v7.n11.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

DESEMPENHO E EMISSÕES EM MOTORES DE IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO COM COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS: UMA REVISÃO DE ESTUDOS SOBRE ESTRATÉGIAS DE COMBUSTÃO

PERFORMANCE AND EMISSIONS IN COMPRESSION-IGNITION ENGINES USING ALTERNATIVE FUELS: A REVIEW OF STUDIES ON COMBUSTION STRATEGIES

RENDIMIENTO Y EMISIONES EN MOTORES DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN CON COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS: UNA REVISIÓN DE LOS ESTUDIOS SOBRE ESTRATEGIAS DE COMBUSTIÓN

Marcelo Souza dos Santos[1], Felipe Orlando Centeno González[2]

e7119431
https://doi.org/10.47820/recima21.v7i11.9431

PUBLICADO: 11/2026

RESUMO

A utilização de combustíveis alternativos em motores de ignição por compressão tem sido investigada como alternativa para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e as emissões associadas à combustão convencional. Entretanto, suas propriedades físico-químicas modificam o processo de combustão, podendo proporcionar benefícios ambientais acompanhados de penalidades no desempenho energético. Este trabalho teve como objetivo analisar os efeitos de combustíveis alternativos e de diferentes regimes de combustão sobre o desempenho e as emissões desses motores. Realizou-se uma revisão da literatura na base Scopus, considerando artigos publicados entre 2017 e 2026. Após as etapas de seleção e elegibilidade, oito estudos foram incluídos na análise. Os resultados indicaram comportamentos distintos para hidrogênio, HVO, amônia, gás natural e biodiesel, conforme as condições operacionais e os indicadores avaliados. A adição de hidrogênio proporcionou ganhos relativos de eficiência térmica, embora também tenha sido observado aumento de NOx. O HVO apresentou resultados favoráveis de eficiência térmica no regime PPCI e de redução do material particulado nas condições investigadas. A amônia proporcionou reduções de CO e NOx acompanhadas de penalidades no desempenho energético. O gás natural apresentou redução da eficiência térmica em determinadas condições de combustão. Estratégias como EGR, controle da injeção, taxa de compressão e sobrealimentação mostraram-se relevantes para equilibrar eficiência térmica e emissões de NOx e material particulado. Conclui-se que esses resultados são influenciados pela reatividade, pelo poder calorífico e pelas características de propagação da combustão, associados ao regime de combustão e aos ajustes operacionais do motor.

PALAVRAS-CHAVE: Motores de ignição por compressão. Combustíveis alternativos. Regimes de combustão. Desempenho. Emissões.

ABSTRACT

The use of alternative fuels in compression-ignition engines has been investigated as a way to reduce dependence on fossil fuels and the emissions associated with conventional combustion. However, their physicochemical properties alter the combustion process, potentially providing environmental benefits accompanied by trade-offs in energy performance.

[1] Graduando em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), na Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho (UACSA), com previsão de conclusão em 2026.
[2] Pós-doutor em Biotecnologia pela UNIFESP, doutor e mestre em Engenharia Mecânica pela UNIFEI. Professor efetivo da UFRPE/UACSA, com experiência como pesquisador visitante na Universidade de Iowa (EUA) e professor titular na Universidad de la Costa (Colômbia).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

The objective of this study was to analyze the effects of alternative fuels and different combustion regimes on the performance and emissions of these engines. A literature review was conducted in the Scopus database, considering articles published between 2017 and 2026. After the selection and eligibility stages, eight studies were included in the analysis. The results indicated distinct behaviors for hydrogen, HVO, ammonia, natural gas, and biodiesel depending on the operating conditions and the indicators evaluated. The addition of hydrogen provided relative gains in thermal efficiency, although an increase in NOx was also observed. HVO showed favorable thermal efficiency results under the PPCI operating mode and in terms of particulate matter emissions under the conditions investigated. Ammonia provided reductions in CO and NOx, accompanied by declines in energy performance. Natural gas showed a reduction in thermal efficiency under certain combustion conditions. Strategies such as EGR, injection control, compression ratio, and supercharging have proven to be effective in balancing thermal efficiency with NOx and particulate matter emissions. It is concluded that these results are influenced by reactivity, calorific value, and combustion propagation characteristics, which are associated with the combustion regime and with the engine's operational settings.

KEYWORDS: *Compression ignition engines. Alternative fuels. Combustion regimes. Performance. Emissions.*

RESUMEN

El uso de combustibles alternativos en motores de encendido por compresión se ha investigado para reducir la dependencia de combustibles fósiles y las emisiones asociadas a la combustión convencional. Sin embargo, sus propiedades fisicoquímicas modifican la combustión y pueden generar beneficios ambientales acompañados de pérdidas de eficiencia energética. Este trabajo analizó los efectos de combustibles alternativos y distintos regímenes de combustión sobre el rendimiento y las emisiones de estos motores. Se realizó una revisión bibliográfica en Scopus, considerando artículos publicados entre 2017 y 2026. Tras la selección y evaluación de elegibilidad, se incluyeron ocho estudios. Los resultados mostraron comportamientos diferentes para el hidrógeno, el HVO, el amoníaco, el gas natural y el biodiésel, según las condiciones operativas y los indicadores evaluados. La adición de hidrógeno mejoró la eficiencia térmica en los estudios analizados, aunque también aumentaron las emisiones de NOx. El HVO mostró resultados favorables de eficiencia térmica en el régimen PPCI y en la reducción de partículas en las condiciones estudiadas. El amoníaco redujo las emisiones de CO y NOx, pero presentó penalizaciones en el rendimiento energético. El gas natural mostró menor eficiencia térmica bajo determinadas condiciones de combustión. Estrategias como EGR, control de inyección, relación de compresión y sobrealimentación contribuyeron al equilibrio entre eficiencia térmica y emisiones de NOx y partículas. Se concluye que estos resultados dependen de la reactividad, el poder calorífico, las características de propagación de la combustión, el régimen empleado y los ajustes operativos del motor.

PALABRAS CLAVE*: Motores de encendido por compresión. Combustibles alternativos. Regímenes de combustión. Rendimiento. Emisiones.*

INTRODUÇÃO

Os motores de ignição por compressão (CI) são amplamente empregados nos setores de transporte, agricultura, indústria e geração de energia devido à elevada eficiência térmica, durabilidade e capacidade de operação sob cargas elevadas (Gorli *et al.*, 2025; Lin *et al.*, 2023;

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Zhao *et al.*, 2026). Entretanto, a heterogeneidade da mistura ar-combustível e as elevadas temperaturas locais características da combustão diesel convencional favorecem a formação de óxidos de nitrogênio (NOx) e material particulado (PM), enquanto a utilização de combustíveis de origem fóssil contribui para as emissões de dióxido de carbono (CO_2) (Dec, 1997; Dec, 2009; Oh *et al.*, 2022; Paykani *et al.*, 2016; Stone, 2012; Zhao *et al.*, 2026; Zhu *et al.*, 2022).

Nesse contexto, combustíveis alternativos como biodiesel, óleo vegetal hidrotratado (Hydrotreated Vegetable Oil – HVO), hidrogênio (H_2), amônia (NH_3) e gás natural têm sido investigados como alternativas para reduzir a dependência do diesel fóssil e modificar o perfil de emissões dos motores CI (Lu *et al.*, 2023). Entretanto, diferenças no poder calorífico inferior (PCI), número de cetano, temperatura de autoignição, velocidade de chama e outras propriedades físico-químicas alteram o atraso de ignição, a taxa de liberação de calor e as temperaturas desenvolvidas durante a combustão (Heywood, 2018; Lapuerta *et al.*, 2008). Consequentemente, a substituição do diesel pode produzir benefícios ambientais, mas também introduzir penalidades na eficiência térmica ou no consumo de combustível.

