

Análise comparativa do consumo e emissões de poluentes em um motor de ignição por centelhamento elétrico operando com etanol hidratado de milho, cana-de-açúcar e gasolina

Verônica Alves Rebequi^{[1]*}, Ramon Eduardo Pereira Silva^[2]

^[1]veronicarebequi.vr@gmail.com, Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD) , Dourados, Mato Grosso do Sul, Brasil. **ORCID**

^[2]ramonsilva@ufgd.edu.br, Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD) , Dourados, Mato Grosso do Sul, Brasil. **ORCID**

* autor correspondente

Resumo

Este estudo realizou uma análise comparativa do consumo e das emissões de poluentes de um motor *flex-fuel* operando com gasolina, etanol de milho e etanol de cana-de-açúcar. Foram avaliadas as propriedades físico-químicas dos combustíveis, como o Poder Calorífico Superior (PCS), a temperatura dos gases de escape, e as emissões de monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x), dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄). Os testes experimentais foram realizados em um motor de ignição por centelhamento elétrico, com as emissões e o consumo de combustível monitorados ao longo de diferentes condições operacionais (marcha lenta, média e alta rotação). Os resultados mostraram que a gasolina, embora apresente maior eficiência energética e autonomia, gera maiores emissões de gases poluentes, especialmente CO₂, impactando negativamente o meio ambiente e a saúde pública. Em contraste, o etanol de cana-de-açúcar se destacou como a alternativa mais sustentável, com menores emissões de GEE e melhor desempenho em termos de eficiência de combustão. O etanol de milho, embora também renovável, gerou maiores emissões de NO_x. Conclui-se que, apesar do alto desempenho energético da gasolina, suas emissões tornam-na uma opção menos sustentável, enquanto o etanol de cana-de-açúcar surge como uma alternativa mais eficiente e ambientalmente favorável.

Palavras-chave: combustão interna, impacto ambiental, biocombustíveis, eficiência de combustível, emissões atmosféricas.

Comparative Analysis of Fuel Consumption and Pollutant Emissions in a Spark-Ignition Engine Operating with Corn Hydrous Ethanol, Sugarcane Hydrous Ethanol, and Gasoline.

Abstract

This study presents a comparative analysis of fuel consumption and pollutant emissions from a flex-fuel engine operating with gasoline, corn ethanol, and sugarcane ethanol. The physicochemical properties of the fuels were evaluated, including the higher heating value (HHV), exhaust gas temperature, and emissions of CO, unburned hydrocarbons (HC), nitrogen oxides (NOx), carbon dioxide (CO₂), and methane (CH₄). Experimental tests were conducted on a spark ignition engine, with fuel consumption and emissions monitored under different operating conditions (idle, medium, and high rotation). The results showed that although gasoline offers higher energy efficiency and range, it produces higher emissions of pollutants, particularly CO₂ and NOx, negatively impacting the environment and public health. In contrast, sugarcane ethanol emerged as the most sustainable alternative, with lower GHG emissions and better combustion efficiency. Corn ethanol, while also renewable, generated higher NOx emissions compared to sugarcane ethanol. In conclusion, despite the high energy performance of gasoline, its emissions make it a less sustainable option, while sugarcane ethanol stands out as a more efficient and environmentally favorable alternative.

Keywords: internal combustion, environmental impact, biofuels, fuel efficiency, atmospheric emissions.

1 Introdução

Nos últimos anos, a crescente preocupação com as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e a busca por alternativas sustentáveis para reduzir a dependência de combustíveis fósseis têm impulsionado o uso de biocombustíveis, especialmente o etanol. Por ser um combustível renovável derivado de fontes vegetais, o etanol destaca-se como uma alternativa aos combustíveis fósseis devido ao seu menor impacto ambiental e ao seu potencial de redução das emissões de CO₂.

Nesse contexto, o Brasil ocupa uma posição de destaque mundial na produção de etanol, principalmente a partir da cana-de-açúcar. A produção nacional é considerada uma das mais eficientes do mundo, tanto em termos de produtividade quanto de benefícios ambientais, uma vez que a cana-de-açúcar apresenta elevada capacidade de captura de carbono (Burgess et al., 2023). Historicamente, esse protagonismo teve início com a implantação do Programa Nacional do Álcool (Proálcool), na década de 1970, que marcou o início da utilização do etanol como alternativa à gasolina e consolidou o país como líder mundial na produção e no uso desse biocombustível.

Apesar do avanço dos biocombustíveis, a gasolina ainda é amplamente utilizada devido ao seu alto rendimento energético, proporcionando boa autonomia aos veículos. Em condições normais de uso, veículos movidos a gasolina podem percorrer entre 8 e 14 km por litro, dependendo do modelo e das condições de operação (Gonçalves; Lemos, 2023). No entanto, por se tratar de um combustível fóssil, a gasolina está associada a impactos ambientais significativos, principalmente relacionados à emissão de poluentes atmosféricos e GEE.

A introdução dos motores flex-fuel no Brasil representou um avanço tecnológico relevante, permitindo a utilização de gasolina e etanol, isoladamente ou em qualquer proporção, em um mesmo motor com as mesmas condições. Inicialmente, o etanol era utilizado majoritariamente apenas como aditivo à gasolina; contudo, com o desenvolvimento dessa tecnologia, tornou-se possível ampliar significativamente o uso do etanol como combustível principal. Mais recentemente, observa-se um crescimento expressivo da produção de etanol a partir do milho, especialmente nas regiões Centro-Oeste e Norte do Brasil, o que abre novas oportunidades para a diversificação da matriz energética nacional (IPIRANGA, 2024).

