

Etanol, a força renovável que move o Brasil

Ethanol: the renewable force driving Brazil

Eduardo Sousa¹
Joentino Lucio²
Paulo Henrique³
Pedro Henrique⁴
Ruan Cangussu⁵
Victor Hugo⁶
Vinicius Silva⁷
Silvana Julia da Silveira Diniz⁸

RESUMO

A transição energética global e a urgência de soluções sustentáveis colocam os combustíveis renováveis no centro das atuais discussões estratégicas. Este trabalho analisa, portanto, o potencial do etanol como alternativa soberana e ecológica para a matriz de transporte brasileira, contrastando suas vantagens em relação aos combustíveis fósseis não renováveis. O estudo analisa a dinâmica do ciclo neutro em carbono e destaca como o cultivo do etanol reduz as emissões de gases de efeito estufa ao absorver CO₂ durante o ciclo de cultivo. No âmbito da engenharia e da eficiência técnica, é realizada uma análise comparativa do desempenho e consumo de motores de combustão interna comparando o etanol com a gasolina. Além disso, o trabalho explora uma das fronteiras mais promissoras e revolucionárias do setor, a conversão de motores diesel para o uso de etanol. Este mercado em rápido crescimento já está sendo concretizado na prática através de protótipos funcionais desenvolvidos por grandes corporações globais de engenharia pesada, como John Deere e CASE IH. Por meio de pesquisa analítica e documental concluiu-se que o etanol continua sendo um ativo estratégico subutilizado no Brasil. O desenvolvimento e a popularização de tecnologias de conversão térmica e eficiência não só impulsionam a inovação industrial e o agronegócio, mas também representam o caminho definitivo para alinhar a viabilidade econômica com a sustentabilidade ambiental.

Palavras-chave: Combustíveis Renováveis. Etanol. Ciclo de Carbono Neutro. Conversão de Motores Diesel. Eficiência Técnica.

¹ eduardosousa.bf99@gmail.com

² joentinoxavier27@gmail.com

³ ph.santos535@gmail.com

⁴ phipanema@hotmail.com

⁵ theruant@gmail.com

⁶ viqcto@gmail.com

⁷ viniciusms008@gmail.com

⁸ Professora orientadora

ABSTRACT

The global energy transition and the urgency of sustainable solutions have placed renewable fuels at the center of current strategic discussions. This study therefore examines the potential of ethanol as a sovereign and environmentally sustainable alternative for the Brazilian transportation energy matrix, highlighting its advantages over non-renewable fossil fuels. The research analyzes the dynamics of the carbon-neutral cycle and demonstrates how ethanol production contributes to the reduction of greenhouse gas emissions through the absorption of CO₂ during the crop growth cycle. From an engineering and technical efficiency perspective, a comparative analysis is conducted on the performance and fuel consumption of internal combustion engines operating on ethanol and gasoline. Furthermore, the study explores one of the most promising and innovative frontiers in the sector: the conversion of diesel engines to ethanol use. This rapidly expanding market is already becoming a practical reality through functional prototypes developed by major global heavy-engineering corporations, such as John Deere and CASE IH. Based on analytical and documentary research, the findings indicate that ethanol remains an underutilized strategic asset in Brazil. The development and widespread adoption of thermal conversion and efficiency-enhancing technologies not only foster industrial innovation and agribusiness development but also represent a viable pathway for aligning economic feasibility with environmental sustainability.

Keywords: Renewable Fuels; Ethanol; Carbon-Neutral Cycle; Diesel Engine Conversion; Technical Efficiency.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento econômico e tecnológico ao longo das últimas décadas intensificou a demanda por energias em escala global, resultando em um aumento significativo do consumo de combustíveis fósseis. Emissões de gases poluentes são 10% maiores do que as registradas em 2015 e, conforme a pesquisa, as emissões de CO₂ geradas pelo uso de carvão, petróleo e gás natural devem crescer 1,1% em relação ao ano anterior, totalizando 38,1 bilhões de toneladas. (UOL - de acordo com o relatório anual Global Carbon Budget). Essa crescente dependência tem gerado impactos ambientais relevantes, como a emissão excessiva de gases poluentes na atmosfera, agravamento do efeito estufa e mudanças climáticas. Diante desse cenário, torna-se necessário a busca por fontes energéticas alternativas que sejam capazes de conciliar o crescimento econômico, a segurança energética e sustentabilidade ambiental.

Neste contexto, os combustíveis renováveis destacam-se como uma importante alternativa aos combustíveis fósseis, por serem provenientes de fontes naturais, capazes de se regenerar em curto ou médio prazo. Entre essas fontes, o etanol tem ganhado notoriedade devido às suas características favoráveis, como uma menor emissão de carbono, bom desempenho energético, elevada octanagem e comportamento termodinâmico eficiente. Além disso, o etanol destaca-se por ser um combustível cuja cadeia produtiva é predominantemente nacional, consolidando-se como uma importante matriz energética brasileira e, segundo dados estatísticos, os combustíveis vêm crescendo de maneira exponencial ao passar dos anos. Em 2023, por exemplo, o uso desta energia chegou a representar 16,9% das escolhas de matrizes energéticas brasileiras (Portal solar – Fonte: Balanço Energético Nacional (BEN 2024)).

Do ponto de vista da engenharia mecânica, o etanol em motores de combustão interna do ciclo Otto oferece vantagens termodinâmicas significativas, como maior resistência à detonação (octanagem) e alto calor de vaporização, embora ainda enfrente o desafio comercial de maior consumo volumétrico em comparação aos combustíveis fósseis.

Além do mercado automotivo convencional, os recentes avanços tecnológicos ampliaram os limites da aplicação do etanol ao setor de máquinas pesadas, tradicionalmente dependente do ciclo diesel. Inovações lideradas por grandes fabricantes do setor agrícola, como John Deere e Case IH, demonstram a viabilidade técnica de conversão de motores agrícolas para funcionarem com etanol, abrindo um novo aspecto de autossuficiência para o agronegócio brasileiro.

O objetivo principal deste trabalho é analisar a viabilidade técnica, termodinâmica e econômica do etanol como principal vetor da transição energética no cenário brasileiro. Para tanto, como objetivos específicos, analisar e comparar o desempenho e consumo entre etanol e gasolina em motores do Ciclo Otto, examinar o impacto do ciclo do carbono na redução de emissões e avaliar o potencial disruptivo de novas tecnologias de conversão de motores diesel em biocombustíveis. Por último, discutir a viabilidade econômica e geopolítica desta transição, a fim de desmistificar os estigmas empresariais e avaliar o potencial inexplorado desta tecnologia verdadeiramente nacional.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O Brasil se consolidou como líder mundial na produção de etanol de cana-de-açúcar a partir da implementação do programa Proálcool em 1975. A iniciativa surgiu como uma resposta estratégica aos choques do petróleo da década de 1970, que comprometeram a balança de pagamentos do país (visto que o Brasil importava 80% do combustível fóssil), a iniciativa visava a segurança energética e a redução da dependência externa. Após um período de estagnação nos anos 90, o setor foi revitalizado em 2003 com a tecnologia flex-fuel, que permitiu aos consumidores alternar entre gasolina e etanol, tornando-os produtos substitutos no consumo. (Lima; Melo, 2024)

2.1 COMBUSTÍVEIS RENOVÁVEIS E NÃO RENOVÁVEIS

A definição de recursos naturais abarca um amplo espectro de componentes como recursos minerais (minérios), recursos biológicos (fauna e flora), recursos ambientais (ar, água e solo), recursos incidentais (radiação solar, ventos e correntes oceânicas) (FONSECA, 1992). Todo recurso natural é um bem que provém da natureza e que o homem pode utilizar para satisfazer suas necessidades, sendo classificado em recurso natural renovável ou não renovável em função da capacidade de esgotamento (SENHORAS, MOREIRA e VITTE, 2009, p. 3).

Os recursos naturais não renováveis são os que não podem ser recolocados pelo homem ou renovados pelo próprio ambiente após sua exploração (OECD, 1997), como por exemplo o petróleo, os minerais (carvão de pedra, xisto, ferro, manganês, cobre, pedras preciosas), a matéria prima do vidro (sílica, soda caustica e cal), entre outros.