Além da substituição do combustível, regimes avançados de combustão têm sido investigados para reduzir o compromisso entre NOx, fuligem e eficiência característico da combustão diesel convencional (CDC). Estratégias como a combustão parcialmente pré-misturada (PPC/PPCI), a ignição por compressão de carga pré-misturada (PCCI), a ignição por compressão controlada por reatividade (RCCI) e a ignição por compressão de carga homogênea (HCCI) modificam o grau de pré-mistura, a distribuição de reatividade e o processo de autoignição (Cao; Johnson, 2024; Chhatbar *et al.*, 2025; Negry, 2015; Yin *et al.*, 2018). A aplicação desses regimes está diretamente relacionada às características do combustível e às condições operacionais empregadas.

Nesse sentido, parâmetros como recirculação dos gases de escape (Exhaust Gas Recirculation – EGR), estratégia de injeção, taxa de compressão e pressão de sobrealimentação também desempenham papel importante no controle da combustão. Essas estratégias permitem modificar o atraso de ignição, a liberação de calor e as temperaturas no cilindro, podendo reduzir determinadas emissões ou compensar penalidades de desempenho associadas à utilização de combustíveis alternativos. Dessa forma, a avaliação isolada do combustível não é suficiente para determinar seus benefícios, sendo necessário considerar sua interação com o regime de combustão e os parâmetros operacionais do motor.

Apesar dos avanços observados na utilização de combustíveis alternativos e em estratégias avançadas de combustão, os estudos disponíveis apresentam diferentes configurações de motores, proporções de combustíveis e condições operacionais, dificultando a

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

comparação direta entre seus resultados. Nesse contexto, esta revisão busca responder à seguinte pergunta norteadora: como as propriedades físico-químicas dos combustíveis alternativos e as estratégias de controle da combustão influenciam o desempenho energético e as emissões de motores de ignição por compressão, considerando as diferentes condições operacionais investigadas? A contribuição deste trabalho consiste em integrar e discutir criticamente resultados de estudos com diferentes configurações experimentais e numéricas, relacionando propriedades dos combustíveis, regimes de combustão, desempenho e emissões, sem pressupor equivalência operacional entre os sistemas avaliados.

Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo analisar, por meio de uma revisão da literatura, os efeitos da utilização de combustíveis alternativos e de diferentes regimes de combustão sobre o desempenho e as emissões de motores de ignição por compressão. Busca-se comparar as principais propriedades dos combustíveis analisados, compreender sua influência sobre a combustão, avaliar seus efeitos sobre a eficiência térmica e o consumo específico de combustível e analisar as emissões de NOx, fuligem, CO e HC, considerando as condições operacionais de cada estudo. Adicionalmente, são discutidas estratégias de mitigação, como EGR, controle da injeção, taxa de compressão e sobrealimentação, visando identificar os principais compromissos e possibilidades de conciliação entre eficiência energética e redução de emissões.

1. REFERENCIAL TEÓRICO

1.1. Comparação das propriedades termoquímicas dos combustíveis

As propriedades físico-químicas dos combustíveis exercem influência direta sobre o processo de combustão em motores de ignição por compressão, afetando parâmetros como atraso de ignição, taxa de liberação de calor (Heat Release Rate – HRR), temperatura de combustão, eficiência térmica e formação de emissões (Dec, 1997; Heywood, 2018). Entre as propriedades mais relevantes destacam-se o poder calorífico inferior (PCI), o número de cetano, a temperatura de autoignição, a temperatura adiabática de chama, a velocidade de chama e o teor de oxigênio. Ressalta-se, entretanto, que a aplicabilidade, os métodos de determinação e a interpretação dessas propriedades podem diferir entre combustíveis líquidos e gasosos, exigindo cautela na comparação direta de seus valores.

O número de cetano caracteriza a facilidade de autoignição dos combustíveis utilizados em motores de ignição por compressão, sendo determinado por métodos padronizados, como a ASTM D613, aplicados a combustíveis líquidos. Valores mais elevados de número de cetano tendem a reduzir o atraso de ignição sob condições operacionais equivalentes (Heywood, 2018;

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

ASTM International, 2026). Para combustíveis gasosos, a aplicação desse parâmetro exige cautela, pois o método convencional não foi desenvolvido para sua caracterização direta, tornando necessária a identificação do procedimento utilizado para determinar valores equivalentes de cetano. O PCI representa a energia liberada por unidade de massa, de modo que combustíveis com menor PCI exigem maior consumo mássico para fornecer quantidade equivalente de energia, sem que isso represente necessariamente menor eficiência térmica. A velocidade de chama laminar influencia a propagação da combustão em misturas pré-misturadas, variando conforme a pressão, temperatura e a razão de equivalência. A temperatura adiabática de chama constitui uma referência termodinâmica para a análise da formação térmica de NOx, que também depende da disponibilidade de oxigênio e do tempo de residência em temperaturas elevadas. A temperatura de autoignição, por sua vez, está associada às condições necessárias para o início espontâneo da combustão (Heywood, 2018).

Em misturas contendo diesel, biodiesel e etanol, propriedades como número de cetano, viscosidade, poder calorífico inferior e entalpia de vaporização influenciam a autoignição e o processo de combustão. Soares Júnior *et al.* (2018) investigaram o biodiesel oxidado como melhorador de cetano para compensar a menor facilidade de autoignição do etanol, enquanto De Carvalho *et al.* (2020) avaliaram a utilização de éter dietílico em misturas diesel-biodiesel-etanol. Esses estudos demonstram que a composição do combustível deve ser considerada na interpretação do desempenho e das emissões.

A Tabela 1 apresenta uma comparação das principais propriedades físico-químicas dos combustíveis analisados, incluindo PCI, número de cetano, velocidade de chama, temperatura adiabática de chama e temperatura de autoignição, considerando as especificidades de medição e aplicabilidade para combustíveis líquidos e gasosos, bem como as condições padronizadas de referência e referências específicas de cada parâmetro.

Tabela 1. Propriedades termoquímicas dos combustíveis analisados

(continua)

Combustível	PCI/LHV (MJ/kg)	Número de cetano [1]	Velocidade laminar de chama (m/s)²	Temperatura de autoignição (K)	Temperatura adiabática da chama (K)³	**Referência**
Diesel	42,5	40	0,3	493-533	2173	Zhao *et al.* (2026); Hunicz *et al.* (2021); D'Ambrosio

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

						et al. (2022)
Biodiesel	39,7 - 42	51-60	1,075-1,105	558	2266-2268	Gorli *et al.* (2025); Arivalagan *et al.* (2025); Gómez-Meyer *et al.* (2012)
Amônia	18,6	N.A.	0,07	924	2070 - 2090	Ji *et al.* (2025); Chu *et al.* (2026); Gorli *et al.* (2025)
Hidrogênio	120	N.A.	2,9	773	2373	Ji *et al.* (2025); Chu *et al.* (2026); Arivalagan *et al.* (2025)
HVO	43,9	74,7	0,3 – 0,66	477	N.D.	Cheng *et al.* (2026); Hunicz *et al.* (2021); D'Ambrosio *et al.* (2022); Hunicz *et al.* (2022)
Gás Natural	48,28	N.A.	0,37	810,15	2324,5	Zhao *et al.* (2026); Ahmad *et al.* (2021)

Fonte: Elaborado pelos autores com base em Zhao *et al.* (2026), Hunicz *et al.* (2021, 2022), D'Ambrosio *et al.* (2022), Gorli *et al.* (2025), Arivalagan *et al.* (2025), Gómez-Meyer *et al.* (2012), Ji *et al.* (2025), Chu *et al.* (2026), Cheng *et al.* (2026), Ahmad *et al.* (2021), Glaude *et al.* (2010) e García Oliver *et al.* (2024).

