

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS - *CAMPUS* BETIM

BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Arthur Moreira Diniz Lima

O ETANOL CONSTITUI UMA ALTERNATIVA AMBIENTALMENTE ADEQUADA?
UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE A FORMAÇÃO DE NO_x EM MOTORES
DE COMBUSTÃO INTERNA

Betim-MG

2026

ARTHUR MOREIRA DINIZ LIMA

O ETANOL CONSTITUI UMA ALTERNATIVA AMBIENTALMENTE ADEQUADA?
UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE A FORMAÇÃO DE NO_x EM MOTORES
DE COMBUSTÃO INTERNA

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à banca examinadora do
curso de Engenharia Mecânica do Instituto
Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Minas Gerais *Campus*
Betim, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

Orientador: Me. Bruno de Souza Baptista.

Betim-MG

2026

FICHA CATALOGRÁFICA

L732e Lima, Arthur Moreira Diniz

O etanol constitui uma alternativa ambientalmente adequada? Uma revisão bibliográfica sobre a formação de NOx em motores de combustão interna/ Arthur Moreira Diniz Lima. – 2026.

75 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Câmpus Betim, 2026.

Orientação: Prof. Me. Bruno de Souza Baptista

1. Motores de combustão interna. 2. Emissão de gases. 3. Etanol. 4. Sustentabilidade. 5. Engenharia Mecânica. I. Lima, Arthur Moreira Diniz. II. Título

CDU: 621.43



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS

Campus Betim
Diretoria de Ensino
Docentes Mecânica

Rua Itamarati - CEP 32677-564 - Betim - MG
3135976360 - www.ifmg.edu.br

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 12 dias do mês de junho do ano de 2026, às dezoito horas e trinta minutos, nas dependências do IFMG – *Campus* Betim, reuniu-se a banca examinadora presidida por mim, Bruno de Souza Baptista e demais membros, Felipe Augusto Rocha da Silva e Guilherme Lima José de Siqueira. Nesta ocasião o discente Arthur Moreira Diniz Lima do curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica, com registro acadêmico de número 40415 do IFMG – *Campus* Betim, defendeu seu Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado **“O ETANOL CONSTITUI UMA ALTERNATIVA AMBIENTALMENTE ADEQUADA? UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE A FORMAÇÃO DE NO_x EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA”** e foi APROVADO, com 85 (oitenta e cinco) pontos.

Este resultado reflete o cumprimento parcial dos critérios de avaliação estabelecidos pelo curso e reconhece os esforços e a dedicação do discente e seu orientador no desenvolvimento do seu TCC. O lançamento da nota e o consequente encerramento do respectivo processo está condicionado ao cumprimento dos procedimentos pós-defesa conforme previstos nos regulamentos vigentes. Tais procedimentos pós-defesa devem ser finalizados dentro do prazo limite de 30 dias, a contar da data desta ata. O descumprimento destes procedimentos até a data estipulada implicará em atribuição de nota 0 (zero) e consequente reprovação.

A sessão foi encerrada às dezenove horas e quarenta e cinco minutos. Para constar, eu, Bruno de Souza Baptista, redigi a presente ata que após lida publicamente, foi aprovada e assinada pelo discente e membros da banca examinadora.

Betim, 30 de junho de 2026.



Documento assinado eletronicamente por **Bruno de Souza Baptista, Professor**, em 30/06/2026, às 14:18, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Felipe Augusto Rocha da Silva, Usuário Externo**, em 30/06/2026, às 14:27, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Guilherme Lima José de Siqueira, Professor Visitante**, em 01/07/2026, às 09:44, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.ifmg.edu.br/consultadocs> informando o código verificador **2789369** e o código CRC **8167A6F7**.

23792.000792/2026-96

2789369v1

Dedico este trabalho à minha família, pelo apoio e incentivo constantes, essenciais à minha trajetória acadêmica, bem como aos amigos e mestres que contribuíram com conhecimento e inspiração ao longo desse percurso. Dedico-o, ainda, àqueles que compartilham o compromisso com uma engenharia voltada à sustentabilidade e ao futuro.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Bruno, pelo suporte, pela paciência e pelas orientações fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho, especialmente nas discussões e estudos relacionados aos temas abordados ao longo desta trajetória. Também agradeço ao Instituto Federal de Minas Gerais, pela oportunidade de aprendizado, pela estrutura oferecida e por proporcionar o conhecimento necessário para minha formação.

RESUMO

A crescente preocupação com as mudanças climáticas, a dependência de combustíveis fósseis e a necessidade de redução das emissões veiculares têm impulsionado a busca por alternativas energéticas mais sustentáveis no setor de transportes. Nesse contexto, o etanol destaca-se como um biocombustível estratégico no Brasil, em função de sua origem renovável, da infraestrutura consolidada de produção e distribuição e da ampla difusão da frota flex fuel. Este Trabalho de Conclusão de Curso tem como objetivo avaliar, por meio de revisão bibliográfica e análise técnica da literatura especializada, a viabilidade ambiental do uso do etanol em motores de combustão interna, com ênfase nos mecanismos de formação de óxidos de nitrogênio (NOx). A metodologia adotada baseia-se em pesquisa exploratória e descritiva, de abordagem qualitativa, com levantamento de artigos científicos, livros técnicos, teses, relatórios institucionais e documentos oficiais nacionais e internacionais. A análise da literatura evidencia que o etanol apresenta vantagens consistentes na redução de emissões associadas à combustão incompleta, como monóxido de carbono e hidrocarbonetos, bem como redução das emissões de CO₂ equivalente quando considerado o ciclo de vida do combustível. Entretanto, o comportamento das emissões de NOx mostrou-se fortemente dependente das condições operacionais do motor, como razão de equivalência, carga, rotação, razão de compressão e estratégias de calibração da ignição. Conclui-se que o etanol não deve ser interpretado como redutor universal de NOx, mas como um combustível tecnicamente viável e ambientalmente relevante, cujo desempenho depende da integração entre combustível, arquitetura do motor, estratégias de controle da combustão e sistemas de pós-tratamento, consolidando-se como solução madura e aplicável no contexto brasileiro de transição energética.

Palavras-chave: Etanol. Motores de combustão interna. Emissões veiculares. Óxidos de nitrogênio. Sustentabilidade.

ABSTRACT

Growing concerns regarding climate change, fossil fuel dependence, and the reduction of vehicular emissions have intensified the search for more sustainable energy alternatives in the transportation sector. In this context, ethanol stands out as a strategic biofuel in Brazil due to its renewable origin, consolidated production and distribution infrastructure, and the widespread adoption of flex-fuel vehicles. This bachelor's thesis aims to evaluate, through a bibliographic review and technical analysis of specialized literature, the environmental feasibility of ethanol use in internal combustion engines, with emphasis on nitrogen oxides (NO_x) formation mechanisms. The methodology is based on exploratory and descriptive qualitative research, supported by scientific articles, technical books, theses, institutional reports, and official national and international documents. The literature analysis indicates that ethanol offers consistent advantages in reducing emissions related to incomplete combustion, such as carbon monoxide and hydrocarbons, as well as lower CO₂-equivalent emissions when considering life cycle assessments. However, NO_x emission behavior is shown to be highly dependent on engine operating conditions, including equivalence ratio, load, speed, compression ratio, and ignition calibration strategies. It is concluded that ethanol should not be regarded as a universal NO_x-reducing fuel, but rather as a technically viable and environmentally relevant option whose performance depends on the integration of fuel properties, engine architecture, combustion control strategies, and aftertreatment systems, reinforcing its role as a mature and applicable solution within the Brazilian energy transition context.

Keywords: Ethanol. Internal combustion engines. Vehicle emissions. Nitrogen oxides. Sustainability.

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PRODUÇÃO E CONSUMO DE ETANOL NO BRASIL (2023–2026)	32
TABELA 2 - EMISSÕES ESPECÍFICAS DE NOX PARA GASOLINA PURA (E0) E MISTURA E20 EM DIFERENTES REGIMES DE OPERAÇÃO DO MOTOR.....	38
TABELA 3 - PROPRIEDADES FÍSICOQUÍMICAS DA GASOLINA E DO ETANOL .	42
TABELA 4 - EMISSÕES DE NOX (G/KM) NAS FASES FRIA E QUENTE DO CICLO ECE PARA GASOLINA COMERCIAL E MISTURAS GASOLINA–ETANOL	44
TABELA 5 - EMISSÕES DE NOX (PPM) EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO DO MOTOR PARA DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE ETANOL NA GASOLINA.....	45
TABELA 6 - TAXAS RECOMENDADAS PARA MISTURAS DE COMBUSTÍVEIS ...	49
TABELA 7 - EMISSÕES DE NOX (PPM) EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE ÁLCOOL EM MISTURAS COM GASOLINA ($\Phi = 1$ E BMEP = 3 BAR)	52
TABELA 8 - RELAÇÃO ENTRE RAZÃO DE EQUIVALÊNCIA E EMISSÃO DE NOX COM G100 E E30	53
TABELA 9 - EFEITO DO ETANOL E DA CALIBRAÇÃO DE IGNIÇÃO NAS EMISSÕES DE NOX EM MOTORES SI ASPIRADOS	57
TABELA 10 - EFEITO DO ETANOL E DAS ESTRATÉGIAS DE CALIBRAÇÃO NAS EMISSÕES DE NOX EM MOTORES SI COM TECNOLOGIAS AVANÇADAS	57

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - CARRO MOVIDO A ÁLCOOL NOS ANOS 1920.....	13
FIGURA 2 - PANORAMA HISTÓRICO DOS PRINCIPAIS PROGRAMAS CIENTÍFICOS, TECNOLÓGICOS E INDUSTRIAIS VINCULADOS À PESQUISA E AO DESENVOLVIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL.	16
FIGURA 3 - FIAT 147: PRIMEIRO AUTOMÓVEL PRODUZIDO EM SÉRIE NO BRASIL MOVIDO EXCLUSIVAMENTE A ETANOL.....	18
FIGURA 4 - VOLKSWAGEN GOL POWER 1.6 TOTAL FLEX: VEÍCULO BICOMBUSTÍVEL (ETANOL E GASOLINA).....	19
FIGURA 5 - ARQUITETURA DE UM VEÍCULO HÍBRIDO FLEX COM MOTOR ELÉTRICO E MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA OPERANDO COM ETANOL E GASOLINA.....	20
FIGURA 6 - EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE) AO LONGO DO CICLO DE VIDA DE VEÍCULOS.....	23
FIGURA 7 - DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM VEÍCULOS AUTOMOTORES LEVES NO BRASIL (2007–2023).	33
FIGURA 8 - EVOLUÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA POR VEÍCULOS LEVES.....	34
FIGURA 9 - EFEITO DA MISTURA DE ETANOL NA EMISSÃO DE NOX EMISSÃO	47
FIGURA 10 - EMISSÕES DE NOX (PPM) EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO DO MOTOR PARA DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE ETANOL E TAXAS DE COMPRESSÃO CR = 10:1 E CR = 11:1	48
Figura 12 - EMISSÕES DE ÓXIDOS DE NITROGÊNIO (NOX, PPM) EM FUNÇÃO DA RAZÃO DE EQUIVALÊNCIA PARA GASOLINA PURA (G100 = E0) E MISTURAS ALCOÓLICAS M30, E30 E B30, SOB CONDIÇÃO DE CARGA ELEVADA (BMEP = 3 BAR E 5 BAR).....	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC – Air Cooled (Arrefecimento A Ar)

ARLA 32 – Agente Redutor Líquido Automotivo

BEV – *Battery Electric Vehicle* (Veículo Elétrico a Bateria)

BMEP – *Brake Mean Effective Pressure* (Pressão média efetiva ao freio)

BSFC – *Brake Specific Fuel Consumption* (Consumo específico de combustível ao freio)

BTDC – *Before Top Dead Center* (Antes do ponto morto superior)

CE – Combustão estratificada

CI – *Compression Ignition* (Ignição por compressão)

CO – Monóxido de carbono

CO₂ – Dióxido de carbono

COPERT – *Computer Program to Calculate Emissions from Road Transport* (Programa de Computador para Calcular Emissões do Transporte Rodoviário)

CR – *Compression Ratio* (Razão de compressão)

DI – *Direct Injection* (Injeção direta)

DPF – *Diesel Particulate Filter* (Filtro de partículas diesel)

ECE –Economic Commission for Europe (Ciclo europeu de condução)

ECU – *Electronic Control Unit* (Unidade de controle eletrônico)

EGR – *Exhaust Gas Recirculation* (Recirculação dos gases de escape)

EGT – *Exhaust Gas Temperature* (Temperatura dos gases de escape)

EIS – Eletronic Injection System (Sistema eletrônico de ignição)

E% – Fração volumétrica de etanol na mistura combustível

E0 – Gasolina sem etanol

E10 – Mistura com 10% de etanol em volume

E20 – Mistura com 20% de etanol em volume

E30 – Mistura com 30% de etanol em volume

E50 – Mistura com 50% de etanol em volume

E70 – Mistura com 70% de etanol em volume

E85 – Mistura com 85% de etanol em volume

E100 – Etanol puro (anidro ou hidratado)

EURO – Padrões europeus de emissões veiculares

FAME – *Fatty Acid Methyl Esters* (Ésteres metílicos de ácidos graxos)

FFE – Flex Fuel Engine (Sistema *flex fuel*)

GDI – *Gasoline Direct Injection* (Injeção direta de gasolina)

GEE – Gases de efeito estufa

GLP – Gás liquefeito de petróleo

GNC – Gás natural comprimido

GPI – *Gasoline Port Injection* (Injeção no duto de admissão)

HC – Hidrocarbonetos

HEV – *Hybrid Electric Vehicle* (Veículo híbrido)

HVO – *Hydrotreated Vegetable Oil* (Óleo vegetal hidrotratado)

ICCT – *International Council on Clean Transportation* (Conselho Internacional de Transporte Limpo)

ICE – *Internal Combustion Engine* (Motor de combustão interna)

IEA – *International Energy Agency* (Agência Internacional de Energia)

IMEP – *Indicated Mean Effective Pressure* (Pressão média efetiva indicada)

KPI – *Key Performance Indicator* (Indicador-chave de desempenho)

LCA – *Life Cycle Assessment* (Avaliação do ciclo de vida)

LCC – *Life Cycle Cost* (Custo do ciclo de vida)

MPFI – *Multi Point Fuel Injection* (Injeção eletrônica multiponto)

MP – Material particulado

NO – Óxido nítrico

NO₂ – Dióxido de nitrogênio

NO_x – Óxidos de nitrogênio

OBD – *On-Board Diagnostics* (Diagnóstico a bordo)

PEMS – *Portable Emissions Measurement System* (Sistema portátil de medição de emissões)

PN – *Particle Number* (Número de partículas)

PM_{2.5} – Material particulado com diâmetro $\leq 2,5 \mu\text{m}$

PHEV – *Plug-in Hybrid Electric Vehicle* (Veículo Elétrico Híbrido Plug-in)

RDE – *Real Driving Emissions* (Emissões em Condições Reais de Condução)

RON – *Research Octane Number* (Número de octanas de pesquisa)

rpm – Rotações por minuto

SCR – *Selective Catalytic Reduction* (Redução catalítica seletiva)

SI – *Spark Ignition* (Ignição por centelha)

TC – *Turbo Charger* (Turboalimentação)

THC – *Total Hydrocarbons* (Hidrocarbonetos totais)

TWC – *Three-Way Catalyst* (Catalisador de três vias)

VSP – *Vehicle Specific Power* (Potência específica do veículo)

WC – *Water Cooled* (Arrefecimento a água)

WLTC – *Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle* (Ciclo de Teste Harmonizado Mundial para Veículos Leves)

WLTP – *Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure* (Procedimento Mundial Harmonizado para Teste de Veículos Leves)

WP – Potência no eixo

λ – Fator lambda (razão ar–combustível)

PROÁLCOOL – Programa Nacional do Álcool

PROCONVE - Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores

ANFAVEA - Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores

ϕ – Razão de Equivalência

HURC - *High useful compression ratios* (Razão de Compressão Útil Limite)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 JUSTIFICATIVA	26
3 OBJETIVOS	27
3.1 Objetivo Geral	27
3.2 Objetivos Específicos	27
4 METODOLOGIA	28
5 REFERENCIAL TEÓRICO.....	30
5.1 Emissões veiculares associados ao uso do etanol.....	30
5.2 Mecanismos de formação dos óxidos de nitrogênio	36
5.3 Influência das propriedades químicas e fisicoquímicas do etanol na combustão e nas emissões de motores de combustão interna	40
5.4 Efeito da partida a frio nas emissões de NOx em motores operando com misturas gasolina-etanol	43
5.5 Influencia termoquímica na emissão de NOx.....	45
5.6 Impacto da razão de compressão na formação de NOx em motores operando com etanol	47
5.7 Influência da razão de equivalência na formação de NOx em motores SI com etanol	51
5.8 Influência da carga e da rotação do motor na formação de NOx em motores operando com etanol	54
5.9 Influência do ponto de ignição na formação de NOx em motores SI com etanol	56
6 DISCUSSÃO.....	59
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
8 REFERÊNCIAS	65

1 INTRODUÇÃO

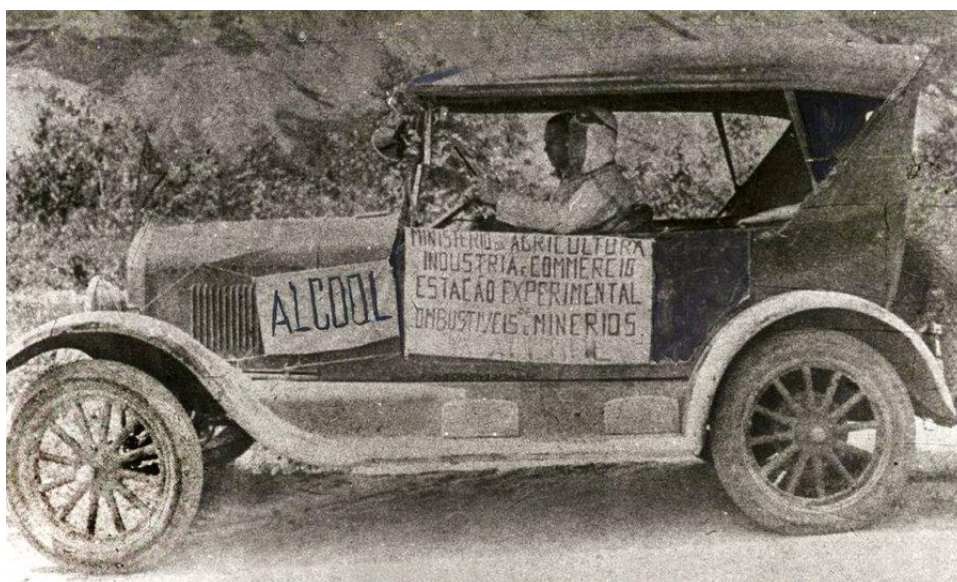
A trajetória do etanol combustível no Brasil configura-se como um dos mais consistentes e duradouros projetos de transição energética implementados em escala nacional. Sustentado por uma base agrícola robusta, avanços tecnológicos contínuos e políticas públicas estruturantes, o etanol consolidou-se como componente estratégico da matriz energética brasileira, particularmente no setor de transportes. Embora sua associação direta à mobilidade seja um fenômeno do século XX, as bases institucionais e científicas que permitiram sua posterior adoção energética começaram a ser delineadas ainda nas primeiras décadas desse período, com destaque para as pesquisas conduzidas na década de 1920 pelo Instituto Nacional de Tecnologia, que investigaram sistematicamente o uso do álcool como combustível automotivo e posicionaram o Brasil como referência mundial em biocombustíveis (CASTRO, 2008).