Recursos naturais renováveis são recursos naturais que, depois de sua exploração, podem voltar para seus níveis de estoque anteriores por um processo natural de crescimento ou reabastecimento (OECD, 1997), como por exemplo a energia solar, o ar, a água e os vegetais.

Para este artigo, consideraremos apenas os recursos naturais que são fontes de produção de energia. Energia renovável é uma energia derivada de processos naturais que são ou podem ser constantemente reabastecidos e incluem energia solar, eólica, biomassa, geotérmica, hidrelétrica, energia maremotriz e biocombustíveis (SCHOLTEN e BOSMAN, 2013, p. 12; IEA, 2004, p. 12). Energia renovável refere-se ainda à energia gerada de recursos naturais em níveis sustentáveis que pode vir de fontes de energia não-fósseis (BJORK et al., 2011, p. 12). Tais fontes são reabastecidas por processos naturais a um ritmo igual ou superior à sua utilização (GREENPEACE, 2013).

Biocombustíveis são entendidos como combustíveis gerados a partir de biomassa renovável, com potencial para substituir parcial ou totalmente os combustíveis fósseis. Sua característica de renovabilidade advém do fato de que a matéria-prima (como a cana-de-açúcar) realiza fotossíntese, removendo carbono da atmosfera durante o crescimento e formando um ciclo onde as emissões da queima são apenas devolvidas ao ambiente, ao contrário dos fósseis que adicionam novos gases. No Brasil, destacam-se o etanol (anidro e hidratado) e o biodiesel (EBSCO-FullText-05_04_2026).

Os biocombustíveis são combustíveis renováveis derivados de matéria-prima biológica e incluem o bioetanol, ou simplesmente etanol, o biodiesel, o biogás (metano). Destes, o etanol é o biocombustível mais utilizado e cuja produção mais cresce no mundo, com um aumento de 4,4 bilhões de barris em 1980 para 46,2 bilhões de barris em 2005 (VICHI e MANSOR, 2009, p. 764).

O etanol, obtido principalmente a partir da cana-de-açúcar, é considerado uma fonte de energia limpa, com menor impacto ambiental em relação aos combustíveis fósseis, que são derivados do petróleo. Sua utilização como combustível veicular tem como objetivo principal reduzir a dependência de combustíveis fósseis, além de mitigar e promover a sustentabilidade energética. (LOPES et al., 2017).

De acordo com Crieckemas (2011, p. 4-5), a energia renovável entrou em cena nos últimos anos como resultado de uma combinação de fatores e tendências. As últimas décadas claramente mostraram que a queima de combustíveis fósseis não-renováveis leva à emissão de CO₂, o esgotamento dos recursos, degradação ambiental local e mudança climática.

2.2 SUSTENTABILIDADE E CICLO DE CARBONO NEUTRO

Os biocombustíveis comercialmente disponíveis, como etanol, biodiesel e biogás apresentam reduções emissões de CO₂ em relação aos combustíveis convencionais e até o momento são as únicas opções disponíveis no mercado em quantidades suficientes para substituir parte dos combustíveis provenientes de fontes fósseis (WBA, 2013).

Segundo LAL (2004), cerca de 82% das emissões dos gases causadores do efeito estufa são oriundos da queima de combustíveis fósseis (não renováveis). Dados como esse tem levado os países ao redor do mundo a priorizar o desenvolvimento de tecnologias que diminuam a dependência desse tipo de material. Entre os anos de 1970 e 1990, o governo federal do Brasil disponibilizou ferramentas e conduziu ações de fomento ao álcool de forma direta, fazendo com que hoje o etanol brasileiro tenha a vantagem de apresentar uma trajetória estabelecida. O processo tecnológico de sua produção, a partir do caldo resultante da moagem da cana-de-açúcar, é chamado de Etanol de Primeira Geração ou de E1G (ABARCA, 2005).

O etanol destaca-se como um biocombustível de biomassa renovável essencial para as metas globais de descarbonização e para a política de carbono zero da ONU para 2030. Diferente dos combustíveis fósseis, que adicionam novos gases à atmosfera, o ciclo do etanol é considerado favorável ao ecossistema porque a cana-de-açúcar absorve dióxido de carbono (CO₂) e monóxido de carbono durante seu desenvolvimento por meio da fotossíntese. Assim,

a combustão apenas devolve à atmosfera o carbono que foi previamente capturado pela planta. Além disso, o uso do etanol pode ser potencializado com a adição de hidrogênio verde, reduzindo ainda mais as emissões de gases de efeito estufa em comparação ao diesel e à gasolina (Januario et al., 2024).

A neutralidade de carbono é alcançada quando a mesma quantidade de dióxido de carbono (CO₂) é emitida para a atmosfera e removida por diversos meios, resultando em um saldo zero, também conhecido como pegada de carbono zero. Existem diferentes maneiras de alcançar esse equilíbrio: a mais saudável é não emitir mais CO₂ do que o que pode ser absorvido naturalmente por florestas e plantas, que atuam como sumidouros de carbono por meio da fotossíntese assimilando o CO₂ atmosférico e transformando-o em oxigênio, ajudando assim a reduzir as emissões (Duch-Guillot J. (2019)).

As discussões sobre a poluição do ar têm ganhado destaque mundial nas preocupações sobre o futuro da humanidade. Anualmente, conselhos ambientais se reúnem para construir novas propostas e metas para alcançar a redução da emissão de poluentes além de promoverem fontes renováveis de energia. Nestes conselhos, os veículos automotores, globalmente usados, têm significativa parcela nas emissões de gases do efeito estufa, principalmente o dióxido de carbono (CO₂). Esses esforços refletem uma crescente conscientização quanto à prioridade de diminuir os impactos ambientais que são causados pelos transportes motorizados e também de promover um desenvolvimento sustentável no setor automotivo. (Moraes, Kalyson, 2024).

No século XX, sob a perspectiva da segurança internacional, ficou claro para a maioria das grandes potências, que sem o controle de recursos de infraestrutura e das tecnologias energéticas modernas, um Estado não conseguiria se defender da agressão de um inimigo externo; por outro lado, a energia também está intimamente relacionada à lógica capitalista do sistema internacional (sem energia não existe comércio, geração de empregos, consumo e o bem-estar da sociedade é ameaçado). Em suma, energia diz respeito à própria estrutura das sociedades e à manutenção da ordem política, tornando-se um elemento fundamental para a compreensão da competição no Sistema de Estados (OLIVEIRA, 2012, p. 19).

A alta dependência de fontes de energia fósseis, a sua localização e as disparidades nos consumos mundiais tornam estes recursos estratégicos e geram uma situação de insegurança generalizada. A oferta de energia global não acompanha a crescente procura, o que resulta em aumento dos preços, o que torna vulneráveis as economias num cenário de instabilidade política e econômica em todos os continentes do mundo (MARTINS, 2013, p. 1).

Os mercados também influenciam esses processos: o aumento do preço de fontes de energia fósseis pode aumentar em um curto período e criar uma volatilidade no mercado. Como resultado, energia renovável se torna mais interessante e econômica em comparação com as outras formas de energia (CRIEKEMANS, 2011, p. 4-5).

A geopolítica da energia começa a adquirir novas dimensões onde eficiência energética, o maior domínio de tecnologias das energias renováveis e as políticas de criação de novos mercados para elas (JANNUZZI, 2014, p. 1) tornam-se cada vez mais urgentes.