Embora o etanol de cana-de-açúcar seja amplamente utilizado e reconhecido por sua eficiência na redução das emissões de GEE, a expansão da produção de etanol de milho tem ganhado relevância no cenário energético brasileiro. Essa diversificação das fontes de etanol contribui para o aumento da oferta do biocombustível, mas também levanta questionamentos sobre os impactos ambientais associados à produção do milho. Entre esses impactos destacam-se o uso intensivo de fertilizantes, o maior consumo energético no processo produtivo e a possível expansão da fronteira agrícola, fatores que podem resultar em emissões indiretas de carbono decorrentes do desmatamento e da mudança no uso da terra (Torres, 2023).

Diante desse cenário, torna-se essencial avaliar o desempenho dos diferentes tipos de etanol em motores flex-fuel. Embora tanto o etanol de cana-de-açúcar quanto o etanol de milho apresentam potencial para a redução de emissões de poluentes, as diferenças em suas propriedades físico-químicas podem influenciar o comportamento do motor, afetando o desempenho energético, o consumo de combustível e as emissões de monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos não queimados (HC) e óxidos de nitrogênio (NOx). Esses poluentes são reconhecidos por sua contribuição para a poluição atmosférica e para o agravamento do efeito estufa (Ryšavý et al., 2025; Ramalho, 2023).

Apesar dos avanços no uso do etanol como combustível automotivo, ainda existe uma escassez de estudos comparativos que avaliem, de forma experimental, o impacto ambiental e as propriedades físico-químicas do etanol de milho e do etanol de cana-de-açúcar quando utilizados em motores flex-fuel. Além disso, a limitada disponibilidade de dados específicos sobre consumo de combustível e emissões de poluentes para cada tipo de etanol restringe uma compreensão mais aprofundada das vantagens e desvantagens ambientais associadas a cada fonte.

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo determinar experimentalmente as propriedades físico-químicas do etanol combustível hidratado (ECH) produzido a partir da cana-de-açúcar e do milho, comparando-os também com a gasolina. Adicionalmente, busca-se medir e comparar o consumo de combustível e as emissões de poluentes de um motor de combustão interna de ignição por centelhamento elétrico.

A pesquisa foi realizada utilizando um motor flex-fuel de 1000 cc, operando com ambos os tipos de etanol e com gasolina, possibilitando uma avaliação comparativa do desempenho e dos impactos ambientais associados a cada combustível. As medições experimentais foram conduzidas no Laboratório de Máquinas Térmicas, Sistemas Térmicos e Combustão (LABCOM), com o auxílio de equipamentos como a bancada Motor 1.0 Flex Rocam Zetec e o analisador de gases de combustão GreenLine 8000. O estudo também incluiu uma revisão bibliográfica sobre a produção e as características físico-químicas do etanol, bem como a reprodução dos ensaios de desempenho e emissões conforme a metodologia proposta por Marques et al. (2016).

Este artigo está estruturado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta o referencial teórico sobre os biocombustíveis analisados e seus impactos ambientais; a Seção 3 descreve a metodologia adotada para a coleta e análise dos dados experimentais; a Seção 4 apresenta e discute os resultados obtidos, comparando o desempenho dos combustíveis em termos de consumo e emissões de poluentes; e, por fim, a Seção 5 expõe as conclusões do estudo, destacando as implicações ambientais e sugerindo direções para pesquisas futuras.

2 Referencial teórico

A gasolina é amplamente utilizada no setor de transportes devido ao seu elevado desempenho energético e à autonomia proporcionada aos veículos. Cada litro de gasolina contém aproximadamente 8,89 kWh de energia, o que a torna eficiente para longas distâncias. No entanto, por se tratar de um combustível fóssil, sua queima resulta na emissão de diversos poluentes atmosféricos e gases de efeito estufa, como dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NOx), hidrocarbonetos não queimados (HC), material particulado e compostos de enxofre (SOx). Esses poluentes contribuem para o aquecimento global, a formação de smog fotoquímico e chuva ácida, além de impactarem negativamente a saúde humana, especialmente por meio de problemas respiratórios (Gomes; Falco; Severino, 2024). Embora a gasolina comercializada no Brasil, devido à adição de etanol, seja relativamente menos poluente do que em outros países, ela ainda apresenta impactos ambientais superiores aos de alternativas renováveis, como o etanol ou a eletricidade proveniente de fontes limpas.

Nesse contexto, o etanol surge como uma alternativa renovável aos combustíveis fósseis, especialmente no setor de transportes. Sua utilização tem sido amplamente estudada devido ao potencial de redução das emissões de poluentes e de gases de efeito estufa. Entretanto, mesmo sendo um combustível mais limpo, a combustão do etanol pode resultar na emissão de monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NOx) e partículas suspensas totais, sobretudo em condições de combustão incompleta ou operação inadequada do motor (Ryšavý et al., 2025; Colussi, 2025).

A adição de etanol à gasolina tem se mostrado uma estratégia eficaz para a mitigação de emissões. Um estudo conduzido por Yang et al. (2024) observou que misturas gasolina-ethanol resultaram em menores emissões de CO, HC e material particulado, embora os efeitos sobre as emissões de NOx possam variar de acordo com a concentração de etanol e as condições operacionais do motor. Dessa forma, o etanol contribui não apenas como substituto parcial ou total da gasolina, mas também como aditivo capaz de melhorar o perfil ambiental do combustível fóssil.

As propriedades físico-químicas do etanol variam conforme a matéria-prima utilizada em sua produção, influenciando diretamente o desempenho energético e as emissões dos motores. O etanol de cana-de-açúcar apresenta um poder calorífico superior (PCS) de aproximadamente 29.620 kJ/kg, enquanto o etanol de milho possui um PCS em torno de 27.859 kJ/kg. Essas diferenças refletem-se no consumo específico e no comportamento da combustão, afetando a formação de poluentes durante o funcionamento do motor.