É fundamental, delimitar corretamente o papel histórico do álcool no período imperial brasileiro. Durante o reinado de Dom Pedro II, a produção alcooleira estava inserida exclusivamente na lógica agroindustrial do complexo sucroexportador, voltada à fabricação de açúcar, aguardente e insumos farmacêuticos e químicos. Nesse contexto, o álcool constituía um subproduto da cana-de-açúcar, sem qualquer finalidade energética associada a motores ou sistemas de geração de energia. A inexistência de motores de combustão interna consolidados, de infraestrutura industrial compatível e de políticas energéticas estruturadas inviabilizava qualquer aplicação do etanol como combustível nesse período. Assim, atribuir ao álcool produzido no Brasil imperial um papel energético configura anacronismo histórico, uma vez que a associação entre etanol, matriz energética e setor de transportes dependeu diretamente do advento dos motores de combustão interna, da consolidação da indústria automobilística e das crises energéticas do século XX. As estratégias de substituição parcial de combustíveis fósseis e as políticas públicas voltadas à diversificação energética somente emergiriam de forma estruturada a partir da década de 1970, com a criação do PROÁLCOOL (Programa Nacional do Álcool) (SCHWARCZ; 2015).

Ainda assim, nas primeiras décadas do século XX surgiram iniciativas pioneiras que demonstraram a viabilidade técnica do etanol como combustível automotivo. Nesse

contexto, a Estação Experimental de Combustíveis e Minérios realizou ensaios com álcool hidratado em um automóvel Ford de quatro cilindros, evidenciando o potencial do etanol para aplicação em motores de combustão interna, conforme ilustrado na Figura 1. Ao longo da década de 1930, o debate sobre segurança energética ganhou relevância no país, impulsionado por alertas quanto à dependência do petróleo importado e à necessidade de alternativas nacionais, estabelecendo uma base conceitual que influenciaria políticas futuras de diversificação da matriz energética (UTZERI, 2013).

FIGURA 1 - CARRO MOVIDO A ÁLCOOL NOS ANOS 1920



Fonte: Utzeri (2013).

O marco decisivo da trajetória moderna do etanol ocorreu em 1975, com a criação do Programa Nacional do Álcool (Proálcool), em resposta direta à crise do petróleo de 1973. O programa promoveu a expansão da agroindústria canavieira, estimulou avanços tecnológicos nos processos fermentativos e impulsionou o desenvolvimento de motores dedicados ao etanol, estabelecendo as bases técnicas e industriais que viabilizariam, décadas depois, a consolidação dos veículos flex-fuel no mercado brasileiro (NIGRO; 2010).

A estruturação do setor sucroenergético brasileiro resultou de uma trajetória institucional ampla e contínua, iniciada ainda no período colonial e progressivamente fortalecida ao longo dos séculos XIX e XX. Esse processo envolveu a criação e a

atuação de diversos institutos agrícolas imperiais, como o Instituto Imperial de Agricultura da Bahia, Pernambuco e Sergipe, o Instituto Imperial de Agricultura Fluminense e o Instituto Imperial de Agricultura do Rio Grande do Sul, que estabeleceram as bases iniciais da pesquisa agrícola no país. Posteriormente, instituições como o Instituto Agrônomo de Campinas e o Instituto do Açúcar e do Alcool assumiram papel central na estruturação da pesquisa agrônoma, no melhoramento genético da cana-de-açúcar e na regulação da produção sucroalcooleira, promovendo a articulação entre ciência, tecnologia e políticas públicas (GRANADE *et al.*, 2024).

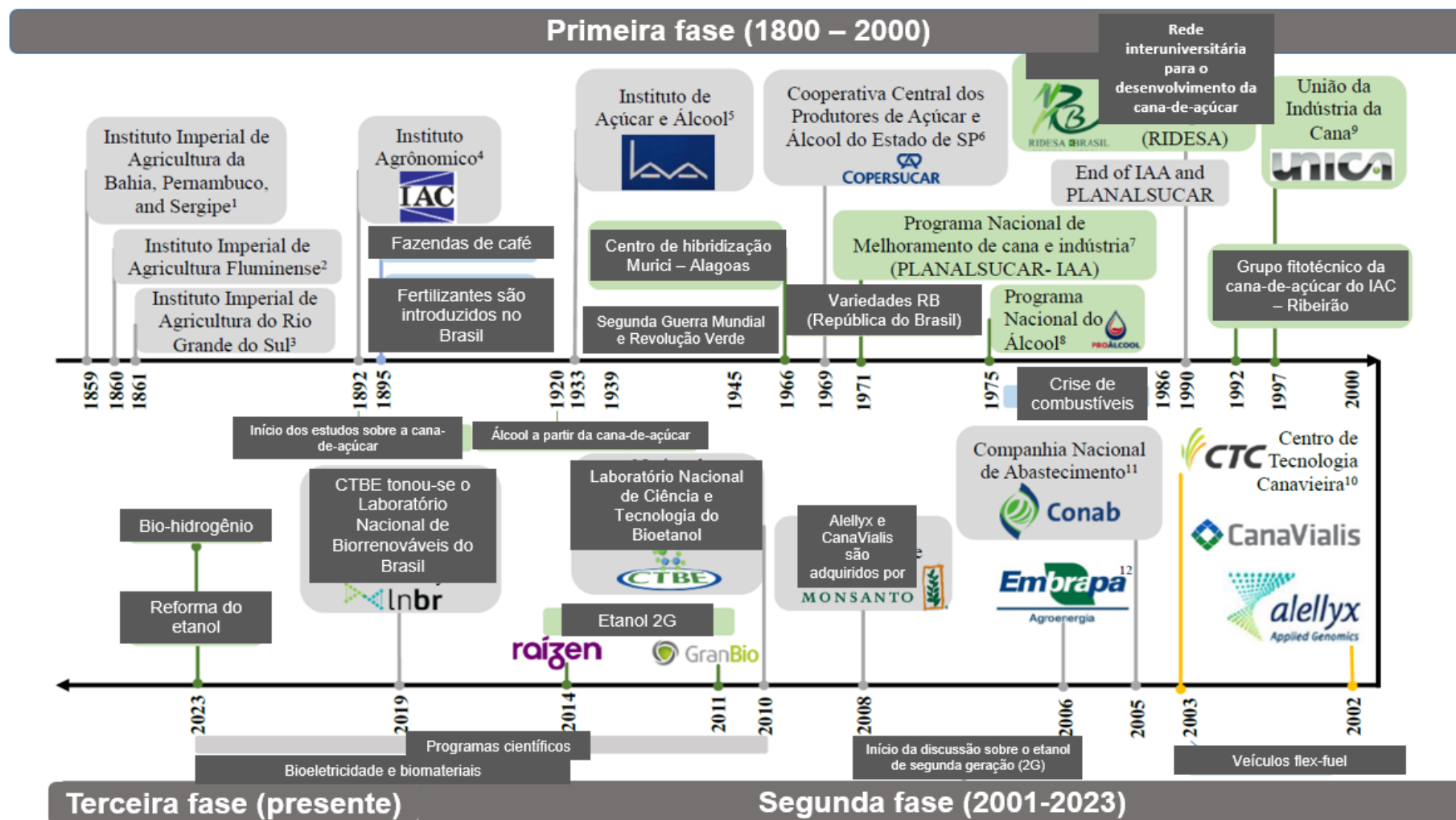
Ao longo desse percurso, diferentes atores passaram a desempenhar funções complementares no desenvolvimento da canavicultura brasileira. Institutos nacionais de pesquisa e regulação tornaram-se como pilares do avanço científico e institucional do setor, enquanto centros de pesquisa especializados voltados especificamente à cana-de-açúcar contribuíram para o aprimoramento agrônomo e tecnológico da cultura. Paralelamente, empresas privadas passaram a atuar de forma crescente na criação e difusão, ampliando a capacidade de inovação do setor e favorecendo ganhos de produtividade e eficiência. Esse arranjo institucional permitiu a convergência entre iniciativas públicas e privadas, fundamental para a consolidação do complexo sucroenergético.

A articulação entre eventos históricos de impacto global, instituições públicas de pesquisa, centros especializados e empresas privadas é sintetizada na Figura 2, que evidencia como a evolução da canavicultura brasileira esteve diretamente associada à construção de uma base científica sólida e a políticas públicas de longo prazo, estabelecendo o etanol como componente estratégico da matriz energética nacional, trazendo o panorama histórico dos principais programas científicos, tecnológicos e industriais vinculados à pesquisa e ao desenvolvimento da cana-de-açúcar no Brasil, abrangendo o período de 1859 a 2023.

A Figura enfatiza a evolução das características agrônomicas da cultura, contempla a atuação do Instituto Imperial de Agricultura da Bahia, Pernambuco e Sergipe (1), do Instituto Imperial de Agricultura Fluminense (2), do Instituto Imperial de Agricultura do Rio Grande do Sul (3), do Instituto Agrônomo (4), do Instituto do Açúcar e do Alcool (5), da Cooperativa Central dos Produtores de Açúcar e Alcool do Estado de São

Paulo (6), do Programa Nacional de Aperfeiçoamento da Indústria Açucareira e da Cana-de-Açúcar (7), do Programa Nacional do Alcool (8), da União da Indústria da Cana-de-Açúcar (9), do Centro de Tecnologia Canavieira (10), da Companhia Nacional de Abastecimento (11) e da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (12) (LIMA, 1992).

FIGURA 2 - PANORAMA HISTÓRICO DOS PRINCIPAIS PROGRAMAS CIENTÍFICOS, TECNOLÓGICOS E INDUSTRIAIS VINCULADOS À PESQUISA E AO DESENVOLVIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL.



Fonte: Adaptado de GRANADE *et al.*, (2024).

Mesmo após a retração do Programa Nacional do Alcool (Proálcool) ao longo da década de 1990, o setor sucroenergético brasileiro manteve um processo de modernização, impulsionado principalmente pela automação industrial, pela ampliação da cogeração de energia a partir do bagaço da cana-de-açúcar e pela descentralização da pesquisa científica. Instituições como a Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético (RIDESA), o Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) e centros privados de inovação desempenharam papel relevante nesse processo (CURSI *et al.*, 2022). Contudo, esse período também foi marcado por descontinuidades institucionais, instabilidade regulatória e políticas públicas inconsistentes, fatores que comprometeram a previsibilidade do setor e limitaram a consolidação do etanol como alternativa energética de longo prazo.

No início dos anos 2000, a introdução dos veículos flex-fuel redefiniu o mercado automotivo nacional, ao permitir a utilização de diferentes proporções de etanol e gasolina nos motores a combustão interna, ampliando a competitividade do combustível renovável e reduzindo a percepção de risco associada ao seu uso. Essa inovação tecnológica mitigou parcialmente os efeitos das falhas observadas nas políticas anteriores, ao transferir parte da decisão de consumo para o usuário final. Ainda assim, a trajetória do etanol permaneceu fortemente condicionada a fatores econômicos, regulatórios e conjunturais, evidenciando que sua viabilidade não depende exclusivamente de avanços tecnológicos.

Paralelamente, programas científicos de grande porte contribuíram para a construção do etanol como plataforma tecnológica estratégica. Destacam-se o Programa FAPESP de Pesquisa em Bioenergia (BIOEN), o Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (INCT do Bioetanol), o Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol e o Laboratório Nacional de Biorrenováveis (CTBE/LNBR), bem como iniciativas como o Sugarcane EST Genomics Project (SUCEST). Esses esforços ampliaram o conhecimento sobre a cadeia produtiva da cana-de-açúcar, viabilizando o desenvolvimento do etanol de segunda geração e de bioprodutos de maior valor agregado (BUCKERIDGE; 2014). Neste contexto, o termo bioetanol é empregado para enfatizar a origem renovável do combustível e sua inserção em uma lógica de bioeconomia.

Atualmente, os veículos flex-fuel representam mais de 75 por cento das vendas de automóveis leves no Brasil, refletindo a maturidade tecnológica do sistema e a

versatilidade do etanol como combustível automotivo (CONAB, 2024). No entanto, essa ampla adoção não elimina os desafios ambientais associados à sua utilização, especialmente no que se refere à formação de poluentes atmosféricos específicos, como os óxidos de nitrogênio (NOx), cuja geração pode ser influenciada pelas características físico-químicas do etanol e pelas condições de combustão.

No âmbito industrial e comercial, a materialização do etanol como produto automotivo pode ser ilustrada por marcos tecnológicos bem definidos. Embora existam registros de experiências experimentais com motores movidos a etanol desde a década de 1920, o primeiro automóvel produzido em série no Brasil movido exclusivamente a esse combustível foi o Fiat 147 a etanol, lançado em julho de 1979 (Figura 3). Esse modelo tornou-se um símbolo do pioneirismo brasileiro na adoção do etanol em larga escala, ainda que sua difusão inicial tenha ocorrido em um contexto de infraestrutura incipiente e forte dependência de incentivos governamentais, necessários para mitigar o risco tecnológico percebido por consumidores e fabricantes (STELLANTIS, 2024).

FIGURA 3 - FIAT 147: PRIMEIRO AUTOMÓVEL PRODUZIDO EM SÉRIE NO BRASIL MOVIDO EXCLUSIVAMENTE A ETANOL.



Fonte: Stellantis (2024).

Ao longo das décadas seguintes, oscilações nos preços relativos dos combustíveis, falhas na oferta e crises de abastecimento, como a observada no final dos anos 1980, comprometeram a confiança do consumidor e contribuíram para a retração dos veículos movidos exclusivamente a etanol. A retomada estrutural do combustível ocorreu somente com o advento da tecnologia flex-fuel, destacando-se o lançamento do Volkswagen Gol 1.6 Total Flex (Figura 4), em março de 2003, cuja arquitetura reduziu a dependência de políticas públicas diretas e ampliou a aceitação do etanol no mercado automotivo nacional.

FIGURA 4 - VOLKSWAGEN GOL POWER 1.6 TOTAL FLEX: VEÍCULO BICOMBUSTÍVEL (ETANOL E GASOLINA).



Fonte: Motor1.com (2014).

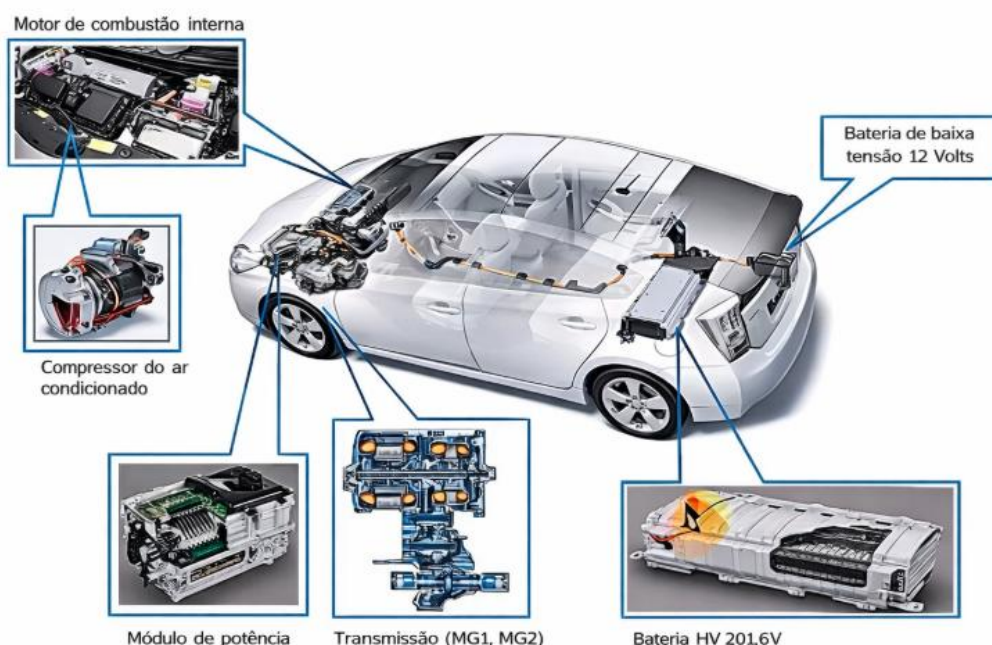
A redução da dependência do consumidor em relação à disponibilidade relativa de etanol ou gasolina acelerou a difusão dos motores flex-fuel no mercado brasileiro, ao permitir a adaptação dinâmica às oscilações de preço e oferta dos combustíveis. Esse avanço tecnológico contribuiu para o encerramento gradual da fase dos veículos monocombustíveis. Como marco simbólico desse processo, destaca-se a Volkswagen Kombi, que manteve configuração monocombustível¹ até meados dos anos 2000 e passou a adotar motorização flex apenas a partir de 2006, refletindo tanto limitações técnicas quanto decisões estratégicas da indústria automobilística diante das exigências regulatórias e de mercado (MOTOR1.COM, 2023; WEBMOTORS, 2024).

A discussão sobre o uso de etanol ou gasolina não se restringe apenas à escolha do combustível, mas envolve impactos ambientais diferenciados, especialmente no que se refere às emissões de poluentes regulados e não regulados. Embora o etanol apresente vantagens associadas à sua origem renovável e ao menor potencial de emissão de monóxido de carbono e hidrocarbonetos, sua combustão pode favorecer a formação de óxidos de nitrogênio (NOx) em determinadas condições operacionais, o que reforça a necessidade de análises comparativas mais criteriosas entre os combustíveis.

¹ Até 2006 a Kombi possuía em maioria de suas versões motorizações monocombustível a gasolina, mas também possuía motores operando exclusivamente com etanol. Motor flex foi implementado após 2006

A partir da década de 2010, a associação entre eletrificação veicular e uso do etanol deixou de ser uma hipótese futura e passou a constituir uma realidade tecnológica, materializada nos veículos híbridos flex. Esses sistemas combinam motores elétricos com motores de combustão interna capazes de operar com etanol hidratado, gasolina ou qualquer proporção de mistura, integrando estratégias complementares de mitigação de emissões. O Toyota Prius Hybrid Flex, lançado no Brasil em 2013 (Figura 5), exemplifica essa integração ao representar o primeiro híbrido flex produzido em escala comercial no mundo, apresentando o etanol como elemento ativo em arquiteturas veiculares de nova geração.

FIGURA 5 - ARQUITETURA DE UM VEÍCULO HÍBRIDO FLEX COM MOTOR ELÉTRICO E MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA OPERANDO COM ETANOL E GASOLINA.



Fonte: Adaptado de Reparação Automotiva (2024).

