‘se ele estivesse aqui, ia dizer tal coisa’. A presença dele continua viva na minha mente e no que me tornei.

RESUMO

O presente trabalho realiza uma revisão bibliográfica sobre biocombustíveis e sua aplicação em motores a combustão, com foco nos principais tipos de biocombustíveis utilizados, eficiência térmica e implicações ambientais. A pesquisa baseia-se na metodologia PRISMA, utilizando filtros de data (2016–2025) e critérios quantitativos como a Média de Citações por Ano (MCA). São selecionados artigos científicos experimentais e estudos de caso relevantes, excluindo-se revisões generalistas. Os resultados indicam que os biocombustíveis apresentam desempenho compatível com motores a combustão interna convencionais, com destaque para o biodiesel e o etanol, que demonstram boa eficiência energética e menores emissões. Conclui-se que os biocombustíveis são alternativas viáveis para reduzir a dependência de combustíveis fósseis, embora haja desafios técnicos e logísticos a serem superados.

Palavras-chave: biodiesel; etanol; eficiência térmica; sustentabilidade; emissões.

ABSTRACT

This study conducts a literature review on biofuels and their application in combustion engines, focusing on the main types of biofuels used, thermal efficiency, and environmental implications. The research is based on the PRISMA methodology, using date filters (2016–2025) and quantitative criteria such as the Average Citations per Year (ACY). Experimental scientific articles and relevant case studies are selected, excluding generalist reviews. The results indicate that biofuels show performance compatible with conventional internal combustion engines, with emphasis on biodiesel and ethanol, which demonstrate good energy efficiency and lower emissions. It is concluded that biofuels are viable alternatives to reduce dependence on fossil fuels, although there are technical and logistical challenges to be overcome.

Keywords: biodiesel; ethanol; thermal efficiency; sustainability; emissions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	–	Misturas comuns de etanol combustível (E5 a E100), composição e uso por país....	15
Figura 2	–	Demanda por combustíveis renováveis por país, cenário principal, 2024.....	17
Figura 3	–	Demanda por combustíveis renováveis por setor, cenário principal, 2023.....	19
Figura 4	–	Localização das plantas de biocombustíveis em operação no Brasil.....	21
Figura 5	–	Produção anual de biodiesel (B100) no Brasil (2015–2022).....	22
Figura 6	–	Produção anual de etanol no Brasil (2015–2025).....	23
Figura 7	–	Metas anuais do RenovaBio (2024–2033).....	24
Figura 8	–	Produção anual de etanol no estado do Rio Grande do Norte (2015–2025).....	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Trabalhos relacionados a biodiesel e motores a combustão interna.....	35
Tabela 2	–	Trabalhos relacionados a etanol e motores a combustão interna.....	38

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 BIOCOMBUSTÍVEIS.....	13
2.1 Introdução.....	13
2.1.1 Biodiesel.....	14
2.1.2 Etanol.....	14
2.1.3 Biometano.....	16
2.2 Panorama dos biocombustíveis.....	16
2.2.1 Cenário global.....	16
2.2.2 Cenário brasileiro.....	19
2.2.2.1 RenovaBio.....	23
2.2.3 Cenário norte-riograndense.....	25
3 MOTORES A BIOCOMBUSTÍVEIS.....	27
3.1 Histórico dos motores a biocombustíveis.....	27
3.1.1 Primeiros motores.....	27
3.1.2 Pró-Álcool.....	28
3.3 Tipos de motores.....	28
3.4 Eficiência típica.....	29
3.5 Veículos Flex.....	29
3.6 Fabricantes.....	30
4 METODOLOGIA.....	32
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	33
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	40
REFERÊNCIAS.....	41

1 INTRODUÇÃO

A indústria automobilística mundial vem sendo constantemente pressionada a se adequar às normas de emissão de poluentes atmosféricos, como monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x) e material particulado (MP). Considera-se que os principais combustíveis utilizados em motores a combustão são de origem fóssil e não-renovável, o que acentua a preocupação com a escassez de recursos naturais e o agravamento da poluição ambiental. Além disso, a necessidade de cumprimento das normas ambientais, como as regulamentações europeias (EURO 1 a 7), norte-americanas (Environmental Protection Agency – EPA) e brasileiras (Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE), tem exigido modificações nos motores, muitas vezes com impacto negativo no desempenho (PROCONVE, 2025).

Nesse contexto, o uso de biocombustíveis como o bioetanol surge como uma alternativa viável para a substituição parcial ou total dos combustíveis fósseis, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa e promovendo maior sustentabilidade ambiental. O bioetanol tem se destacado principalmente em aplicações em motores do ciclo Otto (BARBOSA, 2023), mas também tem sido explorado em motores do ciclo Diesel, mediante adaptações tecnológicas (BORGES, 2024).

Produzido majoritariamente a partir da fermentação de biomassa vegetal — como a cana-de-açúcar e, em menor escala, o milho —, o bioetanol apresenta vantagens significativas frente aos combustíveis convencionais. Entre os principais benefícios, destacam-se a redução na emissão de poluentes atmosféricos e o fato de ser um recurso renovável e potencialmente neutro em carbono (GUEDES; SANTOS; DOS SANTOS, 2021). Além disso, avanços recentes têm possibilitado sua utilização em motores originalmente projetados para funcionar com gasolina ou mesmo diesel, mediante o uso de misturas, ajustes no sistema de injeção e modificações na câmara de combustão (MOTTA et al., 2025).

Diante desse cenário, o presente trabalho realiza uma revisão bibliográfica sistemática sobre o uso do etanol e do biodiesel em motores a combustão, com foco principal em motores do ciclo Otto. A pesquisa investiga os avanços tecnológicos, as implicações ambientais, os benefícios e as limitações associadas à aplicação desses biocombustíveis, bem como as perspectivas para sua adoção em maior escala, à luz do atual contexto energético e ambiental.

2 BIOCOMBUSTÍVEIS

A crescente demanda por alternativas sustentáveis aos combustíveis fósseis tem impulsionado o desenvolvimento e a utilização dos biocombustíveis no Brasil. Esses combustíveis, obtidos a partir de fontes renováveis de biomassa vegetal ou resíduos orgânicos, representam uma estratégia viável para reduzir as emissões de gases de efeito estufa, diminuir a dependência do petróleo e fortalecer a segurança energética nacional (BRASIL, 2025a).

Entre os principais biocombustíveis utilizados no país, destacam-se o biodiesel e o etanol. Ambos possuem papel fundamental na matriz energética brasileira e são regulamentados pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), que estabelece os padrões de qualidade, segurança e comercialização, além de monitorar a produção e o fornecimento em âmbito nacional (BRASIL, 2025b).

O Brasil se destaca como um dos maiores produtores e consumidores de biocombustíveis do mundo, resultado de políticas públicas consolidadas e da ampla disponibilidade de matéria-prima agrícola. De acordo com os dados estatísticos disponibilizados pela ANP, a produção nacional de biodiesel e etanol tem crescido de forma contínua, impulsionada pela demanda interna e por metas ambientais estabelecidas em programas como o RenovaBio (BRASIL, 2025b).

Além dos benefícios ambientais, o setor de biocombustíveis contribui significativamente para a geração de empregos, desenvolvimento regional e valorização da agricultura familiar, especialmente em áreas rurais. Essa cadeia produtiva integra milhares de pequenos produtores, indústrias de processamento e distribuidoras de combustíveis, consolidando-se como um dos pilares da transição energética no país (BRASIL, 2025c).

2.1 Introdução

Os biocombustíveis desempenham um papel crucial na mitigação das mudanças climáticas, pois, ao contrário dos combustíveis fósseis, são produzidos a partir de matérias-primas renováveis que absorvem dióxido de carbono (CO₂) durante seu crescimento. Esse ciclo de absorção e emissão contribui para a redução das emissões líquidas de gases de efeito estufa (GEE), auxiliando no combate ao aquecimento global (RAÍZEN, 2021).

Além disso, a utilização de biocombustíveis promove a diversificação da matriz energética, reduzindo a dependência de fontes fósseis e fortalecendo a segurança energética. No Brasil, políticas públicas como o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel

(PNPB) e a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) têm incentivado a produção e o consumo de biocombustíveis, consolidando o país como um dos líderes mundiais nesse setor (GOV.BR, 2021).

Entretanto, é importante considerar os impactos ambientais associados à produção de biocombustíveis, como o uso intensivo de recursos hídricos e a possibilidade de desmatamento para expansão de áreas cultiváveis. Portanto, é essencial que a produção seja realizada de forma sustentável, com práticas agrícolas responsáveis e respeito às áreas de preservação ambiental (GUITARRARA, 2025).

2.1.1 Biodiesel

O biodiesel é um dos principais tipos de biocombustíveis utilizados no Brasil. Ele é fabricado a partir de óleos vegetais (como soja, mamona ou dendê) ou até de gordura animal. Esse combustível pode ser utilizado em motores a diesel, seja puro ou misturado com diesel mineral, sem necessidade de grandes adaptações (MME, 2025).

No Brasil, a produção de biodiesel é regulada pela ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis), que estabelece regras para garantir a qualidade do produto e a sustentabilidade do processo produtivo. Um dos pontos fortes do biodiesel é que ele pode ser produzido regionalmente, aproveitando culturas agrícolas locais, o que também fortalece a economia de pequenas e médias propriedades rurais (BRASIL, 2025a).

Além disso, o biodiesel reduz significativamente as emissões de poluentes como enxofre e material particulado, o que contribui para melhorar a qualidade do ar e diminuir problemas respiratórios nas grandes cidades (MME, 2025).

2.1.2 Etanol

O etanol é outro dos principais biocombustíveis utilizados no Brasil. É obtido, em sua maioria, da cana-de-açúcar, e em menor escala do milho, sendo utilizado em motores a combustão interna, tanto na forma hidratada (diretamente) quanto anidro (misturado à gasolina) (BRASIL, 2025a).

No Brasil, sua produção e uso são amplamente difundidos, apoiados por uma infraestrutura consolidada de distribuição e pela tecnologia dos veículos flex, que permite o uso de etanol ou gasolina em qualquer proporção. A utilização do etanol como combustível reduz significativamente as emissões de gases do efeito estufa, especialmente o dióxido de

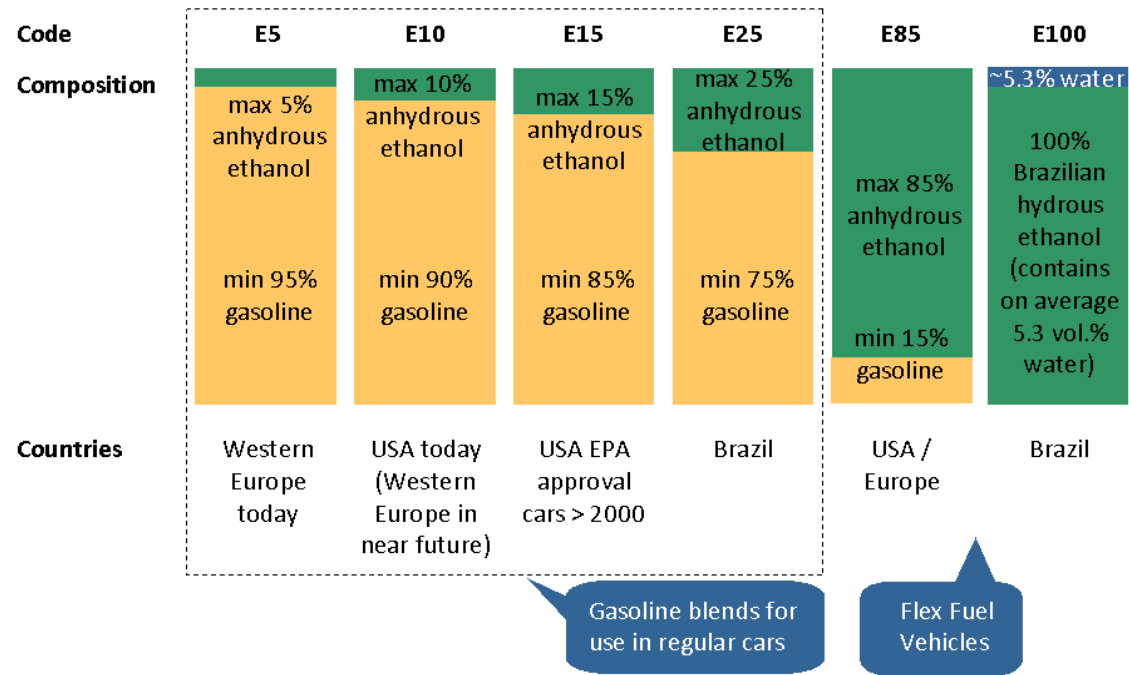
carbono (CO₂), e contribui para a diminuição da dependência de combustíveis fósseis (BRASIL, 2025a).