Diversos estudos apontam vantagens ambientais do etanol de cana-de-açúcar quando comparado ao etanol de milho. Kumar e Sinha (2025) indicam que o etanol de cana apresenta menores emissões de gases de efeito estufa ao longo de seu ciclo de vida, com emissões líquidas de CO₂ de -1,61 kg/L, enquanto o etanol de milho apresenta -0,19 kg/L. Resultados semelhantes foram observados por Torres (2021), que destaca a maior eficiência energética e a menor emissão de poluentes do etanol de cana em relação ao produzido a partir do milho. Além disso, Kumar e Sinha (2025) compararam etanol de

cana-de-açúcar, milho e arroz, concluindo que a cana-de-açúcar apresenta o melhor desempenho ambiental entre as matérias-primas analisadas.

A formação de óxidos de nitrogênio (NOx) está diretamente associada à temperatura dos gases de escape e à eficiência da combustão, sendo favorecida por temperaturas elevadas. Assim, a análise das emissões de NOx é fundamental para a caracterização ambiental dos combustíveis, uma vez que esses compostos contribuem para a formação de ozônio troposférico e para a degradação da qualidade do ar (Ryšavý et al., 2025).

Apesar das vantagens ambientais do etanol de cana-de-açúcar, sua produção também apresenta desafios, como o uso intensivo de água e os riscos de erosão do solo, o que reforça a necessidade da adoção de práticas agrícolas sustentáveis. Paralelamente, o etanol de milho tem ganhado destaque no Brasil devido ao crescimento da produção de milho e à expansão das plantas de processamento, especialmente nos estados do Centro-Oeste (Ryšavý et al., 2025). Essa expansão é vista como uma alternativa estratégica para complementar a oferta de etanol e reduzir a sazonalidade da produção da cana (SEMADESC, 2024).

Entretanto, a produção de etanol de milho levanta preocupações ambientais relacionadas ao maior consumo de insumos do processo produtivo, ao uso intensivo de fertilizantes e pesticidas e aos possíveis impactos sobre a biodiversidade e os recursos hídricos, um diferencial entre o cultivo de milho e cana está relacionado a quantidade de cortes, uma vez que colhe o milho precisa plantar novamente toda a área já a cama permite diversas colheitas de um mesmo plantio (Burgess; Singh; Koroglu, 2006; IPIRANGA, 2024). Esses fatores geram debates sobre a real sustentabilidade dessa rota produtiva quando comparada à cana-de-açúcar.

Do ponto de vista da qualidade do combustível, a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) estabelece parâmetros específicos para o combustível, como pH entre 6,0 e 8,0, condutividade elétrica inferior a $3,5 \mu\text{S}/\text{cm}$ e teor alcoólico entre 95,1° GL e 96,0 °GL para o etanol. Esses parâmetros influenciam diretamente o desempenho do motor e as emissões atmosféricas, uma vez que o pH está relacionado à estabilidade química e à corrosividade do combustível, enquanto a condutividade elétrica indica a presença de impurezas iônicas que podem favorecer a queima incompleta e elevar as emissões de hidrocarbonetos (ANP, 2011).

No âmbito da engenharia automotiva, os motores flex-fuel desempenham papel fundamental na avaliação comparativa de diferentes tipos de etanol. Esses motores permitem a análise controlada do consumo de combustível e das emissões de poluentes, como monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos não queimados (CH_x) e óxidos de nitrogênio (NOx). A eficiência da combustão e o perfil de emissões são parâmetros essenciais para determinar o impacto ambiental dos combustíveis e subsidiar a escolha de rotas mais sustentáveis para a matriz energética veicular (Marques et al., 2016).

3 Método da pesquisa

3.1. Equipamentos e Materiais

A pesquisa foi conduzida utilizando um motor apresentado na Figura 1a, flex-fuel Ford Rocam Zetec 1.0 (1000 cc), de quatro tempos, quatro cilindros, oito válvulas e ignição por centelhamento elétrico, capaz de operar com gasolina, etanol de cana-de-açúcar e etanol de milho. O motor foi instalado em uma bancada experimental equipada para simular diferentes condições de operação. Para monitoramento do funcionamento e coleta de dados dos sistemas de injeção e ignição, utilizou-se o software PCScan3000®, que permite acompanhar parâmetros como rotação do virabrequim e eficiência do motor.

Figura 1 – Equipamentos do Laboratório LABCOM.



Fonte: elaborado pelos autores (2025).

As especificações técnicas do motor estão presentes no quadro 1.

Quadro 1 – Especificação do motor

Propriedade	Valor	Unidade
Diâmetro	68,68	mm
Curso	67,40	mm
Cilindros	4	-
Cilindrada	973,28	cm ³
Taxa de compressão	9,8:1	-
Ciclo	Otto	-
Combustível	Etanol/Gasolina (flex)	-
Rotação máxima	6600	rpm
Potência máxima	87 @ 2750	kW @ rpm
Torque máximo	48,47 @ 5750	Nm @ rpm

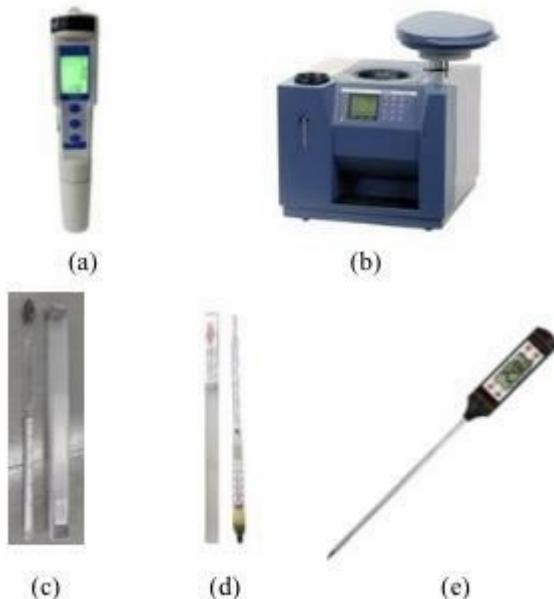
Fonte: elaborado pelos autores (2025).