Estudos indicam que essa configuração híbrida possibilita reduções adicionais nas emissões de dióxido de carbono e de poluentes regulados, especialmente em ciclos urbanos, nos quais o motor elétrico assume maior protagonismo operacional. Ainda assim, a eficácia ambiental desses sistemas depende fortemente do perfil de uso, das condições de condução e do combustível predominante, o que reforça a necessidade de avaliações específicas sobre a contribuição do etanol na formação de NOx em diferentes regimes de operação (TOYOTA, 2019; IEA, 2023).

No campo regulatório, políticas públicas como o RenovaBio e o programa Combustíveis do Futuro fortaleceram os incentivos à redução de emissões no setor de transportes, enquanto programas industriais como o Inovar-Auto, Rota 2030 e o programa Mover contribuíram para a modernização da frota, o aumento da eficiência energética e o estímulo à inovação tecnológica (BRASIL, 2018). Apesar do avanço da eletromobilidade, impulsionado em parte pela elevada participação de fontes renováveis na matriz elétrica brasileira, o etanol permanece relevante como solução de descarbonização de curto e médio prazo.

Considerando o foco central deste trabalho na análise das emissões de poluentes provenientes de motores de combustão interna operando com etanol, torna-se metodologicamente pertinente antecipar a discussão acerca do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE). Esse programa constitui o principal marco regulatório nacional voltado ao controle das emissões veiculares, estabelecendo limites progressivos para poluentes como monóxido de carbono, enxofre, CO₂, hidrocarbonetos, óxidos de nitrogênio e material particulado. A implementação dessas diretrizes induziu avanços tecnológicos significativos nos motores de combustão interna, nos sistemas de pós-tratamento dos gases de exaustão e na qualidade dos combustíveis comercializados. Dessa forma, a inserção do PROCONVE no encadeamento textual fornece a base normativa necessária para a interpretação crítica dos dados de emissões analisados ao longo desta revisão bibliográfica, reforçando a coerência lógica do trabalho (IBAMA, 2023; CETESB, 2022).

Paralelamente, a abordagem do etanol aditivado é relevante sob os aspectos técnico e mercadológico. A incorporação de pacotes químicos destinados à melhoria da detergência, da estabilidade oxidativa e da proteção contra corrosão contribui para a manutenção da eficiência da combustão ao longo do tempo, com potenciais reflexos na redução das emissões de poluentes regulados, especialmente hidrocarbonetos não queimados e monóxido de carbono. Nesse sentido, a qualidade final do combustível emerge como variável determinante na análise das emissões veiculares em motores de combustão interna, evidenciando que os impactos ambientais associados ao seu uso não dependem exclusivamente do tipo de combustível, mas também de suas características físico-químicas e de sua formulação comercial (ANP, 2023).

Além do imperativo climático relacionado à mitigação das emissões de gases de efeito estufa, o estudo das emissões de poluentes regulados, como óxidos de nitrogênio, monóxido de carbono e aldeídos, assume importância central tanto para a Engenharia Mecânica quanto para a saúde pública. O etanol, por se tratar de um combustível oxigenado, altera a estequiometria e a cinética da combustão nos motores de combustão interna. Contudo, seu uso está associado ao aumento das emissões de aldeídos, em especial o acetaldeído, e pode influenciar a formação de NOx em função das temperaturas de combustão e das estratégias de calibração do motor.

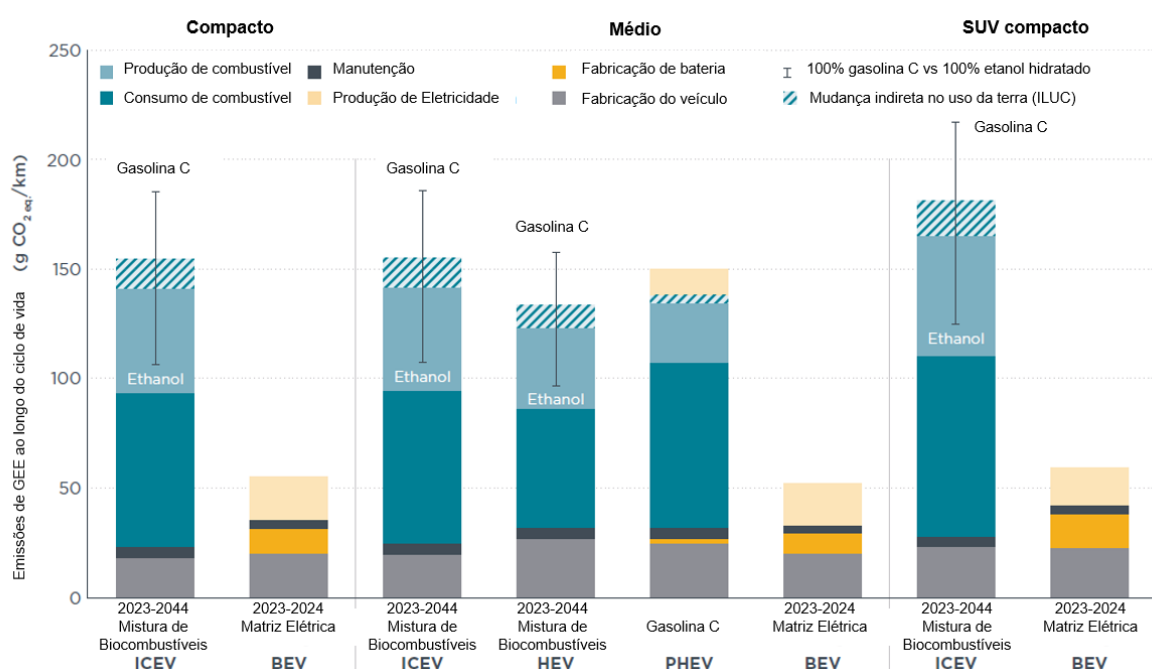
Esses aspectos impõem desafios adicionais à engenharia veicular, relacionados à otimização do processo de combustão e ao desenvolvimento de sistemas de pós-tratamento mais eficientes, sobretudo à luz das exigências mais rigorosas introduzidas pelas fases recentes do PROCONVE, com destaque para a fase L8, em vigor desde 2025. Assim, a análise das emissões associadas ao uso do etanol deve ser conduzida de forma crítica e integrada, considerando simultaneamente seus benefícios ambientais, suas limitações técnicas e as demandas regulatórias contemporâneas (CONSONI, 2021; TEXACO/GZH, 2025).

No planejamento energético de longo prazo, o Brasil considera o etanol como vetor estratégico para a descarbonização do setor automotivo, conforme delineado no Plano Nacional de Energia 2050, em razão de suas vantagens em emissões de CO₂ em análise de ciclo de vida e de sua contribuição à segurança energética. Contudo, o avanço das tecnologias veiculares e a crescente eletrificação global exigem que a avaliação do etanol seja continuamente atualizada à luz do estado da arte científico. Relatórios internacionais indicam que motores de combustão interna alimentados por combustíveis renováveis podem apresentar desempenho ambiental competitivo em contextos específicos, como o brasileiro, quando consideradas análises de ciclo de vida e condições reais de uso (BIEKER, 2021; ISENSTADT *et al.*, 2022; CHU; CUI, 2023).

A Figura 6 ilustra o comportamento das emissões de gases de efeito estufa ao longo do ciclo de vida das principais tecnologias veiculares disponíveis no Brasil, evidenciando a superioridade ambiental dos veículos elétricos, mas também a relevância do etanol na mitigação de emissões em frotas existentes. Na figura em questão, as barras de erro representam os cenários de operação exclusiva com

gasolina C (valor superior) e com etanol hidratado (valor inferior). Adicionalmente, avanços em biotecnologia, etanol celulósico e rotas emergentes, como a produção de hidrogênio renovável a partir do etanol, ampliam o papel estratégico desse biocombustível no cenário global (KUMAR; 2022).

FIGURA 6 - EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE) AO LONGO DO CICLO DE VIDA DE VEÍCULOS.



Fonte: Adaptado de International Council on Clean Transportation (2023).

Dessa forma, a compreensão do papel do etanol na transição para uma mobilidade de baixo carbono exige uma abordagem integrada que articule aspectos históricos, tecnológicos, regulatórios e ambientais. Mesmo diante do avanço da eletrificação veicular, o etanol mantém relevância estratégica como combustível renovável, especialmente em países com elevada disponibilidade de biomassa e infraestrutura consolidada, como o Brasil.

Falando exclusivamente sobre os efeitos do NO_x no nosso dia a dia, estudos epidemiológicos demonstram que o NO_x agrava doenças respiratórias preexistentes, como a asma e a bronquite, aumentando a frequência e a intensidade de crises, tosse e chiado. Além disso, a exposição crônica pode prejudicar as defesas do trato

respiratório contra microrganismos e aumentar a hiperresponsividade brônquica. O NOx também atua como precursor na formação de ozônio troposférico (O₃) e material particulado fino (MP2.5), que são poluentes secundários com impactos ainda mais severos na saúde, incluindo edemas pulmonares, problemas cardíacos e até mesmo o aumento da mortalidade por doenças respiratórias e cardiovasculares. Portanto, a mitigação das emissões de NOx é uma medida crucial não apenas para a proteção ambiental, mas também para a salvaguarda da saúde humana em centros urbanos e regiões afetadas pela poluição veicular e industrial.

Nesse contexto, a análise das emissões associadas ao uso do etanol em motores de combustão interna insere-se em um debate contemporâneo e dinâmico, fundamentando a relevância e a atualidade deste trabalho frente às transformações tecnológicas e regulatórias que moldam o futuro da mobilidade.

2 JUSTIFICATIVA

A análise das emissões de poluentes associadas aos motores de combustão interna que utilizam etanol justifica-se pela relevância ambiental, tecnológica e regulatória do tema no contexto brasileiro. O setor de transportes exerce papel estratégico na matriz energética nacional e na geração de emissões atmosféricas, tornando essencial a avaliação criteriosa do desempenho ambiental dos combustíveis empregados, especialmente daqueles amplamente utilizados no país. O etanol destaca-se como combustível de uso consolidado, demandando compreensão técnica aprofundada sobre seu comportamento emissivo.

Do ponto de vista científico e tecnológico, a justificativa deste estudo reside na necessidade de sistematizar o conhecimento existente acerca das emissões geradas pela combustão do etanol em motores de combustão interna. A complexidade dos processos de combustão e a diversidade de poluentes envolvidos exigem análises fundamentadas em literatura técnica especializada, particularmente diante das exigências ambientais progressivamente mais restritivas impostas à indústria automotiva. A consolidação das evidências científicas disponíveis contribui para o avanço do conhecimento na área de Engenharia Mecânica, com reflexos diretos no desenvolvimento e na otimização de motores.

Dessa forma, a pertinência desta revisão bibliográfica está associada à contribuição que o estudo oferece para a compreensão integrada das emissões veiculares relacionadas ao uso do etanol, fornecendo subsídios técnicos relevantes para pesquisadores, profissionais da engenharia e formuladores de políticas públicas. Ao reunir e analisar criticamente a produção científica existente, o trabalho reforça a importância do etanol no debate sobre controle de poluentes veiculares, mantendo-se alinhado às demandas ambientais e tecnológicas contemporâneas.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

Avaliar, por meio de revisão bibliográfica e análise técnica da literatura especializada, se o uso do etanol em motores de combustão interna se justifica no contexto atual, considerando suas emissões de poluentes, com ênfase nos mecanismos de formação de NOx e em seus impactos ambientais, estabelecendo comparações conceituais com combustíveis convencionais e mencionando, de forma contextual e não aprofundada, alternativas energéticas, como o hidrogênio e a eletricidade.

3.2 Objetivos Específicos

Para atender ao objetivo geral deste estudo, definem-se os seguintes objetivos específicos, orientados por uma abordagem técnica e crítica, com foco nos óxidos de nitrogênio como elemento central de análise:

1. Analisar, com base na literatura científica, os mecanismos de formação de óxidos de nitrogênio (NOx) em motores de combustão interna operando com etanol, considerando as condições termodinâmicas, o processo de combustão e os fatores que influenciam sua geração;
2. Comparar o comportamento das emissões de NOx em motores alimentados com etanol e com combustíveis convencionais, relacionando essas emissões às características físico-químicas dos combustíveis e às condições de operação do motor;
3. Avaliar a influência das tecnologias aplicadas aos motores flex fuel, incluindo estratégias de controle da combustão e da razão de compressão, sobre a formação e o controle das emissões de NOx;
4. Analisar o uso do etanol no contexto do mercado brasileiro, considerando sua relevância estratégica, políticas públicas e inovações tecnológicas, à luz das exigências ambientais relacionadas às emissões de NOx;
5. Desenvolver uma análise crítica sobre a viabilidade técnica e ambiental do uso do etanol em motores de combustão interna, considerando suas vantagens e limitações no controle das emissões de NOx, de modo a subsidiar a discussão sobre sua adequação no cenário atual.

4 METODOLOGIA

Este estudo caracteriza-se como uma pesquisa exploratória e descritiva, de abordagem qualitativa, com ênfase em revisão bibliográfica, cujo objetivo é analisar os impactos ambientais, energéticos e tecnológicos do uso do etanol como biocombustível em motores de combustão interna, a partir de dados previamente publicados na literatura científica.

A metodologia fundamentou-se em levantamento teórico realizado por meio da consulta a artigos científicos, dissertações, teses, livros especializados, relatórios técnicos e documentos institucionais, publicados majoritariamente nos últimos vinte anos, com prioridade para estudos divulgados a partir de 2019, período que concentra os avanços mais recentes na engenharia automotiva e nas políticas públicas de transição energética. O recorte temporal da pesquisa compreendeu o segundo semestre de 2024 e o segundo semestre de 2025, assegurando a atualidade das informações analisadas.

O levantamento bibliográfico foi realizado nas bases SciELO, Google Scholar, ScienceDirect, Portal de Periódicos da CAPES e Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD), complementado por fontes governamentais e institucionais, como o Ministério de Minas e Energia, a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis e a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo.

Foram priorizados estudos publicados entre 2019 e 2025. Entretanto, obras anteriores foram incluídas de forma criteriosa quando apresentaram relevância histórica, contribuição teórica consolidada e caráter fundacional para a compreensão da evolução da cana-de-açúcar e do etanol no Brasil. Essas referências clássicas foram utilizadas exclusivamente para contextualização histórica, complementando a literatura contemporânea sem substituí-la.

Os critérios de inclusão abrangeram estudos que tratassem diretamente do uso do etanol como combustível automotivo, comparações entre etanol e gasolina quanto a emissões, desempenho e viabilidade técnica, bem como publicações com texto integral disponível em português, inglês ou espanhol. Foram excluídos materiais

alheios ao tema, conteúdos opinativos sem embasamento técnico-científico, publicações desatualizadas ou sem revisão por pares e obras sem acesso ao texto completo.

A análise dos dados foi conduzida por meio da técnica de análise de conteúdo, permitindo a organização das informações em categorias temáticas alinhadas aos objetivos do estudo, como desempenho energético, emissões atmosféricas, evolução tecnológica dos motores flex-fuel e políticas públicas de incentivo ao etanol. A triangulação das fontes contribuiu para a construção de uma abordagem crítica e integrada sobre o papel do etanol no setor automotivo.

Em conformidade com as diretrizes éticas e acadêmicas vigentes, e considerando a evolução das ferramentas tecnológicas no processo de pesquisa e escrita, informa-se que a plataforma de Inteligência Artificial Manus AI foi utilizada como ferramenta de apoio na elaboração deste trabalho. Sua aplicação restringiu-se à organização de ideias, estruturação de conteúdos e aprimoramento da clareza textual, sempre sob a supervisão humana e o crivo crítico do autor. Todas as informações e análises contidas neste trabalho foram revisadas, validadas e são de inteira responsabilidade do pesquisador, garantindo a originalidade e a integridade acadêmica do conteúdo, em alinhamento com as recomendações do Ministério da Educação (MEC) e as normas da ABNT sobre o uso ético de tecnologias de IA em produções científicas.

5 REFERENCIAL TEÓRICO

Este tópico aborda o papel do etanol como alternativa aos combustíveis fósseis, destacando seus impactos ambientais, econômicos e nas emissões veiculares. São discutidos seus benefícios na redução de poluentes e gases de efeito estufa, especialmente no contexto brasileiro, bem como os desafios associados à sua produção e ao uso do solo. De modo geral, evidencia-se o potencial do etanol como solução relevante para a descarbonização do setor de transportes.

5.1 Emissões veiculares associados ao uso do etanol

O uso do etanol como combustível automotivo insere-se em um contexto amplo de enfrentamento das mudanças climáticas, de reestruturação da matriz energética e de busca por alternativas aos combustíveis fósseis no setor de transportes. A análise dos aspectos ambientais, econômicos e das emissões veiculares associadas ao etanol requer uma abordagem integrada, que considere não apenas os potenciais benefícios na redução de gases de efeito estufa e poluentes regulados, mas também os condicionantes técnicos, produtivos e estruturais que influenciam seu desempenho ao longo de toda a cadeia. Nesse sentido, torna-se fundamental avaliar o papel do etanol nos cenários brasileiro e internacional, articulando suas propriedades físico-químicas, sua inserção no mercado, as políticas públicas de incentivo e os impactos ambientais observados tanto na fase de uso quanto ao longo do ciclo de vida do combustível.

As emissões de dióxido de carbono (CO_2), juntamente com outros gases de efeito estufa, como metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), constituem os principais vetores das mudanças climáticas contemporâneas, em razão do aumento da retenção de radiação infravermelha na atmosfera.

Nesse contexto, o setor de transportes assume papel central nas estratégias de mitigação climática, sendo responsável por parcela expressiva das emissões globais de gases de efeito estufa, sobretudo em função da predominância do transporte rodoviário e da elevada dependência de derivados do petróleo, as estimativas giram em torno de 23% a 25%. (EPE, 2021).

A incorporação de biocombustíveis, em especial o etanol, destaca-se como alternativa relevante para a redução das emissões veiculares. Embora sua participação global ainda seja limitada, o Brasil apresenta um cenário singular, no qual os combustíveis renováveis representam cerca de 23 % da matriz energética do transporte, com destaque para o etanol, que ocupa posição central nesse contexto (EPE, 2021).

Do ponto de vista técnico, o etanol apresenta propriedades físico-químicas favoráveis à aplicação em motores de combustão interna, como elevado índice de octanagem (108–110 RON) e estrutura molecular oxigenada, que favorecem uma combustão mais completa. Essas características contribuem para a redução das emissões de monóxido de carbono e de hidrocarbonetos não queimados, além de possibilitarem maiores taxas de compressão e potenciais ganhos de eficiência térmica em motores do ciclo Otto (HEYWOOD, 2018).

No cenário global de produção de biocombustíveis, os Estados Unidos figuram como o maior produtor mundial de etanol, enquanto o Brasil ocupa a segunda posição, com base majoritária na cana-de-açúcar². Projeções recentes indicam crescimento contínuo da oferta e da demanda, impulsionado pela expansão da frota de veículos flex-fuel e pela implementação de políticas de descarbonização no setor de transportes, em consonância com diretrizes internacionais de mitigação das mudanças climáticas (IEA, 2023). Entretanto, o desempenho ambiental do etanol não é determinado exclusivamente por suas características na fase de uso, estando também condicionado a aspectos associados às mudanças indiretas no uso do solo, conhecidas como *Indirect Land Use Change* (ILUC).