Nota: [1] O número de cetano caracteriza a qualidade de ignição de combustíveis líquidos (ASTM D613), não sendo diretamente aplicável aos gasosos (N.A.).

[2] A velocidade laminar de chama depende das condições da mistura. Para o biodiesel, os valores foram obtidos a 623 K e 1 atm (Gómez-Meyer *et al.*, 2012); para o HVO, foram estimados graficamente a partir de simulações com n-dodecano a 403 K e 1 atm (García Oliver *et al.*, 2024). Portanto, os valores não são diretamente comparáveis.

[3] A temperatura adiabática de chama corresponde a valores teóricos dependentes das condições de cálculo. Para o gás natural, utiliza-se metano puro em condições estequiométricas (Ahmad *et al.*, 2021). Para o HVO, N.D. indica ausência de valor diretamente fundamentado nas fontes consultadas.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

As diferenças observadas entre as propriedades dos combustíveis fornecem a base para compreender seus distintos comportamentos durante a combustão e sua influência sobre a operação e a transição entre diferentes regimes de combustão.

1.2. Comparação entre regimes de combustão

A transição entre os regimes de combustão está associada às alterações na preparação da mistura ar-combustível, no momento da injeção e da autoignição e na distribuição de reatividade dentro da câmara de combustão. Cabe ressaltar que a apresentação desses regimes não constitui uma transição sequencial ou etapa progressiva linear de um mesmo processo, mas sim estratégias operacionais fisicamente distintas. No regime de combustão diesel convencional (CDC), a injeção ocorre próxima ao período de combustão, resultando em menor tempo para a preparação da mistura e em uma combustão predominantemente controlada pela mistura e pela difusão, favorecendo regiões localmente ricas e de elevada temperatura (Dec, 1997).

Com o aumento do grau de pré-mistura, regimes como a combustão parcialmente pré-misturada (PPC/PPCI) e a ignição por compressão de carga pré-misturada (PCCI) reduzem progressivamente a participação da combustão difusiva, contribuindo para a redução das regiões favoráveis à formação simultânea de NOx e fuligem (Cao; Johnson, 2024). No HCCI, busca-se elevado grau de homogeneidade da mistura antes da autoignição, tornando a combustão predominantemente controlada pela cinética química e pela história térmica da carga, sem a presença de frentes de chama definidas (Negry, 2015).

O RCCI diferencia-se fundamentalmente por não buscar a homogeneização completa da carga, mas sim por criar intencionalmente um gradiente espacial e temporal de reatividade química e de razão de equivalência. O combustível de menor reatividade compõe parte da carga previamente preparada, enquanto o de maior reatividade auxilia no controle do início e da evolução da autoignição (Chhatbar *et al.*, 2025). Dessa forma, a comparação entre CDC, PPC/PPCI, PCCI, RCCI e HCCI representa diferentes níveis de pré-mistura, distribuição de reatividade e controle da autoignição, evidenciando que o RCCI constitui um regime *dual-fuel* com mecanismo próprio de modulação e não um mero estágio intermediário de homogeneização, permitindo modificar a liberação de calor, a temperatura de combustão e, consequentemente, o desempenho e a formação de emissões (Cao; Johnson, 2024; Chhatbar *et al.*, 2025; Negry, 2015).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

2. METODOLOGIA

2.1. Diretrizes da pesquisa e base de dados

Esta revisão da literatura foi desenvolvida para mapear, avaliar e sintetizar as evidências científicas relativas aos diferentes regimes de combustão em motores de ignição por compressão (CIE) alimentados por combustíveis alternativos. O foco do estudo reside na investigação detalhada das relações de compromisso entre o desempenho termodinâmico e as emissões poluentes.

A busca dos artigos científicos foi realizada exclusivamente na base de dados Scopus, selecionada por sua ampla cobertura de publicação científica nas áreas de engenharia, energia e sistemas térmicos. A triagem, seleção e extração dos dados foram conduzidas a partir dos registros recuperados. Reconhece-se que a utilização de uma única base pode limitar a abrangência da revisão, uma vez que estudos relevantes indexados exclusivamente em outras bases podem não ter sido contemplados.

A busca, triagem e seleção dos estudos foram conduzidas de forma estruturada, com base em critérios de inclusão e exclusão previamente definidos, visando garantir a transparência e a consistência do processo de seleção dos artigos.

2.2. Estratégia de busca

Com o objetivo de recuperar estudos relevantes sem perder a especificidade em relação ao tema proposto, foi formulada uma equação de busca booleana aplicada aos campos de título (TITLE) e título/resumo (TITLE-ABS) na base de dados Scopus.

2.2.1. *String* utilizada

Para realizar as pesquisas na base de dados da Scopus, foi utilizada a expressão de busca booleana apresentada a seguir.

TITLE ((*"compression ignition" OR "diesel engine" OR "diesel engines" OR "dual fuel" OR "dual-fuel" OR CIE OR generator OR generators) AND (biodiesel OR hydrogen OR biogas OR ammonia OR "natural gas" OR HVO OR "hydrotreated vegetable oil")) AND TITLE-ABS (("partially premixed" OR "EGR ratio" OR "massive EGR" OR "exhaust gas recirculation" OR "pre-injection" OR "combustion stability" OR "operating parameter" OR "operating parameters" OR "trade-offs" OR "persistent free radicals" OR "pilot injection" OR "substitution ratio") AND (NOx OR "nitrogen oxides" OR soot OR "exhaust emission" OR "exhaust emissions" OR "engine emission" OR "engine emissions" OR pollutant OR pollutants*)) AND PUBYEAR > 2016 AND PUBYEAR < 2027 AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE , "final")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar"))

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENER")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English"))

A estratégia de busca foi executada na base de dados Scopus em 16 de agosto de 2026, utilizando a expressão booleana e os filtros apresentados anteriormente, resultando na recuperação de 391 registros.

Os filtros empregados restringiram a seleção a artigos científicos publicados em inglês, em estágio final da publicação, entre 2017 e 2026, classificados nas áreas de Engenharia e Energia. Embora essas restrições tenham contribuído para delimitar o escopo da pesquisa, reconhece-se que estudos relevantes publicados em outros idiomas, classificados em diferentes áreas ou que utilizem terminologias não contempladas na expressão podem não ter sido recuperados.

2.2.2. Filtros Utilizados

- Janela Temporal: Publicações entre 2017 e 2026.
- Estágio de Publicação: Artigos em formato final.
- Áreas do Conhecimento: Engenharia e Energia.
- Tipo de Documento: Artigos científicos classificados como *Article* na base de dados Scopus.
- Idioma: Redigidos na língua inglesa.