As emissões de gases foram analisadas com o analisador portátil GreenLine 8000, como mostrado na Figura 1b, acoplado diretamente ao sistema de escape. Este equipamento, dotado de sensores eletroquímicos e infravermelho não dispersivo (NDIR), possibilitou a medição das concentrações de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxidos de nitrogênio (NO_x). Os dados foram processados e armazenados por meio do software DBgas2004, com auxílio dos sensores e do computador como apresentado na Figura 1c e Figura 1d respectivamente, garantindo maior confiabilidade nas análises.

Para a caracterização físico-química dos combustíveis, foram utilizados os seguintes instrumentos: na Figura 2b vemos a bomba calorimétrica IKA C200, utilizada para determinação do poder calorífico superior (PCS); densímetro manual apresentado na Figura 2c para medição da massa específica; medidor Kasvi, apresentado na Figura 2a, para análise de pH e condutividade elétrica; e alcoolômetro presente na Figura 2d graduado (0 a 100 °GL) para determinação do teor alcoólico dos etanóis. As medições foram realizadas em bêqueres e provetas limpas, com temperatura controlada a

20 °C com auxílio do termômetro ilustrado na Figura 2e, conforme especificações da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).

Figura 2 – Equipamentos do Laboratório LENER



Fonte: elaborado pelos autores (2025).

O consumo de combustível foi determinado por meio de um reservatório auxiliar instalado sobre uma balança digital, associado a um cronômetro, como ilustrado na Figura 1f, Figura 1e e Figura 1g respectivamente para cálculo da vazão mássica em função do tempo. A temperatura e umidade ambiente foram monitoradas com um termo-higrômetro digital, assegurando que as variáveis externas não interferissem nos resultados. As incertezas e unidades de medida de cada grandeza analisada encontram-se apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2 – Grandezas, equipamentos e suas especificações

Grandeza	Equipamento	Incerteza / Unidade
PCS	Bomba calorimétrica IKA C200	1,0 kJ/kg
pH	KASVI	0,1
Condutividade	KASVI	0,1 μ S/cm
Teor alcoólico	Alcoolômetro	1,0 °GL
Massa específica	Densímetro	5,0 kg/m ³
Temperatura	Termômetro	1,0 °C
Tempo	Cronômetro digital	0,1s
Rotações do virabrequim	PCScan3000®	1,0 rpm
Posição da borboleta	PCScan3000®	0,1 °
CO ₂	NDIR	0,3 %
CO	Eletroquímico	10,0 ppm
NO _x	Eletroquímico	5,0 ppm
CH ₄	NDIR	1,0 ppm
Temperatura ambiente	Termo-Higrômetro	1,0 °C
Umidade do ar	Termo-Higrômetro	1,0 %

Fonte: elaborado pelos autores (2025).

3.2. Controle de Variáveis

Durante os testes experimentais, algumas variáveis foram avaliadas para garantir a consistência dos resultados. Realização de teste com o motor em dias que a temperatura ambiente era de $22 \pm 2^\circ\text{C}$ e a umidade relativa que foi monitorada com um higrômetro, entre 40% e 60%. A temperatura do motor foi estabilizada entre 70°C e 90°C antes de iniciar cada ciclo de medição. Todos os testes foram realizados em condições padronizadas, com o motor aquecido e operando por pelo menos 15 minutos antes de iniciar a coleta dos dados de emissões. A temperatura da água utilizada na bomba calorimétrica foi feito um *Blandy* de água em diferentes temperaturas até atingir temperatura entre a faixa de 18°C e 25°C , e as amostras de combustíveis foram introduzidas com provetas em bacias com água para atingir a temperatura de 20°C .

3.3. Análise de Dados

As emissões de poluentes foram expressas em partes por milhão (ppm) para CO, hidrocarbonetos não queimados (CH_4) e NO_x, enquanto o consumo de combustível foi registrado em gramas por segundo (g/s). O poder calorífico superior (PCS) de cada combustível foi considerado em quilojoule por quilograma (kJ/kg), a condutividade em microsiemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$), o teor alcoólico em graus Gay-Lussac ($^\circ\text{GL}$), a massa específica em quilogramas por metro cúbico (kg/m^3), o tempo em segundos (s), a temperatura em graus Celsius ($^\circ\text{C}$), e as emissões de CO foram medidas em porcentagem (%). A comparação entre os combustíveis foi realizada através dos dados obtidos diretamente a partir de experimentos realizados em bancada.

3.4. Descrição do Experimento

O experimento foi desenvolvido em três etapas principais. Inicialmente, realizou-se a análise físico-química dos combustíveis. Amostras de etanol (cana e milho) e gasolina foram adquiridas em posto autorizado e armazenadas em condições adequadas para evitar degradação. O PCS foi determinado com a bomba calorimétrica IKA C200, enquanto pH e condutividade elétrica foram medidos com o medidor Kasvi, seguindo procedimentos de limpeza e calibração do eletrodo entre as leituras. O teor alcoólico dos etanóis foi obtido com alcoolômetro graduado, utilizando provetas cilíndricas e temperatura controlada a 20°C . A massa específica foi determinada com densímetro manual, também a 20°C , conforme normas da ANP.

Na segunda etapa, o motor Ford Rocam Zetec 1.0 foi operado com gasolina e etanóis em ciclos de marcha lenta, média rotação e alta rotação, simulando diferentes condições de funcionamento. O monitoramento eletrônico foi realizado pelo software PCScan3000®, enquanto o consumo de combustível foi medido por meio do reservatório auxiliar sobre balança digital, associado a um cronômetro, permitindo calcular a vazão mássica (g/s).

Por fim, as emissões de gases foram analisadas com o GreenLine 8000, acoplado ao escape do motor. Antes das medições, o analisador foi calibrado em ambiente controlado, garantindo precisão dos resultados. As concentrações de CO, CH₄ e NO_x foram expressas em partes por milhão (ppm), enquanto CO₂ foi registrado em porcentagem (%). Os dados foram processados pelo software DBgas2004.