As mudanças indiretas no uso do solo referem-se aos efeitos decorrentes da expansão agrícola sobre áreas naturais, como florestas e ecossistemas nativos, resultantes do deslocamento de outras atividades produtivas. Esses efeitos podem comprometer o balanço positivo de emissões do etanol caso não sejam adequadamente controlados por políticas de ordenamento territorial e práticas agrícolas sustentáveis (IPCC, 2021). Dessa forma, a análise ambiental do etanol deve

² Produção de etanol nos Estados Unidos se destaca pela produção majoritariamente com base em amido de milho, chegando a cerca de 94% do etanol produzido. Em 2025 atingiu recorde de 16,49 bilhões de galões (62,4 bilhões de litros).

considerar não apenas as emissões veiculares, mas também os impactos associados à cadeia produtiva como um todo.

Nesse contexto, o etanol de segunda geração representa um avanço tecnológico relevante ao utilizar resíduos lignocelulósicos da cadeia sucroenergética, como o bagaço e a palha da cana-de-açúcar, ampliando a produção de biocombustível sem a necessidade de expansão de áreas cultivadas. Estudos de Avaliação do Ciclo de Vida indicam que o etanol de segunda geração pode proporcionar reduções adicionais nas emissões de gases de efeito estufa quando comparado ao etanol convencional de primeira geração, contribuindo para a mitigação dos impactos associados ao uso do solo (BENVENUTTI *et al.*, 2023).

No Brasil, a ampla difusão dos motores flex-fuel, introduzidos comercialmente a partir de 2003, foi determinante para a consolidação do etanol no mercado nacional. Em 2023, esses veículos representaram mais de 80 % da frota do ciclo Otto, evidenciando a maturidade tecnológica, a infraestrutura consolidada e a elevada capacidade de absorção do biocombustível pelo setor de transportes (ANFAVEA, 2023). Esse contexto estrutural sustenta a expansão contínua da produção e do consumo de etanol no país.

A Tabela 1 apresenta a evolução recente da produção e do consumo de etanol no Brasil entre 2023 e 2026, evidenciando a robustez da cadeia produtiva nacional e sua capacidade de crescimento. Observa-se que a produção total acompanha a ampliação do consumo interno, com destaque para a participação do etanol hidratado³ no atendimento à demanda do mercado de veículos flex-fuel. O etanol anidro, por sua vez, é destinado majoritariamente à mistura obrigatória com a gasolina, conforme regulamentação vigente, desempenhando papel complementar na matriz de combustíveis do ciclo Otto.

³ O etanol hidratado apresenta teor de água em torno de 4 a 5 % (v/v) e é utilizado diretamente como combustível em motores do tipo flex-fuel, enquanto o etanol anidro possui teor de água inferior a 1 % (v/v), sendo destinado exclusivamente à mistura com a gasolina. Essa diferenciação está associada às distintas propriedades físico-químicas de cada tipo de etanol, as quais influenciam o processo de combustão, o desempenho do motor e os perfis de consumo e de emissões veiculares.

TABELA 1 - PRODUÇÃO E CONSUMO DE ETANOL NO BRASIL (2023–2026)

Ano	Produção total de etanol (bilhões de litros)	Etanol anidro (bilhões de litros)	Etanol hidratado (bilhões de litros)	Consumo total (bilhões de litros)
2023	35,61	14,29	21,32	34,2
2024	36,10	14,80	21,30	34,8
2025	36,80 (projeção)	14,50 (projeção)	21,30 (projeção)	35,8 (projeção)
2026	38,20 (projeção)	15,20 (projeção)	22,10 (projeção)	37,30 (projeção)

Fonte: Elaborado pelo autor com base em dados da CONAB (2024), ANP (2023; 2025) e EPE (2023).

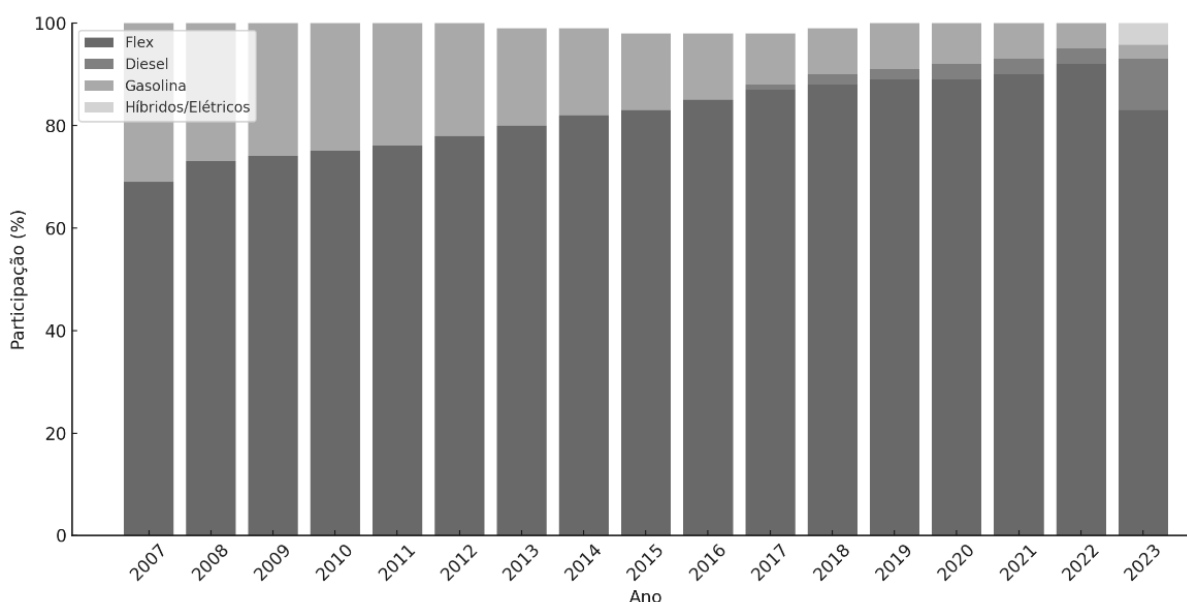
No âmbito nacional, políticas públicas como o Programa Rota 2030 têm contribuído para o aumento da eficiência energética veicular, potencializando os benefícios ambientais associados ao uso de combustíveis de menor intensidade de carbono (MINISTÉRIO DA ECONOMIA, 2020). Nesse cenário, a Avaliação do Ciclo de Vida destaca-se como ferramenta essencial para a comparação entre diferentes tecnologias de propulsão, ao permitir a quantificação sistemática dos impactos ambientais desde a extração das matérias-primas até o destino dos veículos e combustíveis.

Análises de Avaliação do Ciclo de Vida indicam que veículos abastecidos com etanol apresentam menor potencial de aquecimento global em comparação aos movidos exclusivamente a combustíveis fósseis, desde que sua produção não esteja associada ao desmatamento (BENVENUTTI *et al.*, 2023). Projeções apontam que o aumento da participação do etanol no consumo energético da frota leve pode resultar em reduções significativas das emissões de CO₂ em cenários futuros (ANFAVEA, 2021).

Estudos recentes demonstram que veículos elétricos e híbridos concentram emissões relevantes na fase de produção, especialmente na fabricação de baterias, e que seus benefícios climáticos dependem fortemente da intensidade de carbono da matriz elétrica utilizada (HIRZ, 2022). No contexto brasileiro, caracterizado por matriz energética majoritariamente renovável, o etanol apresenta desempenho ambiental competitivo e, em determinados cenários, superior ao de tecnologias elétricas dependentes de matrizes mais intensivas em carbono (VELANDIA VARGAS, 2021).

Complementarmente, a Figura 7 apresenta a evolução do consumo de combustíveis em veículos automotores leves no Brasil ao longo do período de 2007 a 2023, destacando a consolidação do etanol, a redução gradual da participação da gasolina, o crescimento discreto do diesel em automóveis leves e o surgimento progressivo de veículos híbridos e elétricos a partir de 2018. Apesar de desafios específicos, como o aumento das emissões de aldeídos durante a partida a frio, o etanol mantém desempenho favorável em termos de emissões de CO₂ equivalente ao longo do ciclo de vida (CETESB, 2022).

FIGURA 7 - DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM VEÍCULOS AUTOMOTORES LEVES NO BRASIL (2007–2023).



Fonte: Adaptado de ANFAVEA (2023); ICCT – International Council on Clean Transportation (2023).

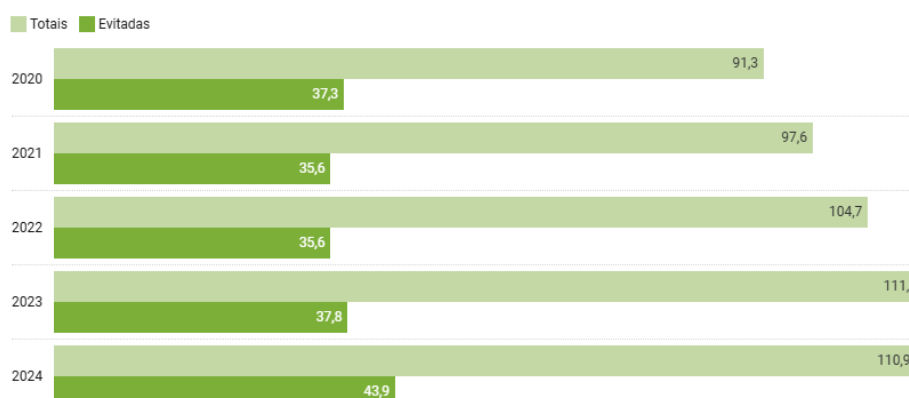
Assim, a análise dos aspectos ambientais, econômicos e das emissões veiculares relacionadas ao uso do etanol evidencia que esse biocombustível apresenta desempenho ambiental favorável no contexto brasileiro, especialmente quando considerada a elevada participação dos veículos *flex-fuel*, a infraestrutura consolidada e a predominância de fontes renováveis na matriz energética nacional. Embora persistam desafios associados ao uso do solo e a determinadas emissões específicas, os resultados de Avaliação do Ciclo de Vida indicam que o etanol pode contribuir de maneira consistente para a mitigação das emissões veiculares e para a redução do potencial de aquecimento global, desde que sua produção seja conduzida sob critérios

de sustentabilidade. O etanol consolida-se como uma solução tecnicamente madura e estrategicamente relevante no curto e médio prazo para a descarbonização do transporte rodoviário no Brasil, servindo de base para a análise mais específica das emissões reguladas, em especial os óxidos de nitrogênio, abordadas nos tópicos subsequentes. (MINASPETRO, 2025)

Já é possível visualizar alguns resultados da utilização do etanol na pesquisa realizada pelo Observatório de Inovação e Conhecimento em Bioeconomia (OCBio), da Fundação Getúlio Vargas (FGV). No estudo é possível verificar que mesmo com o crescimento da utilização de combustível pelos veículos leves em 3,6% tivemos uma redução na emissão de gases de efeito estufa em 0,7% em 2024. (MINASPETRO, 2025)

Menos poluente, o etanol ampliou sua participação no mercado, passando de 36,5% em 2023 para 41,1% no ano seguinte. Esse avanço foi impulsionado principalmente pelo aumento nas vendas de etanol hidratado, comercializado diretamente nos postos, cujo market share cresceu cinco pontos percentuais. Em contrapartida, o etanol anidro, utilizado na mistura com a gasolina, apresentou queda de 1,1 ponto percentual.

FIGURA 8 - EVOLUÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA POR VEÍCULOS LEVES



Fonte: Adaptado de MINASPETRO (2025)

A Figura 8, contextualiza a relevância global da pesquisa sobre combustíveis alternativos. Esta figura ilustra a tendência histórica das emissões de poluentes,

medida em milhões de toneladas de gás carbônico equivalente destacando a necessidade de descarbonização do setor de transportes.

5.2 Mecanismos de formação dos óxidos de nitrogênio

Essa seção irá abordar os mecanismos de formação dos óxidos de nitrogênio (NOx) em motores de combustão interna, com ênfase na influência do etanol e de misturas etanol–gasolina. São discutidos os principais fatores que afetam a geração desses poluentes, como temperatura, presença de oxigênio e condições de operação do motor, bem como os mecanismos térmico e instantâneo de formação. De modo geral, evidencia-se que o etanol pode tanto reduzir quanto aumentar as emissões de NOx, dependendo das condições de funcionamento, destacando a complexidade do fenômeno e a importância de estratégias adequadas de controle.

A formação de óxidos de nitrogênio (NOx) em motores de combustão interna constitui um dos principais desafios ambientais associados ao uso de combustíveis automotivos, em razão de seus impactos sobre a qualidade do ar e a saúde humana. No caso de motores do ciclo Otto operando com etanol ou misturas etanol–gasolina, a formação desses poluentes é fortemente influenciada pelas propriedades físico-químicas do combustível, que alteram as condições termodinâmicas da combustão, o perfil térmico no interior do cilindro e a cinética das reações químicas envolvidas. Assim, a compreensão dos mecanismos de formação de NOx torna-se essencial para a avaliação crítica do desempenho ambiental do etanol em aplicações veiculares.

Os óxidos de nitrogênio constituem um grupo de poluentes regulados formados predominantemente por óxido nítrico (NO) e dióxido de nitrogênio (NO₂), enquanto outras espécies, como N₂O, N₂O₃ e N₂O₄, ocorrem em concentrações residuais nos gases de escape (NORMANN *et al.*, 2009). Em motores de ignição por centelha, a formação de NOx está diretamente associada à oxidação do nitrogênio molecular do ar em condições de elevada temperatura durante o processo de combustão (CHONG *et al.*, 2010). De modo geral, a geração desses poluentes depende da interação entre a temperatura máxima atingida no cilindro, a concentração de oxigênio disponível, a razão de equivalência⁴ da mistura ar–combustível e o tempo de

⁴ Razão de equivalência: A razão de equivalência na combustão é a proporção entre a relação ar–combustível real e a estequiométrica (ideal), usada para determinar se a mistura é rica ou pobre.

residência dos reagentes em condições favoráveis à reação entre nitrogênio e oxigênio atmosféricos (MASUM *et al.*, 2013).

No contexto do uso do etanol como combustível, essas variáveis passam a ser influenciadas por características intrínsecas do biocombustível, como o elevado índice de octanagem, o teor de oxigênio presente em sua molécula e o alto calor latente de vaporização. O elevado número de octanas do etanol permite a operação do motor com maiores taxas de compressão e avanços de ignição mais agressivos, causando uma menor propensão à detonação e favorecendo ganhos de eficiência térmica. Entretanto, essas mesmas condições podem elevar as temperaturas máximas no interior do cilindro, especialmente sob regimes de alta carga, criando um ambiente favorável à formação de NOx quando não são adotadas estratégias adequadas de controle da combustão (FAJRI *et al.*, 2017).

Em motores Otto, o mecanismo predominante de formação de NOx é o denominado NOx térmico, descrito classicamente pelo mecanismo de Zeldovich, que se intensifica em temperaturas superiores a aproximadamente 1800 K. Esse mecanismo apresenta elevada energia de ativação, da ordem de 314 kJ/mol, o que torna sua taxa de formação extremamente sensível à temperatura. Dessa forma, picos térmicos elevados, altas concentrações de oxigênio e longos tempos de residência dos gases na câmara de combustão favorecem intensamente a produção de NOx térmico (VARATHARAJAN, 2012). Estratégias de combustão que elevam a temperatura máxima no cilindro tendem a aumentar as emissões de NOx, enquanto aquelas que promovem o resfriamento da mistura atuam como mecanismos indiretos de mitigação.

A concentração de etanol na mistura combustível exerce influência direta sobre o perfil térmico no interior do cilindro e, conseqüentemente, sobre os mecanismos de formação de NOx. Em misturas com teores moderados a elevados de etanol, observa-se, de modo geral, redução progressiva da temperatura máxima de combustão, favorecendo a diminuição da formação de NOx térmico (LIU *et al.*, 2016). Ensaios experimentais conduzidos em motores de ignição por centelha indicam reduções consistentes de NOx para misturas contendo entre 30 % e 85 % de etanol em volume, atribuídas principalmente ao efeito de resfriamento da chama (TURNER *et al.*, 2011).

O etanol apresenta uma característica particularmente relevante nesse contexto, que é o seu elevado calor latente de vaporização. Durante a vaporização do combustível, ocorre resfriamento significativo da carga admitida, reduzindo a temperatura média da mistura ar-combustível e, conseqüentemente, limitando os picos térmicos responsáveis pela formação de NOx térmico. Esse efeito explica por que diversos estudos experimentais reportam redução das emissões de NOx em motores operando com misturas etanol-gasolina, sobretudo em condições de carga parcial e operação próxima à estequiometria (SONG *et al.*, 2007).

Além do NOx térmico, o mecanismo conhecido como NOx instantâneo ou *prompt NOx* pode contribuir para as emissões totais em condições específicas de operação. Esse mecanismo ocorre principalmente no início da combustão, antes do estabelecimento das altas temperaturas características do NOx térmico, estando associado à reação entre o nitrogênio molecular e radicais hidrocarbonetos formados na frente de chama, especialmente em condições de mistura rica. No caso do etanol, sua estrutura molecular mais simples e o elevado teor de oxigênio tendem a reduzir a formação desses radicais quando comparado à gasolina, limitando a contribuição relativa do *prompt NOx* em regimes estabilizados de operação (SHAHIR *et al.*, 2015).

A Tabela 2 evidencia que a adição de 20% v/v de etanol à gasolina (E20) resulta, de modo geral, em redução das emissões específicas de NOx em grande parte dos regimes de operação avaliados. Observa-se que as reduções mais expressivas ocorrem em rotações intermediárias e sob cargas parciais, com diminuições superiores a 20% em alguns pontos, comportamento associado ao efeito de resfriamento da carga promovido pelo elevado calor latente de vaporização do etanol. Em contrapartida, em condições específicas, como a operação a 2500 rpm com 100% de abertura da borboleta, verifica-se leve aumento das emissões de NOx para a mistura E20, indicando que, sob altas cargas, a intensificação da combustão e o aumento das temperaturas máximas no cilindro podem se sobrepor ao efeito de resfriamento. Esses resultados reforçam o caráter não linear da influência do etanol sobre a formação de NOx e destacam a forte dependência das emissões em relação às condições operacionais do motor.