2.3. Critérios de inclusão

- Estudos experimentais ou numérico-experimentais em motores de Ignição por Compressão (CIE).
- Emprego de combustíveis alternativos (H_2, NH_3, Biodiesel, HVO e Gás Natural) em substituição total ou parcial ao diesel.
- Investigação de regimes de combustão, alterações no comportamento da combustão decorrentes da substituição parcial ou total do diesel por combustíveis alternativos e/ou aplicação de estratégias de controle térmico e reativo (EGR, alteração da taxa de compressão, pré-injeção ou sobrealimentação), com avaliação dos efeitos sobre o desempenho e as emissões.
- Avaliação quantitativa dos *trade-offs* entre desempenho termodinâmico e emissões poluentes.

2.4. Critérios de exclusão

- Fora do escopo do motor: Motores de Ignição por Centelha (SI / Ciclo Otto), turbinas a gás, células de combustível ou sistemas isolados sem aplicação a motores CIE.
- Ausência de combustíveis alternativos: Estudos restritos ao emprego de diesel fóssil, sem avaliação de combustíveis alternativos contemplados no escopo da revisão.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

- Ausência de transição de regime e *trade-offs*: Trabalhos operando apenas em regime difusivo convencional sem aplicação das estratégias de controle ou alterações das condições operacionais contempladas nesta revisão.
- Estudos Metodológicos/ Otimização isolada: Artigos focados unicamente na síntese/produção do combustível, Análise de Ciclo de Vida (LCA), avaliação econômica ou métodos de tomada de decisão multicritério (MCDM), sem investigação do desempenho e das emissões em motores de ignição por compressão.

2.5. Resultado da triagem

A busca executada na base de dados Scopus retornou um total de 391 artigos científicos. O processo de triagem e seleção dos estudos foi conduzido em duas etapas sucessivas, com o objetivo de verificar sua adequação aos critérios de inclusão e exclusão estabelecidos para a pesquisa.

2.5.1. Triagem por título e resumo

Os 391 registros foram avaliados individualmente em uma primeira análise de adequação. Os registros recuperados na base de dados Scopus foram exportados para uma planilha do Microsoft Excel, utilizada para organizar os estudos e auxiliar no processo de triagem e seleção, conforme os critérios de inclusão e exclusão estabelecidos. Durante a organização dos registros, foi realizada a verificação de possíveis duplicidades, não sendo identificados artigos duplicados.

A triagem e a seleção dos estudos foram realizadas por um único pesquisador, com base nos critérios de inclusão e exclusão estabelecidos para a revisão. Nesta etapa, 356 artigos foram desconsiderados por não atenderem aos critérios mínimos de elegibilidade:

- Fora de escopo do motor – 10 artigos
- Ausência de combustíveis alternativos – 104 artigos
- Estudos metodológicos/ Otimização isolada – 17 artigos
- Operação convencional sem parâmetros avançados – 225 artigos

Os motivos de exclusão foram organizados em categorias mutuamente exclusivas para fins de contabilização, sendo atribuído a cada registro um motivo principal de exclusão.

2.5.2. Avaliação de elegibilidade por leitura do texto

Os 35 artigos remanescentes foram recuperados e submetidos à leitura na íntegra. Nesta fase de análise aprofundada, 27 artigos foram excluídos por não apresentarem uma avaliação

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

quantitativa conjunta dos indicadores de desempenho do motor, como eficiência térmica efetiva (BTE) ou consumo específico de combustível (BSFC), e das emissões poluentes, como óxidos de nitrogênio (NOx) ou material particulado/fuligem, conforme os critérios estabelecidos para a revisão.

• Ausência de análise de *trade-offs* detalhada – 27 artigos

2.5.3. Inclusão final

Ao término das duas fases de seleção, 8 artigos primários atenderam aos critérios de inclusão e foram selecionados para compor o corpus analítico final da revisão. A análise crítica dos oito estudos selecionados considerou os procedimentos metodológicos, as condições operacionais e os resultados de desempenho e emissões apresentados, sem a aplicação de um instrumento padronizado de avaliação da qualidade metodológica.

Ressalta-se que foram utilizadas ferramentas de inteligência artificial generativa, como o Gemini Notebook, da Google, como apoio à revisão gramatical, organização e síntese do texto. Todo o conteúdo técnico, as citações, as referências e as interpretações foram revisados criticamente pelos autores, em conformidade com os princípios de integridade e responsabilidade na atividade científica estabelecidos pela Portaria CNPq nº 2.664/2026 (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, 2026).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão, oito estudos foram selecionados para compor o corpus final da revisão. Os trabalhos apresentam diferentes configurações de motores, combustíveis, potências, taxas de compressão e estratégias de combustão, permitindo analisar o comportamento dos combustíveis alternativos sob distintas condições experimentais. A Tabela 2 apresenta as principais características dos estudos selecionados.

Tabela 2. Características dos estudos selecionados

(continua)

Autor / Ano	Combustível	Motor	Potência	Taxa Compr. (CR)	Regime de Combustão	Variáveis Analisadas
Zhao *et al.* (2026)	*Dual-fuel*: Gás Natural (PFI) + Diesel (DI piloto)	Modelagem CFD 3D CONVERGE	Não informado*	16,5:1 a 18,5:1	*Dual-Fuel* LTC (*Low-Temperature Combustion*) por	CR (16,5 a 18,5) e EGR (0% a 32%)

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

		(validado em bancada)			Ignição por Compressão	sob pré-injeção
Chaichan (2018)	*Dual-fuel*: Hidrogênio (20% volume) + Biodiesel Girassol (B100)	Bancada experimental (Fiat TD 313, 4 cilindros)	Não informado*	17,5:1	*Dual-Fuel* (H2/B100) por Ignição por Compressão com EGR Massivo	Injeção de H2 (20% volume), EGR quente (30%) e EGR resfriado (30% a 25 °C)
Cheng *et al.* (2026)	Blendas ternárias: Diesel ULSD + Biodiesel Soja (0-30%) + HVO (10%)	Bancada experimental (Yanmar YDG-5500N, monocilindro)	6,6 kW @ 3600 rpm;	19,3:1	Ignição por Compressão Convencional Direta (DI)	Proporção de biodiesel de soja (0-30%) com 10% HVO e diesel D100
Gorli *et al.* (2025)	*Dual-fuel*: Amônia gasosa (5-15 l/min) + Biodiesel B20	Bancada experimental (Kirloskar monocilindro, 4 tempos)	3,5 kW @ 1500 rpm	18,5:1	*Dual-Fuel* Amônia/Biodiesel B20 por Ignição por Compressão	Vazão de NH3 (0 a 15 l/min) e carga do motor (25% a 100%)
Ahmed *et al.* (2018)	*Dual-fuel*: Gás Natural + Diesel piloto (DI)	Modelagem numérica 1D GT-*power* (validado em bancada)	298 kW @ 1800 rpm (MCR)	13,0:1	*Dual-Fuel* Gás Natural/Diesel por Ignição por Compressão (GT-*Power*)	Taxa de substituição energética por Gás Natural (15%, 25%, 50%, 75%)
Hunicz *et al.* (2022)	HVO puro (Neste 99%) vs. Diesel Fóssil	Bancada experimental (AVL 5402 monocilindro de pesquisa)	Não informado*	17,0:1	Combustão Parcialmente Pré-misturada (PPCI) multi-pulso	Pressão de *boost* (130-165 kPa), EGR (0-42%) e *lambda*
Chu *et al.* (2026)	Multicombustível (ADDF): Amônia + Diesel piloto + H2	Modelagem CFD 3D CONVERGE (validado em bancada)	Não informado*	16,5:1	Combustão Multicombustível Amônia-Diesel Enriquecida com H2	Razão de Energia de H2 (HESR: 0-45%) e EGR (0-30%)
Arivalagan *et al.* (2025)	Dual-fuel: Hidrogênio (craqueamento	Bancada experimental (Motor diesel	3,5 kW @ 1500 rpm	17,5:1	*Dual-Fuel* Hidrogênio/Biodiesel Microalgas por	Vazão de H2 (10, 15, 20 LPM),