2.3 CONVERSÃO DE MOTORES DIESEL PARA ETANOL

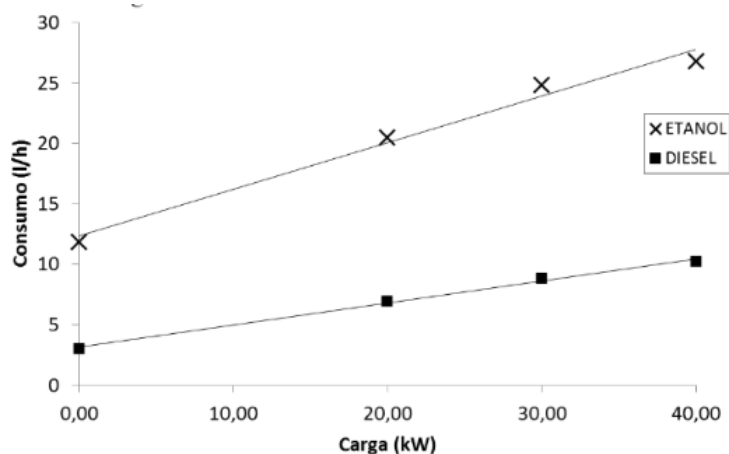
A busca pela minimização das emissões de gases de efeito estufa e a redução da pegada de carbono têm impulsionado o uso de combustíveis renováveis em motores de combustão interna. No contexto brasileiro, o incremento no número de geradores movidos a óleo diesel, especialmente após crises no setor elétrico, gerou uma demanda por alternativas mais limpas e economicamente viáveis para a geração local de energia. Motores Diesel são os mais utilizados nesses sistemas devido à sua elevada eficiência térmica e robustez mecânica, o

que os torna candidatos ideais para processos de conversão para o etanol (ROSO, V. R. et al - jun. 2016).

Para que a conversão seja bem-sucedida, o motor deve passar por uma mudança estrutural profunda, deixando de operar sob o ciclo Diesel (ignição por compressão) para operar sob o ciclo Otto (ignição por centelha). As modificações essenciais incluem a instalação de velas de ignição, a adaptação de eletroválvulas injetoras de combustível compatíveis com etanol e a implementação de um sistema eletrônico de gerenciamento para controlar precisamente o tempo de injeção e o ponto de ignição. Essa adaptação permite que o motor opere com rotação constante, essencial para a geração de energia elétrica.

Um fator crítico na conversão é a disparidade energética entre os combustíveis. O poder calorífico do etanol é de aproximadamente 26 MJ/kg, enquanto o do diesel é de 42 MJ/kg. Devido a essa menor densidade energética, o motor convertido exige um volume de combustível significativamente maior para realizar o mesmo trabalho. Dados experimentais demonstram que o consumo volumétrico de etanol tende a ser cerca de 55% superior ao de diesel. Conforme ilustrado no gráfico 1, esse aumento de consumo é linear e diretamente proporcional à carga aplicada ao motor:

Gráfico 1: – Valores experimentais de consumo (l/h) para diferentes cargas e combustíveis.



Fonte: (ROSO, V. R. et al. 2016)

Do ponto de vista ambiental, a conversão é altamente benéfica na redução drástica das emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x), que são quase eliminadas em comparação ao diesel devido à menor temperatura de combustão do etanol. Adicionalmente, o uso de etanol de cana-de-açúcar apresenta uma balança energética favorável, sendo capaz de gerar 9,3 Joules de energia renovável para cada 1 Joule de energia fóssil gasto na sua produção, superando outras fontes como a beterraba e o trigo.

Entretanto, o motor convertido pode apresentar um aumento nas emissões de hidrocarbonetos (HC) e monóxido de carbono (CO). Isso ocorre porque a câmara de combustão original do motor diesel não é otimizada para o etanol, o que pode causar o impacto do combustível líquido nas paredes da câmara, dificultando sua vaporização completa, especialmente em regimes de baixa carga. À medida que a carga e a temperatura do motor aumentam, essas emissões tendem a diminuir significativamente. (ROSO, V. R. et al - jun. 2016).

Por fim, a viabilidade econômica da conversão é fortemente influenciada pela logística de suprimento. Embora o custo do etanol em postos de revenda possa tornar a operação mais cara que o diesel em certas regiões, a alternativa torna-se extremamente atrativa para produtores rurais que possuem capacidade de produção própria de combustível. O custo de

produção de etanol em micro-usinas é significativamente menor (estimado em R\$ 0,392/litro para cana-de-açúcar), permitindo uma economia diária que pode superar 100 reais na operação de grupos geradores, garantindo o retorno do investimento na conversão.

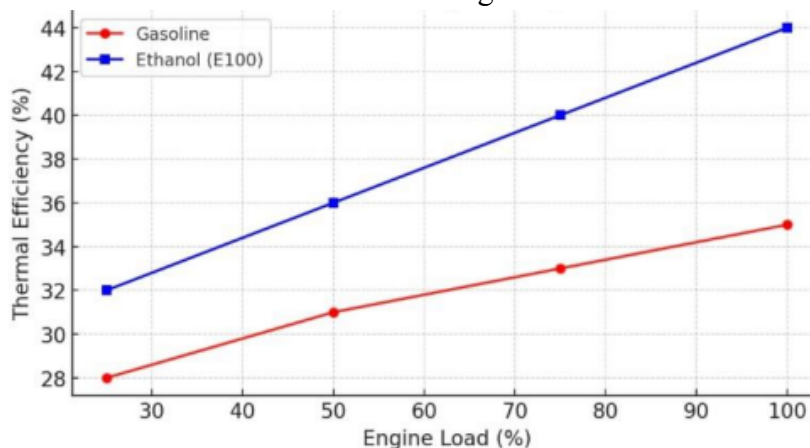
2.4 EFICIÊNCIA TÉCNICA E DESEMPENHO EM MOTORES

Do ponto de vista técnico, o etanol é superior à gasolina em diversos parâmetros de performance. Por possuir propriedades antidetonantes superiores (maior octanagem), ele permite o uso de taxas de compressão mais elevadas, o que resulta em ganhos significativos de potência e torque.

Testes em motores estacionários e automotivos demonstram que a conversão para o etanol pode elevar a potência em até 0,48 hp e o torque em 0,11 kgf.m em comparação com a gasolina comum. Além da performance superior, a utilização do etanol contribui para a longevidade dos componentes internos do motor, mantendo sistemas como os pistões mais limpos.(Fantinatti et al., 2023)

O gráfico 2 ilustra claramente a superioridade da eficiência térmica do etanol (E100) em comparação com a gasolina em toda a faixa de carga do motor. Esse comportamento é fundamentalmente explicado por duas propriedades termodinâmicas do etanol: seu alto índice de octano (~108 RON) e seu alto calor latente de vaporização (~0,84 MJ/kg). O alto índice de octano permite que o motor opere com um avanço de ignição mais agressivo sem risco de detonação (batida de pino), o que aproxima o ciclo de combustão de um processo de volume constante mais ideal e, portanto, mais eficiente.

Gráfico 2: Eficiência Térmica vs. Carga Para Gasolina vs. Etanol



Fonte: Star of Sciences Multidisciplinary Journal, ISSN-e 3091-1885, Vol. 2, Nº. 2, 2025

Simultaneamente, o alto calor de vaporização causa um resfriamento significativo da mistura ar-combustível durante a admissão, aumentando sua densidade (melhorando a eficiência volumétrica) e reduzindo ainda mais a propensão à autoignição. A combinação desses fatores permite uma conversão mais eficaz da energia química do combustível em trabalho mecânico, conforme previsto pela termodinâmica do ciclo Otto. (Star of Sciences Multidisciplinary Journal, ISSN-e 3091-1885, Vol. 2, Nº. 2, 2025).

Sabe-se que uma das principais vantagens do uso do etanol como combustível é o seu poder antidetonante (alta octanagem), que permite o motor funcionar em condições de altas pressões na câmara de combustão. A alta octanagem aliada ao elevado calor latente de vaporização proveniente do etanol são características que tornam possível o desenvolvimento de motores com maiores razões de compressão, o que por sua vez resulta em motores com maior eficiência térmica (SILVA, 2017).

Para obter um melhor aproveitamento das propriedades do etanol, torna-se fundamental a concepção de um projeto adequado ao motor de combustão, envolvendo parâmetros geométricos e operacionais, como a razão de compressão do motor. (RAMOS, Victória Regina - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019).