TABELA 2 - EMISSÕES ESPECÍFICAS DE NOx PARA GASOLINA PURA (E0) E MISTURA E20 EM DIFERENTES REGIMES DE OPERAÇÃO DO MOTOR

Rotação do motor (rpm)	TPS (%)	NOx – E0 (g/kWh)	NOx – E20 (g/kWh)	Variação percentual (E20 vs. E0)
1500	25	~13	~10	-23%
1500	50	~15	~12	-20%
1500	75	~14	~12	-14%
1500	100	~11	~10	-9%
2500	25	~18	~15	-17%
2500	50	~23	~18	-22%
2500	75	~26	~21	-19%
2500	100	~14	~15	+7%
3500	25	~26	~23	-12%
3500	50	~34	~31	-9%
3500	75	~37	~35	-5%
3500	100	~20	~17	-15%
4500	25	~48	~43	-10%
4500	50	~20	~18	-10%
4500	75	~22	~20	-9%
4500	100	~21	~18	-14%

Fonte: Elaborado pelo autor (2025) e adaptado de TIBAQUIRÁ *et al.* (2018). TPS corresponde à posição da borboleta de aceleração (*Throttle Position Sensor*).

Ressalta-se que esses resultados são representativos de um conjunto específico de condições experimentais e não devem ser interpretados como universais, uma vez que variações no projeto do motor, no ciclo de ensaio e nas estratégias de controle podem resultar em perfis distintos de emissões. Na Tabela 2 os resultados foram obtidos em motores 1.4 DOHC⁵ e 1.6 SOHC⁶ movidos a gasolina construídos pela General Motors.

De modo geral, a formação de NOx em motores de ignição por centelha operando com etanol resulta da interação complexa entre fenômenos térmicos, cinéticos e químicos, sendo fortemente condicionada pelas propriedades do combustível, pelas condições operacionais do motor e pelas estratégias de controle da combustão.

⁵ DOHC: Duplo Comando de Válvulas no Cabeçote

⁶ SOHC: Comando Simples no Cabeçote

Embora o etanol possa contribuir para a redução das emissões de NOx em diversos regimes de operação, especialmente em condições próximas à estequiometria, sua influência não é uniforme, podendo variar conforme a carga, a rotação, a razão de compressão e o teor de etanol na mistura. Dessa forma, a avaliação do etanol no contexto das emissões de NOx deve ser conduzida de maneira crítica e contextualizada, servindo de base para a discussão das estratégias de controle e mitigação desses poluentes.

5.3 Influência das propriedades químicas e físico-químicas do etanol na combustão e nas emissões de motores de combustão interna

O objetivo desse próximo tópico, será avaliado a influência das propriedades químicas e físico-químicas do etanol sobre o processo de combustão, o desempenho dos motores e a formação de emissões, com destaque para os óxidos de nitrogênio (NOx). Fatores como densidade, poder calorífico, calor latente de vaporização, teor de oxigênio e índice de octanagem.

As propriedades químicas e físico-químicas do etanol exercem influência direta sobre o processo de combustão, o desempenho dos motores e os perfis de emissões veiculares, especialmente no que se refere à formação de óxidos de nitrogênio (NOx). Dentre as propriedades mais relevantes para aplicações automotivas, destacam-se:

- **Densidade:**

A densidade ligeiramente superior do etanol em relação à gasolina, variando entre 5% e 8%, pode alterar a massa efetivamente injetada em sistemas volumétricos, influenciando indiretamente o perfil térmico da combustão (MOFIJUR *et al.*, 2016).

- **Poder Calorífico:**

O menor poder calorífico implica maior consumo específico, embora a energia disponível por unidade de mistura estequiométrica permaneça semelhante para ambos os combustíveis, o que explica a manutenção do desempenho quando o motor é adequadamente calibrado (DENG *et al.*, 2018).

- Razão ar-combustível:

A razão ar-combustível estequiométrica inferior à da gasolina exige ajustes contínuos no gerenciamento eletrônico do motor, afetando diretamente o regime térmico da combustão e o potencial de formação de NO_x, especialmente em condições de carga elevada (MASUM *et al.*, 2013).

- Calor latente:

O elevado calor latente de vaporização do etanol promove resfriamento significativo da mistura durante a vaporização, reduzindo as temperaturas máximas no interior do cilindro e, conseqüentemente, inibindo a formação térmica de NO_x, fortemente dependente de picos térmicos elevados. Em contrapartida, esse mesmo efeito pode prejudicar a vaporização durante a partida a frio, afetando temporariamente o controle das emissões (AMIRANTE *et al.*, 2017; IODICE *et al.*, 2018).

- Teor de oxigênio:

O teor de oxigênio do etanol favorece uma combustão mais completa, reduzindo emissões de CO e HC. Contudo, sob determinadas condições operacionais, esse oxigênio adicional pode intensificar localmente a reação de combustão e elevar a temperatura da chama, produzindo um efeito competitivo sobre as emissões de NO_x. Assim, o impacto do etanol sobre o NO_x resulta do balanço entre o resfriamento evaporativo e o aumento da reatividade química da mistura (FAJRI *et al.*, 2017).

- Octanagem:

O elevado número de octanas do etanol permite maiores taxas de compressão sem ocorrência de detonação, favorecendo ganhos de eficiência térmica. Entretanto, taxas de compressão mais elevadas tendem a aumentar as temperaturas máximas no cilindro, podendo resultar em incrementos nas emissões de NO_x sob altas cargas, o que reforça a necessidade de estratégias de controle adequadas (JAMROZIK *et al.*, 2018).

A presença de oxigênio na estrutura molecular do etanol⁷ contribui para uma combustão mais completa, intensificando a oxidação de monóxido de carbono e hidrocarbonetos não queimados, sobretudo em condições de mistura rica. Adicionalmente, o elevado calor latente de vaporização e a maior velocidade de propagação da chama promovem o resfriamento da carga admitida, elevando a eficiência volumétrica e reduzindo a tendência à detonação. Esses efeitos são potencializados em motores equipados com injeção direta de combustível, controle eletrônico avançado da razão ar–combustível e estratégias otimizadas de avanço de ignição (COSTAGLIOLA *et al.*, 2016).

Do ponto de vista técnico, o etanol apresenta elevado índice de octanagem, tipicamente superior a 108 RON, em comparação à gasolina comercial, cujo índice situa-se entre 87 e 95 RON, a depender da formulação. Essa característica permite a operação dos motores com maiores taxas de compressão e avanços de ignição mais agressivos, reduzindo a propensão à detonação e favorecendo ganhos de eficiência térmica e potência específica em motores do ciclo Otto. Em contrapartida, o menor poder calorífico inferior do etanol, aproximadamente 26,8–27,0 MJ/kg, frente aos cerca de 43–44 MJ/kg da gasolina, implica maior consumo volumétrico para uma mesma demanda energética (HEYWOOD, 2018).

Sob a ótica ambiental, o etanol apresenta potencial de redução das emissões de dióxido de carbono em razão do menor teor de carbono em sua composição e da origem biogênica desse elemento, contribuindo para a mitigação das emissões ao longo do ciclo de vida do combustível (NORMANN *et al.*, 2009).

A Tabela 3 apresenta as principais propriedades físico-químicas da gasolina e do etanol relevantes para o funcionamento de motores de ignição por centelha e para os mecanismos de formação de poluentes, em especial os óxidos de nitrogênio. Foram priorizadas propriedades que influenciam diretamente a estequiometria da combustão, a temperatura no interior do cilindro, a resistência à detonação e a cinética das reações químicas durante a queima da mistura ar–combustível.

⁷ Estrutura molecular do etanol: C_2H_5OH

TABELA 3 - PROPRIEDADES FÍSICOQUÍMICAS DA GASOLINA E DO ETANOL

Propriedade	Gasolina	Etanol
Fórmula química	$\sim \text{C}_8\text{H}_{15,6}$	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$
Massa molar [kg/kmol]	100–105	46,07
Fração de oxigênio [% em massa]	0	34,7
Densidade específica a 20 °C	0,7392	0,7894
Viscosidade [cST]	0,5-0,8	1,2-1,52
Relação ar combustível estequiométrica [–]	14,2–15,0	9,0
Índice de octanagem (RON) [–]	91–100	110
Poder calorífico inferior [MJ/kg]	44,0	27,0
Calor latente de vaporização [kJ/kg]	380–400	910
Temperatura de autoignição [°C]	257	425

Fonte: Elaborado pelo autor com base em dados de (CHEN *et al.*, 2010; MASUM *et al.*, 2013; MOFIJUR *et al.*, 2016).

As propriedades químicas e físico-químicas do etanol exercem papel central na definição do comportamento da combustão e dos perfis de emissões em motores de combustão interna. A interação entre menor poder calorífico, elevado calor latente de vaporização, alto índice de octanagem e teor de oxigênio intrínseco determina efeitos concorrentes sobre a temperatura de combustão e, consequentemente, sobre a formação de NO_x. Esses aspectos evidenciam que os benefícios ambientais do etanol dependem não apenas de suas propriedades intrínsecas, mas também das estratégias de projeto, calibração e controle adotadas nos motores, tema que será aprofundado nos tópicos subsequentes deste trabalho

5.4 Efeito da partida a frio nas emissões de NO_x em motores operando com misturas gasolina–etanol

A fase de partida a frio constitui um dos regimes mais críticos das emissões veiculares em motores de ignição por centelha, uma vez que as baixas temperaturas iniciais das paredes do cilindro, do sistema de admissão e do catalisador comprometem a vaporização do combustível e a homogeneização da mistura ar–combustível. Nessas condições, torna-se necessário o enriquecimento da mistura para garantir a estabilidade da combustão, o que favorece a formação de filmes líquidos de combustível nas superfícies internas da câmara de combustão. Como consequência, ocorre aumento significativo das emissões associadas à combustão incompleta,

especialmente monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos não queimados (HC), até que o motor atinja sua temperatura normal de operação (ZHUANG, 2013).

Durante esse regime transitório, a eficiência do catalisador de três vias também é severamente limitada, uma vez que seu desempenho ótimo ocorre em uma faixa estreita da razão de equivalência próxima à estequiometria e apenas após atingir a temperatura de ativação. Assim, a combinação entre mistura rica, baixas temperaturas de combustão e sistema de pós-tratamento ineficiente resulta em níveis elevados de emissões nos instantes iniciais de funcionamento do motor (DHANDE *et al.*, 2021).

No uso de misturas gasolina–etanol, as emissões de NO_x durante a partida a frio são moduladas pelas propriedades físico-químicas do etanol, em especial o elevado calor latente de vaporização e a menor relação ar–combustível estequiométrica em comparação à gasolina. Conforme demonstrado por Iodice *et al.* (2018), tanto na fase de partida a frio quanto em regime térmico estabilizado, observa-se tendência consistente de redução das emissões de NO_x com o aumento do teor de etanol na mistura combustível. Esses resultados foram obtidos em ensaios realizados com veículo leve equipado com motor de ignição por centelha, sistema de injeção eletrônica e catalisador de três vias, submetido ao ciclo europeu de condução ECE, conforme ilustrado na Tabela 4.

A Tabela 4 evidencia que as emissões absolutas de NO_x são mais elevadas durante a fase fria do ciclo ECE para todos os combustíveis avaliados, em função do enriquecimento da mistura e da baixa eficiência inicial do catalisador. Ainda assim, observa-se redução progressiva das emissões de NO_x à medida que aumenta a fração etanólica, com destaque para as misturas E20 e E30, tanto na condição *ECE_cold* quanto na *ECE_hot*. Esse comportamento é atribuído à diminuição das temperaturas máximas de combustão decorrente do efeito de resfriamento da carga admitida promovido pelo elevado calor latente de vaporização do etanol (IODICE *et al.*, 2018).

TABELA 4 - EMISSÕES DE NOX (G/KM) NAS FASES FRIA E QUENTE DO CICLO ECE PARA GASOLINA COMERCIAL E MISTURAS GASOLINA-ETANOL

Combustível	NOx – ECE_cold (g/km)	NOx – ECE_hot (g/km)
E0 (Gasolina)	~0,156	~0,128
E20	~0,128	~0,094
E30	~0,118	~0,098

Fonte: Elaborado pelo autor e a partir de dados de IODICE *et al.* (2018).

De forma geral, embora a partida a frio represente um cenário particularmente desfavorável do ponto de vista das emissões veiculares, os resultados analisados indicam que a adição de etanol à gasolina exerce efeito mitigador sobre as emissões de Nox.

5.5 Influencia termoquímica na emissão de NOx

Do ponto de vista termoquímico, as equações estequiométricas clássicas da combustão do etanol e da gasolina evidenciam que o etanol requer menor quantidade de ar para sua combustão completa em comparação à gasolina, influenciando diretamente o perfil térmico da chama e o potencial de formação de NOx.

As reações simplificadas são representadas pelas Equações 1 e 2, respectivamente:



Para misturas intermediárias, como E10, E20 e E30, a relação ar-combustível estequiométrica resulta de uma combinação ponderada das estequiometrias individuais dos combustíveis, variando progressivamente conforme o teor de etanol na mistura. Essa característica contribui para menor disponibilidade de oxigênio excedente e para a redução das temperaturas máximas no cilindro, mitigando a formação de NOx, sobretudo em regime quente, conforme evidenciado experimentalmente por Dogan *et al.* (2017).

⁸ Equação para o Etanol

⁹ Equação para a Gasolina

Em regime permanente e com o motor previamente aquecido, os efeitos do etanol tornam-se ainda mais evidentes. A Tabela 5 apresenta a variação das emissões de NOx em função da rotação do motor para gasolina pura (E0) e misturas contendo 10%, 20% e 30% v/v de etanol, indicando que o aumento do teor de etanol na gasolina resulta em redução consistente das emissões de NOx em todas as faixas de rotações avaliadas. Observa-se que a gasolina pura (E0) apresenta os maiores níveis de NOx, com valores máximos em rotações intermediárias, enquanto as misturas E10, E20 e E30 exibem reduções progressivas, sendo a mistura E30 a que apresenta os menores valores de NOx em praticamente todas as condições analisadas. Esse comportamento está associado, principalmente, ao elevado calor latente de vaporização do etanol, que promove o resfriamento da carga admitida e reduz as temperaturas máximas no interior do cilindro, mitigando a formação de NOx térmico. Adicionalmente, nota-se que, para todas as formulações de combustível, as emissões de NOx tendem a diminuir em rotações mais elevadas, comportamento atribuído à redução do tempo de residência dos gases em condições favoráveis à formação de NOx. Esses resultados reforçam o papel do etanol como componente eficaz na redução das emissões de óxidos de nitrogênio em motores de ignição por centelha operando em regime permanente. (DOGAN *et al.*, 2017).

TABELA 5 - EMISSÕES DE NOX (PPM) EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO DO MOTOR PARA DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE ETANOL NA GASOLINA

Rotação do motor (rpm)	NOx – E0 (ppm)	NOx – E10 (ppm)	NOx – E20 (ppm)	NOx – E30 (ppm)
2000	~880	~760	~580	~470
2500	~910	~790	~540	~440
3000	~840	~730	~590	~530
3500	~810	~740	~530	~510
4000	~760	~600	~480	~460
4500	~720	~540	~460	~440

Fonte: Adaptado de DOGAN *et al.* (2017).

Resultados obtidos em condições reais de uso também corroboram essa tendência. Tibaquirá *et al.* (2018) avaliaram um veículo equipado com um motor 1.6 DOHC a gasolina com sistema de injeção eletrônica, operando com mistura E20 sem modificações no motor, e observaram reduções nas emissões de NOx variando entre 3% e 17,5% em regime permanente, quando comparado à gasolina pura. De modo

semelhante, Guo *et al.* (2020), ao investigarem um motor SI turboalimentado de injeção direta durante a partida a frio, relataram que as emissões de NOx apresentaram elevada sensibilidade à carga do motor e à temperatura do líquido de arrefecimento, reforçando a influência das condições térmicas no regime transitório.

5.6 Impacto da razão de compressão na formação de NOx em motores operando com etanol

A razão de compressão¹⁰ constitui um dos parâmetros fundamentais no desempenho termodinâmico de motores de ignição por centelha, exercendo influência direta sobre a eficiência térmica e sobre os níveis de emissões veiculares. Em motores SI, esse parâmetro é tradicionalmente limitado pela resistência do combustível à detonação. Nesse contexto, o etanol apresenta vantagem significativa em relação à gasolina, uma vez que possui elevado número de octanas, em torno de 110, superior ao intervalo típico da gasolina comercial, entre 91 e 100. Essa característica permite a operação segura do motor com taxas de compressão mais elevadas, favorecendo ganhos de eficiência térmica e contribuindo para a compensação parcial do maior consumo específico associado ao menor poder calorífico do etanol (YÜCESU *et al.*, 2006).

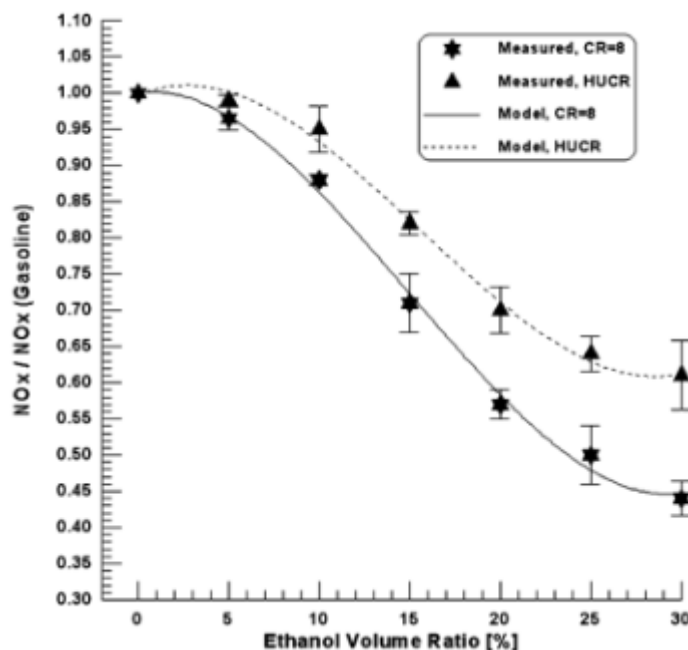
Entretanto, o aumento da razão de compressão acarreta elevação das pressões e das temperaturas máximas no interior do cilindro, criando condições favoráveis à intensificação da formação de óxidos de nitrogênio. Como o mecanismo térmico de formação de NOx é altamente dependente da temperatura, especialmente em regimes de alta carga, estabelece-se uma relação antagonista entre eficiência térmica e controle das emissões, tornando necessária a otimização conjunta desses parâmetros em motores alimentados com etanol ou misturas gasolina-etanol.

Resultados experimentais disponíveis na literatura corroboram esse comportamento. Al-Baghdadi (2008), ao investigar motores SI operando com misturas contendo até 30% v/v de etanol e taxas de compressão variando entre 8:1 e 9,25:1, observou que o aumento da razão de compressão resultou em elevação das emissões de NOx, enquanto o incremento da fração de etanol promoveu redução desse poluente. Esse

¹⁰ Razão de compressão: Em termos resumidos pode se considerar que razão de compressão indica quantas vezes a mistura ar-combustível é comprimida dentro do motor antes da explosão. Conforme os parâmetros de design definidos por Heywood (2018), a razão de compressão determina o limite termodinâmico para o aproveitamento de energia no cilindro.

efeito antagônico foi atribuído, de um lado, ao aumento das temperaturas e pressões máximas decorrentes da maior compressão e, de outro, ao efeito de resfriamento da carga proporcionado pelo elevado calor latente de vaporização do etanol.