Para assegurar a confiabilidade dos resultados, as medições foram conduzidas cuidadosamente em dias com temperatura ambiente semelhante, visando reduzir variações significativas nos resultados. A temperatura ambiente em $22 \pm 2^\circ\text{C}$, umidade relativa entre 40% e 60%, e temperatura do motor estabilizada entre 70°C e 90°C antes das medições. A temperatura da água na bomba calorimétrica foi ajustada entre 18°C e 25°C , e as amostras de combustíveis foram acondicionadas para atingir 20°C . Além disso, após a troca de combustível, aguardou-se 15 minutos para a estabilização do sensor lambda.

Essa metodologia permitiu a obtenção de dados consistentes para análise comparativa entre os combustíveis, considerando parâmetros físico-químicos, consumo e emissões.

4 Resultados e discussões

Com base na Resolução ANP nº 7, de 9 de fevereiro de 2011, que define os parâmetros de qualidade para combustíveis, o critério avaliado foi de PCS, que foi analisado em triplicata e feita a média em temperatura controlada de 20 °C. Esse parâmetro é essencial para garantir o desempenho adequado do etanol e da gasolina nos motores, bem como sua conformidade com os padrões ambientais e de segurança.

Quadro 3 – Propriedades físico-químicas dos combustíveis

Medidas	Etanol de milho	Etanol de Cana	Gasolina
PCS (kJ/kg)	25.410	26.160	39.300
ANP	29.670 kJ/kg		47.300 kJ/kg

Fonte: elaborado pelos autores (2025); adaptado de Marques (2016).

A gasolina segundo Marques *et al.* (2016) tem um PCS de 39.300 kJ/kg, bem superior ao do etanol de milho e de cana, o que significa que a gasolina contém cerca de 50% mais energia. Isso explica a menor autonomia dos veículos a etanol, que precisam consumir mais combustível para percorrer a mesma distância. Quanto à diferença entre o etanol de milho e o de cana, ela é pequena, com o etanol de cana apresentando um PCS aproximadamente 2,9% superior ao de milho. No entanto, ambos os tipos de etanóis são praticamente idênticos em composição química (etanol hidratado com 96% de álcool). As variações entre eles estão mais relacionadas aos processos de produção do que às suas propriedades físico-químicas, não afetando o desempenho do combustível (Marques, 2016).

No que diz respeito ao pH, o etanol de cana com o valor de 8,0 mostra-se 8,6% mais elevado que a base de milho, ambos dentro da faixa de 6,0 a 8,0 definida pela ANP, diferença que pode ser explicada pelo processo de produção distintos ou composição de química residual. A maior discrepância está na condutividade elétrica: o valor medido para o combustível a base de cana é de 2,0 estando dentro do limite máximo permitido pela ANP. Já o produzido a partir do milho excede esse limite, sendo igual a 71,4%, valor significativo, que pode indicar presença de impurezas ou sais condutores em níveis considerados inadequados.

Quanto ao teor alcoólico, os valores medidos foram de 96,33 °GL para o etanol de cana-de-açúcar e 96 °GL para o etanol de milho. De acordo com a Resolução ANP nº 7/2011, o etanol hidratado deve apresentar teor alcoólico entre 95,1°GL e 96,0°GL a 20 °C. Assim, o etanol de milho está em conformidade com a especificação, enquanto o etanol de cana ultrapassa ligeiramente o limite máximo, sugerindo maior pureza alcoólica e menor teor de água, características que podem influenciar a densidade e o comportamento de combustão.

Os valores de massa específica obtidos são apresentados no Quadro 4.

Quadro 4 – Massa específica dos combustíveis analisados

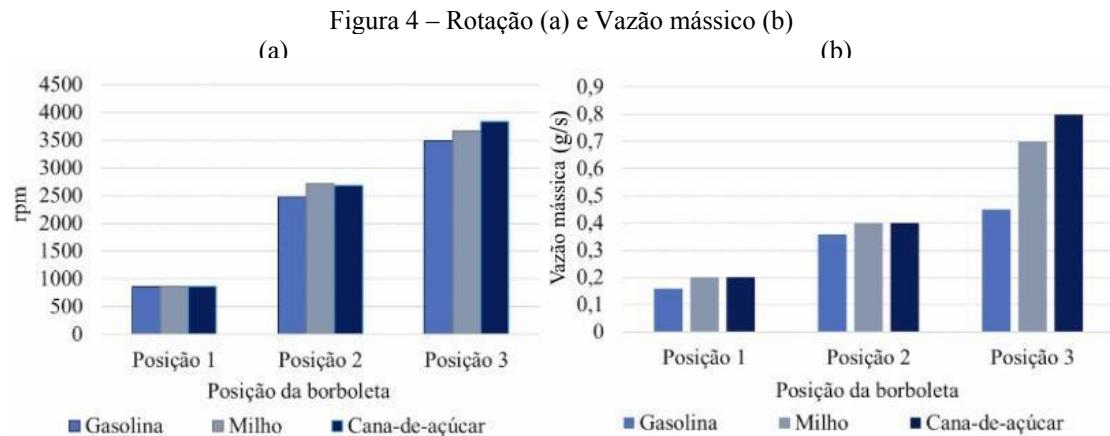
Substância	Massa específica (kg/m ³)
Etanol de Milho	815
Gasolina	780
Etanol de Cana-de-açúcar	810

Fonte: elaborado pelos autores (2025).

Assim o valor de massa específica para o Etanol de Milho indica não conformidade com as especificações de qualidade estabelecidas pela ANP para combustíveis comercializados a 20°C. Enquanto o Etanol Hidratado Combustível deve ter massa específica entre 805,2 e 811,2 kg/m³, o valor obtido está fora dessa faixa, sugerindo, para o etanol de milho, a provável adulteração por excesso de água ou solventes.