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

	NH3) + Biodiesel B20	monocilindro, 4 tempos)			Ignição por Compressão	equivalência (θ 1,0 e 1,1) e B10/B20

Fonte: Elaborado pelos autores (2026), com base em (Ahmed *et al.*, 2018; Arivalagan *et al.*, 2025; Chaichan, 2018; Cheng *et al.*, 2026; Chu *et al.*, 2026; Gorli *et al.*, 2025; Hunicz *et al.*, 2022; Zhao *et al.*, 2026).
Nota: (*) Indicação "não informado" refere-se à ausência de valores explícitos de potência nos estudos consultados. Alguns trabalhos caracterizam as condições operacionais por meio de parâmetros como carga do motor ou pressão média efetiva indicada (IMEP), que não foram considerados equivalentes à potência.

3.1. Efeitos das transições no desempenho do motor

A utilização de combustíveis alternativos e a alteração das condições de combustão afetam diretamente a eficiência térmica e o consumo de combustível do motor. Entre os principais parâmetros utilizados para avaliar esses efeitos estão a eficiência térmica de freio (*Brake Thermal Efficiency* – BTE), que representa a parcela da energia química fornecida pelo combustível efetivamente convertida em potência útil no eixo do motor, e o consumo específico de combustível (*Brake Specific Fuel Consumption* – BSFC), que representa a quantidade de combustível necessária para produzir determinada quantidade de energia útil. Dessa forma, valores mais elevados de BTE indicam melhor aproveitamento energético, enquanto menores valores de BSFC representam menor consumo de combustível em massa por unidade de energia útil produzida. Entretanto, a comparação do BSFC entre combustíveis distintos deve considerar as diferenças de poder calorífico inferior (PCI), uma vez que um maior consumo específico não implica necessariamente menor eficiência térmica.

Entre os combustíveis analisados, a adição de hidrogênio apresentou ganhos de eficiência térmica nas condições investigadas. Arivalagan *et al.* (2025) observaram BTE de 32% com a mistura de BH20, correspondente a um aumento relativo de 23,08% em comparação ao diesel, enquanto Chaichan (2018) registrou incremento relativo de 12,9% no BTE utilizando hidrogênio associado ao biodiesel, sem aplicação de EGR. Esses resultados podem estar relacionados à elevada velocidade de propagação de chama do hidrogênio, que pode favorecer uma combustão mais rápida e o aproveitamento de energia liberada, dependendo das condições de mistura e operação do motor. O HVO, por sua vez, alcançou eficiência térmica indicada (*Indicated Thermal Efficiency* – ITE) de 43,5% em regime PPCI, superando o diesel de referência em 1,5 ponto percentual nas condições otimizadas de EGR (25%) e pressão de sobrealimentação (130 kPa), investigadas por Hunicz *et al.* (2022). Diferentemente da BTE, a ITE considera o trabalho desenvolvido pelos gases no interior do cilindro, antes das perdas mecânicas até o eixo. Portanto, os valores de BTE e ITE devem ser interpretados

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

separadamente, não permitindo estabelecer uma comparação direta de superioridade energética entre os combustíveis avaliados.

Em contrapartida, a utilização de amônia e gás natural apresentou penalidades no desempenho em condições específicas de operação. Gorli *et al.* (2025), em ensaios a plena carga e 1.500 rpm, observaram redução de 6% na BTE e aumento de 13% no BSFC com a utilização de B20 associado a 15 L/min de amônia, em comparação ao diesel puro. Segundo os autores, a elevada temperatura de autoignição e a baixa velocidade de propagação de chama da amônia contribuíram para o aumento do atraso de ignição e da duração da combustão, prejudicando o aproveitamento energético. Além disso, seu PCI contribuiu para o maior consumo específico em massa, calculado considerando ambos os combustíveis. Ahmed *et al.* (2018), por sua vez, em simulação numérica de um motor turboalimentado a 1.800 rpm, verificaram redução relativa de 62,9% na BTE e aumento de aproximadamente 147% no BSFC com uma fração de 15% de gás natural, em comparação ao diesel puro. Com o aumento dessa fração para 25%, 50% e 75%, as reduções relativas da BTE diminuíram para 46%, 36% e 30%, respectivamente. Esse comportamento foi associado à formação de misturas ar-gás natural excessivamente pobres nas menores frações de substituição, dificultando a propagação da chama e favorecendo a combustão incompleta. O BSFC considerou a massa dos dois combustíveis, enquanto a BTE foi calculada com base na energia total fornecida. Dessa forma, os resultados devem ser interpretados considerando as propriedades dos combustíveis e as condições operacionais investigadas, sem estabelecer uma classificação geral de desempenho entre os estudos.

Como evidência complementar, Santos *et al.* (2017) avaliaram misturas diesel-biodiesel em um motor estacionário submetido a diferentes cargas, sem identificar variações significativas na eficiência energética com o aumento da proporção de biodiesel. De Carvalho *et al.* (2020) também observaram eficiências próximas entre os combustíveis investigados, embora a mistura contendo etanol e éter dietílico tenha apresentado a maior eficiência na condição de carga elevada. Esses resultados reforçam a necessidade de interpretar a eficiência e o consumo considerando a composição do combustível e as condições operacionais do motor.

Os resultados evidenciam, portanto, comportamentos distintos entre os combustíveis analisados. A adição de hidrogênio apresentou ganhos relativos de eficiência térmica, enquanto o HVO demonstrou elevada eficiência em condições de combustão parcialmente pré-misturada. Em contrapartida, a utilização de amônia apresentou redução de eficiência e aumento de consumo específico, enquanto o gás natural mostrou penalidade de desempenho em condições de baixa carga. Entretanto, essas diferenças devem ser interpretadas considerando as particularidades de cada estudo, uma vez que os motores, as condições operacionais e os

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

indicadores de desempenho não são necessariamente equivalentes. Dessa forma, o desempenho não depende exclusivamente do combustível empregado, mas da interação entre suas propriedades físico-químicas, o regime de combustão e os parâmetros operacionais do motor.

3.2. Efeitos das transições nas emissões

As emissões dos motores de ignição por compressão estão diretamente relacionadas às condições de formação da mistura ar-combustível e às temperaturas atingidas durante a combustão. Entre os principais poluentes avaliados estão os óxidos de nitrogênio (NOx), formados principalmente em regiões de elevada temperatura; o material particulado (PM) e a fuligem, associados principalmente às regiões localmente ricas em combustível; e o monóxido de carbono (CO) e os hidrocarbonetos não queimados (HC), relacionados à oxidação incompleta do combustível. Dessa forma, alterações no combustível e no regime de combustão podem reduzir determinados poluentes enquanto aumentam outros, caracterizando relações de compromisso entre as emissões.