3. METODOLOGIA

Este artigo classifica-se como uma pesquisa aplicada de natureza investigativa que aborda a definição dos combustíveis renováveis, sua relação direta com o etanol, o avanço da poluição ambiental e a intensificação da emissão de dióxido de carbono (CO₂), um dos principais vetores das mudanças climáticas, impulsionadas pelo uso contínuo de combustíveis não renováveis. O Etanol, destaca-se como um combustível de matriz energética genuinamente brasileira e, sobretudo, renovável. Ao longo deste estudo, serão apresentadas comparações entre etanol, gasolina e o diesel, evidenciando a eficiência do ciclo Otto, explicando os fundamentos dos combustíveis renováveis e os impactos na economia e sociedade.

A presente pesquisa caracteriza-se por uma abordagem qualitativa, permitindo a compreensão dos fenômenos técnicos, econômicos e ambientais relacionados ao etanol. Quanto aos seus fins, a pesquisa é de natureza exploratória e descritiva, visando registrar e correlacionar fatos da realidade energética brasileira sem manipulá-los.

Para o alcance dos objetivos, o trabalho será dividido em três frentes metodológicas:

3.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA E DOCUMENTAL (SUSTENTABILIDADE E GEOPOLÍTICA)

A presente pesquisa caracteriza-se como bibliográfica e documental, com abordagem qualitativa, buscando analisar a importância do etanol e dos biocombustíveis no contexto da sustentabilidade, da segurança energética e da geopolítica brasileira.

A pesquisa bibliográfica foi realizada por meio da consulta a artigos científicos, livros, monografias, teses, relatórios técnicos e documentos institucionais disponíveis em bases de dados acadêmicas e fontes oficiais. As buscas foram realizadas utilizando as palavras-chave: "etanol", "biocombustíveis", "cana-de-açúcar", "sustentabilidade", "segurança energética", "matriz energética brasileira", "geopolítica da energia", "combustíveis renováveis", "emissões de CO₂" e "motores a etanol". As palavras-chave foram utilizadas de forma isolada e combinada, visando ampliar a abrangência dos resultados encontrados.

Foram identificados 44 documentos durante a etapa de levantamento bibliográfico. Após a aplicação dos critérios de relevância, atualidade e aderência aos objetivos da pesquisa, 41 documentos foram selecionados para compor o referencial teórico e a análise documental.

A pesquisa documental utilizou dados secundários provenientes de instituições e órgãos oficiais, tais como a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o Balanço Energético Nacional (BEN), a União da Indústria de Cana-de-Açúcar e Bioenergia (UNICA), a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD) e a World Bioenergy Association (WBA).

A análise dos dados teve como objetivo compreender a evolução histórica do setor sucroenergético brasileiro, os avanços tecnológicos relacionados à produção e utilização do etanol, seus impactos ambientais e econômicos, bem como sua relevância estratégica para a segurança energética nacional. Além disso, buscou-se identificar como o Programa Nacional

do Álcool (Proálcool) e as políticas públicas voltadas aos biocombustíveis contribuíram para consolidar o etanol como uma das principais fontes renováveis da matriz energética brasileira.

Tabela 1 – Documentos selecionados para a pesquisa bibliográfica e documental

Nº	Autor(es)	Ano	Título	Tipo de Documento
1	Revista de Economia Mackenzie	2009	Aspectos Econômicos da Produção Brasileira de Etanol e Sustentabilidade	Artigo Científico
2	Revista de Economia e Sociologia Rural	2012	Álcool Combustível no Brasil e Path Dependence	Artigo Científico
3	ABARCA, C. D. G.	2005	Inovações Tecnológicas na Agroindústria da Cana-de-Açúcar no Brasil	Dissertação
4	CRIEKEMANS, D.	2011	The Geopolitics of Renewable Energy: Different or Similar to the Geopolitics of Conventional Energy?	Artigo/Conference Paper
5	DUCH-GUILLOT, J.	2019	O que é a Neutralidade de Carbono e Como Alcançá-la até 2050	Relatório Institucional
6	Applied Thermal Engineering	2017	Experimental Comparative Study on Combustion, Performance and Emissions Characteristics of Methanol, Ethanol and Butanol in a Spark Ignition Engine	Artigo Científico
7	Revista Foco	2022	Estudo do Desempenho de um Motor de Combustão Interna Turboalimentado e com Restrição da Entrada de Ar	Artigo Científico
8	FONSECA, E.	1992	Meio Ambiente e Contas Nacionais: a Experiência Internacional	Livro/Capítulo
9	FANTINATTI, L. Z. et al.	2023	Evaluation of the Performance Curves of the 4-Stroke, Spark-Ignited, Single-Cylinder Engine Altered to Consume Ethanol	Artigo Científico
10	GREENPEACE	2013	[R]evolução Energética: a Caminho do Desenvolvimento Limpo	Relatório Técnico
11	ISABELLA, G. et al.	2017	Another Driver of the Brazilian Fuel Ethanol Supply Chain: The Consumers' Preferences	Artigo Científico
12	JANNUZZI, G. M.	2014	A Nova Geopolítica da Energia	Trabalho em Evento Científico
13	JANUARIO, J. L. et al.	2024	Análise Comparativa da Combustão do Etanol com Adição de Hidrogênio Verde	Artigo Científico

			para o Monitoramento da Emissão de CO ₂	
14	LOPES, C. H.; GABRIEL, A. V.; BORGES, M. T. M. R.	2017	Produção de Etanol a partir da Cana-de-Açúcar: Tecnologia de Produção de Etanol	Material Técnico
15	LIMA, E. F. P. A.; MELO, A. S.	2024	Examining the Relationship Between the Gasoline A Market and the Prices of Hydrous Ethanol and Sugar to the Producer in Brazil	Artigo Científico
16	Portal Solar / BEN	2024	Matriz Energética Brasileira e Matriz Elétrica Brasileira	Documento Técnico
17	OECD	1997	Glossary of Environment Statistics	Documento Institucional
18	RAMOS, V. R.	2019	Análise Técnica do Uso de Etanol em um Motor de Combustão Interna para Diferentes Razões de Compressão	Monografia
19	ROSO, V. R. et al.	2016	Consumo de Combustível e Emissões de Poluentes em um Motor Diesel Convertido a Etanol para Geração Térmica de Energia Elétrica	Artigo Científico
20	SENHORAS, E. M.; MOREIRA, F.; VITTE, C. C. S.	2009	A Agenda Exploratória de Recursos Naturais na América do Sul	Artigo Científico
21	SCHOLTEN, D.; BOSMAN, R.	2013	The Geopolitics of Renewable Energy: A Mere Shift of Landslide in Energy Dependencies?	Artigo Científico
22	TORRES, J. F.	1986	Desempenho de Motores de Ciclo Diesel Convertidos para Ciclo Otto, Visando a Utilização de Álcool Etílico Hidratado	Tese de Doutorado
23	UNICA	2019	Uso do Etanol Evitou a Emissão de 535 Milhões de Toneladas de CO ₂	Relatório Institucional
24	VICHI, F.; MANSOR, M. T. C.	2009	Energia, Meio Ambiente e Economia: O Brasil no Contexto Mundial	Artigo Científico
25	VIDAL, M. F.	2024	Etanol	Caderno Setorial ETENE
26	WBA – World Bioenergy Association	2013	Biofuels for Transport	Relatório Técnico
27	CETESB	2023	Emissões veiculares	Artigo Científico

28	EMBRAPA	2023	Agroenergia e sustentabilidade da produção de etanol de cana-de-açúcar	Artigo Científico
29	EPA	2024	Alternative Fuels	Artigo Científico
30	GOLDEMBERG	2007	Ethanol for a sustainable energy future	Relatório Técnico
31	OLIVEIRA	2020	Manejo e produção de palhada da cana-de-açúcar em um sistema irrigado por gotejamento subsuperficial para geração de bioetanol	Artigo Científico
32	OMS	2024	Air Pollution	Artigo Científico
33	SAE	2023	Ethanol Fuel and Engine Performance Studies	Relatório Técnico
34	SOARES	2017	Desenvolvimento de uma rota tecnológica para produção de etanol celulósico de segunda geração de bagaço de cana-de-açúcar	Artigo Científico
35	JANUARIO	2024	Análise do ciclo de vida e neutralidade do carbono no uso de biocombustíveis de primeira geração	Artigo Científico
36	ONU	2015	Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável	Relatório Institucional
37	ROSO	2016	Desempenho e emissões de um motor ciclo diesel convertido para operar com etanol hidratado sob o ciclo Otto	Relatório Técnico
38	FANTINATTI	2023	Estudo comparativo de potência e torque em motores flex-fuel sob ensaios dinamométricos	Artigo Científico
39	LIMA	2024	Racionalidade econômica na paridade do combustível flex: a dinâmica da regra dos 70%	Relatório Institucional
40	SILVA	2017	Análise termodinâmica de motores de combustão interna alternativos operando com etanol e alta taxa de compressão	Relatório Técnico
41	STAR OF SCIENCES	2025	Thermodynamic efficiency and latent heat vaporization of alternative fuels in spark-ignition engines	Artigo Científico