Para a análise da eficiência energética dos combustíveis, foram elaborados gráficos que estão apresentados nas Figuras 4a e 4b. A Figura 4a, ilustra a rotação do motor, em rpm, em função da abertura da borboleta, considerando três condições operacionais: marcha lenta (Posição 1), média rotação (Posição 2) e alta rotação (Posição 3). Já a Figura 4b, apresenta a vazão mássica de

combustível em relação à abertura da borboleta, permitindo uma avaliação comparativa do desempenho dos dois tipos de etanol sob diferentes regimes de operação.

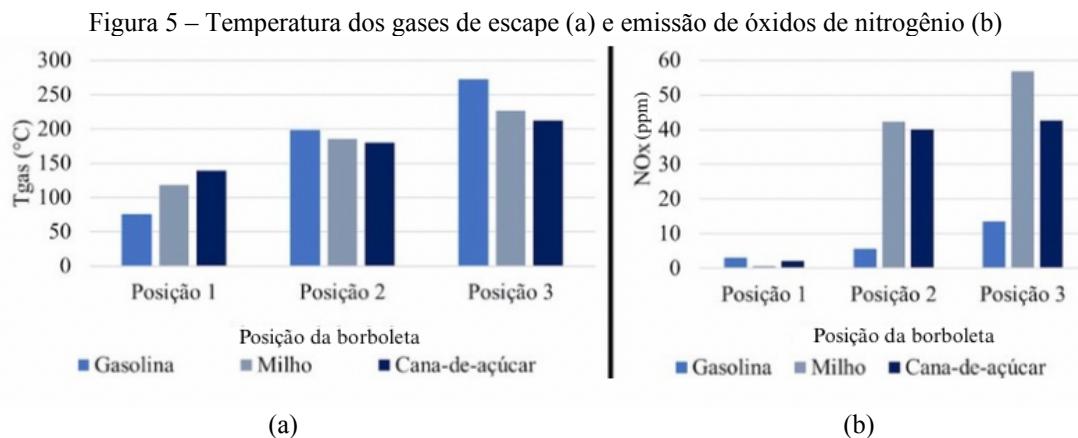


Fonte: elaborado pelos autores (2025).

Na Figura 4a, nota-se que a movimentação do virabrequim em marcha lenta e média apresenta rotação de operação próxima para todos os combustíveis, já na posição de alta rotação o etanol de cana é superior ao de milho em 4,8%. De forma semelhante, na Figura 4b, o consumo máximo para as duas primeiras posições da borboleta é igual e aumenta na terceira posição devido ao aumento da rotação do motor, notando que o consumo sofreu maior influência da rotação para os etanóis do que os valores medidos de PCS.

Na Figura 4a, verificou-se que a rotação do motor com a gasolina, milho e cana-de-açúcar segue um padrão semelhante nas primeiras duas posições da borboleta. No entanto, na terceira posição, a gasolina apresenta um aumento mais significativo em relação aos outros combustíveis. De maneira análoga, a Figura 3b revela que a vazão mássica aumenta com o aumento da rotação do motor a cada abertura da borboleta, com a gasolina tendo uma maior variação de consumo em comparação com o milho e a cana-de-açúcar.

As Figuras 5a e 5b mostram, respectivamente, os dados de temperatura dos gases de escape e os níveis de emissão de N para as várias posições da borboleta. Conforme Torres (2021), isso possibilita comparar o etanol de cana-de-açúcar e o etanol de milho em diferentes condições operacionais.

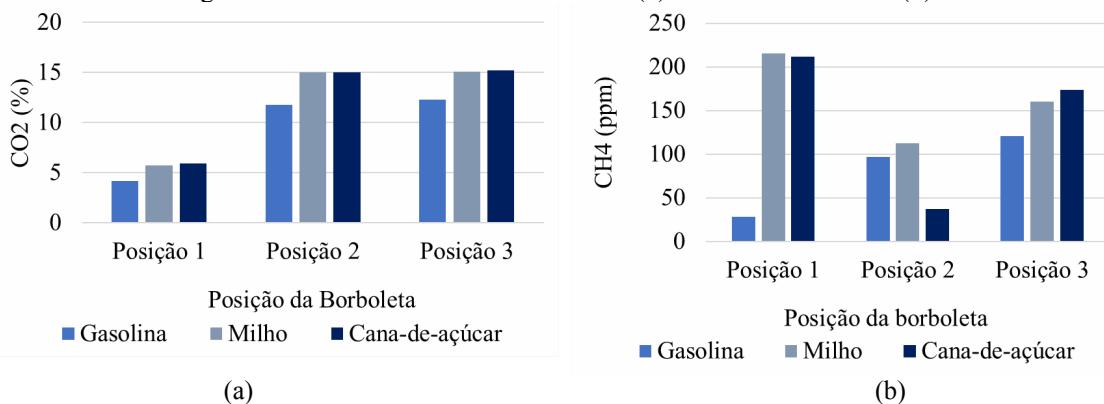


Fonte: elaborado pelos autores (2025).

Observa-se nas Figura 5a e 5b que a temperatura dos gases de escape e NO_x aumenta com a maior abertura da borboleta, evidenciando uma maior liberação de energia. A gasolina, quando comparada ao etanol de milho e cana-de-açúcar, apresenta temperaturas mais altas e menor emissão de

NO_x nas posições médias e altas rotações. Esse comportamento está relacionado à composição química: a gasolina possui maior poder calorífico, o que eleva a temperatura em altas cargas, mas, por não conter oxigênio na molécula, limita a formação térmica de óxidos de nitrogênio. Já os biocombustíveis, apesar de apresentarem temperaturas mais baixas devido ao efeito de resfriamento evaporativo devido seu calor latente, geram concentrações mais elevadas de NO_x , resultado da combustão mais completa favorecida pelo oxigênio presente na estrutura química.