A política nacional de biocombustíveis é reforçada pelo programa RenovaBio, criado pelo Governo Federal e regulamentado pela ANP. O programa define metas compulsórias de redução de emissões para as distribuidoras de combustíveis e promove o comércio dos Créditos de Descarbonização (CBIOs), incentivando práticas sustentáveis e reconhecendo a performance ambiental dos produtores de etanol (BRASIL, 2025b).

Além disso, o etanol fortalece o setor agrícola e gera emprego em diversas regiões do país, principalmente nas zonas rurais, onde se concentra a produção da cana-de-açúcar (BRASIL, 2025c).

A Figura 1 ilustra as principais misturas de etanol combustível utilizadas internacionalmente, classificadas conforme a porcentagem de etanol anidro ou hidratado presente no combustível e sua aplicação por região. Enquanto países como os Estados Unidos e membros da União Europeia utilizam majoritariamente misturas com baixos teores de etanol, como E5, E10 ou E15, o Brasil se destaca pelo uso do E100 — etanol hidratado puro — viabilizado por uma frota de veículos flex e por políticas públicas de incentivo à substituição da gasolina. Essa diferenciação evidencia a liderança brasileira no aproveitamento do etanol como vetor de transição energética, ao mesmo tempo em que revela o potencial de expansão de sua adoção em outros mercados.

Figura 1 – Misturas comuns de etanol combustível (E5 a E100), composição e uso por país.



Fonte: Wikipedia, 2025.

Recentemente, em maio de 2025, o Brasil deu mais um passo significativo na ampliação do uso do etanol com a autorização oficial para a comercialização da mistura E30 — composta por até 30% de etanol anidro e 70% de gasolina. Essa nova proporção foi aprovada pela ANP, em 2025, mediante comprovação de viabilidade técnica, segurança e compatibilidade com veículos da frota nacional. Embora oficialmente justificada por motivos ambientais e técnicos, a liberação do E30 também pode ser interpretada como uma resposta econômica à alta nos preços da gasolina, funcionando como uma estratégia indireta de contenção da inflação dos combustíveis. Como o etanol anidro costuma ter custo inferior ao da gasolina, o aumento de sua proporção nas misturas representa uma forma de baratear o combustível final na bomba, sem necessidade de subsídios diretos (BRASIL, 2025a).

2.1.3 Biometano

O biometano é um biocombustível gasoso obtido a partir da purificação do biogás, que por sua vez é gerado pela decomposição de matéria orgânica, como resíduos agrícolas, esgoto sanitário ou resíduos sólidos urbanos. Após o processo de purificação, o biometano adquire características semelhantes às do gás natural fóssil, podendo ser utilizado como substituto em veículos, indústrias e na geração de energia elétrica e térmica (BRASIL, 2025c).

No Brasil, a ANP regula a produção e o fornecimento de biometano, estabelecendo requisitos técnicos e de qualidade para garantir a segurança do uso e a viabilidade comercial do combustível. Essa regulação inclui o controle de contaminantes e a padronização da composição do gás purificado, assegurando sua compatibilidade com as redes de distribuição de gás natural (BRASIL, 2025a).

Além de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, o uso do biometano permite o reaproveitamento de resíduos que, de outra forma, seriam descartados no meio ambiente. Isso o torna uma solução energética eficiente e alinhada com práticas de economia circular e sustentabilidade, segundo a ANP (BRASIL, 2025c).

2.2 Panorama dos biocombustíveis

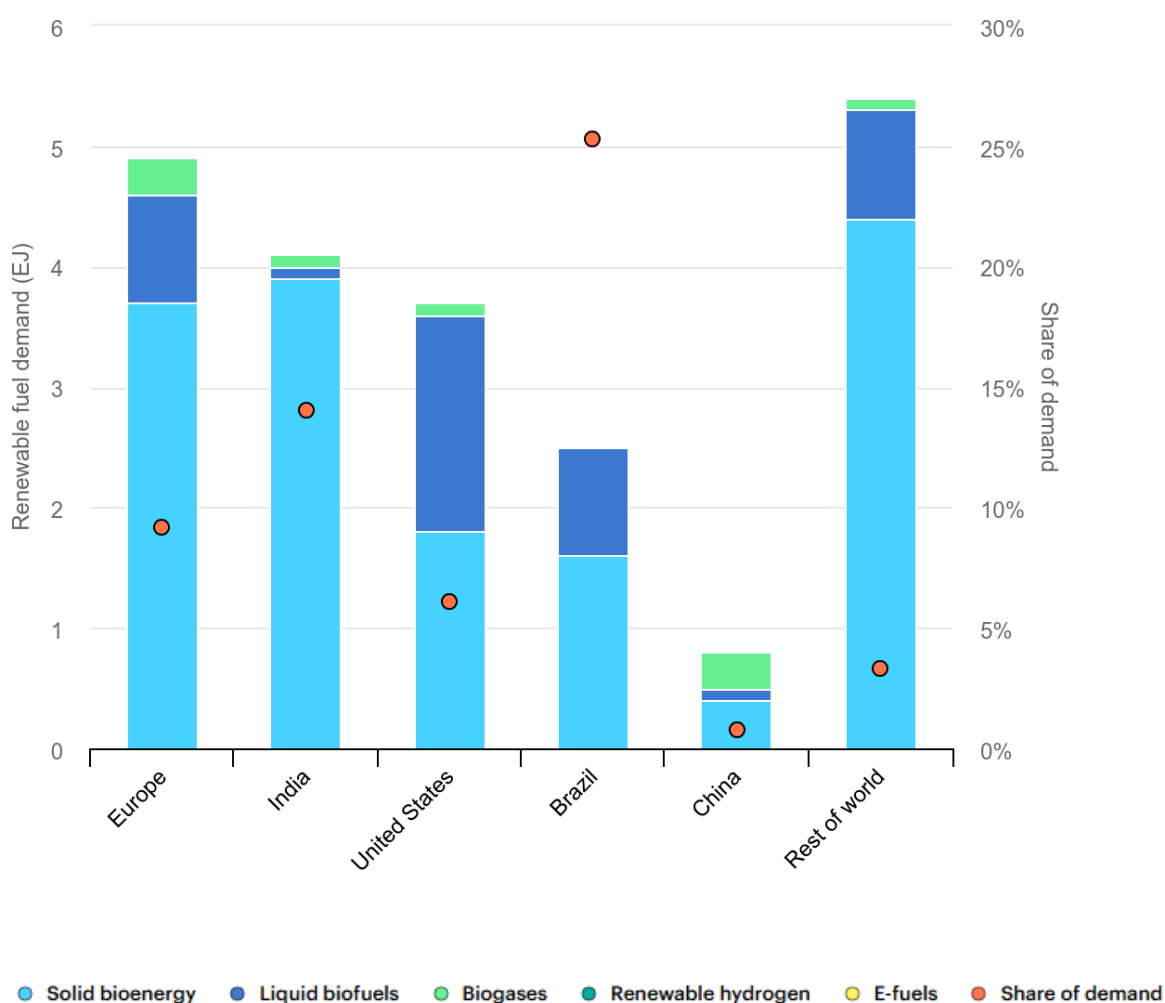
2.2.1 Cenário global

De acordo com a International Energy Agency (IEA, 2024), o uso global de combustíveis renováveis cresceu como alternativa para reduzir emissões em setores difíceis de eletrificar. Em 2023, Europa, Índia e Estados Unidos lideraram essa demanda, seguidos

pelo Brasil, que se destacou no uso de biocombustíveis líquidos devido à sua longa experiência com etanol e infraestrutura consolidada.

Como é mostrado na Figura 2, em 2023, a maior demanda por combustíveis renováveis foi observada na Europa, seguida por Índia e Estados Unidos, evidenciando o avanço de políticas energéticas voltadas à transição verde nessas regiões (IEA, 2024a). O Brasil aparece em quarto lugar, com destaque para o uso intensivo de biocombustíveis líquidos, resultado de décadas de experiência acumulada com o etanol e uma estrutura consolidada de produção e distribuição. Essa posição reflete não apenas o compromisso nacional com a sustentabilidade, mas também a capacidade técnica e agrícola do país em oferecer soluções energéticas renováveis.

Figura 2 – Demanda por combustíveis renováveis por país, cenário principal, 2024.



Fonte: IEA, 2024a.

Além disso, a análise do gráfico indica que a composição do consumo varia consideravelmente entre os países, com a Europa utilizando uma gama diversificada de fontes — como biomassa sólida, biogás e hidrogênio renovável — enquanto o Brasil concentra sua matriz em biocombustíveis líquidos. Essa diferenciação ressalta a influência de fatores geográficos, tecnológicos e regulatórios nas estratégias de cada região. Portanto, compreender essas particularidades é essencial para o planejamento de políticas mais eficazes e adaptadas às realidades locais, com vistas à expansão do uso de combustíveis de baixo carbono.

Essa diversidade de trajetórias evidencia a necessidade de políticas energéticas flexíveis, que considerem as vocações e limitações regionais. Enquanto países como Alemanha e Suécia avançam na integração do hidrogênio verde em setores industriais, outras nações priorizam o fortalecimento de cadeias produtivas agrícolas para produção de etanol ou biodiesel.

Além disso, a competitividade dos biocombustíveis frente aos combustíveis fósseis ainda depende fortemente de incentivos fiscais, subsídios e da precificação adequada do carbono. A incorporação de métricas de pegada de carbono e o desenvolvimento de certificações internacionais de sustentabilidade têm se mostrado ferramentas importantes para fomentar mercados mais exigentes, especialmente na União Europeia.