Fonte: (Elaborado pelos autores, 2026)

3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E ESTUDO DE CASO (TERMODINÂMICA E EMISSÕES)

Para analisar as diferenças termodinâmicas e de emissão de CO₂ entre o etanol e a gasolina, a metodologia baseia-se em protocolos de ensaios técnicos:

- **Análise de Combustão:** Utilização de modelagem estequiométrica das reações para calcular a massa de CO₂ emitida por volume de combustível queimado.
- **Desempenho em Motores:** Avaliação de curvas de potência e torque em dinamômetros de chassi ou bancada, seguindo normas técnicas como a SAE J1995, para comparar o rendimento do etanol (Ciclo Otto) frente às gasolinas comercializadas no Brasil.

3.3 IDENTIFICAÇÃO DA RELAÇÃO DE CONSUMO

- **Regra dos 70%:** É um parâmetro técnico e econômico utilizado principalmente por proprietários de veículos flexfuel para determinar qual combustível oferece o melhor custo-benefício no momento do reabastecimento. A regra baseia-se no diferencial de rendimento energético entre o etanol e a gasolina. Devido ao menor teor de energia do etanol, a paridade de preços por quilômetro rodado ocorre quando o preço do litro do biocombustível equivale a aproximadamente 70% do preço do litro da gasolina. O funcionamento da regra baseia-se na lógica da arbitragem de consumo e na racionalidade econômica do consumidor. Com a introdução dos motores flex em 2003, o etanol e a gasolina tornaram-se substitutos quase perfeitos. Isso significa que a demanda por etanol é altamente sensível (elástica) a variações que o aproximem ou afastem desse limite de 70%. Essa regra acaba por "prender" o preço do etanol ao da gasolina. Se o preço do etanol sobe além da paridade de 70%, os consumidores migram para a gasolina, forçando uma queda na demanda e, eventualmente, no preço do biocombustível para que ele volte a ser competitivo. Em resumo, a regra dos 70% funciona como um mecanismo de mercado que equilibra a demanda entre o combustível renovável e o fóssil, baseando-se estritamente na eficiência técnica comparativa de cada um.
- **Comportamento do Consumidor:** Aplicação de levantamentos e análise fatorial para identificar fatores que influenciam a escolha do combustível, como conveniência, confiança e preocupação ambiental.

3.4 CONVERSÃO DE MOTORES A DIESEL PARA ETANOL

A metodologia deste estudo será baseada em pesquisa bibliográfica sobre a conversão de motores ciclo diesel para operação com etanol, utilizando informações obtidas em artigos científicos, livros, dissertações e normas técnicas relacionadas a combustíveis renováveis e motores de combustão interna. O desenvolvimento da pesquisa consistirá na análise das principais adaptações necessárias para a utilização do etanol em motores originalmente projetados para funcionamento com diesel, considerando aspectos como combustão, alimentação de combustível e eficiência energética. Serão abordadas características físico-químicas do etanol, incluindo poder calorífico, taxa de compressão e comportamento durante o processo de ignição. A avaliação teórica da conversão será realizada por meio de cálculos simplificados relacionados ao desempenho do motor, utilizando fórmulas básicas de consumo específico e eficiência térmica. Para análise do consumo específico de combustível, será utilizada a Equação 1.

$$CEC = \frac{Mc}{P} \quad (1)$$

Onde:

- CEC = Consumo específico de combustível;
- Mc = Vazão mássica de combustível;
- P = Potência desenvolvida pelo motor.

Para estimativa da eficiência térmica do motor, será utilizada a Equação 2.

$$\eta_t = \frac{P}{Mc \cdot PCI} \quad (2)$$

Onde:

- η_t = Eficiência térmica;
- P = Potência útil do motor;
- Mc = Vazão mássica de combustível;
- PCI = Poder calorífico inferior do combustível.

Os resultados obtidos a partir da revisão bibliográfica e dos cálculos teóricos serão utilizados para comparar as características do diesel e do etanol, permitindo analisar a viabilidade técnica da conversão sob os aspectos energéticos e operacionais.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 SUSTENTABILIDADE, CENÁRIO GEOPOLÍTICO E CICLO DO CARBONO NEUTRO

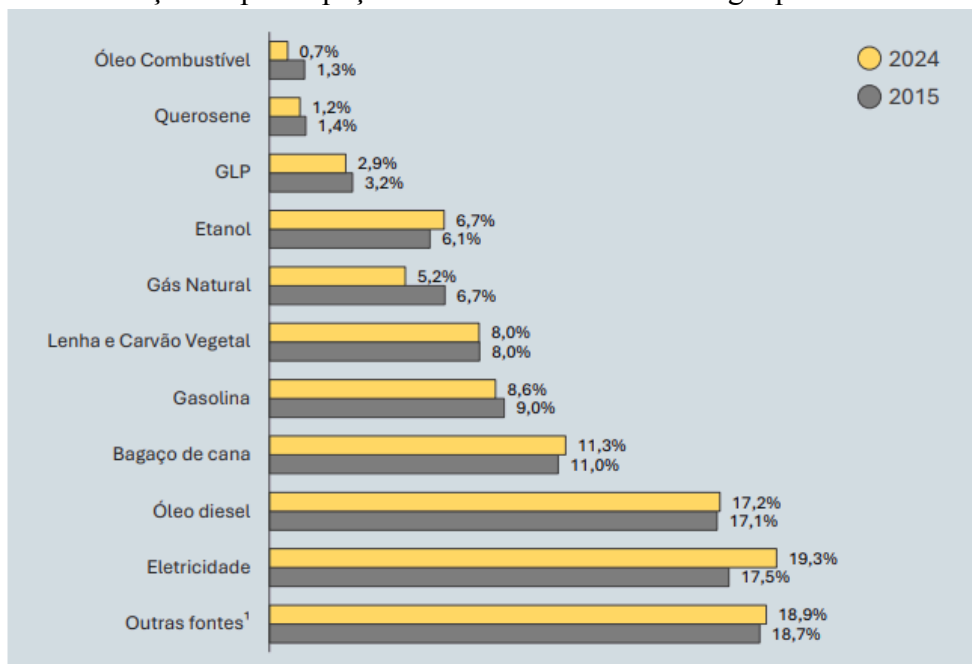
Diante da análise bibliográfica e documental dos dados obtidos junto aos órgãos reguladores e os balanços energéticos, consegue-se perceber que a consolidação do etanol como um pilar estratégico da segurança energética no Brasil apresenta um histórico de amadurecimento ao longo dos anos e de resiliência, com início na década de 1970. A partir dessa análise, os resultados obtidos indicam que, com a evolução da matriz de transportes no Brasil, houve uma redução considerável da dependência externa de combustíveis fósseis. Sob uma perspectiva sustentável, os resultados indicam e confirmam a viabilidade do etanol, que cumpre as metas globais de carbono zero estabelecidas pela ONU até 2030.

Em contraste com a gasolina e o diesel, cuja combustão de fontes não renováveis libera novos gases nocivos à atmosfera (o que contribui para um aumento em escala global de 1,1% nas emissões de CO₂), o ciclo de vida do etanol está dentro do princípio de neutralidade do carbono. A fundamentação teórica aponta que:

- Absorção de carbono: Durante o desenvolvimento da cana de açúcar, a planta realiza fotossíntese e absorve o CO₂ da atmosfera, funcionando como um sumidouro natural do carbono (DUCH-GUILLOT, 2019).
- Saldo de emissões: Quando o etanol sofre combustão em um motor veicular, ele devolve à atmosfera exatamente o mesmo volume de carbono que havia utilizado para o desenvolvimento da planta, gerando assim um saldo líquido de emissão próximo a zero (JANUARIO et al., 2024).
- Evolução do hidrogênio verde: Projeções literárias indicam que a eficiência ambiental do etanol de primeira geração (E1G) pode ser ampliada em caso de

combinação com o hidrogênio verde, o que acarreta uma diminuição da pegada ecológica no setor de transportes (JANUARIO et al., 2024).