A substituição parcial do diesel por combustíveis alternativos apresentou resultados expressivos para CO e HC. Gorli *et al.* (2025) observaram redução de 89,1% nas emissões de CO com a utilização de B20 associado a 15 L/min de amônia, sob plena carga e 1.500 rpm, resultado relacionado à substituição parcial do combustível carbonáceo por amônia. Arivalagan *et al.* (2025) verificaram reduções de 50% no CO e 12,6% nos HC com a adição de hidrogênio ao biodiesel na condição de razão de equivalência igual a 1,0. Embora esses resultados indiquem benefícios na redução de determinados poluentes, sua interpretação deve considerar as condições de combustão e os componentes efetivamente monitorados. No estudo de Gorli *et al.* (2025), por exemplo, não foram quantificadas as emissões de amônia não queimada (NH_3) e óxido nitroso (N_2O), o que limita uma avaliação ambiental mais abrangente.

Em relação ao material particulado, a utilização de combustíveis oxigenados e de combustão parcialmente pré-misturada apresentou resultados favoráveis. Cheng *et al.* (2026) observaram reduções entre 12,5% e 43,9% nas emissões de PM2,5 em relação ao diesel puro, com misturas contendo HVO e biodiesel. A maior redução ocorreu com a mistura D60B30H10, composta por 60% de diesel, 30% de biodiesel e 10% de HVO. Hunicz *et al.* (2022), por sua vez, obtiveram emissão de fuligem de 0,055 g/kWh utilizando HVO em regime PPCI, sob condições otimizadas de EGR e sobrealimentação. Esses resultados podem estar associados às características químicas dos combustíveis e às condições de formação da mistura, que influenciam os processos de formação e oxidação da fuligem. Entretanto, os mecanismos

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

envolvidos devem ser interpretados considerando as particularidades de cada combustível e estratégia de combustão.

Para o NOx, entretanto, os resultados evidenciam um comportamento distinto. Arivalagan *et al.* (2025) observaram aumento de 3,4% nas emissões desse poluente, sob razão de equivalência de 1,1, comportamento que pode estar associado às temperaturas alcançadas durante a combustão. Em contrapartida, Gorli *et al.* (2025) observaram redução de 10,9% nas emissões de NOx com a utilização de B20 associada a 15 L/min de amônia. Segundo os autores, essa redução pode estar associada à diminuição das temperaturas de combustão, além da possível atuação da amônia em mecanismos de redução química de NOx. Entretanto, a ausência de medições de NH_3 não queimada e N_2O limita a avaliação das emissões nitrogenadas nesse sistema. Assim, a redução de poluentes carbonáceos não implica necessariamente diminuição simultânea de NOx, uma vez que seus mecanismos de formação respondem de maneira distinta às propriedades dos combustíveis e aos parâmetros operacionais.

De forma geral, os resultados evidenciam que as reduções de emissões variam conforme o combustível, o regime de combustão e as condições operacionais investigadas. A amônia apresentou redução de CO e de NOx nas condições analisadas por Gorli *et al.* (2025), enquanto a adição de hidrogênio favoreceu a redução de CO e HC, porém apresentou aumento de NOx no estudo de Arivalagan *et al.* (2025). O HVO e o biodiesel apresentaram resultados favoráveis principalmente na redução do material particulado. Entretanto, a comparação ambiental entre os combustíveis deve considerar os poluentes efetivamente avaliados e as possíveis emissões não quantificadas, como NH_3, N_2O e metano não queimado. Assim, a escolha do combustível deve ser associada ao controle das condições de combustão, buscando equilibrar a redução de NOx, fuligem, CO e HC sem comprometer o desempenho energético do motor.

3.3. Estratégias de mitigação e controle da combustão

Os resultados apresentados nas seções anteriores demonstram que a utilização de combustíveis alternativos pode introduzir relações de compromisso entre eficiência térmica e emissões. Nesse contexto, estratégias de controle da combustão tornam-se necessárias para reduzir essas penalidades. Entre as principais alternativas identificadas nos estudos estão a recirculação dos gases de escape (Exhaust Gas Recirculation – EGR), o controle dos parâmetros de injeção, a alteração da taxa de compressão e o ajuste da pressão de sobrealimentação (*boost*).

O EGR consiste na recirculação de uma parcela dos gases de escape para a admissão do motor, reduzindo a concentração de oxigênio e as temperaturas máximas de combustão, o

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

que contribui principalmente para a redução da formação de NOx. Zhao *et al.* (2026) observaram redução de até 99,7% desse poluente ao elevar a taxa de EGR de 0% para 32%, sob plena carga, em operação *dual-fuel* com gás natural. Em sistemas utilizando amônia, diesel e hidrogênio, Chu *et al.* (2026) verificaram que a aplicação de 30% de EGR, com participação energética de hidrogênio de 35% e rotação de 1.500 rpm, reduziu as emissões de NOx para aproximadamente 6 g/kWh. Entretanto, níveis elevados de EGR podem reduzir a disponibilidade de oxigênio e dificultar a oxidação completa do combustível, favorecendo o aumento de CO, HC ou material particulado, dependendo da mistura e do regime de combustão. Dessa forma, torna-se necessário ajustar a taxa de EGR em conjunto com outras variáveis operacionais, buscando equilibrar a redução de NOx e a manutenção da eficiência térmica.

A estratégia de injeção também exerce influência sobre o início da combustão e a taxa de liberação de calor. Hunicz *et al.* (2022), utilizando HVO em regime PPCI, empregaram injeção dividida, com injeção piloto a 18° antes do ponto morto superior (BTDC), correspondente a 10% do combustível injetado, e principal a 6° BTDC, com os 90% restantes. Essa configuração favoreceu a preparação da mistura antes do início da combustão de alta temperatura, contribuindo para o estabelecimento do regime parcialmente pré-misturado. Entretanto, os resultados de eficiência e emissões obtidos pelos autores devem ser interpretados considerando também os ajustes de EGR e sobrealimentação realizados no estudo, uma vez que esses parâmetros atuam conjuntamente sobre as condições de combustão.

Outro parâmetro relevante é a taxa de compressão, definida pela relação entre o volume máximo e o volume mínimo no interior do cilindro. Zhao *et al.* (2026) verificaram que o aumento da taxa de compressão de 16,5 para 18,5 em operação com gás natural e diesel sob plena carga, elevou a pressão máxima no cilindro em 9,8% e reduziu as emissões de metano não queimado em 22,4%. Esse comportamento está relacionado ao aumento da pressão e da temperatura ao final da compressão, favorecendo a ignição do combustível piloto e a propagação da combustão, o que contribui para reduzir a parcela de metano não oxidada. Entretanto, o aumento da taxa de compressão também pode elevar as solicitações mecânicas e modificar a formação de NOx, exigindo atenção aos limites operacionais do motor.

A pressão de sobrealimentação, ou *boost*, corresponde ao aumento da pressão do ar fornecido ao cilindro e pode ser utilizada para modificar a disponibilidade de oxigênio e as condições de combustão. Hunicz *et al.* (2022), utilizando HVO em regime PPCI, identificaram condições otimizadas de operação com pressão absoluta de 130 kPa e taxa de EGR de 25%, obtendo eficiência térmica indicada de 43,5%. Esses resultados evidenciam a importância do ajuste conjunto dos parâmetros operacionais, uma vez que a alteração da pressão de admissão

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

influencia a formação da mistura e o desenvolvimento da combustão. Assim, EGR, parâmetros de injeção, taxa de compressão e *boost* demonstram que as penalidades associadas aos combustíveis alternativos não dependem exclusivamente de suas propriedades, podendo ser parcialmente compensadas pelo controle adequado das condições operacionais. Portanto, a otimização conjunta entre combustível e estratégia de combustão constitui um elemento fundamental para conciliar eficiência térmica e redução de emissões.