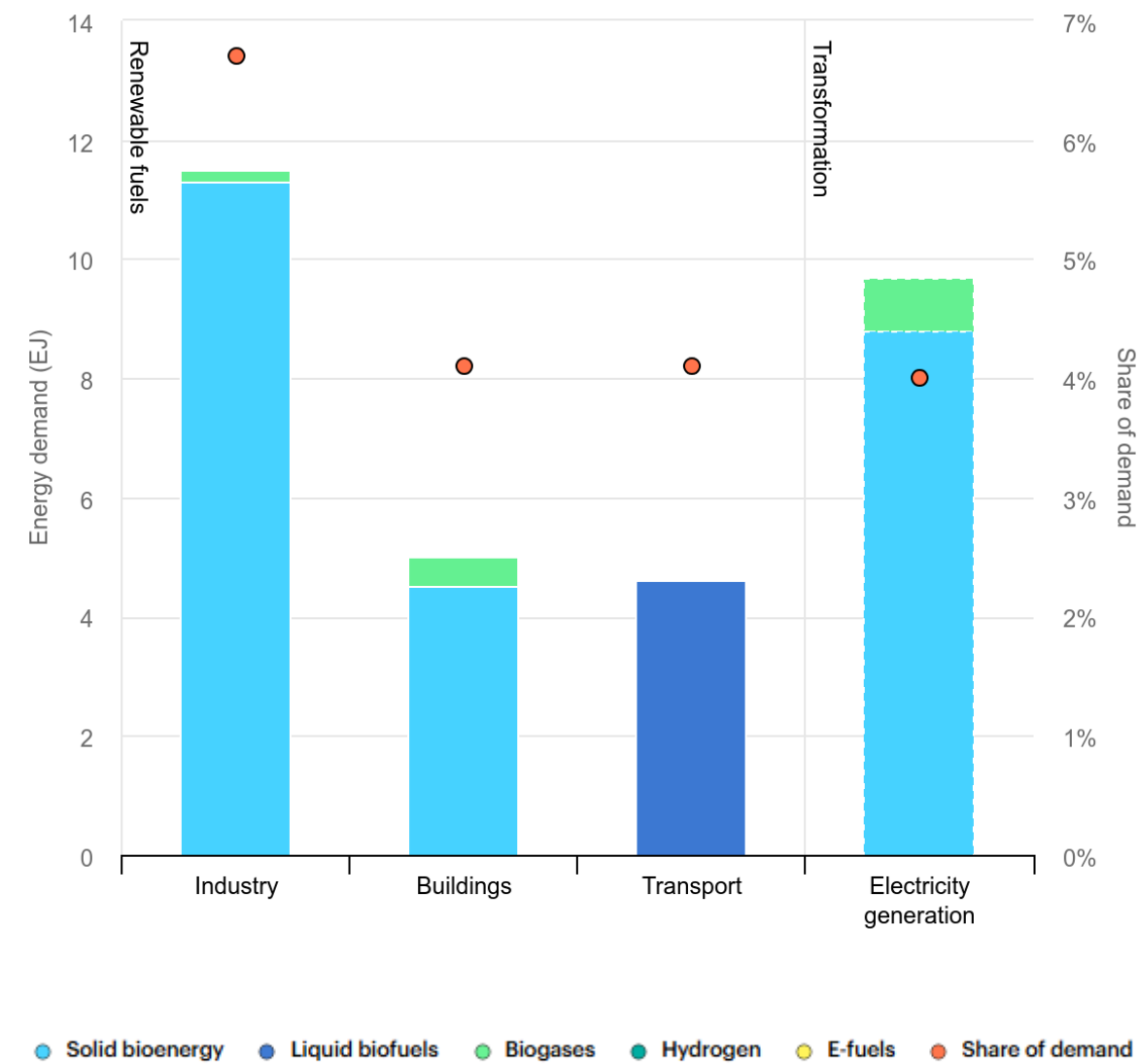
Portanto, o cenário global se apresenta como um mosaico dinâmico, onde o sucesso da transição energética com biocombustíveis dependerá da integração entre inovação tecnológica, apoio institucional e mecanismos de cooperação internacional. Tais elementos são fundamentais para garantir segurança energética, redução de emissões e desenvolvimento sustentável em longo prazo (IEA, 2024a).

A Figura 3 reforça essa tendência ao apresentar a distribuição setorial da demanda por combustíveis renováveis em 2023, evidenciando que a indústria se mantém como o principal consumidor, impulsionada pela necessidade de substituir fontes fósseis em processos térmicos e industriais de alta intensidade energética. A geração de eletricidade aparece em segundo lugar, refletindo o avanço da bioenergia sólida e do biogás como alternativas viáveis para a produção de energia elétrica em sistemas híbridos e descentralizados.

Já os setores de edificações e transportes demonstram participação mais modesta, embora estratégica. O transporte, em particular, representa um dos maiores desafios para a descarbonização global, e sua baixa participação relativa indica que ainda há amplo espaço para a ampliação do uso de combustíveis renováveis, especialmente biocombustíveis líquidos, e-fuels e hidrogênio verde. Esses dados ressaltam a urgência de políticas públicas e

investimentos tecnológicos que aceleram a penetração dessas fontes em segmentos que historicamente dependem de derivados do petróleo (IEA, 2024b).

Figura 3 – Demanda por combustíveis renováveis por setor, cenário principal, 2024.



Fonte: IEA, 2024b.

2.2.2 Cenário brasileiro

O Brasil possui uma das matrizes energéticas mais limpas do mundo, com destaque para a participação expressiva dos biocombustíveis. De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2024), em 2023, a produção total de etanol atingiu 35,3 bilhões de litros, sendo 29,5 bilhões provenientes da cana-de-açúcar e 5,8 bilhões do milho, representando um aumento de 40% em relação a 2022. Essa expansão foi favorecida por condições climáticas propícias e pela crescente adoção do etanol de milho, que já representa 17% do consumo

interno do grão (EPE, 2024).

No setor de biodiesel, a produção nacional também se destacou, impulsionada por políticas públicas e avanços regulatórios. A mistura obrigatória de biodiesel ao diesel (atualmente em B13) é constantemente avaliada pelo governo federal. Os testes técnicos coordenados pelo Ministério de Minas e Energia (MME) e realizados pelo Instituto Nacional de Tecnologia (INT) indicaram viabilidade técnica e estabilidade da mistura B15 em motores automotivos, inclusive sob diferentes condições de armazenamento e com uso de aditivos antioxidantes (MME, 2025).

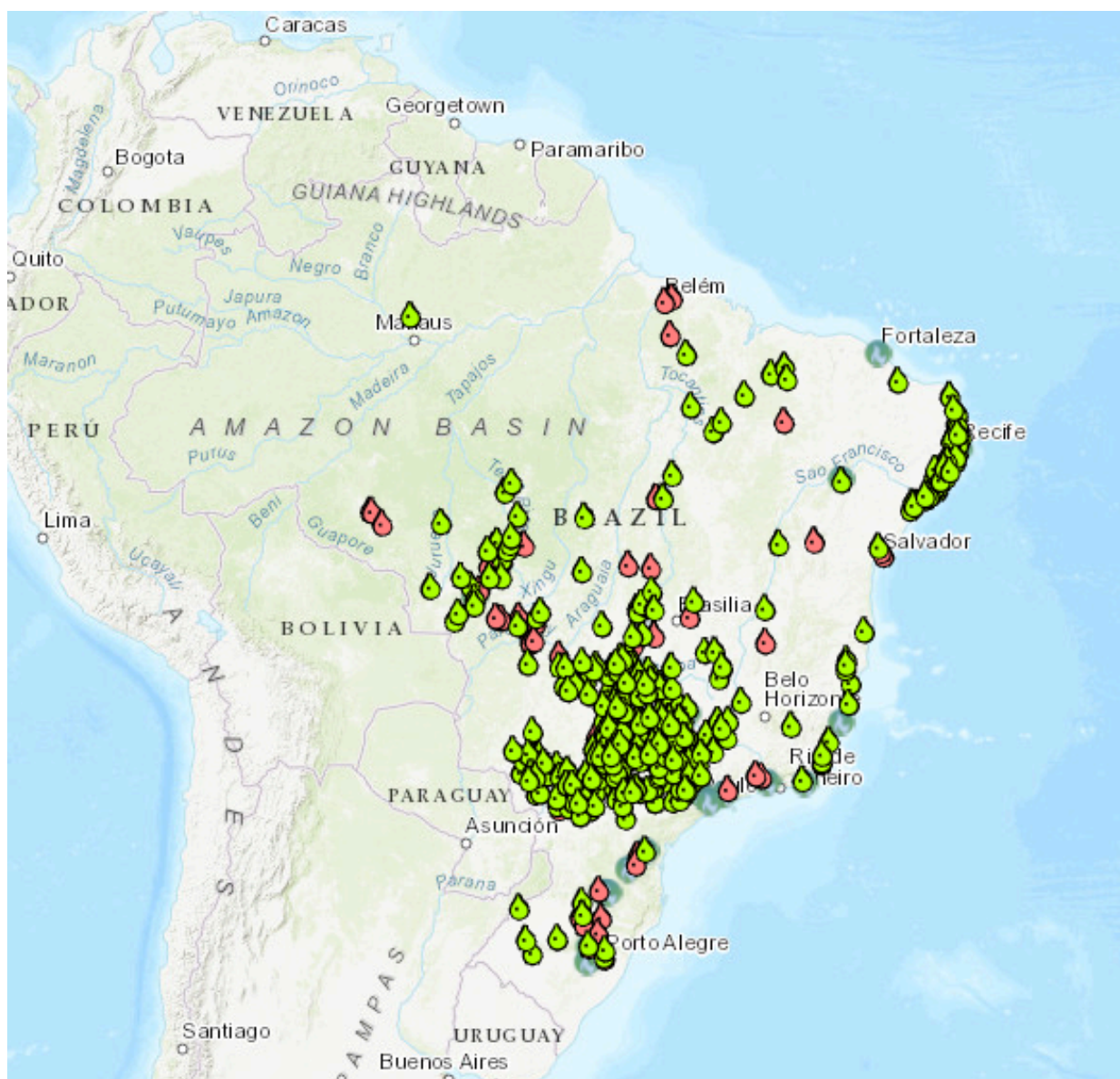
A implementação do B15 tem sido discutida com base em laudos técnicos validados por instituições como a UFRJ e a ANP. A ANP, inclusive, promoveu ajustes normativos para elevar os padrões de estabilidade oxidativa do biodiesel, exigindo testes obrigatórios e uso de aditivos, garantindo qualidade independentemente da matéria-prima utilizada (MME, 2025).

Além da produção e da segurança técnica, o uso de biocombustíveis tem gerado impactos relevantes na redução de emissões. Segundo a EPE (2024), somente em 2023, o uso de bioenergia no Brasil evitou a emissão de cerca de 100 milhões de toneladas de CO₂ equivalente. A continuidade dessas políticas, como o RenovaBio, e o crescimento do setor consolidam os biocombustíveis como ferramenta essencial para a transição energética brasileira (EPE, 2024).

A Figura 4 apresenta a localização das plantas de biocombustíveis em operação no Brasil, conforme dados georreferenciados disponibilizados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Observa-se uma forte concentração de unidades no Centro-Sul do país, especialmente nos estados de São Paulo, Goiás, Mato Grosso e Minas Gerais, regiões historicamente ligadas à produção de etanol e biodiesel devido à disponibilidade de matéria-prima agrícola, infraestrutura logística e incentivos regionais.

A distribuição menos densa nas regiões Norte e Nordeste evidencia disparidades estruturais que ainda limitam a expansão da cadeia produtiva nesses territórios, mas que também apontam oportunidades para descentralização e inclusão produtiva com o apoio de políticas públicas específicas. Esse mapeamento reforça a relevância do planejamento territorial na consolidação dos biocombustíveis como vetor de desenvolvimento sustentável no Brasil.

Figura 4 – Localização das plantas de biocombustíveis em operação no Brasil.



Fonte: EPE WebMap (2025).