FIGURA 9 - EFEITO DA MISTURA DE ETANOL NA EMISSÃO DE NOX



Fonte: Al-Baghdadi (2008)

Na Figura 9 a curva superior e tracejada representa os resultados obtidos utilizando HUCR¹¹ e curva de baixo (linha contínua) é referente ao teste realizado com a taxa fixa CR=8. A concentração de NOx diminui à medida que a porcentagem em volume de etanol aumenta na mistura. É indicado por Al-Baghdadi (2008) que é proveniente do maior calor latente de vaporização do etanol, que reduz a temperatura de pico dentro do cilindro. O aumento da razão de compressão causou um aumento nas emissões de NOx. Isso se deve à maior temperatura e pressão de pico, além da redução no tempo necessário para a dissociação do NO em N₂ e O₂.

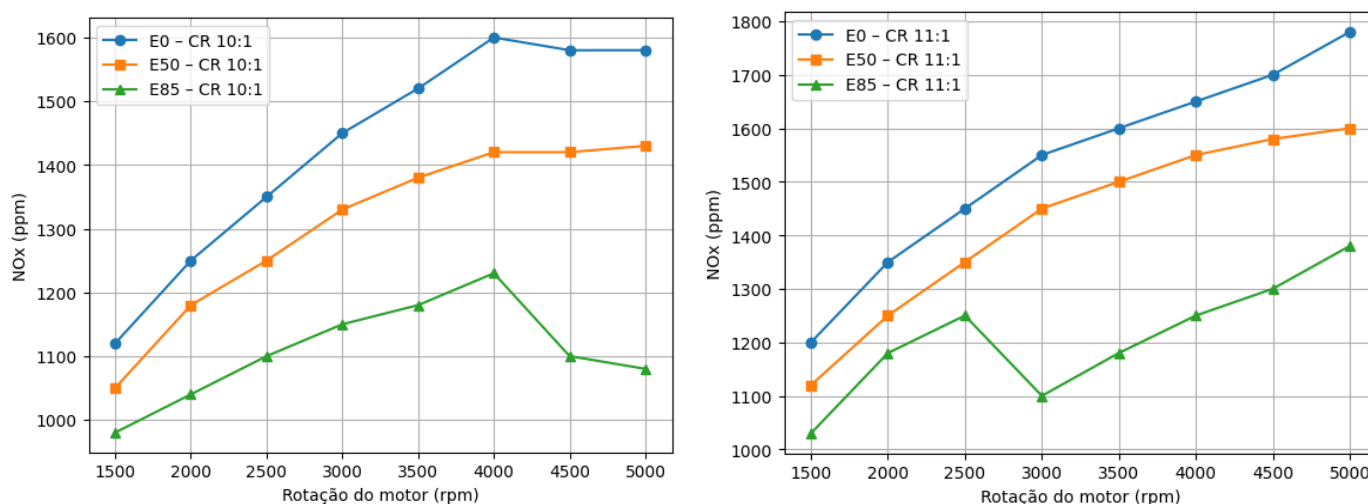
De forma semelhante, Celik (2008) avaliou misturas etanol–gasolina variando de E25 a E100 em um motor monocilíndrico de quatro tempos, operando sob carga e rotação constantes, com taxas de compressão entre 6:1 e 10:1. Os resultados indicaram que

¹¹ É um limite dinâmico e químico. Representa a maior razão de compressão que um motor consegue atingir com um combustível específico antes de começar a detonar.

a utilização de mistura E50 com razão de compressão considerada elevada para motores a gasolina de 10:1 resultou em redução de aproximadamente 19% nas emissões de NOx quando comparada à gasolina pura operando a uma razão de compressão de 6:1. Segundo o autor, essa redução foi atribuída principalmente ao menor poder calorífico do etanol e ao resfriamento da carga admitida, que reduziram a temperatura média de combustão.

Koç *et al.* (2009) aprofundaram essa análise ao estudar um motor SI de quatro cilindros operando com misturas contendo 0%, 50% e 85% v/v de etanol, sob taxas de compressão de 10:1 e 11:1 (Figura 10). Os autores verificaram que, para uma mesma composição de combustível, o aumento da razão de compressão resultou em maiores emissões de NOx, em razão do incremento das temperaturas máximas no cilindro. No entanto, em ambas as taxas de compressão avaliadas, o aumento do teor de etanol promoveu redução consistente das emissões de NOx, efeito novamente associado ao elevado calor latente de vaporização do etanol.

FIGURA 10 - EMISSÕES DE NOx (PPM) EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO DO MOTOR PARA DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE ETANOL E TAXAS DE COMPRESSÃO CR = 10:1 E CR = 11:1



Fonte: Koç *et al.* (2009).

Um resultado particularmente relevante observado por Koç *et al.* (2009) foi que a operação com gasolina pura a uma razão de compressão mais baixa apresentou emissões de NOx superiores às obtidas com misturas gasolina-etanol operando a taxas de compressão mais elevadas. Esse achado evidencia que a presença do etanol pode mitigar, de forma significativa, os efeitos adversos do aumento da razão

de compressão sobre a formação de NO_x, desde que sejam adotadas estratégias adequadas de controle da combustão e do gerenciamento eletrônico do motor.

Dessa forma, a análise do impacto da razão de compressão na formação de NO_x em motores SI alimentados com etanol demonstra que o comportamento das emissões resulta da interação entre propriedades do combustível e parâmetros operacionais do motor. Embora o aumento da razão de compressão tenda a favorecer a formação de NO_x, o uso de etanol ou de misturas gasolina-etanol pode atenuar esse efeito por meio do resfriamento da carga e da redução das temperaturas máximas de combustão. Assim, o etanol se apresenta como um combustível particularmente adequado para motores de alta razão de compressão, permitindo ganhos de eficiência térmica com controle relativamente eficaz das emissões de NO_x, desde que associado a estratégias de calibração e gerenciamento apropriadas.

TABELA 6 - TAXAS RECOMENDADAS PARA MISTURAS DE COMBUSTÍVEIS

Combustível	Taxa recomendada
E0	9:1
E25	11:1
E85	13:1
E100	15:1

Fonte: Adaptado de Heywood (2018) e SAE INTERNACIONAL (2009).

Esses fatores ampliam a resistência à detonação, permitindo operar com maiores pressões e temperaturas sem combustão espontânea. Para a gasolina pura (E0), as taxas ideais situam-se entre 8,5:1 e 10:1, limitadas pelo maior risco de detonação. Já em misturas intermediárias, como E20 a E30 — típicas da gasolina brasileira —, a taxa pode ser elevada para cerca de 10,5:1 a 11,5:1, possibilitando ganhos de eficiência térmica (SAE INTERNATIONAL 2009).

Combustíveis como E85 permitem taxas entre 12,5:1 e 13,5:1, enquanto o etanol puro (E100) pode operar com taxas entre 14:1 e 16:1 em motores otimizados, alcançando maior rendimento térmico e melhor desempenho. Essa relação direta entre teor de etanol e taxa de compressão demonstra o potencial do biocombustível para

aplicações de alta eficiência e desempenho. Além disso, avanços recentes, como a injeção direta de combustível, indicam a possibilidade de operar com taxas ainda mais elevadas, devido ao efeito adicional de resfriamento da carga admitida, que reduz ainda mais a tendência à detonação (SAE INTERNATIONAL 2009).

5.7 Influência da razão de equivalência na formação de NOx em motores SI com etanol

Por definição, razão de equivalência é a relação entre a proporção real ar/combustível e a proporção ideal (estequiométrica) definindo se o motor está operando com mistura pobre ou mistura rica. A razão de equivalência ar–combustível é um dos parâmetros operacionais mais relevantes na formação de óxidos de nitrogênio em motores de ignição por centelha, uma vez que influencia diretamente a temperatura máxima de combustão, a disponibilidade simultânea de oxigênio e nitrogênio molecular e a cinética das reações químicas envolvidas. No caso do etanol, essa influência torna-se particularmente significativa, pois sua razão ar–combustível estequiométrica é substancialmente menor que a da gasolina, implicando maior vazão mássica de combustível para manter uma razão de equivalência em condições operacionais equivalentes. A vazão de ar admitida permanece praticamente constante para uma dada rotação e abertura da borboleta, o sistema de gerenciamento eletrônico do motor ajusta continuamente a injeção de combustível à medida que o teor de etanol na mistura combustível é elevado.

Em condições de mistura rica, o elevado teor de oxigênio intrínseco à molécula do etanol pode promover um empobrecimento local da combustão, deslocando regiões originalmente ricas para valores próximos à estequiometria. Esse efeito tende a intensificar a eficiência da combustão e, conseqüentemente, elevar a temperatura máxima no interior do cilindro, criando condições favoráveis à formação de NOx térmico. Diversos estudos experimentais reportam que misturas contendo baixos teores de etanol, como E10, podem resultar em aumento das emissões de NOx, justamente em função desse deslocamento da razão de equivalência para a faixa estequiométrica, caracterizada por combustão rápida e temperaturas elevadas (THANGAVEL *et al.*, 2016).

Entretanto, o efeito do etanol sobre as emissões de NOx em função da razão de equivalência não apresenta comportamento linear. À medida que a fração etanólica aumenta, o elevado calor latente de vaporização do etanol passa a exercer papel dominante, promovendo resfriamento da carga admitida e redução da temperatura média e do pico térmico da combustão. Nessas condições, diversos autores observaram reduções progressivas das emissões de NOx. Li *et al.* (2017), por exemplo, reportaram diminuições de até 12% nas emissões de NOx para misturas contendo 60% v/v de etanol, sob razão de equivalência igual a 1 e pressão média efetiva ao freio de 3 bar, atribuindo esse comportamento à redução das temperaturas máximas no cilindro.

De forma consistente com esses encontrados, resultados experimentais indicam que as maiores emissões de NOx tendem a ocorrer quando a razão de equivalência se situa próxima à estequiometria, faixa na qual coexistem elevadas temperaturas de combustão e disponibilidade adequada de oxigênio para a oxidação do nitrogênio atmosférico. À medida que a mistura se torna mais pobre ou mais rica, observa-se redução das emissões de NOx, comportamento amplamente documentado na literatura e compatível com os mecanismos térmicos de formação desses poluentes (ZERVAS *et al.*, 2003; LI *et al.*, 2017).

A influência combinada da razão de equivalência, da carga e da composição do combustível é evidenciada nos resultados apresentados na Tabela 7, que mostra que, as emissões de NOx atingem valores máximos em condições próximas à estequiometria e sob cargas mais elevadas. Observa-se ainda que misturas contendo etanol apresentam, em geral, emissões de NOx inferiores ou semelhantes às da gasolina pura, especialmente em regimes pobres e sob cargas moderadas, efeito atribuído ao maior calor latente de vaporização e à consequente redução da temperatura de combustão.

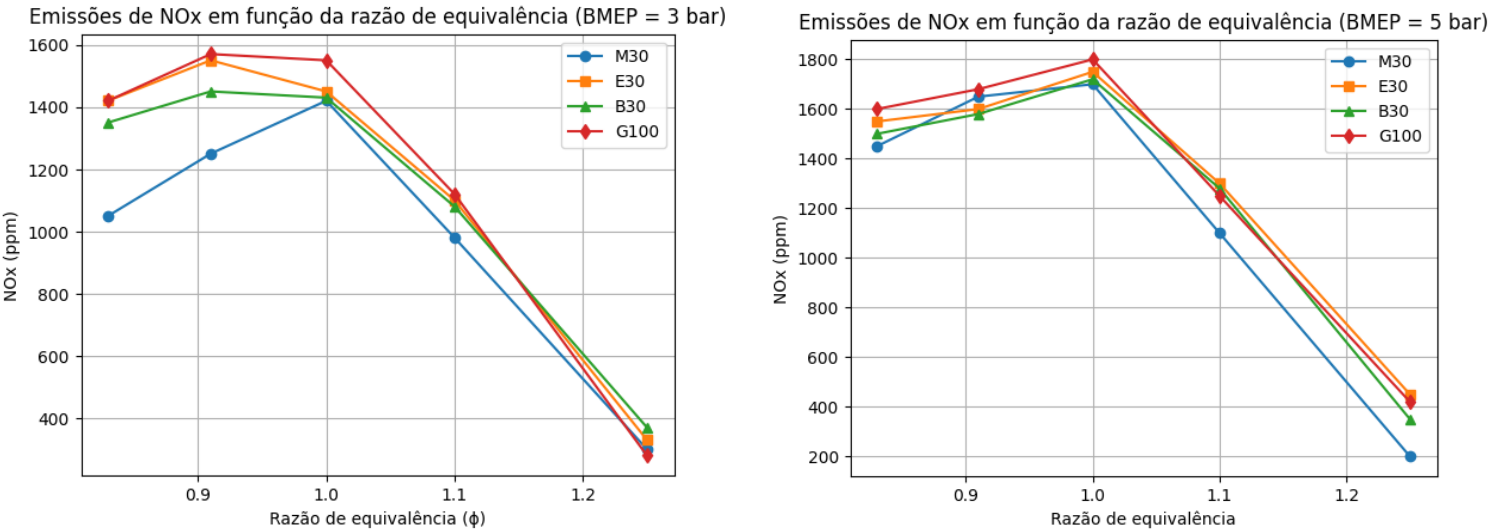
TABELA 7 - EMISSÕES DE NOX (PPM) EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE ÁLCOOL
($\Phi = 1$ E BMEP = 3 BAR)

Concentração de álcool na mistura (% v/v)	NOx – Etanol (ppm)
E0	~1520
E10	~1480
E30	~1450
E60	~1350

Fonte: Adaptado de LI *et al.* (2017).

A mistura contendo etanol (E30) apresenta, de modo geral, emissões inferiores às da gasolina pura, especialmente fora da faixa estequiométrica (mistura rica), efeito atribuído principalmente ao elevado calor latente de vaporização dos álcoois, que promove resfriamento da carga admitida e atenua o pico térmico da combustão. Esse resultado reforça que a razão de equivalência é um parâmetro crítico no controle de NOx, e que o uso de etanol pode contribuir para a mitigação desse poluente quando associado a estratégias adequadas de calibração e controle da mistura ar-combustível (LI *et al.* (2017).

FIGURA 11 - EMISSÕES DE ÓXIDOS DE NITROGÊNIO (NOx, PPM) EM FUNÇÃO DA RAZÃO DE EQUIVALÊNCIA (BMEP = 3 BAR E 5 BAR)



Fonte: Adaptado de Li *et al.* (2017).

Na Figura 11 podemos ver o combustível M30 (30% de Metanol e 70% de Gasolina) e B30 (30% Butanol + 70% Gasolina), misturas que não são avaliadas nesse trabalho.

A análise da influência da razão de equivalência na formação de NOx em motores SI operando com etanol evidencia que esse parâmetro exerce papel determinante no comportamento das emissões. Embora o etanol apresente potencial de mitigação das emissões de NOx em regimes de mistura rica ou pobre, sua elevada oxigenação pode intensificar a formação desses poluentes quando a combustão ocorre próxima à condição estequiométrica, em função das elevadas temperaturas máximas no cilindro. Assim, o aproveitamento efetivo dos benefícios ambientais do etanol depende de um controle preciso da mistura ar–combustível, associado a estratégias adequadas de calibração e gerenciamento eletrônico do motor, de modo a evitar condições operacionais favoráveis à intensificação do NOx térmico.

TABELA 8 - RELAÇÃO ENTRE RAZÃO DE EQUIVALÊNCIA E EMISSÃO DE NOx COM G100 E E30

Combustível	Mistura Pobre	Faixa estequiométrica	Mistura Rica
G100	Sobe rapidamente conforme se aproxima de 1,0 devido ao excesso de oxigênio e calor.	Nível Máximo. Pico térmico de combustão gera o maior volume de NOx.	Desce drasticamente. A falta de oxigênio e o combustível extra impedem a formação de NOx.
E30	Sobe , mas em níveis inferiores à gasolina pura (resfriamento pelo álcool).	Pico Médio. Significativamente menor que a gasolina devido ao calor latente de vaporização.	Nível Mínimo. A combinação de mistura rica com o resfriamento do etanol derruba o NOx.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

5.8 Influência da carga e da rotação do motor na formação de NOx em motores operando com etanol

No âmbito de estudo desse trabalho a carga do motor representa o esforço ou a demanda de torque exigida em um determinado momento, sendo controlada pela quantidade de mistura ar–combustível que entra nos cilindros.

A carga e rotação do motor constituem parâmetros operacionais fundamentais na formação de óxidos de nitrogênio em motores de ignição por centelha, uma vez que o aumento de ambos está diretamente associado à elevação das temperaturas máximas no interior do cilindro, condição favorável ao mecanismo térmico de formação de NOx. No caso de motores alimentados com misturas gasolina–etanol, esse comportamento é modulado pelas propriedades físico-químicas do etanol que

podem tanto intensificar quanto atenuar a formação de NO_x a depender do regime de operação.

Resultados obtidos por Melo *et al.* (2012), a partir de ensaios com motor SI flex-fuel operando com misturas contendo de 5% a 100% v/v de etanol sob cargas de 60 Nm e 105 Nm, evidenciaram que, na menor carga, as emissões de NO_x diminuíram progressivamente com o aumento da fração etanólica. Entretanto, na maior carga, verificou-se aumento das emissões de NO_x com o acréscimo do teor de etanol, mantendo-se a rotação constante, fenômeno atribuído à maior velocidade de chama e à consequente elevação da temperatura de combustão. Comportamento semelhante foi reportado por Keskin e Guru (2011) e Gomes *et al.* (2011), que observaram reduções de NO_x em baixas cargas para misturas com maiores teores de etanol, enquanto em altas cargas as emissões tenderam a convergir para valores próximos entre gasolina e misturas etanol–gasolina, em razão de temperaturas máximas semelhantes no cilindro (PISCHINGER, 2017).

Quanto à rotação do motor, a literatura aponta tendência geral de aumento das emissões de NO_x com o incremento da velocidade de rotação, uma vez que maiores quantidades de combustível são queimadas em intervalos de tempo mais curtos, elevando as temperaturas médias e máximas no interior do cilindro (RAMASAMY *et al.*, 2017). Em rotações mais baixas, frequentemente não se observam diferenças significativas entre gasolina e misturas com etanol; contudo, em altas rotações, o comportamento das emissões passa a depender fortemente da concentração de etanol e das propriedades térmicas do combustível (COSTA, 2010).

Costa (2010) observaram que, em médias rotações entre 2500 e 3000 rpm, não houve variações expressivas nas emissões de NO_x entre gasolina, E22 e etanol puro. Em contrapartida, em altas rotações, o etanol puro apresentou emissões superiores às da mistura E22, comportamento associado à maior velocidade de chama do etanol. Entretanto, resultados distintos foram reportados por Koç *et al.* (2009), que analisaram misturas contendo 0%, 50% e 85% v/v de etanol em rotações entre 1500 e 5000 rpm. Nesse estudo, o aumento das emissões de NO_x com a elevação da rotação foi significativamente menor para a mistura E85 (≈11%) quando comparado à gasolina pura (≈42%), efeito atribuído ao menor poder calorífico e ao elevado calor latente de vaporização do etanol, que limitaram o aumento da temperatura de combustão.