Gráfico 3: Variação da participação do consumo final de energia por fonte em 10 anos



Fonte: (EPE - Balanço Energético Nacional, 2025)

4.2 VIABILIDADE DA CONVERSÃO DE MOTORES DIESEL PARA ETANOL

Com base nos dados analisados a respeito da conversão dos motores, originalmente projetados para o ciclo Diesel (ignição por compressão) e utilizados para operar no ciclo Otto, evidenciam-se diferentes respostas quanto ao consumo e às emissões de gases. Para as modificações estruturais analisadas, os resultados indicaram uma necessidade de adaptação e mudanças no sistema de ignição e eletroválvulas injetoras (ROSO, V. R. et al., 2016).

Tabela 2: Propriedades da gasolina, álcool etílico, álcool etílico hidratado e diesel.

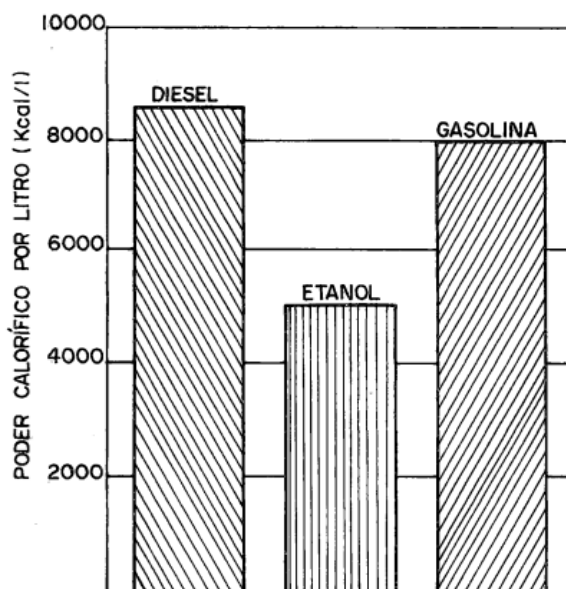
Propriedades	Gasolina	Álcool Etílico	Álcool Etílico Hidratado	Óleo Diesel
Densidade (20°) (g/cm ³)	0,73	0,79	0,81	0,84
Poder Calorífico (Kcal/Kg)	10.500	64.000	5.952	10.200
Dosagem com/ar (em massa)	1:14,8	1:9	1:8,3	1:14,9
Octanagem	73-77	M:89 R:106	M:92 R:110	-
Índice de Cetano	8-14	8	8	45-55
Graus GL (em volume)	-	99,5	95	-
Graus INPM (em peso)	-	99,2	93,5	-

Fonte: Torres (1986, p. 18).

A análise das curvas de consumo volumétrico em função da aplicação de carga no motor, conforme apresentado anteriormente pelos ensaios coletados na literatura, apresentou os seguintes comportamentos:

- Consumo e poder calorífico: Se o óleo diesel convencional, encontrado em postos de gasolina, possui um poder calorífico de, aproximadamente 42 MJ/kg, o etanol em contrapartida apresenta 26 MJ/kg. Como o etanol possui menos energia por cada quilo, o motor precisa injetar muito mais combustível para conseguir entregar e alcançar a mesma força e rotação (ROSO, V. R. et al., 2016).
- Comportamento das curvas: Utilizando como base os resultados obtidos no gráfico 1, nota-se que o consumo de combustível em litros por hora (l/h) é diretamente proporcional ao aumento da carga mecânica para todos os combustíveis. Assim, é observado que, mesmo com carga zero, o consumo do etanol é superior aos demais. Quando o motor é exigido ao máximo (carga de 40kW), o consumo com o etanol dispara e alcança números próximos ao 27 l/h, enquanto o diesel alcança somente 10 l/h (ROSO, V. R. et al., 2016).
- Emissão de poluentes: Ao observar sob ponto de vista ambiental, os testes destacaram que a opção pelo etanol gera vantagens expressivas, resultando em uma redução drástica nas emissões de fuligem (partículas) e de óxidos de nitrogênio. Entretanto, como a câmara interna do motor não foi originalmente projetada somente para ao etanol, a temperatura de combustão é um pouco menor e acarreta acúmulo de combustível não queimado nas paredes do cilindro. Essa ocorrência ocasiona um aumento das emissões de monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos na atmosfera (ROSO, V. R. et al., 2016).

Gráfico 4: Comparação do poder calorífico do etanol, gasolina e do diesel.



Fonte: Torres (1986, p. 19).

4.3 EFICIÊNCIA TÉRMICA E CONSUMO (ETANOL E GASOLINA)

Após análise do desempenho dos combustíveis no ciclo Otto, os testes comparativos de curvas de potência, torque e rendimento termodinâmico apontaram uma superioridade técnica do etanol (E100) em relação a gasolina comum (FANTINATTI et al., 2023; SILVA, 2017).

Os resultados da eficiência térmica em função da carga de trabalho do motor indicaram um ganho par ambos os combustíveis, entretanto com vantagem considerável para o biocombustível:

Tabela 3: Eficiência térmica x consumo

Carga do Motor (%)	Eficiência Térmica - Gasolina (%)	Eficiência Térmica - Etanol (%)
25%	~28%	~32%
50%	~31%	~36%
75%	~33%	~40%
100%	~35%	~44%

Fonte: (Elaborado pelos autores, 2026)

A superioridade na eficiência térmica do etanol, que chega a atingir 44% sob a carga total contra 35% da gasolina, pode ser fundamentada pelas propriedades físico-químicas do próprio biocombustível:

- Alta octanagem (~108 RON): O etanol é extremamente resistente à detonação. Isso permite a projeção de motores com uma taxa de compressão mais alta e adiantar o ponto de ignição sem o risco de o motor começar a “bater pino”. Do ponto de vista termodinâmico, isso possibilita a combustão real chegar bem próximo do que seria um processo ideal a volume constante (SILVA, 2017; *Star of Sciences Multidisciplinary Journal*, 2025).
- Alto calor latente de vaporização: Quando ocorre a evaporação do etanol no coletor de admissão do motor, ele resfria muito a mistura de ar + combustível. Esse resfriamento aumenta a densidade da mistura e melhora a eficiência volumétrica, além de diminuir a temperatura dentro do motor, possibilitando transformar mais energia térmica em trabalho mecânico. Nos testes realizados, essa melhora se apresentou com ganhos de até 0,48 hp da potência e 0,11 kgf de torque (FANTINATTI et al., 2023).
- A regra dos 70%: Toda a diferença de energia apresentada resulta em economia para o bolso do consumidor e explica também a famosa regra dos 70%. Como o etanol tem menos energia por litro consumido, o carro flex roda com ele cerca de 70% do que rodaria com a gasolina comum. O mercado mostra que o motorista é racional nessa escolha e, caso o preço do etanol passe desse limite de 70%, a opção pela gasolina se torna mais viável financeiramente (LIMA; MELO, 2024).