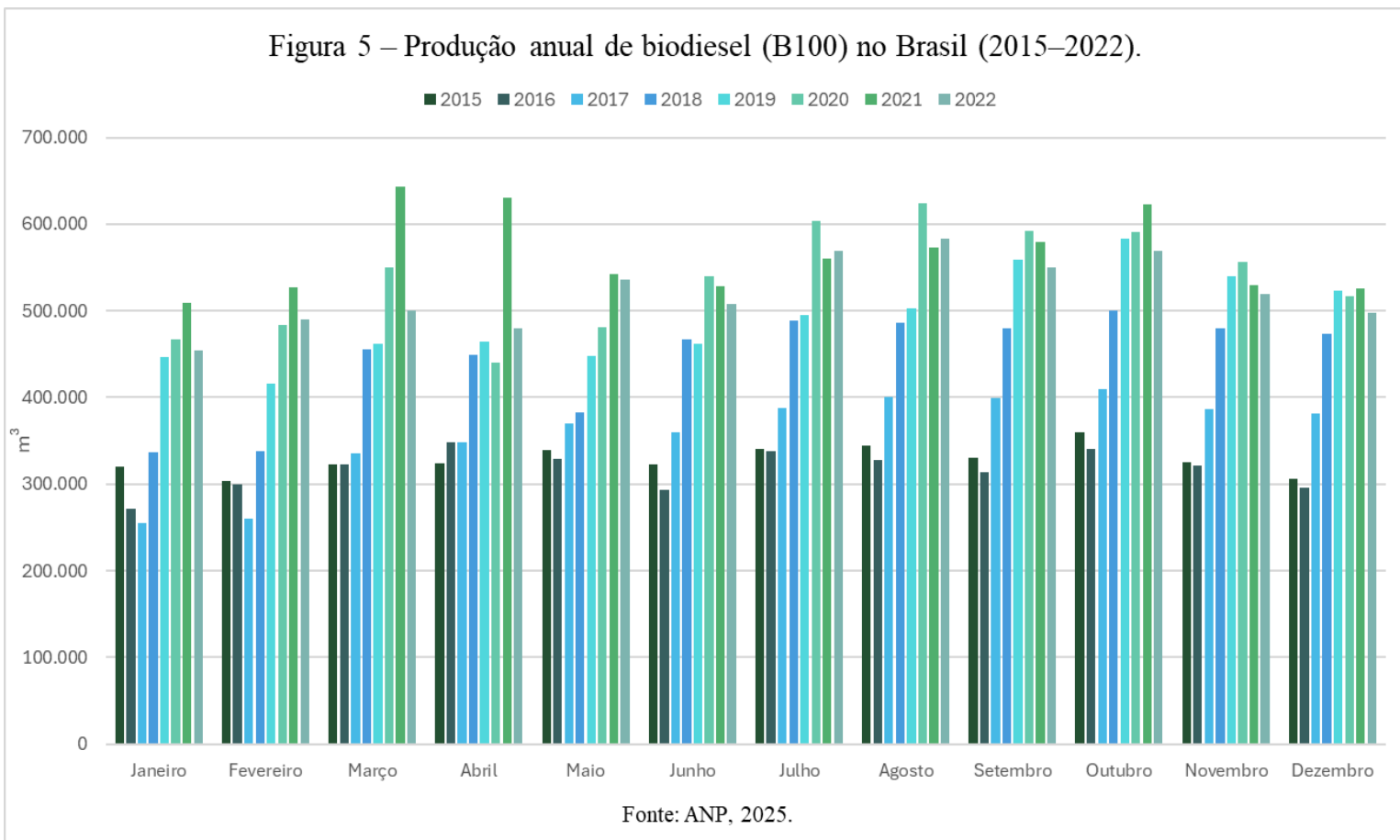
Legenda:

Gota verde: Centro de produção de Etanol

Gota vermelha: Centro de produção de Biodiesel

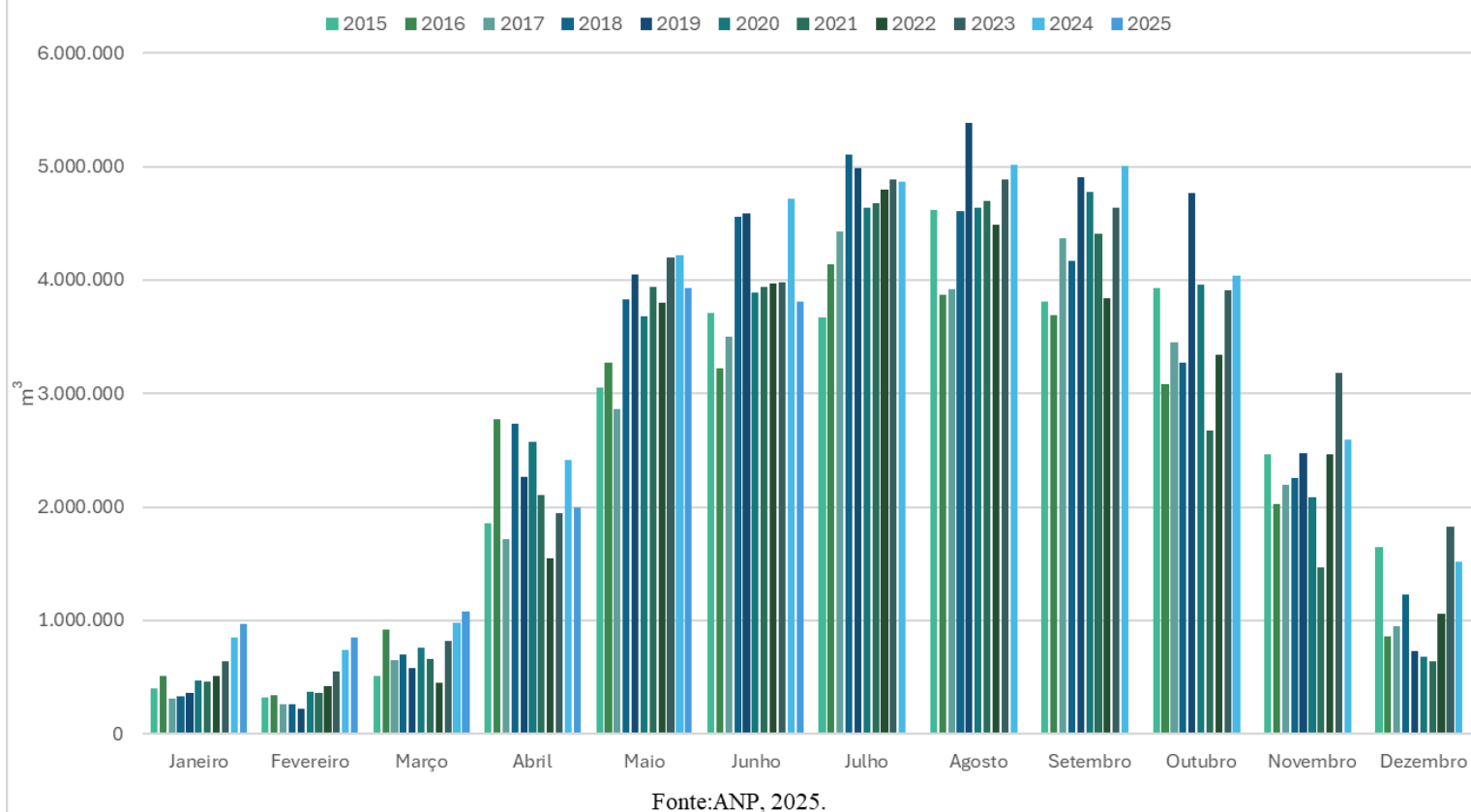
A Figura 5 apresenta a produção anual de biodiesel (B100) no Brasil entre os anos de 2015 e 2022, em metros cúbicos. Observa-se um crescimento gradual ao longo do período, os meses de maior produção concentram-se entre junho e outubro, indicando um padrão sazonal. Essa evolução está diretamente relacionada ao fortalecimento de políticas públicas federais, como o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB), e à ampliação progressiva da mistura obrigatória de biodiesel ao diesel fóssil, que passou de B2 em 2008 para B13 em 2024, conforme regulado pela ANP (ANP, 2025a).

Figura 5 – Produção anual de biodiesel (B100) no Brasil (2015–2022).



A Figura 6 mostra a produção anual nacional de etanol no Brasil entre os anos de 2015 e 2025, em metros cúbicos, com destaque para o crescimento da produção a partir do milho, especialmente nas regiões Centro-Oeste e Sul. Embora o etanol de cana-de-açúcar continue sendo predominante, sua produção é sensível às variações climáticas, como demonstrado pelas oscilações em 2021 e 2022. O aumento gradual da produção total, com estabilidade em 2024 e crescimento em 2025, reflete a consolidação do RenovaBio e a maior eficiência das usinas no aproveitamento da biomassa (ANP, 2025b).

Figura 6 – Produção anual de etanol no Brasil (2015–2025).



2.2.2.1 RenovaBio

O RenovaBio, instituído pela Lei nº 13.576/2017, é a principal política pública brasileira voltada para a expansão dos biocombustíveis com foco na descarbonização da matriz de transportes. Seu objetivo central é reconhecer o papel estratégico de todos os biocombustíveis na matriz energética nacional e contribuir para o cumprimento dos compromissos do Brasil no Acordo de Paris, mediante a indução de ganhos de eficiência energética e ambiental no setor (BRASIL, 2025b).

A principal ferramenta do programa é a criação dos Créditos de Descarbonização (CBIOs), ativos ambientais que representam uma tonelada de CO₂ evitada e são emitidos por produtores e importadores de biocombustíveis que comprovam a eficiência ambiental de suas produções. Esses créditos são comercializados na B3 e devem ser adquiridos por distribuidores de combustíveis fósseis como forma de compensar suas emissões de CO₂. O

sistema é regulado pela ANP, que define anualmente as metas compulsórias de aquisição de CBIOs com base na participação de mercado de cada distribuidora (BRASIL, 2025b).

A figura 7 apresenta as metas nacionais projetadas para o período de 2024 a 2033, detalhando a intensidade de carbono (IC) pretendida em gCO₂ por MJ, os volumes anuais estimados de CBIOs a serem apresentados, e os intervalos de tolerância superior e inferior definidos para cada ano.

Figura 7 – Metas anuais do RenovaBio, intensidade de carbono projetada e intervalos de tolerância (2024–2033).

Ano	Intensidade de Carbono Projetada (gCO₂/MJ)	Redução de IC Pretendida (base 2018)	Meta Anual (Milhões de CBIOs)	Intervalos de Tolerância (Limites Superior e Inferior)
2024	72,77	-0,80%	38,78	–
2025	71,7	-2,20%	40,39	36,17 – 48,94
2026	69,97	-4,60%	48,09	40,88 – 55,30
2027	68,74	-6,70%	52,37	44,51 – 60,23
2028	67,7	-8,40%	56,74	47,95 – 64,87
2029	66,68	-10,00%	61,41	52,05 – 70,43
2030	66,02	-10,80%	64,84	54,47 – 73,70
2031	65,56	-10,60%	67,13	57,06 – 77,20
2032	65,44	-10,80%	68,81	58,49 – 79,14
2033	65,22	-11,10%	71,29	60,59 – 81,98

Fonte: BRASIL, 2025c.

Segundo o Ministério de Minas e Energia (MME), o RenovaBio promove a previsibilidade e a estabilidade regulatória, essenciais para estimular novos investimentos em biocombustíveis. Em 2025, a meta nacional de descarbonização estipulada é de 40,39 milhões de CBIOs, o equivalente à mitigação de 40,39 milhões de toneladas de CO₂ equivalente. O

programa também contribui para a valorização ambiental e econômica dos biocombustíveis, reforçando a segurança energética e a geração de empregos no campo (BRASIL, 2025c).

Essa política inovadora posiciona o Brasil como referência internacional em transição energética sustentável, ao mesmo tempo em que fortalece os mercados de etanol, biodiesel e biometano (BRASIL, 2025c).