3.4. Síntese dos *trade-offs* e limitações dos estudos

A análise conjunta dos estudos evidencia que os benefícios associados aos combustíveis alternativos variam conforme os parâmetros de desempenho e emissões. A adição de hidrogênio apresentou ganhos relativos de eficiência térmica e redução de CO e HC, embora também tenha sido observado um aumento de NOx, evidenciando possíveis compromissos entre melhoria da combustão e formação de poluentes. O HVO, especialmente em condições de combustão parcialmente pré-misturada, apresentou elevada eficiência associada à baixa formação de fuligem. A amônia proporcionou reduções expressivas de emissões de CO e NOx, mas apresentou penalidades na eficiência térmica e no consumo específico. O gás natural também favoreceu a redução de determinados poluentes, embora seu desempenho tenha sido prejudicado principalmente em condições de baixa carga.

Esses resultados demonstram que as propriedades do combustível, isoladamente, não determinam o desempenho final do motor. A interação entre reatividade, poder calorífico, preparação da mistura ar-combustível e condições de autoignição modifica a taxa de liberação de calor e as temperaturas desenvolvidas durante a combustão. Consequentemente, a utilização de estratégias como EGR, controle da injeção, alteração da taxa de compressão e ajuste da pressão de sobrealimentação torna-se necessária para compensar as limitações de cada combustível e buscar um equilíbrio entre eficiência e emissões. Entretanto, a aplicação dessas estratégias deve considerar as condições operacionais e os possíveis compromissos associados a cada ajuste.

Cabe destacar, contudo, que a comparação quantitativa entre os estudos apresenta limitações decorrentes das diferentes configurações experimentais empregadas. Os trabalhos selecionados utilizaram motores, condições de carga, proporções de combustíveis, taxas de EGR, estratégias de injeção e regimes de combustão distintos. Dessa forma, diferenças percentuais de eficiência, consumo ou emissões não devem ser interpretadas como uma comparação direta entre combustíveis em condições equivalentes, mas como tendências observadas nas condições específicas investigadas em cada estudo.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Além disso, os estudos selecionados não avaliaram experimentalmente todas as transições entre CDC, PPC/PPCI, PCCI, RCCI e HCCI sob uma mesma configuração de motor. Assim, a literatura analisada permite identificar como as propriedades dos combustíveis e as estratégias operacionais favorecem diferentes características de combustão, mas ainda apresenta limitações para estabelecer condições universais de transição entre os regimes. Essa heterogeneidade evidencia a necessidade de estudos comparativos conduzidos sob condições padronizadas, permitindo avaliar de forma mais direta os efeitos dos combustíveis alternativos sobre desempenho, emissões e transição dos regimes de combustão.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta revisão analisou a influência de combustíveis alternativos sobre o comportamento da combustão em motores de ignição por compressão, considerando seus efeitos sobre os regimes de combustão, o desempenho energético e a formação de emissões. A literatura analisada indica que as propriedades físico-químicas dos combustíveis, especialmente poder calorífico, reatividade, temperatura de autoignição e velocidade de chama, modificam o atraso de ignição, a preparação da mistura ar-combustível e a liberação de calor, influenciando as características dos diferentes regimes de combustão.

Entre os combustíveis analisados, a adição de hidrogênio apresentou ganhos relativos de eficiência térmica e resultados favoráveis na redução de CO e HC, embora possa elevar as emissões de NOx. O HVO demonstrou elevada eficiência associada à baixa formação de material particulado, especialmente em condições de combustão parcialmente pré-misturada. A amônia apresentou potencial para redução de emissões de CO e NOx, porém com penalidades no desempenho energético e no consumo específico. O gás natural também apresentou limitações de eficiência nas condições de menores frações. O biodiesel, por sua vez, mostrou-se relevante pela substituição parcial do combustível fóssil e pelos resultados favoráveis na redução do material particulado em determinadas misturas.

A análise também evidenciou que os benefícios dos combustíveis alternativos não dependem exclusivamente de suas propriedades, mas da interação com o regime de combustão e com os parâmetros operacionais do motor. Estratégias como recirculação dos gases de escape, controle da injeção, ajuste da taxa de compressão e pressão de sobrealimentação mostraram-se importantes para controlar a autoignição e a liberação de calor, possibilitando reduzir os compromissos entre eficiência térmica, NOx e fuligem. Dessa forma, os resultados reforçam a importância da adequação conjunta entre combustível, regime de combustão e

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

estratégia de controle, considerando os diferentes indicadores de desempenho e emissões avaliados.

Por fim, a heterogeneidade das condições experimentais dos estudos analisados limita a comparação direta entre os resultados e a definição de condições universais para a transição entre os regimes CDC, PPC/PPCI, PCCI, RCCI e HCCI. Estudos futuros conduzidos sob condições experimentais padronizadas podem permitir comparações mais diretas entre combustíveis e contribuir para identificar estratégias capazes de conciliar elevada eficiência energética, estabilidade da combustão e redução simultânea das principais emissões dos motores de ignição por compressão.

REFERÊNCIAS

AHMAD, Z. *et al.* Effects of ethane addition on diesel-methane dual-fuel combustion in a heavy-duty engine. Fuel, v. 289, art. 119834, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119834.

AHMED, S. A.; ZHOU, S.; ZHU, Y. Performance and Emission Characteristics Analysis of Dual Fuel Compression Ignition Engine Using Natural Gas and Diesel. International Journal of Thermodynamics, v. 21, n. 1, p. 16–25, 2018. DOI: https://doi.org/10.5541/ijot.316300.

ARIVALAGAN, P.; KAMARUDIN, S. K.; MEENAKSHI, V.; PRAVEENKUMAR, T. R. Trade-offs between engine performance and emissions in diesel engines fueled with hydrogen from ammonia cracking and biodiesel blends. Renewable Energy, v. 254, art. 123799, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.123799.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D613-26: Standard Test Method for Cetane Number of Diesel Fuel Oil. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2026. DOI: https://doi.org/10.1520/D0613-26.

CAO, D. N.; JOHNSON, A. J. T. A Simulation Study on a Premixed-charge Compression Ignition Mode-based Engine Using a Blend of Biodiesel/Diesel Fuel under a Split Injection Strategy. International Journal of Advanced Science, Engineering and Information Technology, v. 14, n. 2, p. 451–471, 2024. DOI: https://doi.org/10.18517/ijaseit.14.2.19524.

CHAICHAN, M. T. Performance and emission characteristics of CIE using hydrogen, biodiesel, and massive EGR. International Journal of Hydrogen Energy, v. 43, n. 10, p. 5415–5435, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.09.072.

CHENG, P.-C.; FANG, G.-C.; CHEN, S.-C.; CHOU, F.-C.; CHEN, T.-Y.; LIN, Y.-C. The innovative blend of HVO and biodiesel with diesel for higher generator efficiency, reduction in pollutants and investigation of persistent free radicals emissions. Sustainable Environment Research, v. 36, art. 2, 2026. DOI: https://doi.org/10.1186/s42834-026-00279-z.