Tabela 4: Etanol a 70% do valor da gasolina

Combustível	Km por litro	Preço por litro	Valor abastecido por	Litros	Km total
Etanol	7,7	R\$ 3,92	R\$ 50,00	12,76	98,21
Gasolina	11	R\$ 5,60	R\$ 50,00	8,93	98,21

Fonte: (Elaborado pelos autores, 2026)

Tabela 5: Etanol a 67% do valor da gasolina

Combustível	Km por litro	Preço por litro	Valor abastecido por litro	Litros	Km total
Etanol	7,7	R\$ 3,92	R\$ 50,00	12,76	98,21
Gasolina	11	R\$ 5,85	R\$ 50,00	8,55	94,02

Fonte: (Elaborado pelos autores, 2026)

Tabela 6: Etanol a 75% do valor da gasolina

Combustível	Km por litro	Preço por litro	Valor abastecido por litro	Litros	Km total
Etanol	7,7	R\$ 4,39	R\$ 50,00	12,76	87,70
Gasolina	11	R\$ 5,60	R\$ 50,00	8,93	98,21

Fonte: (Elaborado pelos autores, 2026)

4.4 COMPARAÇÃO DAS EMISSÕES DO ETANOL, DIESEL E GASOLINA

Os resultados da análise comparativa deixam claro que o etanol traz vantagens ambientais expressivas quando colocado lado a lado com os combustíveis fósseis. A grande diferença está na origem do que é liberado: enquanto a gasolina e o diesel trazem para a atmosfera um carbono fóssil que estava guardado há milhões de anos, o etanol faz parte de um ciclo vivo e renovável, o que reduz drasticamente o impacto líquido dessas emissões (CETESB, 2023).

No caso do dióxido de carbono (CO₂), essa conta fecha no positivo, pois a cana-de-açúcar absorve o gás da atmosfera durante o seu crescimento, compensando o que sai pelo escapamento. Os dados também apontam para uma queda significativa na emissão do material particulado e óxidos de nitrogênio (NO₂), uma vitória importante principalmente na comparação direta com o diesel (EMBRAPA, 2023).

Por outro lado, a pesquisa também acende um alerta, quando o etanol é usado em motores que não foram calibrados ou projetados exclusivamente para ele, o tiro pode sair pela culatra. Nesses casos, a temperatura de combustão mais baixa e a dificuldade de o combustível evaporar por completo acabam aumentando a liberação de monóxido de carbono e hidrocarbonetos não queimados. Fica evidente, portanto, que o etanol tem um papel estratégico e de alto potencial para limpar a matriz do setor de transportes. Contudo, para que esse potencial se transforme em realidade e os benefícios ambientais sejam colhidos por inteiro, a tecnologia dos motores precisa caminhar de mãos dadas com o combustível (EPA, 2024).

- A "mágica" do ciclo fechado (Carbono Novo vs. Carbono Velho): A grande sacada do etanol não é a ausência de emissões pelo escapamento, mas sim o fato de ele integrar um ciclo biológico ativo. O carbono liberado hoje é o mesmo que a cana-de-açúcar absorveu do ar recentemente para crescer. A gasolina e o diesel, por outro lado, desenterram um carbono estocado há eras, injetando um "peso extra" que a atmosfera não consegue reabsorver a tempo.
- O ganho real na saúde das cidades: Além de mitigar o impacto no clima global, o etanol traz um alívio imediato para o ar dos centros urbanos. Ao reduzir drasticamente a fuligem (material particulado) e os gases que contribuem para a chuva ácida, ele se mostra uma alternativa muito mais limpa que os derivados do petróleo, refletindo-se diretamente na melhoria da saúde pública. (OMS, 2024).
- O combustível não joga sozinho (O fator motor): Este é o ponto de equilíbrio do diagnóstico. O etanol possui um potencial gigante, mas depende do par perfeito.

Se o motor não for calibrado para as suas características físicas específicas como a necessidade de maior calor para a vaporização, o resultado será uma queima incompleta, gerando mais poluentes do que o esperado. Combustível de alta performance exige engenharia adequada (SAE INTERNATIONAL, 2023).

4.5 IMPACTO ECONÔMICO DO ETANOL NA ECONOMIA BRASILEIRA

O etanol vai muito além de um combustível limpo, ele é um motor estratégico para a economia do Brasil. Todo ano, a cadeia da cana-de-açúcar movimentava bilhões de reais e gera milhares de empregos, do campo à tecnologia. Ao produzirmos nosso próprio combustível, dependemos menos do petróleo importado, o que ajuda a equilibrar as contas do país. Além disso, o etanol funciona como um "escudo" para o bolso do consumidor, quando o preço do petróleo dispara no mundo, ele segura a inflação nos transportes. Por fim, o crescimento desse setor atrai investimentos que aceleram a inovação, trazendo motores mais eficientes e novos biocombustíveis para o mercado (GOLDEMBERG, 2007).

4.6 PERSPECTIVAS FUTURAS DO ETANOL E NOVAS TECNOLOGIAS

As projeções tecnológicas indicam que o etanol permanecerá como um elemento estratégico na transição energética global. Essa relevância futura se apoia, sobretudo, em três frentes de inovação, o desenvolvimento do etanol de segunda geração (E2G), a integração com o hidrogênio verde e o aperfeiçoamento dos motores híbridos flex. Ao reaproveitar resíduos da biomassa da cana-de-açúcar, como o bagaço e a palha, o E2G eleva significativamente o rendimento energético sem demandar a expansão da área agrícola (SOARES, 2017).

Somado a isso, estudos recentes apontam que a associação do biocombustível ao hidrogênio verde potencializa a mitigação de gases de efeito estufa, elevando o patamar de sustentabilidade do ciclo produtivo. Essa evolução converge com o desenvolvimento de motores flex de alta eficiência térmica, otimizados especificamente para explorar as propriedades antidetonantes do etanol. Diante desse cenário, constata-se que o potencial do biocombustível transcende o contexto energético atual, consolidando-se como uma das principais alternativas para o futuro da mobilidade sustentável (OLIVEIRA, 2020).

5. CONCLUSÃO

Diante do cenário global de transformação energética, o etanol se consolida não apenas como uma alternativa viável, mas como um pilar estratégico e soberano da matriz de transportes brasileira. Uma análise comparativa entre fontes renováveis e fósseis mostra que a viabilidade do etanol vai além da eficiência térmica e do desempenho mecânico em motores de combustão interna, onde já é altamente competitivo em relação à gasolina. A sua verdadeira diferença reside no encerramento do ciclo neutro em carbono, que reduz drasticamente as emissões de gases com efeito de estufa desde o cultivo até à combustão.

Além disso, a conversão de motores diesel para a utilização de etanol está a emergir como uma das fronteiras mais perturbadoras e promissoras para a descarbonização. Longe de ser apenas uma projeção teórica, este mercado com grande potencial de crescimento já está se materializando na prática, com grandes players dos setores agrícola e de equipamentos pesados, como JOHN DEERE e CASE IH, já tendo protótipos funcionais em testes. Esta transição tecnológica permite a substituição direta dos combustíveis fósseis mais poluentes e dispendiosos da nossa frota por uma solução nacional, limpa e renovável.

Conclui-se, portanto, que embora o Brasil seja pioneiro técnico e agrícola, o etanol ainda é um ativo subutilizado em todo o seu potencial transformador. Valorizar e expandir esta tecnologia de combustíveis, a sua integração nos transportes urbanos e na maquinaria agrícola pesada, é o caminho definitivo para combinar soberania econômica, liderança de mercado e cumprir metas urgentes de sustentabilidade global.