2.2.3 Cenário norte-riograndense

Apesar da forte tradição do Brasil na produção de biocombustíveis, o Rio Grande do Norte apresenta uma participação ainda modesta nesse segmento. No caso do biodiesel, os dados da ANP (2025b) revelam que a produção estadual de B100 foi registrada apenas em 2015, totalizando 1.739 m³. Desde então, não há registros específicos para o estado, pois a ANP (2025b) passou a agregar os dados por região quando há menos de três produtores ativos ou volumes insignificantes – situação que persiste no RN desde 2016. Essa ausência de dados indica a descontinuidade da produção local, sugerindo a inexistência de plantas industriais de biodiesel em operação após 2015. Além disso, a mudança no modelo de comercialização, com a substituição de leilões públicos por contratos diretos a partir de 2023, dificultou ainda mais o monitoramento individualizado de estados com produção incipiente, como é o caso do Rio Grande do Norte.

Embora o estado não se destaque na produção de biodiesel, a região Nordeste como um todo vem apresentando crescimento expressivo no setor. Em 2022, a produção regional foi de aproximadamente 454 mil m³, subindo para 631,5 mil m³ em 2023 e alcançando 790,4 mil m³ em 2024 – um aumento acumulado de 24,9% no período. Esses números demonstram o potencial produtivo da região, ainda que o RN não tenha conseguido se inserir de forma significativa nesse mercado.

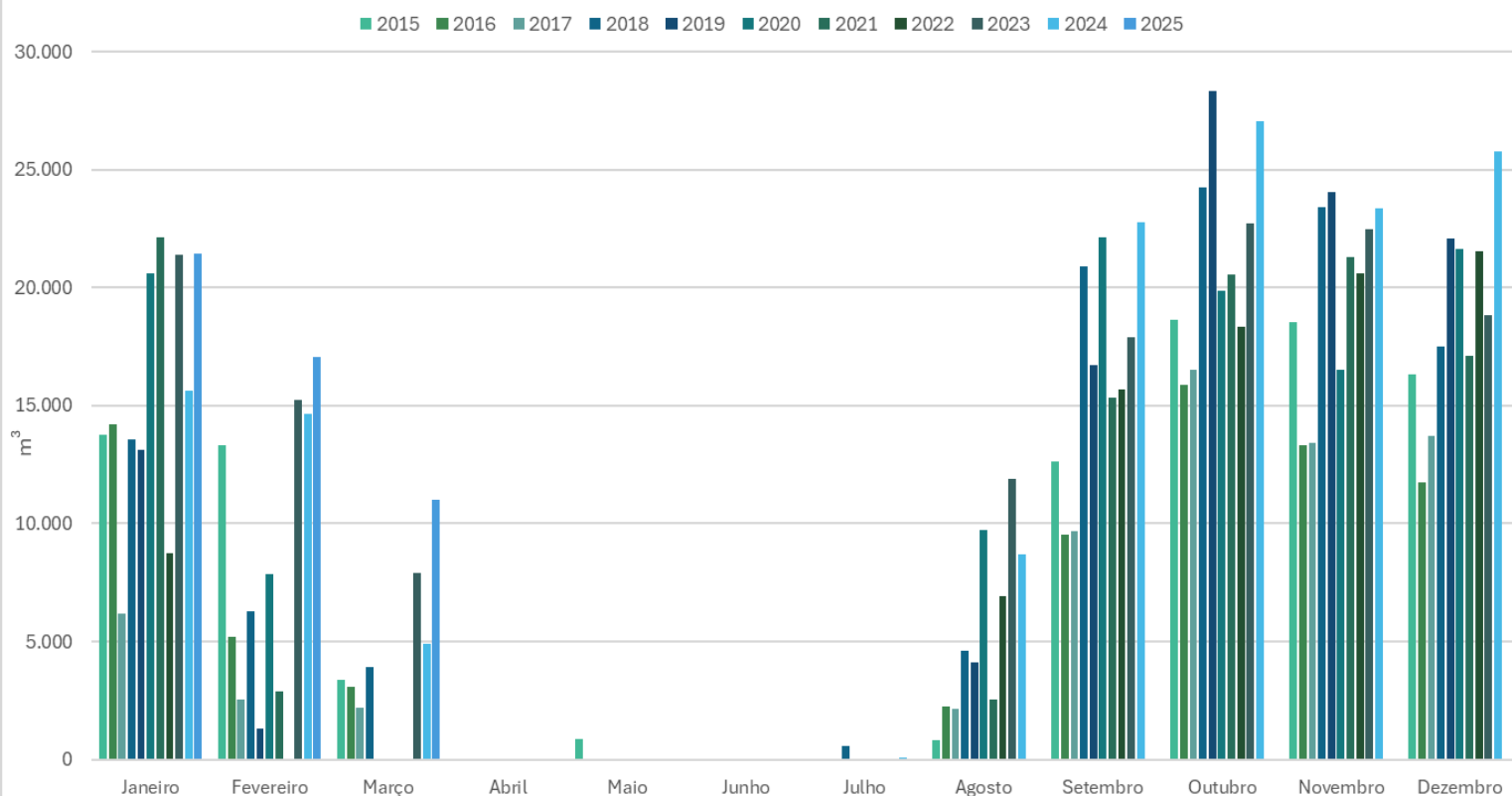
No que diz respeito ao etanol, o cenário é um pouco mais favorável. O Rio Grande do Norte mantém uma produção recorrente, embora em volumes reduzidos quando comparados aos grandes polos nacionais. Entre 2021 e 2023, a produção se manteve estável, com um leve crescimento em 2024 e 2025, possivelmente impulsionado por políticas de incentivo aos biocombustíveis e pela maior valorização do etanol na matriz energética brasileira. A análise da produção mensal entre 2015 e 2025 revela uma sazonalidade característica, com maiores volumes concentrados nos períodos de janeiro a março e setembro a dezembro, refletindo os ciclos de colheita e processamento da cana-de-açúcar, principal matéria-prima utilizada no

estado.

Apesar dessa produção contínua, o RN ainda depende significativamente de outros estados para atender à demanda regional, uma vez que sua capacidade produtiva é limitada. No entanto, o estado possui características favoráveis ao desenvolvimento do setor, como vocação agrícola e disponibilidade de matérias-primas alternativas, incluindo sorgo, milho e resíduos agroindustriais. A implantação de pequenas unidades de processamento descentralizado poderia representar uma oportunidade para fortalecer a participação do Rio Grande do Norte na cadeia de biocombustíveis, desde que acompanhada de políticas públicas adequadas e investimentos em infraestrutura.

Em síntese, o Rio Grande do Norte mantém uma produção relevante de etanol, com estabilidade ao longo dos anos, conforme mostra a Figura 8. Por outro lado, a ausência de produção de biodiesel constante evidencia uma subutilização do potencial produtivo estadual nesse segmento. A experiência de crescimento regional sugere que, com políticas públicas adequadas e superação de entraves logísticos, o estado pode ampliar sua atuação na cadeia dos biocombustíveis.

Figura 8 – Produção anual de etanol no estado do Rio Grande do Norte (2015–2025).



Fonte: ANP, 2025.

3 MOTORES A BIOCOMBUSTÍVEIS

A eficiência dos motores térmicos, incluindo aqueles que operam com biocombustíveis, é limitada por princípios termodinâmicos fundamentais. O principal deles é o Ciclo de Carnot, que estabelece o limite máximo teórico de eficiência de qualquer máquina térmica operando entre duas temperaturas. Segundo esse modelo, a eficiência depende da diferença entre a temperatura da fonte quente (combustão) e da fonte fria (meio ambiente), sendo impossível converter todo o calor em trabalho mecânico (MORAN, 2018).

Nos motores a combustão interna, como os de ciclo Otto e Diesel, essa limitação se manifesta na forma de perdas térmicas inevitáveis durante o processo de queima e exaustão dos gases. Ainda que os biocombustíveis apresentem vantagens ambientais e possam melhorar aspectos da combustão – como a redução de emissões e a maior resistência à detonação no caso do etanol –, eles continuam sujeitos ao mesmo limite de eficiência imposto pela segunda lei da termodinâmica. Assim, a busca por maior rendimento energético em motores a biocombustíveis envolve não apenas o aprimoramento do combustível, mas também o avanço em tecnologias que reduzam as perdas e operem mais próximas do limite teórico (RAÍZEN, 2021).

3.1 Histórico dos motores a biocombustíveis

3.1.1 Primeiros motores

O uso de biocombustíveis em motores de combustão interna remonta ao final do século XIX. Em 1893, Rudolf Diesel colocou em funcionamento o primeiro protótipo de seu motor, utilizando óleo de amendoim como combustível. Seu objetivo era desenvolver um motor eficiente que pudesse operar com óleos vegetais, visando beneficiar a agricultura e reduzir a dependência de combustíveis fósseis (BIODIESELBR, 2025a).

Apesar do sucesso inicial, a descoberta de grandes reservas de petróleo e a consequente redução dos custos dos derivados fósseis levaram à predominância desses combustíveis no século XX. No entanto, a crise do petróleo de 1973 reacendeu o interesse por fontes alternativas, destacando a importância dos biocombustíveis como opção viável para diversificar a matriz energética e reduzir a dependência do petróleo (GUITARRARA, 2025).

3.1.2 Pró-Álcool

No contexto da crise do petróleo de 1973, o Brasil lançou, em 14 de novembro de 1975, o Programa Nacional do Álcool (Pró-Álcool), por meio do Decreto nº 76.593. O programa visava estimular a produção de etanol a partir da cana-de-açúcar, substituindo parcialmente a gasolina e reduzindo a dependência de combustíveis fósseis (ANFAVEA, 2015).

O Pró-Álcool promoveu incentivos fiscais e financiamentos para produtores de cana-de-açúcar e indústrias automobilísticas, resultando na adaptação de motores para o uso exclusivo de etanol. Em 1979, foi lançado o Fiat 147, primeiro carro movido exclusivamente a álcool produzido em série no mundo (ANFAVEA, 2015). Apesar de enfrentar desafios nas décadas seguintes, o programa consolidou o Brasil como líder na utilização de biocombustíveis, estabelecendo as bases para o desenvolvimento de tecnologias como os veículos flex fuel (FRANCISCO, 2025).

3.3 Tipos de motores

A utilização de biocombustíveis em motores de combustão interna requer adaptações específicas conforme o tipo de combustível e o ciclo de funcionamento do motor. No Brasil, os principais biocombustíveis empregados são o etanol e o biodiesel, cada um associado a diferentes tipos de motores e aplicações.

Os motores do ciclo Otto, caracterizados pela ignição por centelha, são predominantemente utilizados em veículos leves e podem operar com gasolina, etanol ou uma mistura de ambos. Esses motores foram adaptados para o uso do etanol hidratado, especialmente durante o Programa Nacional do Álcool (Pró-Álcool), e evoluíram para os sistemas bicomcombustíveis (flex fuel), capazes de ajustar automaticamente a proporção de combustível utilizada, proporcionando maior flexibilidade ao consumidor (BRASIL ESCOLA, 2023).

Por outro lado, os motores do ciclo Diesel, que funcionam por ignição por compressão, são amplamente empregados em veículos pesados, como caminhões e ônibus, além de maquinários agrícolas e geradores de energia. Esses motores podem utilizar o biodiesel, um combustível renovável produzido a partir de óleos vegetais ou gorduras animais, que pode ser misturado ao diesel fóssil em diferentes proporções, como o B10 (10% de biodiesel) ou B20 (20% de biodiesel). Além disso, tecnologias mais recentes permitem o uso de diesel verde (HVO), um combustível renovável que possui propriedades semelhantes

ao diesel convencional, podendo ser utilizado em motores existentes sem a necessidade de modificações significativas (GOV.BR, 2021).