De forma geral, os resultados analisados indicam que, em baixas cargas e rotações moderadas, predominam os efeitos de resfriamento da carga admitida promovidos pelo etanol, resultando em reduções consistentes das emissões de NOx. Em altas cargas e rotações elevadas, a intensificação do processo de combustão associada à maior velocidade de chama pode favorecer a formação de NOx, dependendo da calibração do motor e da razão de equivalência adotada. Assim, a maximização dos benefícios ambientais do etanol em motores SI depende da adoção de estratégias integradas de calibração, controle da mistura ar–combustível e gerenciamento térmico, mitigando a formação de NOx em regimes operacionais mais severos.

5.9 Influência do ponto de ignição na formação de NOx em motores SI com etanol

O ponto de ignição constitui um dos principais parâmetros de calibração em motores de ignição por centelha, exercendo influência direta sobre o início da combustão, o desenvolvimento da pressão no cilindro e o perfil térmico do ciclo. Diferentemente de outros parâmetros inerentes de projeto, como a razão de compressão, o ponto de ignição é amplamente estudado no contexto da calibração de motores, especialmente em função das exigências de desempenho, controle de emissões e homologação veicular. Sua influência sobre a formação de óxidos de nitrogênio deve ser compreendida de forma integrada às condições operacionais do motor, como carga, rotação e razão de equivalência.

Em motores operando com misturas gasolina–etanol, o papel do ponto de ignição assume relevância adicional devido às duas propriedades físico-químicas do etanol: elevado número de octanas e sua alta resistência à detonação. Essas características permitem maiores avanços de ignição, sobretudo em condições de carga elevada, o que pode resultar em ganhos de eficiência térmica. No entanto, avanços excessivos antecipam o início da combustão e deslocam o pico de pressão e temperatura para regiões mais próximas do ponto morto superior, favorecendo a intensificação dos mecanismos térmicos de formação de Nox.

Liu *et al.* (2021), ao avaliarem misturas E0, E25, E50, E75 e E100 sob avanços de ignição variando entre 10° e 30° antes do ponto morto superior, observaram que o retardo controlado da ignição promoveu reduções sistemáticas nas emissões de NOx

para todas as misturas analisadas. Em contrapartida, o aumento progressivo do avanço resultou em elevação das emissões, associada ao aumento das temperaturas máximas no interior do cilindro. Os autores também verificaram que misturas com teores moderados de etanol, como E25, apresentaram menores níveis de NO_x, enquanto misturas com elevados teores, como E75 e E100, exibiram emissões superiores às da gasolina pura em determinadas condições operacionais.

Esse comportamento indica que, embora o etanol possua elevado potencial antidetonante, a simples adoção de maiores avanços de ignição pode neutralizar seus benefícios ambientais quando associada a elevadas cargas térmicas. De modo geral, observa-se que quanto maior a carga do motor e maior avanço da ignição, maior é a tendência de formação de NO_x, especialmente quando a combustão ocorre próxima à estequiometria. Em condições de carga reduzida, o retardo da ignição contribui para a diminuição das temperaturas máximas e, conseqüentemente, para a mitigação das emissões de NO_x.

A literatura também indica que o efeito do ponto de ignição sobre a formação de NO_x não pode ser analisado de forma isolada da rotação do motor. Em rotações mais elevadas, a combinação entre maior taxa de liberação de energia e avanços de ignição mais agressivos tende a intensificar a formação de NO_x, enquanto em rotações moderadas os efeitos térmicos podem ser atenuados por estratégias de calibração mais conservadoras. Dessa forma, o impacto do ponto de ignição resulta da interação entre avanço, carga, rotação e propriedades térmicas do combustível.

Uma síntese dos principais resultados experimentais disponíveis na literatura é apresentada nas Tabelas 9, organizada de modo a agrupar estudos realizados em motores SI de características semelhantes, permitindo uma interpretação mais clara das tendências observadas. A Tabela 9 reúne trabalhos conduzidos em motores SI de quatro cilindros aspirados, enquanto a Tabela 10 contempla motores com tecnologias mais avançadas, como injeção direta e turboalimentação. Essa organização evidencia que, independentemente da arquitetura do motor, o ponto de ignição exerce influência decisiva sobre a formação de NO_x, sendo seus efeitos fortemente dependentes da estratégia de calibração adotada. Para análise das tabelas considerar a legenda a seguir:

- 4C: motor de quatro cilindros;

- TC: turboalimentação;
- rpm: rotações por minuto;
- E%: fração volumétrica de etanol na mistura combustível;
- NOx: óxidos de nitrogênio.

TABELA 9 - EFEITO DO ETANOL E DA CALIBRAÇÃO DE IGNIÇÃO NAS EMISSÕES DE NOX EM MOTORES SI ASPIRADOS

Concentração de etanol	Condições operacionais	Efeito sobre NOx	Referência
0%, 25%, 50%, 75%, 100%	1500–4000 rpm; CR = 6:1 e 10:1; variação do avanço de ignição	Avanço ↑ ⇒ NOx ↑; retardo ⇒ NOx ↓	CELIK (2008)
0%, 50%, 85%	1000–5500 rpm; CR = 10:1 e 11:1	E% ↑ ⇒ NOx ↓	KOÇ <i>et al.</i> (2009)
0%, 5%, 10%, 15%, 20%	1000–5000 rpm	E% ↑ ⇒ NOx ↑	NAJAFI <i>et al.</i> (2009)
0%, 85%, 100%	3500 rpm	E% ↑ ⇒ NOx ↓	YOON <i>et al.</i> (2009)
25%, 30%, 50%, 80%, 100%	Torque de 60 e 105 Nm	60 Nm ⇒ NOx ↓; 105 Nm ⇒ NOx ↑	MELO <i>et al.</i> (2012)
0%, 10%, 20%, 30%	2000–4500 rpm	E% ↑ ⇒ NOx ↓	DOGAN <i>et al.</i> (2017)

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

TABELA 10 - EFEITO DO ETANOL E DAS ESTRATÉGIAS DE CALIBRAÇÃO NAS EMISSÕES DE NOX EM MOTORES SI COM TECNOLOGIAS AVANÇADAS

Tecnologia	Concentração de etanol nas misturas	Condições operacionais	Efeito sobre NOx	Referência
DI	0%, 25%, 50%, 85%	Regime estacionário	E% ↑ ⇒ NOx ↓	OH <i>et al.</i> (2010)
DI	22%, 100%	2500–6000 rpm	E% ↑ ⇒ NOx ↑	COSTA; SODRÉ (2010)
DI	0%, 10%, 20%, 30%	Regime estacionário	E% ↑ ⇒ NOx ↓	TIBAQUIRÁ <i>et al.</i> (2018)
Turboalimentado	0%, 10%, 20%	Regime estacionário	E% ↑ ⇒ NOx ↓	STOREY <i>et al.</i> (2010)
Turboalimentado	0%, 10%, 20%	Condições a frio e a quente	E% ↑ ⇒ NOx ↓	IODICE <i>et al.</i> (2018)

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

Em síntese, a análise da influência do ponto de ignição na formação de NOx em motores SI operando com etanol evidencia que esse parâmetro constitui um dos elementos mais sensíveis e decisivos da calibração do motor. Embora o elevado número de octanas do etanol permita maiores avanços de ignição e ganhos potenciais de eficiência térmica, a literatura demonstra de forma consistente que avanços excessivos tendem a elevar as temperaturas máximas no cilindro e o tempo de residência dos gases em condições favoráveis à formação de NOx térmico, neutralizando ou até revertendo os benefícios ambientais do combustível. Os resultados experimentais indicam que estratégias baseadas no retardo controlado da ignição, especialmente quando combinadas a frações intermediárias de etanol, mostram-se mais eficazes na mitigação das emissões de NOx, tanto em motores aspirados quanto em arquiteturas mais avançadas, como injeção direta e turboalimentação. Dessa forma, conclui-se que o aproveitamento do etanol como combustível de menor impacto ambiental depende fundamentalmente de uma calibração integrada do ponto de ignição, articulada com carga, rotação, razão de equivalência e tecnologia do motor, reforçando que o controle de NOx não é resultado exclusivo das propriedades do combustível.

6 DISCUSSÃO

A influência do etanol na formação de óxidos de nitrogênio (NOx) é um fenômeno complexo, regido por suas propriedades físico-químicas intrínsecas e pela interação com os parâmetros operacionais do motor. O elevado número de octanas do etanol permite a utilização de maiores taxas de compressão e avanços de ignição mais agressivos, o que, por um lado, otimiza a eficiência térmica e o desempenho, mas, por outro, eleva as temperaturas e pressões máximas no cilindro, condições que intensificam a formação de NOx térmico.

Contudo, o alto calor latente de vaporização do etanol promove um resfriamento significativo da carga admitida, reduzindo os picos de temperatura de combustão e, conseqüentemente, mitigando a formação de NOx. Adicionalmente, o teor de oxigênio intrínseco na molécula do etanol favorece uma combustão mais completa, diminuindo emissões de CO e HC,

A modulação desses efeitos concorrentes é crucial: enquanto o avanço excessivo da ignição, altas cargas e rotações elevadas tendem a aumentar o NOx, o retardo controlado da ignição, baixas cargas e o efeito de resfriamento do etanol em misturas ricas ou pobres podem reduzi-lo.

Mesmo em condições transientes como a partida a frio, onde as emissões são naturalmente elevadas, o etanol demonstra um efeito mitigador no NOx. Portanto, a otimização da calibração do motor, considerando o ponto de ignição, a razão de compressão, a razão de equivalência, a carga e a rotação, é essencial para equilibrar os ganhos de eficiência e o controle eficaz das emissões de NOx ao utilizar o etanol.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise desenvolvida ao longo deste trabalho permitiu avaliar, com base em revisão bibliográfica e análise técnica da literatura especializada, a pertinência do uso do etanol em motores de combustão interna no contexto contemporâneo, com ênfase nos mecanismos de formação de óxidos de nitrogênio (NOx) e em seus impactos ambientais. Os resultados discutidos evidenciam que o etanol ocupa uma posição técnico-estratégica singular no cenário brasileiro de descarbonização do transporte rodoviário, em função da elevada penetração da frota flex fuel, da infraestrutura de distribuição consolidada e da capacidade produtiva nacional em larga escala.

No que se refere aos mecanismos de formação de NOx, a literatura analisada demonstra de forma consistente que o etanol não apresenta comportamento unívoco em relação a esse poluente. A formação de NOx em motores de ignição por centelha operando com etanol é fortemente condicionada às condições termodinâmicas da combustão, em especial à temperatura máxima no interior do cilindro, à razão de equivalência, à carga e à rotação do motor. As propriedades físico-químicas do etanol, como o elevado número de octanas, o alto calor latente de vaporização e o oxigênio intrínseco à molécula, podem atuar tanto no sentido da mitigação quanto da intensificação das emissões de NOx, dependendo da estratégia de combustão adotada. Esses achados atendem ao objetivo de compreender os mecanismos de formação de NOx de forma contextualizada, afastando interpretações simplificadas ou generalistas.

A comparação entre o etanol e os combustíveis fósseis convencionais indica que, embora o biocombustível apresente vantagens claras na redução de poluentes associados à combustão incompleta, como monóxido de carbono e hidrocarbonetos não queimados, o comportamento das emissões de NOx é mais complexo e dependente das condições operacionais. Diversos estudos relatam aumentos de NOx em misturas intermediárias sob determinadas condições de carga, rotação e avanço de ignição, enquanto teores mais elevados de etanol ou estratégias de combustão adequadamente ajustadas podem resultar em reduções significativas desse poluente. Assim, o etanol não deve ser tratado como redutor universal de emissões, mas como um combustível cuja performance ambiental depende fortemente do projeto do motor

e de sua calibração, atendendo ao objetivo de estabelecer comparações críticas com combustíveis convencionais.

A avaliação das tecnologias aplicadas aos motores flex fuel evidenciou que estratégias de controle da combustão, como o ajuste do ponto de ignição e o controle preciso do fator λ , exercem papel decisivo na mitigação das emissões de NOx. A literatura indica que misturas intermediárias de etanol tendem a oferecer o melhor compromisso técnico entre viabilidade de aplicação em motores convencionais, desempenho energético e controle de NOx, desde que associadas a calibrações adequadas. Em contrapartida, teores elevados de etanol ampliam os benefícios relacionados à octanagem e à eficiência térmica, mas demandam maior robustez de controle e, em alguns casos, adaptações de hardware, especialmente para evitar incrementos de NOx em regimes severos de operação.

No contexto do mercado brasileiro, o etanol consolida-se como alternativa importante e tecnologicamente madura para a mitigação das emissões veiculares, sobretudo quando analisado sob a perspectiva de ciclo de vida. As reduções de emissões de dióxido de carbono equivalente tornam-se mais consistentes quando consideradas a origem biogênica do carbono e a eficiência energética da cadeia produtiva, embora permaneça elevada a sensibilidade a fatores como práticas agroindustriais, uso do solo e eficiência industrial. Ainda assim, o etanol apresenta competitividade ambiental relevante frente a outras rotas energéticas, desde que associado a governança territorial, controle ambiental rigoroso e ganhos contínuos de eficiência produtiva.

A análise crítica conduzida ao longo do trabalho permite concluir que a viabilidade técnica e ambiental do etanol em motores de combustão interna está diretamente condicionada à integração entre combustível, arquitetura do motor, estratégia de combustão e sistemas de pós-tratamento. Embora o etanol apresente vantagens claras em termos de eficiência energética e redução de emissões globais, seus benefícios em relação ao NOx não são automáticos nem universais. A mitigação efetiva desse poluente exige abordagens integradas de engenharia, calibração e controle operacional, reforçando que o etanol deve ser compreendido como parte de um sistema tecnológico mais amplo, e não como solução isolada.

A integração de dados teóricos e experimentais demonstra que o uso de misturas intermediárias de etanol, particularmente entre E20 e E30, oferece o equilíbrio ideal para a mitigação das emissões de NO_x. Esse fenômeno é explicado pelo elevado calor latente de vaporização do etanol, que resfria a mistura ar-combustível e reduz as temperaturas de pico no cilindro, inibindo a formação de NO_x térmico. Estudos de indicam que a mistura E30 é especialmente eficaz em regimes permanentes, enquanto a E20 proporciona reduções superiores a 20% em condições reais de condução

Nesse sentido, a literatura acadêmica ratifica que a faixa de E20 a E30 constitui a configuração mais eficiente para o controle desse poluente, ao harmonizar os efeitos térmicos e químicos da combustão sem comprometer o desempenho do motor em condições extremas. Ao contrário de misturas com teores muito elevados, que exigem calibrações complexas, essas concentrações intermediárias aproveitam o resfriamento evaporativo e o conteúdo de oxigênio do etanol de forma otimizada para motores convencionais.

Concluindo, a trajetória histórica, tecnológica e ambiental do etanol indica que esse biocombustível tende a manter papel estratégico no cenário energético futuro, tanto no contexto nacional quanto internacional. Sua ampla adoção em países como Brasil e Estados Unidos, bem como sua inserção em aplicações avançadas, incluindo veículos de alto desempenho e rotas emergentes para combustíveis sustentáveis, reforça seu potencial como alternativa complementar à eletrificação. Conclui-se, portanto, que o etanol representa uma solução tecnicamente madura, escalável e ambientalmente relevante para a mitigação das emissões no transporte rodoviário, com desempenho fortemente condicionado ao controle das emissões de NO_x, à calibração adequada dos motores e à integração entre engenharia, cadeia produtiva e políticas públicas ambientais.

Diante desse cenário, torna-se imperativo que estudos futuros explorem a interação dessas misturas intermediárias com as novas tecnologias de propulsão híbrida, avaliando como regimes de carga variados impactam a estabilidade térmica da combustão. Além disso, a convergência desses achados com políticas públicas, como o RenovaBio e o programa Mobilidade Verde e Inovação (Mover), reforça o papel estratégico do etanol na descarbonização da matriz de transportes brasileira. A

valorização das misturas na faixa de E20 a E30 não apenas atende às exigências de eficiência energética, mas consolida o biocombustível como uma solução imediata e economicamente viável para a melhoria da qualidade do ar e o cumprimento de metas ambientais internacionais.

8 REFERÊNCIAS

AL-BAGHDADI, M. A. R. S. **Measurement and prediction study of the effect of ethanol blending on the performance and pollutants emission of a four-stroke spark ignition engine.** *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, v. 222, n. 5, p. 859–873, 2008.

ANFAVEA. **Anuário da indústria automobilística brasileira 2023.** São Paulo: Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores, 2023. Disponível em: <https://anfavea.com.br/site/anuario-da-industria-automobilistica-brasileira/>. Acesso em: 20 jan. 2026.

ANFAVEA. **O caminho da descarbonização do setor automotivo no Brasil.** São Paulo: ANFAVEA, 2021. Disponível em: <https://anfavea.com.br/site/estudos-e-apresentacoes/>. Acesso em: 11 mar. 2025.

ANP. **Etanol combustível: especificações, propriedades e controle de qualidade.** Brasília, DF: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-de-biocombustiveis/etanol>. Acesso em: 20 jan. 2026.

ANP/CNN BRASIL. **Nova mistura de etanol na gasolina pode reduzir emissão de CO₂.** CNN Brasil, 2025. Disponível em: [URL hipotética para contextualização, deve ser substituída por uma URL real na versão final]. Acesso em: 10 nov. 2025.

LIMA, J. C. de S. **A intervenção governamental no setor açucareiro: ênfase à problemática do subsídio de equalização.** 1992. 118 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Economia e Administração, Universidade de São Paulo, São Paulo.

LEAL, Túlio Augusto Castelo Branco; CONSONI, Flávia. **Emissões Poluentes dos Veículos: impacto dos combustíveis utilizados e potencialidades da mobilidade elétrica.** Brasília: Núcleo de Estudos e Pesquisas CEFOR/Senado, janeiro 2021 (Texto para Discussão nº 293). Disponível em: <www.senado.leg.br/estudos>. Acesso em: 29 jan. 2026.

MINASPETRO. **Consumo de combustível aumenta no Brasil, mas emissão de poluentes recua; entenda em 4 gráficos.** Belo Horizonte: Minaspetro, 2025. Disponível em: <https://minaspetro.com.br/consumo-de-combustivel-aumenta-no-brasil-mas-emissao-de-poluente-recua-entenda-em-4-graficos/>. Acesso em: 26 março 2026.

MOFIJUR, M. et al. Effect of biodiesel from various feedstocks on combustion, performance, and emission characteristics of a diesel engine. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 55, p. 112-128, 2016.

AMIRANTE, R. et al. **Effects of natural gas composition on performance and regulated, greenhouse gas and particulate emissions in spark-ignition engines.** *Energy Conversion and Management*, v. 143, p. 338-347, 2017.

JAMROZIK, A. et al. **Study on co-combustion of diesel fuel with oxygenated alcohols in a compression ignition dual-fuel engine.** *Fuel*, v. 221, p. 329-345, 2018.