CHHATBAR, J.; RAJPARA, P.; BISWAS, S.; BANERJEE, R. Integration of RCCI and CDF combustion in conventional diesel engine using CNG-diesel fuels: an experimental study. Journal of Applied Fluid Mechanics, v. 18, n. 1, p. 87–97, 2025. DOI: https://doi.org/10.47176/jafm.18.1.2809.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

CHU, X.; HE, J.; LIU, H.; DUAN, X.; SUN, Z. The influences of hydrogen-enriched and exhaust gas recirculation strategies on the performance of ammonia-diesel dual-fuel engine. Energy, v. 358, art. 141358, 2026. DOI: https://doi.org/10.1016/j.energy.2026.141358.

CONSELHO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO (CNPq). Portaria CNPq nº 2.664, de 6 de março de 2026. Institui a Política de Integridade na Atividade Científica do CNPq. Brasília, DF: CNPq, 2026.

D'AMBROSIO, S.; MANCARELLA, A.; MANELLI, A. Utilization of hydrotreated vegetable oil (HVO) in a Euro 6 dual-loop EGR diesel engine: behavior as a drop-in fuel and potentialities along calibration parameter sweeps. Energies, v. 15, n. 19, art. 7202, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/en15197202.

DE CARVALHO, M. A. S.; ACHY, A. R. A.; SOARES JUNIOR, L. C. S.; FERREIRA, V. P.; DA SILVA, J. A. M.; PEPE, I. M.; TORRES, E. A. Mechanical and emissions performance of a diesel engine fueled with biodiesel, ethanol and diethyl ether blends. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 42, n. 4, art. 182, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/s40430-020-2269-7.

DEC, J. E. A conceptual model of DI diesel combustion based on laser-sheet imaging. SAE Technical Paper Series, n. 970873, p. 1–27, 1997. DOI: https://doi.org/10.4271/970873.

DEC, J. E. Advanced compression-ignition engines—understanding the in-cylinder processes. Proceedings of the Combustion Institute, v. 32, n. 2, p. 2727–2742, 2009. DOI: https://doi.org/10.1016/j.proci.2008.08.008.

GARCÍA OLIVER, J. M.; NOVELLA, R.; MICÓ, C.; BIN-KHALID, U.; LOPEZ-PINTOR, D. A numerical analysis of hydrotreated vegetable oil (HVO) and dimethoxymethane (OME1) blends combustion and pollutant formation through the development of a reduced reaction mechanism. International Journal of Engine Research, v. 25, n. 6, p. 1174–1190, 2024. DOI: https://doi.org/10.1177/14680874231226321.

GLAUDE, P.-A.; FOURNET, R.; BOUNACEUR, R.; MOLIÈRE, M. Adiabatic flame temperature from biofuels and fossil fuels and derived effect on NOx emissions. Fuel Processing Technology, v. 91, n. 2, p. 229–235, 2010. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.10.002.

GORLI, S. R.; RESAPU, R. R.; SAGARI, J. Effects of gaseous ammonia enriched third generation biodiesel on the evaluation of diesel engine operating parameters. International Journal of Hydrogen Energy, v. 196, art. 152562, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.152562.

GÓMEZ-MEYER, J.-S.; GOLLAHALLI, S. R.; PARTHASARATHY, R. N.; QUIROGA, J.-E. Laminar flame speed of soy and canola biofuels. CT&F – Ciencia, Tecnología y Futuro, v. 4, n. 5, p. 75–83, 2012.

HEYWOOD, J. B. Internal Combustion Engine Fundamentals. 2. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2018.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

HUNICZ, J.; KRZACZEK, P.; GĘCA, M.; RYBAK, A.; MIKULSKI, M. Comparative study of combustion and emissions of diesel engine fuelled with FAME and HVO. *Combustion Engines*, v. 184, n. 1, p. 72–78, 2021. DOI: https://doi.org/10.19206/CE-135066.

HUNICZ, J.; MIKULSKI, M.; SHUKLA, P. C.; GĘCA, M. S. Partially premixed combustion of hydrotreated vegetable oil in a diesel engine: Sensitivity to boost and exhaust gas recirculation. Fuel, v. 307, art. 121910, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121910.

JI, C.; YANG, X.; YANG, J.; QIANG, Y.; CAI, X. Numerical study of ammonia-hydrogen blending ratio and ignition timing on the combustion and emission characteristics of a gasoline rotary engine. Energy, v. 340, art. 139167, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.139167.

LAPUERTA, M.; ARMAS, O.; RODRÍGUEZ-FERNÁNDEZ, J. Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions. Progress in Energy and Combustion Science, v. 34, n. 2, p. 198–223, 2008. DOI: https://doi.org/10.1016/j.pecs.2007.07.001.

LIN, Y.; MANIGANDAN, S.; CHINNATHAMBI, A.; NASIF, O.; GAVUROVÁ, B.; JHANANI, G. K. *et al.* Role of chicken fat waste and hydrogen energy ratio as the potential alternate fuel with nano-additives: insights into resources and atmospheric remediation process. Environmental Research, v. 216, art. 114742, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114742.

LU, Z.; MA, M.; WANG, T.; LU, T.; WANG, H.; FENG, Y. *et al.* Numerical research of the in-cylinder natural gas stratification in a natural gas-diesel dual-fuel marine engine. Fuel, v. 337, art. 126861, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126861.

NEGRY, M. M. de O. Análise das variações em ciclos operacionais em um motor Otto em Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI). 2015. 84 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

OH, J.; OH, S.; KIM, C.; LEE, S.; LEE, S.; JANG, H. *et al.* Effect of multi-angle diesel injector nozzle on emission and efficiency of natural gas/diesel dual-fuel combustion in compression ignition engine. Fuel, v. 316, art. 123442, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123442.

PAYKANI, A.; KAKAEE, A. H.; RAHNAMA, P.; REITZ, R. D. Progress and recent trends in reactivity-controlled compression ignition engines. International Journal of Engine Research, v. 17, n. 5, p. 481–524, 2016. DOI: https://doi.org/10.1177/1468087415593013.

SANTOS, T. B.; FERREIRA, V. P.; TORRES, E. A.; SILVA, J. A. M.; ORDONEZ, J. C. Energy analysis and exhaust emissions of a stationary engine fueled with diesel–biodiesel blends at variable loads. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, v. 39, p. 3237–3247, 2017. DOI: https://doi.org/10.1007/s40430-017-0847-0.

SOARES JÚNIOR, L. C. S.; FERREIRA, V. P.; SILVA, J. A. M.; TORRES, E. A.; PEPE, I. M. Oxidized biodiesel as a cetane improver for diesel–biodiesel–ethanol mixtures in a vehicle engine. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, v. 40, art. 79, 2018. DOI: https://doi.org/10.1007/s40430-018-1029-4.

STONE, R. Introduction to Internal Combustion Engines. 4. ed. Warrendale, PA: SAE International; Macmillan Press, 2012.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

YIN, L.; TURESSON, G.; YANG, T.; JOHANSSON, R.; TUNESTÅL, P. Partially Premixed Combustion (PPC) Stratification Control to Achieve High Engine Efficiency. IFAC-PapersOnLine, v. 51, n. 31, p. 694–699, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.10.160.

ZHAO, W.; ZHU, C.; LIU, Y.; JI, Q.; LIU, J. Effects of compression ratio and EGR ratio on combustion stability and emission characteristics of natural gas/diesel engines with pre-injection strategy. Fuel, v. 415, art. 138508, 2026. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2026.138508.

ZHU, Z.; LI, Y.; SHI, C. Effect of natural gas energy fractions on combustion performance and emission characteristics in an optical CI engine fueled with natural gas/diesel dual-fuel. Fuel, v. 307, art. 121842, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121842.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.