A diversidade de motores adaptados ao uso de biocombustíveis reflete o avanço tecnológico e a busca por alternativas mais sustentáveis no setor de transportes, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa e a diminuição da dependência de combustíveis fósseis.

3.4 Eficiência típica

A eficiência dos motores a biocombustíveis varia conforme o tipo de combustível utilizado e as características do motor. No caso do etanol, apesar de seu poder calorífico inferior ao da gasolina, suas propriedades físico-químicas proporcionam uma combustão mais limpa e eficiente. O etanol possui um índice de octanas elevado, o que permite maior resistência à detonação e melhor desempenho em motores de alta compressão, resultando em maior eficiência térmica (SEMIL, 2024).

Quanto ao biodiesel, sua utilização em motores do ciclo Diesel apresenta eficiência energética comparável ao diesel fóssil. Estudos indicam que a eficiência de conversão energética do biodiesel pode atingir até 85%, dependendo das condições operacionais e da qualidade do combustível. Além disso, o biodiesel contribui para a redução das emissões de gases poluentes, como monóxido de carbono e hidrocarbonetos não queimados, embora possa haver um aumento nas emissões de óxidos de nitrogênio (NOx) (UBRABIO, 2016).

É importante ressaltar que a eficiência dos motores a biocombustíveis também depende de fatores como a proporção de mistura com combustíveis fósseis, as condições de operação e a manutenção adequada dos motores. A adoção de tecnologias avançadas e o desenvolvimento de motores específicos para biocombustíveis têm potencial para melhorar ainda mais a eficiência e a sustentabilidade desses sistemas de propulsão.

3.5 Veículos Flex

A introdução dos veículos flex no Brasil representou um marco na indústria automobilística e na utilização de biocombustíveis. Em março de 2003, a Volkswagen lançou o Gol 1.6 Total Flex, primeiro carro nacional capaz de operar com qualquer proporção de gasolina e etanol, graças a um sistema de gerenciamento eletrônico que ajusta automaticamente a mistura de combustíveis (GOV.BR, 2023).

A tecnologia flex foi desenvolvida para oferecer aos consumidores maior liberdade na escolha do combustível, permitindo que optem por etanol, gasolina ou qualquer combinação

entre ambos, de acordo com o preço e a disponibilidade. Essa flexibilidade contribuiu para a rápida adoção dos veículos flex no mercado brasileiro, que, em poucos anos, passaram a representar a maioria dos automóveis vendidos no país (BOSCH, 2023).

Além da vantagem econômica, os veículos flex desempenham um papel importante na redução das emissões de gases de efeito estufa, especialmente quando abastecidos com etanol, um combustível renovável e de menor impacto ambiental. Estudos indicam que o uso do etanol pode reduzir em até 90% as emissões de CO₂ em comparação com a gasolina, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas (EXAME, 2024).

A evolução dos veículos flex também inclui o desenvolvimento de modelos híbridos, que combinam motores a combustão com sistemas elétricos, ampliando ainda mais a eficiência energética e a sustentabilidade no setor de transportes (JOTA, 2024).

3.6 Fabricantes

O Brasil abriga diversos fabricantes e fornecedores de motores e sistemas compatíveis com biocombustíveis, refletindo o compromisso do país com a sustentabilidade e a inovação tecnológica no setor automotivo.

A Bosch é uma das pioneiras no desenvolvimento de sistemas de injeção eletrônica para veículos flex, tendo introduzido essa tecnologia no Brasil em 2003. Desde então, a empresa já produziu mais de 13 milhões de unidades desse sistema, fornecendo para diversas montadoras e contribuindo significativamente para a popularização dos veículos flex no país (BOSCH, 2023).

A Horse Powertrain, uma joint venture entre a Renault e a Geely, iniciou em 2024 a produção do motor HR13 1.3 turbo flex em sua fábrica em São José dos Pinhais (PR). Esse propulsor, projetado especificamente para o mercado sul-americano, pode operar com gasolina ou etanol em qualquer proporção e está em conformidade com os padrões de emissões L8 (MOTOR1, 2024).

No segmento de máquinas agrícolas, a AGCO, detentora das marcas Valtra, Massey Ferguson e Fendt, investe anualmente cerca de US\$500 milhões em pesquisa e inovação. A empresa equipou suas máquinas com motores eletrônicos compatíveis com o padrão MAR1, que operam com biodiesel, e está avançando para o padrão MAR2 (BIODIESELBR, 2025b).

A John Deere, por sua vez, aprova desde 2001 o uso de biodiesel (B5) em seus motores. Atualmente, todos os motores da empresa, incluindo os certificados MAR-1, podem utilizar misturas com até 20% de biodiesel (B20), atendendo aos parâmetros estabelecidos

pela ANP (JOHN DEERE, 2025).

A Cummins, multinacional americana com forte presença no Brasil, produz uma ampla gama de motores para diversos segmentos, incluindo caminhões, ônibus, máquinas agrícolas e geradores de energia. A empresa também investe em tecnologias sustentáveis, como motores a hidrogênio, visando a redução das emissões de gases de efeito estufa (CUMMINS, 2025).

A MWM International, fabricante brasileira de motores a diesel e geradores de energia, atua em diversos mercados, incluindo o agrícola, industrial e marítimo. A empresa possui uma planta em São Paulo (SP) e exporta seus produtos para mais de 45 países (MWM, 2025).

A FPT Industrial, parte do IVECO Group, produz motores a diesel para aplicações em caminhões, ônibus, máquinas agrícolas e de construção, geração de energia e marítima. A empresa possui plantas e centros de pesquisa no Brasil, contribuindo para o desenvolvimento de soluções sustentáveis no setor automotivo (FPT INDUSTRIAL, 2025).

A presença dessas empresas no território nacional fortalece a cadeia produtiva automotiva brasileira, estimulando a geração de empregos qualificados, a transferência de tecnologia e o desenvolvimento de soluções adaptadas às condições locais de uso e combustíveis. Além disso, o investimento contínuo em pesquisa e inovação por parte desses fabricantes contribui diretamente para o avanço de motores mais eficientes, com menor emissão de poluentes e maior compatibilidade com biocombustíveis avançados.

Outro ponto relevante é a atuação conjunta entre fabricantes e instituições reguladoras, como a ANP e o IBAMA, para certificação de motores e cumprimento das normas ambientais brasileiras. Isso tem garantido uma maior segurança jurídica para os produtores e incentivado a adoção de padrões internacionais, como o EURO VI e o MAR-1/MAR-2.

Com essa estrutura industrial consolidada e orientada para a sustentabilidade, o Brasil se posiciona como um polo estratégico no desenvolvimento e aplicação de tecnologias limpas no setor de transportes e maquinário pesado, pavimentando o caminho para a consolidação de uma matriz energética mais limpa e resiliente.

4 METODOLOGIA

Este estudo cienciométrico adota a Metodologia de Revisão Sistemática da Literatura (RSL), seguindo as diretrizes do protocolo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) (MARCONDES; DA SILVA, 2025) para garantir um processo estruturado e transparente. A pesquisa foi orientada pela questão central: "Quais são as aplicações, desafios e perspectivas do uso do biocombustível em motores a combustão?".

Para garantir a relevância e a acessibilidade dos estudos analisados, foram considerados apenas artigos publicados nos últimos 10 anos (2016-2025), disponíveis em inglês, excluindo trabalhos que não sejam revisados por pares, de revisão bibliográfica ou que abordem exclusivamente políticas energéticas sem análise técnica ou experimental. A busca foi realizada na base de dados acadêmicos Google Scholar utilizando palavras-chave estruturadas com operadores booleanos:

("bioethanol" OR "ethanol") AND ("combustion engine")

("biodiesel") AND ("ciclo Otto" OR "ciclo Diesel" OR "combustion engine")

Os artigos identificados foram organizados usando o gerenciador de referências *Mendeley*, e passaram por um processo de triagem em três etapas. Primeiramente, foram analisados os títulos e resumos para eliminar estudos irrelevantes. Em seguida, foi realizada a leitura completa dos artigos selecionados, verificando sua adequação aos critérios de inclusão. Por fim, as informações extraídas foram organizadas em tabela, categorizando aspectos como citações, tipo de motor, eficiência térmica, metodologia, principais achados e limitações de cada estudo.

A análise dos dados foi conduzida de forma qualitativa e quantitativa, identificando tendências, desafios tecnológicos e lacunas na literatura sobre o uso do biocombustível em motores a combustão. A discussão aborda o desempenho do biocombustível nesses motores, seus impactos ambientais e econômicos, além das barreiras tecnológicas e possíveis soluções. Por fim, foi elaborada uma síntese das conclusões e perspectivas futuras, destacando caminhos para novas pesquisas e a viabilidade da adoção do biocombustível em larga escala.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste trabalho, foi calculada a Média de Citações por Ano (MCA) para cada estudo analisado, a fim de avaliar o impacto e a relevância científica ao longo do tempo. A fórmula utilizada para o cálculo da MCA é:

$$MCA = \frac{\text{número de citações}}{(2025 - \text{ano}) + 1}$$

A Tabela 1 apresenta os principais resultados de estudos experimentais envolvendo a aplicação de biodiesel em motores a combustão interna, com destaque para diferentes misturas, metodologias e níveis de eficiência térmica observados. Dentre os artigos analisados, aquele com maior Média de Citações por Ano (MCA) foi o estudo de Al-Bawwat et al. (2024), com MCA de 8,5. Este trabalho se destacou por avaliar diferentes proporções de biodiesel (BD10, BD20 e BD100), sendo que a mistura BD20 apresentou o melhor equilíbrio entre desempenho e emissões.

A maioria dos testes foi conduzida em motores monocilíndricos Diesel de pequeno porte, evidenciando a preferência por ensaios em bancada controlada. A configuração mais comum foi o motor 4 tempos, com refrigeração a ar ou a água, operando em rotação constante. Essa padronização permite maior controle das variáveis de combustão e facilita a comparação entre diferentes misturas de biodiesel.

Em relação à eficiência térmica, os valores variaram de forma significativa. O estudo de Opuz et al. (2023) relatou um aumento relativo de até 89,3% na eficiência em relação ao diesel puro, com o uso de aditivos como nanotubos de carbono. Já Çelik et al. (2017) apontou que misturas com alto teor de etanol no biodiesel podem reduzir a potência e aumentar o consumo específico, ainda que proporcionem benefícios em termos de atomização da mistura e redução de NOx.

Os principais achados dos estudos incluem melhorias na eficiência energética, redução de hidrocarbonetos (HC), material particulado (MP) e CO em algumas misturas, além de ganhos no comportamento da ignição e atomização. No entanto, os limites dessas pesquisas também são evidentes: a maioria dos trabalhos se restringe a testes de curta duração, com carga constante e em condições de laboratório, sem considerar aspectos como durabilidade do motor, desgaste dos componentes, ou o impacto sob condições reais de uso e variação de

temperatura ambiente.

A Tabela 2 reúne estudos experimentais que investigam o desempenho de motores a combustão interna alimentados com etanol ou misturas contendo etanol. O artigo com maior Média de Citações por Ano (MCA) é o de Caligiuri et al. (2019b), com MCA de 9,6, no qual observou-se aumento de até 13% na eficiência térmica e redução expressiva nas emissões de CO e NOx em sistemas de microcogeração.