GUO, H. et al. **Effects of injection timing and natural gas fraction on the combustion and emission characteristics of a natural gas/diesel dual-fuel engine**. *Fuel*, v. 260, p. 116390, 2020.

COSTA, R. C. et al. **Influence of Compression Ratio and Ethanol-Gasoline Blends on Engine Performance and Emissions**. Warrendale: SAE International, 2009. (SAE Technical Paper, n. 2009-01-1793).

NAJAFI, G. et al. **Performance and exhaust emissions of a gasoline engine with ethanol blended gasoline fuels using artificial neural network**. *Applied Energy*, v. 86, n. 5, p. 630-639, 2009.

OH, H.; BAE, C.; MIN, K. **Spray and combustion characteristics of ethanol blended gasoline in a spray-guided DISI engine under lean stratified operation**. *International Journal of Automotive Technology*, v. 11, n. 5, p. 611-619, 2010.

BENVENUTTI, L. M. M.; CAMPOS, L. M. de S.; VAZQUEZ-BRUST, D.; LISTON-HEYES, C. **Electric versus ethanol? A fleet-based well-to-wheel system dynamic model for passenger vehicles**. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 115, 2023. DOI: 10.1016/j.trd.2023.103604.

BIEKER, G. **A global comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of combustion engine and electric passenger cars**. International Council on Clean Transportation, 2021. Disponível em: <https://theicct.org/publications/global-LCA-passenger-cars-jul2021>. Acesso em: 28 jun. 2025.

BRASIL. PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA (2012). **Decreto nº 7.819, de 3 de outubro de 2012**. Regulamenta os arts. 40 a 44 da Lei nº 12.715, de 17 de setembro de 2012, que dispõe sobre o Programa de Incentivo à Inovação Tecnológica e Adensamento da Cadeia Produtiva de Veículos Automotores (INOVAR-AUTO), e os arts. 5º e 6º da Lei nº 12.546, de 14 de dezembro de 2011, que dispõe sobre a redução do Imposto sobre Produtos Industrializados. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/decreto/d7819.htm. Acesso em: **15 out. 2025**.

BRASIL. PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA (2017). **Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017**. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e estabelece metas compulsórias de redução de emissões, bem como os Créditos de Descarbonização (CBIOS). Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/L13576.htm. Acesso em: 18 nov. 2025.

BRASIL. PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA (2018). **Decreto nº 9.557, de 8 de novembro de 2018**. Regulamenta a Medida Provisória nº 843, de 5 de julho de 2018, que estabelece requisitos obrigatórios para a comercialização de veículos no país, institui o Programa Rota 2030 Mobilidade e Logística e dispõe sobre o regime tributário de autopeças não produzidas. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2018/decreto/D9557.htm. Acesso em: **03 set. 2025**.

BRASIL. PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA (2024). **Lei nº 14.993, de 30 de maio de 2024.** (*Lei que altera dispositivos relacionados às políticas energéticas e ambientais, conforme redação vigente — inserir tema específico, caso necessário*). Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/L14993.htm. Acesso em: 15 out. 2025.

BUCKERIDGE, M. S.; DE SOUZA, A. P. **Breaking the glycomic code of cell wall polysaccharides may improve second-generation bioenergy production from biomass.** *BioEnergy Research*, v. 7, p. 1065–1073, 2014. Acesso em: 6 jun. 2025.

CASTRO, M. H. M.; SCHWARTZMAN, S. **Tecnologia para a indústria: a história do Instituto Nacional de Tecnologia.** Rio de Janeiro: Centro Edelstein, 2008.

CELIK, M. B. **Experimental determination of suitable ethanol-gasoline blend rate at high compression ratio for gasoline engine.** *Applied Thermal Engineering*, v. 28, n. 5–6, p. 396–404, 2008.

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Relatório de Emissões Veiculares – Fatores de Emissão 2022.** São Paulo: CETESB, 2022. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/>. Acesso em: 21 maio 2025.

CHEN, Y. L.; CHEN, S.; TSAI, C. Y.; SUN, R. H.; TSAI, J. M.; LIU, S. Y. **Effects of ethanol-gasoline blends on engine performance and exhaust emissions in motorcycle.** In: *Proceedings of the 5th International Symposium on Machinery and Mechatronics for Agriculture and Biosystems Engineering*. Fukuoka: ISMAB, 2010.

CHONG, J. J.; TSOLAKIS, A.; GILL, S. S.; THEINNOI, K.; GOLUNSKI, S. E. **Enhancing the NO₂/NO_x ratio in compression ignition engines by hydrogen and reformat combustion for improved aftertreatment performance.** *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 35, n. 16, p. 8723–8732, 2010.

CHU, Y.; CUI, H. **Annual update on the global transition to electric vehicles: 2022.** International Council on Clean Transportation, 2023. Disponível em: https://theicct.org/publication/global-transition-electric-vehicles-update-jun23/?gad_source=1&gad_campaignid=22639629046&gbraid=0AAAAA_pFleelfjHn uUo_pxsciFCfU-G67&gclid=CjwKCAiA3L_JBhAlEiwAlcWO5197uhRn9-Jk9okZHKrzS9IM-q-dFaQj20G_dJJYNpiPaxbCrGvMVRoCHGMQAvD_BwE. Acesso em: 18 jun. 2025.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da Safra Brasileira: cana-de-açúcar, v. 11 – safra 2023/24, n. 3 – terceiro levantamento.** Brasília: CONAB, 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br>. Acesso em: 20 maio 2025.

COSTA, R. C.; SODRÉ, J. R. **Hydrous ethanol vs. gasoline-ethanol blend: engine performance and emissions.** *Fuel*, v. 89, n. 2, p. 287–293, 2010.

COSTAGLIOLA, M. A.; PRATI, M. V.; FLORIO, S.; SCORLETTI, P.; IODICE, P.; BUONO, D.; SENATORE, A. **Performances and emissions of a 4-stroke motorcycle fuelled with ethanol/gasoline blends.** *Fuel*, v. 183, p. 470–477, 2016.

CURSI, D. E. *et al.* **History and current status of sugarcane breeding, germplasm development and molecular genetics in Brazil.** *Sugar Tech*, v. 24, p. 112–133, 2022.

DHANDE, D. Y.; SINAGA, N.; DAHE, K. B. **The study of performance and emission characteristics of a spark ignition (SI) engine fueled with different blends of pomegranate ethanol.** *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, v. 12, n. 2, p. 295–306, 2021.

DOGAN, B.; EROL, D.; YAMAN, H.; KODANLI, E. **The effect of ethanol-gasoline blends on performance and exhaust emissions of a spark ignition engine through exergy analysis.** *Applied Thermal Engineering*, v. 120, p. 433–443, 2017.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco Energético Nacional 2022: ano base 2021.** Rio de Janeiro: EPE, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>. Acesso em: 01 fev. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Matriz energética e elétrica.** Rio de Janeiro: EPE, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcedenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 27 mar. 2025.

FAJRI, H. R.; JAFARI, M. J.; SHAMEKHI, A. H.; JAZAYERI, S. A. **A numerical investigation of the effects of combustion parameters on the performance of a compression ignition engine toward NO_x emission reduction.** *Journal of Cleaner Production*, v. 167, p. 140–153, 2017.

GOMES, P.; ECKER, R.; KULZER, A.; KUFFERATH, A.; CONTI, E. **Study on boosted direct injection SI combustion with ethanol blends and the influence on the ignition system.** *SAE Technical Paper*, n. 2011-36-0196, 2011.

GRANADE, A.; FERREIRA, J. S.; PAGLIUSO, D.; BUCKERIDGE, M. S. **Scientific Research on Bioethanol in Brazil: History and Prospects for Sustainable Biofuel.** *Sustainability*, Basel, v. 16, n. 10, p. 4167, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su16104167>. Acesso em: 4 dez. 2025.

HEYWOOD, John B. **Internal Combustion Engine Fundamentals.** 2. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2018. 1056 p. ISBN 978-1-260-11610-6. Disponível em: <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9781260116106>. Acesso em: 9 mar. 2025.

HIRZ, M.; NGUYEN, T. T. **Life-cycle CO₂-equivalent emissions of cars driven by conventional and electric propulsion systems.** *World Electric Vehicle Journal*, v. 13, n. 4, 2022. DOI: 10.3390/wevj13040061.

IBAMA. **Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE.** Brasília, DF: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/proconve>. Acesso em: 20 jan. 2026.

IEA. **Renewables 2023: analysis and forecast to 2028**. Paris: International Energy Agency, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>. Acesso em: 20 jan. 2026.

INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION (ICCT). *Life-cycle greenhouse gas emissions of combustion engine and electric passenger cars in Brazil*. Washington, DC: International Council on Clean Transportation, 2023. Acknowledgments: Funding provided by Crux Alliance. Disponível em: <https://theicct.org>. Acesso em: 01 nov. 2025.

IODICE, P.; LANGELLA, G.; AMORESANO, A. **Ethanol in gasoline fuel blends: effect on fuel consumption and engine-out emissions of SI engines in cold operating conditions**. *Applied Thermal Engineering*, v. 130, p. 1081–1089, 2018.

IPCC. **Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Summary for Policymakers**. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

ISENSTADT, A. *et al.* **Real world usage of plug-in hybrid vehicles in the United States**. International Council on Clean Transportation, 2022. Disponível em: https://theicct.org/publication/real-world-phev-us-dec22/?gad_source=1&gad_campaignid=22639629046&gbraid=0AAAAA_pFleelfjHnuUo_pxsciFCfUG67&gclid=CjwKCAiA3L_JBhAIEiwAlcWO5xQjJZq8q2dJMRk3U2BoVV4sLDZS1rVSFBliTMCAg2jSR396yEQC8hoC1JMQAvD_BwE. Acesso em: 17 jun. 2025.

KESKIN, A.; GÜRÜ, M. **The effects of ethanol and propanol additions into unleaded gasoline on exhaust and noise emissions of a spark ignition engine**. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, v. 33, n. 23, p. 2194–2205, 2011.

KOÇ, M.; SEKMEN, Y.; TOPGÜL, T.; YÜCESU, H. S. **The effects of ethanol–unleaded gasoline blends on engine performance and exhaust emissions in a spark-ignition engine**. *Renewable Energy*, v. 34, n. 10, p. 2101–2106, 2009.

KUMAR, R.; KUMAR, A.; PAL, A. **Overview of hydrogen production from biogas reforming: Technological advancement**. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 47, p. 34831–34855, 2022.

LI, Y.; GONG, J.; DENG, Y.; YUAN, W.; FU, J.; ZHANG, B. **Experimental comparative study on combustion, performance and emissions characteristics of methanol, ethanol and butanol in a spark ignition engine**. *Applied Thermal Engineering*, v. 115, p. 53–63, 2017.

MASUM, B. M.; MASJUKI, H. H.; KALAM, M. A.; FATTAH, I. R.; PALASH, S. M.; ABEDIN, M. J. **Effect of ethanol–gasoline blend on NO_x emission in SI engine**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 24, p. 209–222, 2013.

MELO, T. C. C.; MACHADO, G. B.; BELCHIOR, C. R.; COLAÇO, M. J.; BARROS, J. E.; OLIVEIRA, E. J.; OLIVEIRA, D. G. **Hydrous ethanol–gasoline blends:**

combustion and emission investigations on a flex-fuel engine. *Fuel*, v. 97, p. 796–804, 2012.

MINISTÉRIO DA ECONOMIA. **Rota 2030: Mobilidade e Logística.** Brasília: Ministério da Economia, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/produtividade-e-comercio-exterior/pt-br/assuntos/competitividade-industrial/setor-automotivo/rota-2030-mobilidade-e-logistica>. Acesso em: 26 fev. 2025.

MOHAMMED, M. K.; BALLA, H. H.; AL-DULAIMI, Z. M. H.; KAREEM, Z. S.; AL-ZUHAIRY, M. S. **Effect of ethanol–gasoline blends on SI engine performance and emissions.** *Case Studies in Thermal Engineering*, v. 25, p. 100891, 2021.

MOTOR1.COM. **Carros para sempre: Gol Power 1.6 Total Flex foi o primeiro bicombustível do Brasil.** 4 ago. 2014. Disponível em: <https://motor1.uol.com.br/news/118148/carros-para-sempre-gol-power-16-total-flex-foi-o-primeiro-bicombustivel-do-brasil/>. Acesso em: 31 jan. 2026.

NIGRO, F.; SZWARC, A. **O etanol como combustível.** In: SOUSA, E. L. L.; MACEDO, I. C. (org.). *Etanol e bioeletricidade: a cana-de-açúcar no futuro da matriz energética.* São Paulo: Luc Projetos de Comunicação, 2010. v. 6, p. 154–189.

NORMANN, F.; ANDERSSON, K.; LECKNER, B.; JOHNSON, F. **Emission control of nitrogen oxides in the oxy-fuel process.** *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 35, n. 5, p. 385–397, 2009.

PISCHINGER, S.; GÜNTHER, M.; BUDAK, O. **Abnormal combustion phenomena with different fuels in a spark ignition engine with direct fuel injection.** *Combustion and Flame*, v. 175, p. 123–137, 2017.

RAMASAMY, D.; GOH, C. Y.; KADIRGAMA, K.; BENEDICT, F.; NOOR, M. M.; NAJAFI, G.; CARLUCCI, A. P. **Engine performance, exhaust emission and combustion analysis of a 4-stroke spark ignited engine using dual fuel injection.** *Fuel*, v. 207, p. 719–728, 2017.

REPARAÇÃO AUTOMOTIVA. Conheça as diferenças entre o Honda Civic híbrido e o Toyota Corolla híbrido flex. *Reparação Automotiva*, 04 nov. 2024. Disponível em: <https://reparacaoautomotiva.com.br/2024/11/04/conheca-as-diferencas-entre-o-honda-civic-hibrido-e-o-toyota-corolla-hibrido-flex/>. Acesso em: 31 jan. 2026.

SCHWARCZ, L. M.; STARLING, H. M. **Brasil: uma biografia.** São Paulo: Companhia das Letras, 2015.

SHAHIR, S. A.; MASJUKI, H. H.; KALAM, M. A.; IMRAN, A.; ASHRAFUL, A. M. **Performance and emission assessment of diesel–biodiesel–ethanol/bioethanol blend as a fuel in diesel engines: a review.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 48, p. 62–78, 2015.

SONG, C. L.; ZHOU, Y. C.; HUANG, R. J.; WANG, Y. Q.; HUANG, Q. F.; LÜ, G.; LIU, K. M. **Influence of ethanol–diesel blended fuels on diesel exhaust emissions and**

mutagenic and genotoxic activities of particulate extracts. *Journal of Hazardous Materials*, v. 149, n. 2, p. 355–363, 2007.

STELLANTIS. **Fiat celebra os 45 anos do primeiro carro movido a etanol do mundo.** Betim, 5 jul. 2024. Disponível em: <https://www.media.stellantis.com/br-pt/flat/press/flat-celebra-os-45-anos-do-primeiro-carro-movido-a-etanol-do-mundo>. Acesso em: 20 jan. 2026.

STOREY, J. M.; BARONE, T.; NORMAN, K.; LEWIS, S. **Ethanol blend effects on direct injection spark-ignition gasoline vehicle particulate matter emissions.** *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, v. 3, n. 2, p. 650–659, 2010.

TAGHAVIFAR, H.; KALEJI, B. K.; KHEYROLLAHI, J. **Application of composite TNA nanoparticle with bio-ethanol blend on gasoline fueled SI engine at different lambda ratios.** *Fuel*, v. 277, p. 118218, 2020.

TEXACO. **Proconve L8: o que muda nos motores e catalisadores dos carros a partir de 2025.** Blog Texaco, 2025. Disponível em: <https://blog.texaco.com.br/havoline/proconve-l8-novas-regras-veiculos-leves/>. Acesso em: 03 dez. 2025.

THANGAVEL, V.; MOMULA, S. Y.; GOSALA, D. B.; ASVATHANARAYANAN, R. **Experimental studies on simultaneous injection of ethanol–gasoline and n-butanol–gasoline in the intake port of a four stroke SI engine.** *Renewable Energy*, v. 91, p. 347–360, 2016.

TIBAQUIRÁ, J. E.; HUERTAS, J. I.; OSPINA, S.; QUIRAMA, L. F.; NIÑO, J. E. **The effect of using ethanol–gasoline blends on the mechanical, energy and environmental performance of in-use vehicles.** *Energies*, v. 11, n. 1, p. 221, 2018.

TOYOTA DO BRASIL. **Toyota lança primeiro veículo híbrido flex do mundo no Brasil.** São Paulo, 2019. Disponível em: <https://www.toyota.com.br/mundo-toyota/noticias/toyota-lanca-primeiro-hibrido-flex-do-mundo-no-brasil>. Acesso em: 20 jan. 2026.

TURNER, D.; XU, H.; CRACKNELL, R. F.; NATARAJAN, V.; CHEN, X. **Combustion performance of bio-ethanol at various blend ratios in a gasoline direct injection engine.** *Fuel*, v. 90, n. 5, p. 1999–2006, 2011.

UTZERI, F. **Pra quem gosta de automobilismo – Carro movido a cachaça – Ernesto Lopes da Fonseca Costa.** Rio de Janeiro: Instituto Nacional de Tecnologia, 2013. Disponível em: <http://www.int.gov.br/int90anos/historiaINT02.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2025.

VARATHARAJAN, K.; CHERALATHAN, M. **Influence of fuel properties and composition on NOx emissions from biodiesel powered diesel engines: a review.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 16, n. 6, p. 3702–3710, 2012.

VELANDIA VARGAS, J. E.; SEABRA, J. E. A. **Fuel-cell technologies for private vehicles in Brazil: environmental mirage or prospective romance?** *Science of the Total Environment*, v. 798, 2021. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.149265.

WEBMOTORS. **VW Kombi: veja como está o último carro fabricado.** São Paulo, 26 set. 2024. Disponível em: <https://www.webmotors.com.br/wm1/noticias/vw-kombi-saiba-onde-esta-a-ultima>. Acesso em: 20 jan. 2026.

YOON, S. H.; HA, S. Y.; ROH, H. G.; LEE, C. S. **Effect of bioethanol as an alternative fuel on the emissions reduction characteristics and combustion stability in a spark ignition engine.** *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, v. 223, n. 7, p. 941–951, 2009.

YÜCESU, H. S.; TOPGÜL, T.; ÇINAR, C.; OKUR, M. **Effect of ethanol–gasoline blends on engine performance and exhaust emissions in different compression ratios.** *Applied Thermal Engineering*, v. 26, n. 17–18, p. 2272–2278, 2006.

ZERVAS, E.; MONTAGNE, X.; LAHAYE, J. **Emissions of regulated pollutants from a spark ignition engine: influence of fuel and air/fuel equivalence ratio.** *Environmental Science and Technology*, v. 37, n. 14, p. 3232–3238, 2003.

ZHUANG, Y.; HONG, G. **Primary investigation to leveraging effect of using ethanol fuel on reducing gasoline fuel consumption.** *Fuel*, v. 105, p. 425–431, 2013.