Figura 6 – Emissão de dióxido de carbono (a) e emissão de metano (b)



Fonte: elaborado pelos autores (2025).

Os resultados apresentados nas Figuras 6a e 6b são das emissões de CO₂ e CH₄, respectivamente, em diferentes posições da borboleta. Observa-se que quanto maior a presença de CO₂, mais completa é a combustão, o que indica uma maior eficiência do processo. A gasolina, quando comparada ao etanol de milho e ao etanol de cana-de-açúcar, apresenta valores menores de emissão de CO₂, mesmo em rotações mais elevadas. Esse comportamento indica uma combustão com menor liberação de CO. Já na Figura 5b, que mostra a emissão de metano (CH₄), é possível verificar que a gasolina apresenta níveis mais baixos de CH₄, sugerindo menor presença de hidrocarbonetos não queimados nos gases de escape, o que pode ser associado a uma combustão mais completa em comparação com os outros combustíveis.

Viana (2023), avaliou o desempenho e as emissões de poluentes de motores *flex*, especificamente de um motor Renault D4D de 4 cilindros, utilizando etanol hidratado de cana-de-açúcar e gasolina. Quanto às emissões de poluentes, o etanol apresenta vantagens em relação ao monóxido de carbono (CO), emitindo cerca de cinco vezes menos que a gasolina. Porém, sua combustão tende a gerar óxidos de nitrogênio (NO_x) em maiores quantidades, devido à maior temperatura de combustão. Ambos os combustíveis emitem hidrocarbonetos não queimados (HC), mas a gasolina pode gerar mais HC em condições de baixa rotação, devido à combustão incompleta. As simulações realizadas demonstraram que o etanol não compromete a performance do motor, mantendo suas características operacionais.

No entanto, enquanto oferece uma redução significativa nas emissões de CO, os elevados níveis de NO_x permanecem um desafio. Em conclusão, o etanol é vantajoso em termos de performance e emissões de CO, mas apresenta maiores emissões de NO_x. Sua utilização é mais benéfica em contextos que priorizam a redução de CO₂ e outros gases poluentes, embora seja necessária a evolução de tecnologias para controlar as emissões de NO_x.

Vital, Dias e Silva (2022), confirma esses dados através de sua pesquisa, concluindo que, apesar de o etanol ter um poder calorífico menor que a gasolina, ele apresenta vantagens no torque e potência, oferecendo melhor desempenho mecânico. A utilização de sensores e controle eletrônico no motor *Flex-Fuel* permite a adaptação eficiente entre gasolina e etanol, reduzindo as emissões de poluentes, especialmente CO₂. No entanto, a emissão de NO_x continua sendo um desafio a ser

superado. A adaptação dos materiais e sistemas de partida a frio também é crucial para o funcionamento adequado com etanol.

Merá *et al.* (2023), comparou os três combustíveis em seu relatório, revelando diferenças significativas em termos de eficiência energética e impacto ambiental. O etanol de cana-de-açúcar se destaca como o mais eficiente energeticamente, devido à sua produção de alto rendimento e ao menor uso de insumos agrícolas quando comparado ao etanol de milho, que exige mais energia para sua produção. Além disso, o etanol de cana apresenta um desempenho superior na redução das emissões de CO₂, gerando emissões significativamente mais baixas que a gasolina e o etanol de milho. Em relação às emissões de ILUC (Mudança Indireta no Uso da Terra), o etanol de milho apresenta impactos ambientais mais negativos, devido ao desmatamento e à expansão agrícola necessária para sua produção, resultando em maiores emissões indiretas. Em contrapartida, o etanol de cana-de-açúcar apresenta emissões de ILUC mais baixas, tornando-se uma alternativa mais sustentável.

No contexto geral de impacto ambiental, a gasolina, sendo um combustível fóssil, possui o maior potencial de emissões de GEE, o que a torna a opção menos sustentável. O etanol de cana-de-açúcar, com seu ciclo de vida mais limpo e maior eficiência de produção, emerge como a escolha ambientalmente mais favorável, enquanto o etanol de milho, apesar de renovável, apresenta maiores impactos ambientais devido às suas emissões mais altas e ao impacto da produção agrícola.

Os resultados obtidos mostram comportamento consistente entre os combustíveis analisados, evidenciando que as variações observadas no desempenho do motor e nas emissões estão diretamente associadas às propriedades físico-químicas e às condições operacionais impostas. O aumento da abertura da borboleta influenciou de forma significativa a rotação, a vazão mássica, a temperatura dos gases de escape e a formação de poluentes, independentemente do combustível utilizado. Diferenças nos valores de PCS, massa específica e composição química explicam as variações de consumo e emissões entre gasolina, etanol de milho e etanol de cana-de-açúcar. Dessa forma, os ensaios realizados permitiram uma comparação confiável entre os combustíveis, atendendo ao objetivo proposto e validando a metodologia experimental empregada.

5 Conclusão/Considerações finais

O estudo demonstrou que a gasolina continua sendo uma opção de alto desempenho energético, evidenciada pelo menor consumo de massa e maior poder calorífico, características que garantem maior autonomia veicular. Nos testes realizados, a gasolina apresentou menores emissões diretas de CO₂, NOx e hidrocarbonetos não queimados (CH_x) em comparação aos etanóis, embora seu uso contribua para impactos climáticos no ciclo de vida por ser um combustível fóssil. Essa condição reforça que, apesar da eficiência energética, a gasolina não é ambientalmente sustentável a longo prazo.

Por outro lado, os etanóis de milho e de cana-de-açúcar, embora apresentem maior consumo de combustível e maiores emissões instantâneas de CO₂, NOx e CH_x, são renováveis e possuem um ciclo de vida mais limpo, especialmente o etanol de cana, que se destaca como alternativa estratégica para a matriz energética brasileira. Essa vantagem está associada à redução das emissões líquidas de gases de efeito estufa quando considerado todo o processo produtivo, desde a origem agrícola até a combustão. Contudo, o etanol de milho apresentou maior emissão de NOx em altas rotações, o que limita sua eficiência ambiental em determinadas condições operacionais.