Como direções para pesquisas futuras, recomenda-se estudos do uso de Combustíveis Sustentáveis de Aviação (SAF) à base de etanol no contexto da aviação sustentável, bem como o aprofundamento de estudos sobre fadiga e seleção de materiais aplicados ao setor agrícola, além da análise de aspectos relacionados à logística de distribuição.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Universitário Una e a Coordenadora do curso de Engenharia, Sra. Liliane Santos, pelo apoio institucional, pela disponibilização da infraestrutura e por incentivar continuamente, em seus alunos, a busca por possibilidades ilimitadas. Agradecem, de forma especial, à Professora Sra. Silvana Julia da Silveira Diniz pela orientação, paciência, incentivo e pelas valiosas contribuições ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Estendem ainda seus agradecimentos aos colegas do grupo pelas discussões científicas e pelo empenho dedicado à conclusão deste artigo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6022: informação e documentação - artigo em publicação periódica técnica e/ou científica - apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ASPECTOS ECONÔMICOS DA PRODUÇÃO BRASILEIRA DE ETANOL E SUSTENTABILIDADE – (Revista de Economia Mackenzie, 2009).
- ÁLCOOL COMBUSTÍVEL NO BRASIL E PATH DEPENDENCE – (Revista de Economia e Sociologia Rural, abr-jun 2012).
- ABARCA, C. D. G.. Inovações tecnológicas na agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2005.
- CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Emissões veiculares no Estado de São Paulo. São Paulo: CETESB, 2023.
- CRIEKEMANS, D. (2011), The geopolitics of renewable energy: different or similar to the geopolitics of conventional energy? ISA Annual Convention 2011, Montréal, Québec, Canada. Global Governance: Political Authority in Transition.
- Duch-Guillot J. (2019). O que é a neutralidade de carbono e como alcançá-la até 2050: Notícias: Parlamento Europeu. Direção-Geral da Comunicação.
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Agroenergia e sustentabilidade da produção de etanol de cana-de-açúcar. Brasília: Embrapa, 2023.
- EPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Alternative Fuels Data Center. Washington, DC, 2024.
- EXPERIMENTAL COMPARATIVE STUDY ON COMBUSTION, PERFORMANCE AND EMISSIONS CHARACTERISTICS OF METHANOL, ETHANOL AND BUTANOL IN A SPARK IGNITION ENGINE – (Applied Thermal Engineering, Mar 2017).
- ESTUDO DO DESEMPENHO DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA TURBOALIMENTADO E COM RESTRIÇÃO DA ENTRADA DE AR – (Revista Foco Interdisciplinary Studies Journal, 2022).

FONSECA, E. (1992), Meio ambiente e contas nacionais: a experiência internacional. Contabilização econômica do meio ambiente. São Paulo: Governo do Estado de São Paulo.

FANTINATTI, Lucas Zaia *et al.* EVALUATION OF THE PERFORMANCE CURVES OF THE 4-STROKE, SPARK-IGNITED, SINGLE-CYLINDER ENGINE ALTERED TO CONSUME ETHANOL. Revista de Gestao Social e Ambiental, v. 17, n. 10, 2023.

FANTINATTI, L. H. *et al.* Estudo comparativo de potência e torque em motores flex-fuel sob ensaios dinamométricos. Revista de Engenharia Térmica, v. 22, n. 1, p. 89–101, 2023.

GOLDEMBERG, José. Ethanol for a sustainable energy future. Science, Washington, v. 315, n. 5813, p. 808-810, 2007.

GREENPEACE. (2013), [R]evolução energética: a caminho do desenvolvimento limpo. Cenário Brasileiro.

ISABELLA, Giuliana *et al.* Another driver of the Brazilian fuel ethanol supply chain: the consumers' preferences. Revista de Administração, v. 52, n. 3, p. 304–316, jul. 2017.

JANNUZZI, Gilberto M. (2014) A nova geopolítica da energia. Paper apresentado no painel temático “A nova geopolítica da energia”, durante o evento “Diálogos sobre Política Externa, promovido pelo MRE, palácio do Itamaraty, 21/03/2014. Disponível em: http://pt.slideshare.net/gilberto1096/20140321-geopolitica-da-energia?redirected_from=save_on_embed

JANUARIO, Jorge Luiz *et al.* ANÁLISE COMPARATIVA DA COMBUSTÃO DO ETANOL E COM ADIAÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE, PARA O MONITORAMENTO DA EMISSÃO DE CO₂. REVISTA FOCO, v. 17, n. 11, p. e6349, 18 nov. 2024.

JANUARIO, E. F. *et al.* Análise do ciclo de vida e neutralidade do carbono no uso de biocombustíveis de primeira geração. Revista Brasileira de Engenharia Ambiental e Sustentabilidade, v. 11, n. 2, p. 45–58, 2024.

LOPES, C. H.; GABRIEL, A. V.; BORGES, M. T. M. R. Produção de etanol a partir da cana-de-açúcar: tecnologia de produção de etanol. 2017. UFSCar

LIMA, Eduarda Ferreira Pacheco de Andrade; MELO, André de Souza. Examining the Relationship Between the Gasoline A Market and the Prices of Hydrous Ethanol and Sugar to the Producer in Brazil. Revista de Gestão Social e Ambiental, v. 18, n. 10, p. e08847, 4 out. 2024.

LIMA, R. M.; MELO, J. A. Racionalidade econômica na paridade do combustível flex: a dinâmica da regra dos 70%. Análise Macroeconômica e de Mercado, v. 14, n. 2, p. 204–218, 2024.

Matriz energética brasileira e matriz elétrica brasileira, (Site portal solar - Balanço Energético Nacional (BEN 2024))

OECD. (1997), Glossary of Environment Statistics, Studies in Methods. Series F, No.67, United Nations, New York, 1997.

OLIVEIRA, A. R.; SIMÕES, W. L. Manejo e produção de palhada da cana-de-açúcar em um sistema irrigado por gotejamento subsuperficial para geração de bioetanol. Energia na Agricultura, v. 35, n. 4, p. 516–530, 2020.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Nova York: ONU, 2015.

OMS – ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. Air Pollution. Geneva: World Health Organization, 2024.

RAISSA NEVES, Combustíveis fósseis devem bater recorde em 2025, revela estudo (Site UOL 14 de novembro de 2025)

RAMOS, Victória Regina. Análise técnica do uso de etanol em um motor de combustão interna para diferentes razões de compressão. 2019. 64 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

ROSO, V. R. et al. Consumo de combustível e emissões de poluentes em um motor Diesel convertido a etanol para geração térmica de energia elétrica. *Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas*, Londrina, v. 37, n. 1, p. 131-142, jan./jun. 2016.

ROSO, V. R. et al. Desempenho e emissões de um motor ciclo diesel convertido para operar com etanol hidratado sob o ciclo Otto. *Revista Internacional de Engenharia Automotiva*, v. 7, n. 3, p. 112–125, 2016.

SAE INTERNATIONAL. *Ethanol Fuel and Engine Performance Studies*. Warrendale: SAE International, 2023.

SENHORAS, Elói Martins; MOREIRA, Fabiano; VITTE, Claudete de Castro Silva. (2009), *A agenda exploratória de recursos naturais na América do Sul: da empiria à teorização geoestratégica de assimetrias nas relações internacionais*. Selected works. January 2009.

SILVA, A. G. Análise termodinâmica de motores de combustão interna alternativos operando com etanol e alta taxa de compressão. 2017. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

SOARES, S.; PATROCÍNIO, A. B. do; SILVA, F. C. da. Desenvolvimento de uma rota tecnológica para produção de etanol celulósico de segunda geração de bagaço de cana-de-açúcar. In: *Anais de eventos científicos da Embrapa*, 2017.

SCHOLTEN, D; BOSAMAN, R. (2013), *The Geopolitics of Renewable Energy: a mere shift of lanslide in energy dependencies?* Disponível em: <http://www.drift.eur.nl/wp-content/uploads/2013/11/Scholten-and-Bosman-2013-Geopolitics-of-Renewables.pdf>

Star of Sciences Multidisciplinary Journal, ISSN-e 3091-1885, Vol. 2, Nº. 2, 2025 (Ejemplar dedicado a: Edición Regular: Estudios Multidisciplinarios).

STAR OF SCIENCES MULTIDISCIPLINARY JOURNAL. Thermodynamic efficiency and latente heat vaporization of alternative fuels in spark-ignition engines. *Star of Sciences Multidisciplinary Journal*, v. 6, n. 1, p. 12–29, 2025.

TORRES, José Francisco. Desempenho de motores de ciclo Diesel convertidos para ciclo Otto, visando a utilização de álcool etílico hidratado. 1986. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1986.

USO DO ETANOL EVITOU A EMISSÃO DE 535 MILHÕES DE TONELADAS DE CO₂ – (Site Única 5 de junho de 2019).

VICHI, Flavio; MANSOR, Maria Teresa Castilho.(2009), *Energia, Meio Ambiente e Economia: o Brasil no Contexto Mundial*. *Quim. Nova*, Vol. 32, No. 3, 757-767, 2009.

VIDAL, Maria de Fatima. ETANOL: v. 9, n. 325, janeiro, 2024. *Caderno Setorial ETENE*, Fortaleza, v. 9, n. 343, 2024.

WBA (2013) *Biofuels for Transport*. World Bioenergy Association.