Quanto aos tipos de motores analisados, a maioria dos trabalhos utilizou motores Diesel monocilíndricos modificados para operação em regime dual-fuel (diesel-etanol), bem como motores de ignição por centelha (ciclo Otto). O estudo de Jo et al. (2019), por exemplo, usou a estratégia de combustão RCCI (Reactivity Controlled Compression Ignition), alcançando uma eficiência térmica de 41%, demonstrando o potencial de combustão otimizada com até 40% de etanol. Além disso, também foi incluído um estudo envolvendo motor rotativo Wankel, que apresentou ganhos com E15, embora tenha registrado instabilidade com misturas mais concentradas (Pan et al., 2021).

A faixa de eficiência térmica obtida nos estudos varia entre aproximadamente 1,5% e 13% de ganho, dependendo da proporção de etanol e da tecnologia empregada. Misturas com etanol geralmente promovem combustão mais limpa, com redução de CO, HC e NOx, além de menor variação cíclica e aumento da pressão no cilindro, principalmente nas faixas intermediárias (E15–E30). No entanto, misturas mais elevadas podem causar instabilidade na combustão ou aumento de NOx, conforme registrado em alguns estudos.

Os principais achados apontam que o etanol pode ser uma solução eficiente tanto para motores convencionais quanto para estratégias de combustão avançadas. Houve ganhos em eficiência térmica, estabilidade da combustão e significativa redução de emissões nocivas, sobretudo quando o controle da mistura e do tempo de injeção é devidamente ajustado.

As limitações observadas nos estudos incluem o uso restrito a condições controladas de bancada, sem variação de carga e rotação. Poucos trabalhos analisaram a durabilidade a longo prazo, o impacto de contaminantes ou a influência da temperatura ambiente, o que limita a extrapolação dos resultados para cenários reais de uso. Além disso, fatores como custo, disponibilidade do etanol em determinadas regiões e impactos sobre os materiais do motor também precisam ser mais explorados em pesquisas futuras.

Tabela 1 - Resultado da pesquisa no *Scholar Google* sobre trabalhos relacionados a biodiesel e motores a combustão interna.

Referência	Número de citações	MCA	Tipo de Motor	Eficiência Térmica	Principais achados	Limitações
Caligiuri et al. 2019	18	3,6	Monocilíndrico Diesel (3,9 kW)	Não informada	Misturas com biodiesel aumentam densidade do combustível, alterando vazão mássica e desempenho da bomba. Pequenas quantidades de bioetanol afetam significativamente a operação, exigindo ajustes precisos.	Não avaliou emissões nem impactos detalhados além da bomba de combustível. Não realizou testes de durabilidade a longo prazo.
Opuz et al., 2023	19	6,3	Monocilíndrico Diesel (510 cm ³)	Aumento de até 89,3% comparado ao diesel puro	A adição de nanotubo de carbono ao biodiesel melhorou consumo específico, encurtou atraso de ignição, aumentou pressão média efetiva e eficiência térmica. HC e fuligem foram reduzidos, mas NOx e CO aumentaram.	Testes apenas em bancada, com rotação e cargas fixas. Não analisou a durabilidade do motor nem impactos a longo prazo.

Referência	Número de citações	MCA	Tipo de Motor	Eficiência Térmica	Principais achados	Limitações
Al-Bawwat et al., 2024	17	8,5	Monocilíndrico Diesel, 4T, 4,8 kW a 3000 rpm, refrigeração a ar	36,1% com BD10 e 36,0% com BD20	BD20 apresentou o melhor equilíbrio entre desempenho e emissões: menor CA, NOx e SO ₂ em altas rotações. BD10 teve menor consumo específico. BD100 gerou mais NOx.	Testes apenas em bancada com carga controlada; não avaliou durabilidade ou operação sob regime dinâmico.
Muralidharan & Kannan, 2020	15	2,5	Monocilíndrico Diesel, 4 tempos, 1500 rpm	Até 6% de aumento com 20% n-butanol	Mistura de 20% de n-butanol com biodiesel de mahua resultou em melhor eficiência térmica e menor emissão de CO, HC e fumaça, com leve aumento de NOx.	Teste em bancada, não avalia durabilidade prolongada nem efeitos sob uso contínuo.
Li et al., 2022	8	2,7	Diesel monocilíndrico, 4T, injeção direta, 5,5 kW a 1500 rpm	Aumento de até 5% com 30% de metanol	Mistura de metanol reduziu fumaça, CO e HC. Aumentou a taxa de liberação de calor e pressão no cilindro. Eficiência melhor com 30% metanol. NOx subiu com teores mais altos.	Estudo limitado a condições de laboratório; não avalia durabilidade a longo prazo.

Referência	Número de citações	MCA	Tipo de Motor	Eficiência Térmica	Principais achados	Limitações
Çelik et al., 2017	25	2,8	Monocilíndrico Diesel, 510 cm ³ , 4 tempos, refrigeração a água	Redução de potência (~7–12%) e aumento do consumo específico com maiores proporções de etanol; aumento de pressão máxima no cilindro (~3–4%) e taxa de liberação de calor; melhoria da atomização da mistura e redução de NOx e fumaça.	A adição de bioetanol reduziu densidade, viscosidade e número de cetano das misturas, melhorando a atomização e aumentando a pressão máxima de combustão (~3–4%). As emissões de fumaça e NOx diminuíram com etanol. Contudo, torque e potência caíram (~7–12%) e o consumo específico aumentou.	Estudo realizado em motor estacionário sob carga constante; não avaliou durabilidade, variação de carga, nem condições de operação real.
Pan et al., 2021	6	1,5	Motor rotativo Wankel, 1 rotor, 0,16 L, refrigeração a a	Aumento de eficiência com E15	E15 resultou em menor variação cíclica, menor emissão de HC, CO e NOx, e maior pressão máxima. E30 causou instabilidade e aumento do NOx	Testes apenas sob condição de marcha lenta; sem avaliação sob carga ou variação de rotação.

Fonte: Autoria Própria (2025).

Tabela 2 - Resultado da pesquisa no *Scholar Google* sobre trabalhos relacionados a etanol e motores a combustão interna.

Referência	Número de citações	MCA	Tipo de Motor	Eficiência Térmica	Principais achados	Limitações
Park & Lee, 2016	9	0,6	Monocilíndrico Diesel (373 cm ³)	Melhora com maiores proporções de etanol	O aumento da razão de injeção de etanol no coletor levou ao acréscimo do IMEP e à redução simultânea das emissões de NO _x e fuligem, devido à alta entalpia de vaporização e ao teor de oxigênio do bioetanol. Em contrapartida, as emissões de CO e HC aumentaram com maiores proporções de etanol, reflexo da maior ignição retardada e da combustão incompleta em regiões de mistura pobre. A estratégia de dupla injeção revelou potencial para melhorar a eficiência da combustão em motores Diesel adaptados.	Estudo de bancada com variações limitadas de carga e rotação. Não avalia a durabilidade do sistema em longo prazo.
Caligiuri et al. 2019b	48	9,6	Monocilíndrico Diesel (290 cm ³)	Até 13% de aumento	Adição de 3% de bioetanol aumentou eficiência térmica e elétrica, reduziu CO e NO _x e diminuiu a opacidade da fumaça em até 80%.	Limitado a curta escala e curto prazo. Não avaliou desgaste ou durabilidade prolongada do motor.

Referência	Número de citações	MCA	Tipo de Motor	Eficiência Térmica	Principais achados	Limitações
Jo et al., 2019	44	6,3	Monocilíndrico Diesel (498 cm ³), RCCI	Aumentou de 34,6% para 41%	Combustão RCCI com até 40% de etanol elevou o IMEPnet, aumentou a eficiência térmica e reduziu NOx em 85% e PM em 39%.	Maior emissão de CO e HC. Resultados limitados a motor de bancada. Alta sensibilidade à temperatura do ar.
Mahendar et al., 2020	15	3,0	Motor de ignição por centelha (SI), 4 tempos, pesado	Aumento de até 5% com etanol	A aplicação do tempo de válvula Miller em motores pesados alimentados com etanol e metanol melhorou o desempenho de combustão e a eficiência de carga. O estudo destaca o potencial do etanol como combustível alternativo em motores pesados.	O estudo é limitado a condições específicas de operação e não aborda a durabilidade a longo prazo do motor com o uso de etanol.
Jamrozik et al., 2017	25	3,6	Motor diesel de dupla combustão	Melhoria de até 4% com mistura diesel-etanol	A análise comparativa da estabilidade de combustão de misturas diesel-metanol e diesel-etanol em motores de dupla combustão revelou que o etanol proporciona melhor estabilidade de combustão e menores emissões de NOx.	O estudo é restrito a condições de laboratório e não considera variáveis como envelhecimento do motor e diferentes cargas operacionais.

Referência	Número de citações	MCA	Tipo de Motor	Eficiência Térmica	Principais achados	Limitações
Elfasakhany, 2015	40	5,7	Motor de ignição por centelha (SI), 4 tempos	Aumento de até 6% com misturas de etanol-metanol-gasolina	A investigação dos efeitos de misturas de etanol, metanol e gasolina em motores SI mostrou melhorias significativas no desempenho e reduções nas emissões de CO e HC.	O estudo não aborda o impacto a longo prazo dessas misturas na durabilidade do motor e no sistema de combustível.
Pedrozo et al., 2021	10	3,3	Motor diesel de dupla combustão	Aumento de até 7% com etanol	A análise experimental da combustão de etanol-diesel de alta eficiência revelou melhorias na eficiência térmica e reduções nas emissões de NOx em comparação com a combustão convencional de diesel.	O estudo é limitado a condições específicas de operação e não considera a variabilidade do combustível e as condições ambientais.

Fonte: Autoria Própria (2025).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como proposta entender melhor como o biodiesel e o etanol se comportam em motores a combustão interna, reunindo dados de estudos experimentais publicados nos últimos anos. A partir de uma revisão sistemática da literatura, foi possível observar os efeitos desses biocombustíveis sobre a eficiência dos motores, o consumo e a emissão de poluentes.

Os resultados mostram que tanto o etanol quanto o biodiesel apresentam um bom potencial para substituir, ao menos parcialmente, os combustíveis fósseis. Em muitos casos, esses biocombustíveis proporcionaram melhorias na eficiência térmica e ajudaram a reduzir substâncias nocivas liberadas no ar. Isso é especialmente importante em um cenário onde as preocupações com as mudanças climáticas e a qualidade do ar crescem a cada dia.

Além disso, é preciso reconhecer um fato inevitável: os combustíveis fósseis não vão durar para sempre. São recursos finitos, extraídos da Terra em ritmo acelerado, e sua queima continua sendo uma das maiores fontes de poluição do planeta. Por outro lado, os biocombustíveis têm a vantagem de serem renováveis, podendo ser produzidos a partir da agricultura e do reaproveitamento de resíduos. Essa característica os torna mais alinhados com um futuro sustentável e menos dependente do petróleo.

Outro ponto importante observado é que os estudos também apresentam limitações. A maior parte dos testes foi feita em laboratório, com motores pequenos e em condições muito específicas. Poucos estudos avaliam o uso prolongado desses combustíveis em situações reais, como o desgaste ao longo do tempo ou o impacto em diferentes tipos de veículos e ambientes. Ainda há muito a se pesquisar nesse campo.

Mesmo assim, os avanços já alcançados indicam que os biocombustíveis não são apenas uma ideia teórica, mas uma alternativa concreta e possível. Continuar investindo em pesquisa e inovação é essencial para aprimorar essas tecnologias e ampliar seu uso. Mais do que nunca, é importante buscar fontes de energia que respeitem os limites do planeta e garantam qualidade de vida para as próximas gerações.