Logo, a gasolina ainda oferece desempenho energético superior, mas a custos ambientais elevados, enquanto o etanol de cana surge como uma opção mais sustentável para o Brasil. A transição para biocombustíveis e o avanço das tecnologias flex-fuel são essenciais para reduzir impactos ambientais e promover uma mobilidade mais limpa, alinhada às metas de descarbonização e à ampliação da matriz energética renovável.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Resolução ANP nº 7, de 9 de fevereiro de 2011. Dispõe sobre a especificação do etanol combustível.** Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2011.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Resolução ANP Nº 19, de 15 de abril de 2015.** Dispõe sobre as especificações do etanol combustível (etanol anidro combustível e etanol hidratado combustível. Rio de Janeiro: ANP, 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Resolução ANP Nº 807, de 23 de janeiro de 2020.** Estabelece as especificações das gasolinas de uso automotivo e as obrigações quanto ao controle da qualidade a serem atendidas pelos agentes econômicos que comercializarem o produto em todo o território nacional. Rio de Janeiro: ANP, 2020.

BURGESS, K.; SINGH, P. J.; KOROGLU, R. Supply chain management: a structured literature review and implications for future research. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 26, n. 7, p. 703–729, 2006.

COLUSSI, J. **Ethanol boom drives sharp rise in Brazil's corn consumption.** Farmdoc Daily, 15 abr. 2025. Disponível em: https://advancedbiofuelsusa.info/ethanol-boom-drives-sharp-rise-in-brazil-s-corn-consumption?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 26 out. 2025.

GOMES, Guilherme Carvalho; FALCO, Leonardo Roberto Recco; SEVERINO, Mateus Chanquini. ANÁLISE INTEGRATIVA SOBRE O USO DE BIOCOMBUSTÍVEIS EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA: desempenho, emissões e durabilidade. **Revista Contemporânea**, [S.L.], v. 4, n. 11, p. 1-30, 21 nov. 2024. <http://dx.doi.org/10.56083/rcv4n11-126>.

GONÇALVES, Filipe; LEMOS, Carlos. Análise da produção do etanol como fonte de energia renovável e avaliação do abastecimento de veículos no Brasil. **Anais Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental**, [S.L.], v. 1, n. 1, p. 1-7, 7 nov. 2023. Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais e de Saneamento. <http://dx.doi.org/10.55449/congea.14.23.x-002>.

IPIRANGA. **Relatório técnico sobre o mercado de biocombustíveis no Brasil.** São Paulo, 2024.

MARQUES, R. P. et al. Estudo experimental de desempenho e emissões de motor flex-fuel utilizando etanol e gasolina. **Revista Brasileira de Engenharia Mecânica**, v. 38, n. 2, p. 123-135, 2016.

KUMAR, Vijay; SINHA, Ashish Ranjan. Sustainable ethanol production: co2 emission analysis and feedstock strategies through life cycle assessment. **Energy For Sustainable Development**, [S.L.], v. 88, p. 101775-101780, out. 2025. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2025.101775>.

MERÁ, Zamir; BIEKER, Georg; REBOUÇAS, Ana Beatriz; CIEPLINSKI, André. **Comparação das emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida de carros de passeio a combustão e elétricos no Brasil.** 2023. International Council on Clean Transportation (ICCT). Disponível em: <https://theicct.org/>. Acesso em: 24 out. 2025.

MIGUEL, P. A. C. Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução. **Production**, v. 17, n. 1, p. 216–229, 2007.

RAMALHO, Natália Vitoi Teixeira. **Avaliação dos impactos ambientais da produção de etanol a partir de cana-de-açúcar e de milho:** uma revisão bibliográfica. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2023.

RYŁAVÝ, Jiří; VICENTE, Estela Alexandra Domingos; MOLCHANOV, Oleksandr; CIPOLI, Yago Alonso; KRPEC, Kamil; ALVES, Célia A.; FELICIANO, Manuel; DARGHAM, Imane; KUO, Jenn-Kun; WANG, Cheng-Chi. Experimental study of thermo-environmental properties of single and double-chambered bioethanol burners. **Applications In Energy And Combustion Science**, [S.L.], v. 23, n. 3, p. 100359-100369, set. 2025. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaecs.2025.100359>.

SEMADESC – Secretaria de Meio Ambiente, Desenvolvimento, Ciência, Tecnologia e Inovação de Mato Grosso do Sul. **Boletim estatístico de bioenergia: panorama do etanol de milho no Brasil**. Campo Grande, 2024.

TORRES, A. L. Formação de poluentes atmosféricos em motores de combustão interna: uma revisão bibliográfica. **Revista Engenharia & Sustentabilidade**, v. 9, n. 1, p. 55-70, 2021.

VIANA, Lívio Bruno Nery da Silva. **Motor Flex: Análise Comparativa de Performance e Emissão de Gases com Diferentes Combustíveis**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023.

VITAL, João Victor Golino; DIAS, Rafael Leite; SILVA, Pedro Henrique Domingos da. **Análise motores de combustão interna Flex Fuel: estudo comparativo de desempenho entre etanol e gasolina**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnólogo em Mecânica Automobilística) – Faculdade de Tecnologia de Santo André, Santo André, 2022.

YANG, Xinpeng; ZHANG, Xiaogen; ZU, Lei; TIAN, Miao; ZHU, Rencheng; SONG, Kai; XIAO, Teng; ZHU, Manni; LIAO, Songli; ZHENG, Junyu. Assessment of alternative fuels for on-road volatile organic compounds emission characteristics: ethanol-containing gasoline and natural gas. **Fuel**, [S.L.], v. 364, n. 5, p. 130992-130999, maio 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2024.130992>.