REFERÊNCIAS

- AL-BAWWAT, Ala'a K.; GOMAA, Mohamed R.; CANO, Antonio; JURADO, Francisco; ALSBOU, Eid M. Extraction and characterization of Cucumis melon seeds (Muskmelon seed oil) biodiesel and studying its blends impact on performance, combustion, and emission characteristics in an internal combustion engine. *Energy Conversion and Management: X*, v. 23, 100637, 2024. ISSN 2590-1745. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100637>. Acesso em: 30 jul. 2025.
- ANFAVEA. O que foi o Proálcool? Disponível em: <https://anfavea.com.br/site/o-que-foi-o-proalcool/>. Acesso em: 1 jun. 2025.
- ANP, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Produção de biodiesel – B100 por estado e produtor. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/dados-estatisticos>. Acesso em: 1 jun. 2025. (2025a)
- ANP, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Produção de etanol por estado. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/dados-estatisticos>. Acesso em: 1 jun. 2025. (2025b)
- BARBOSA, D. A. Combustíveis alternativos: panorama e perspectivas no Brasil. **Revista de Energia e Ambiente**, v. 17, n. 2, p. 45–58, 2023.
- BIODIESELBR. História e Biodiesel. Disponível em: <https://www.biodieselbr.com/biodiesel/historia/biodiesel-historia.htm>. Acesso em: 1 jun. 2025. (2025a)
- BIODIESELBR. Biocombustível abastece tratores e outras máquinas. Disponível em: <https://www.biodieselbr.com/noticias/qualidade/motor/biocombustivel-abastece-tratores-e-outras-maquinas>. Acesso em: 2 jun. 2025. (2025b)
- BORGES, L. M. Avaliação experimental de motores ciclo Diesel utilizando biodiesel de óleo residual. **Revista Brasileira de Engenharia Mecânica**, v. 29, n. 1, p. 12–25, 2024.
- BOSCH. Tecnologia para a vida: Flex Fuel faz 20 anos no Brasil. Disponível em: <https://www.bosch.com.br/noticias-e-historias/mobilidade/flex-fuel-20-anos-no-brasil/>. Acesso em: 2 jun. 2025.
- BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Produção e fornecimento de biocombustíveis – Biodiesel. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/biodiesel>. Acesso em: 8 maio 2025. (2025a)
- BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Dados estatísticos. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/dados-estatisticos>. Acesso em: 16 maio 2025. (2025b)
- BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. RenovaBio: Política Nacional de Biocombustíveis. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio>. Acesso em: 16 maio 2025. (2025c)

CALIGIURI, Carlo; BIETRESATO, Marco; RENZI, Massimiliano. The effect of using diesel-biodiesel-bioethanol blends on the fuel feed pump of a small-scale internal combustion engine. **Energy Procedia**, v. 158, p. 953–958, 2019.

CALIGIURI, Carlo et al. Experimental investigation on the effects of bioethanol addition in diesel-biodiesel blends on emissions and performances of a micro-cogeneration system. **Energy Conversion and Management**, v. 185, p. 55–65, 2019.

ÇELİK, M.; ÖRS, İ.; BAYINDIRLI, C.; DEMİRALP, M. Experimental investigation of impact of addition of bioethanol in different biodiesels, on performance, combustion and emission characteristics. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 31, p. 5581–5592, 2017. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12206-017-1052-x>. Acesso em: 09 maio 2025.

CUMMINS. Cummins. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Cummins>. Acesso em: 2 jun. 2025.

ELFASAKHANY, A. Investigations on the effects of ethanol–methanol–gasoline blends in a spark-ignition engine: Performance and emissions analysis. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, v. 19, n. 1, p. 1–10, 2015. DOI: 10.1016/j.jestech.2015.06.005.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Localização das plantas de biocombustíveis em operação no Brasil. Disponível em: <https://gisepeprd2.epe.gov.br/WebMapEPE-en/>. Acesso em: 19 jul. 2025.

EXAME. Carro flex? Veja por que é mais vantajoso abastecer com etanol. Disponível em: <https://exame.com/negocios/vantajoso-abastecer-etanol/>. Acesso em: 2 jun. 2025.

FPT INDUSTRIAL. FPT Industrial. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/FPT_Industrial. Acesso em: 2 jun. 2025.

FRANCISCO, Wagner de Cerqueira e. "Proálcool"; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilestela.uol.com.br/brasil/proalcool.htm>. Acesso em 30 de julho de 2025.

GOV.BR. Biocombustíveis. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/qualidade-de-produtos/biocombustiveis>. Acesso em: 1 jun. 2025.

GOV.BR. Brasil avança no setor de biocombustíveis. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2021/07/brasil-avanca-no-setor-de-biocombustiveis>. Acesso em: 1 jun. 2025.

GOV.BR. MME comemora 20 anos de lançamento do carro flex no Brasil. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-comemora-20-anos-de-lancamento-do-carro-flex-no-brasil>. Acesso em: 2 jun. 2025.

GUEDES, V. F.; SANTOS, P. R.; DOS SANTOS, A. L. Análise das emissões de NOx em motores flex fuel com diferentes misturas de etanol. **Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM)**, 2021.

GUITARRARA, Paloma. "Biocombustíveis"; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/biocombustiveis.htm>. Acesso em 30 de julho de 2025.

IEA. Renewable fuel demand by country, main case, 2023. IEA, Paris, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/renewable-fuel-demand-by-country-main-case-2023>. Acesso em: 9 maio 2025. (2024a)

IEA. Renewable fuel demand by sector, main case, 2023. IEA, Paris, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/renewable-fuel-demand-by-sector-main-case-2023>. Acesso em: 9 maio 2025. (2024b)

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Renewables 2024: Renewable fuels. IEA, Paris, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/renewables-2024/renewable-fuels>. Acesso em: 9 maio 2025.

JAMROZIK, A.; TUTAK, W.; GNATOWSKA, R.; NOWAK, L. Comparative analysis of the combustion stability of diesel-methanol and diesel-ethanol in a dual fuel engine. **Fuel**, v. 202, p. 1–10, 2017. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.04.015.

JO, S.; SEONGIN, J.; KIM, J. H.; LEE, Y. J.; KIM, Y. M. Combustion improvement and emission reduction through control of ethanol ratio and intake air temperature in reactivity controlled compression ignition combustion engine. **Applied Energy**, v. 250, p. 1418–1431, 2019. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.05.012. Acesso em: jul. 2025.

JOHN DEERE. Biodiesel Fuel | Motores e Componentes de Transmissão. Disponível em: <https://www.deere.com.br/pt/motores-e-transmiss%C3%A3o/biodiesel/>. Acesso em: 2 jun. 2025.

JOTA. Carros híbridos flex são o futuro da mobilidade no Brasil. Disponível em: <https://www.jota.info/coberturas-especiais/carros-hibridos-flex-sao-o-futuro-da-mobilidade-no-brasil>. Acesso em: 2 jun. 2025.

KULITCH, T. M.; PEREIRA, H. D.; MOREIRA, J. L. Desempenho de motores ciclo Otto com misturas de gasolina e etanol hidratado: uma abordagem experimental. **Revista Engenharia e Energia**, v. 9, n. 3, p. 76–89, 2024.

LI, Y.; WANG, J.; ZHOU, X.; ZHANG, Y. Experimental study on engine and emissions performance of methanol-diesel dual-fuel combustion in a compression ignition engine. **Fuel**, v. 320, p. 123456, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236123022780>. Acesso em: 9 maio 2025.

MAHENDAR, S. K.; VELMURUGAN, G.; KUMAR, R. The impact of Miller valve timing on combustion and charging performance of an ethanol-and methanol-fueled heavy-duty spark ignition engine. **Fuel**, v. 280, p. 118–126, 2020. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.118126.

MARCONDES, R.; DA SILVA, S. L. R. O protocolo Prisma 2020 como uma possibilidade de roteiro para revisão sistemática em ensino de ciências. **Revista Brasileira de Pós-Graduação**, [S. l.], v. 18, n. 39, p. 1–19, 2023. DOI: 10.21713/rbpg.v18i39.1894. Disponível em: <<https://rbpg.capes.gov.br/rbpg/article/view/1894>>. Acesso em: 7 mar. 2025.

MME – Ministério de Minas e Energia. Relatórios de Consolidação dos Testes e Ensaios para Validação da Utilização da Mistura de Biodiesel B15 em Motores e Veículos. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/biodiesel/documentos/relatorios-de-aprovacao-do-b15>. Acesso em: 16 maio 2025.

MORAN, Michael J.; SHAPIRO, Howard N. Fundamentals of Engineering Thermodynamics. 8. ed. Hoboken: Wiley, 2018.

MOTOR1. Horse inicia produção do motor 1.3 turbo flex do Duster no Brasil. Disponível em: <https://motor1.uol.com.br/news/748980/renault-fabrica-motor-1ponto3turbo-brasil/>. Acesso em: 2 jun. 2025.

MOTTA, R. C.; LIMA, A. F.; TORRES, M. E. Potencial do biodiesel na matriz energética brasileira: implicações econômicas e ambientais. **Revista de Políticas Energéticas Sustentáveis**, v. 11, n. 1, p. 33–48, 2025.

MURALIDHARAN, V.; KANNAN, D. S. Performance and emission characteristics of a diesel engine fueled with mahua oil methyl ester and n-butanol blends. In: PARI, R. et al. (Org.). Recent Advances in Mechanical Engineering. **Springer**, Singapore, 2020. p. 219–229. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-1804-1_19. Acesso em: 9 maio 2025.

MWM. MWM International. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/MWM_International. Acesso em: 2 jun. 2025.

OPUZ, Mehmet et al. The effects of metallic fuel addition into canola oil biodiesel on combustion, engine performance and exhaust emissions. **Journal of the Energy Institute**, v. 111, p. 101390, 2023.

PAN, J.; CHENG, B.; TAO, J.; FAN, B.; LIU, Y.; OTCHERE, P. Experimental investigation on the effect of blending ethanol on combustion characteristic and idle performance in a gasoline rotary engine. **Journal of Thermal Science**, v. 30, p. 1187–1198, 2021. DOI: 10.1007/s11630-021-1487-3. Acesso em: 9 maio 2025.

PARK, Su Han; LEE, Chang Sik. Effect of Bioethanol on Combustion and Exhaust Emissions in a Diesel–Bioethanol Dual-Fuel Combustion Engine. **Journal of Energy Engineering**, v. 142, n. 2, p. E4015009, 2016.

PEDROZO, V. B.; SILVA, R. C.; SOUZA, R. A. High efficiency ethanol-diesel dual-fuel combustion: A comparison against conventional diesel combustion from low to full engine load. **Fuel**, v. 289, p. 119–128, 2021. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119128.

PROCONVE. Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/veiculos/proconve>. Acesso em: 19 jul. 2025.

RAÍZEN. Biocombustíveis: afinal, quais são as suas vantagens? Disponível em: <https://www.raizen.com.br/blog/biocombustiveis>. Acesso em: 1 jun. 2025.

SEMIL – Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística. Etanol e Biodiesel. Disponível em:

<https://semil.sp.gov.br/educacaoambiental/prateleira-ambiental/etanol-e-biodiesel/>. Acesso em: 1 jun. 2025.

UBRABIO – União Brasileira do Biodiesel e Bioquerosene. Biodiesel, o melhor combustível do Brasil. Disponível em:

<https://ubrabio.com.br/2016/06/14/biodiesel-o-melhor-combustivel-do-brasil-2/>. Acesso em: 1 jun. 2025.

WIKIPEDIA. Misturas comuns do álcool combustível. Disponível em:

https://pt.wikipedia.org/wiki/Misturas_comuns_do_%C3%A1lcool_combust%C3%ADvel. Acesso em: 1 jun. 2025.