REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

INJEÇÃO DE HIDROGÊNIO NOS MOTORES DIESEL: REVISÃO SISTEMÁTICA

HYDROGEN INJECTION IN DIESEL ENGINES: SYSTEMATIC REVIEW

INYECCIÓN DE HIDRÓGENO EN MOTORES DIESEL: REVISIÓN SISTEMÁTICA

Layra Beatriz da Silva Carvalho[1], Gabriel Coelho Rodrigues Alvares[1], Alex Pereira da Cunha[1], Paulo Sergio Barbosa dos Santos[1]

e6106820
https://doi.org/10.47820/recima21.v6i10.6820

PUBLICADO: 10/2025

RESUMO

A crescente demanda por soluções sustentáveis no setor de transportes tem impulsionado a busca por alternativas que reduzam as emissões de poluentes provenientes de motores a combustão interna. Nesse contexto, destaca-se a utilização do gás oxi-hidrogênio (HHO) como complemento ao diesel em motores operando no modo dual-fuel. Pesquisas indicam melhorias significativas no desempenho, como aumento de torque, maior eficiência térmica e redução no consumo específico de combustível. Além disso, foi constatada uma diminuição relevante nas emissões de carbono, embora permaneça a necessidade de um controle rigoroso para evitar o aumento na formação de NOx.

PALAVRAS-CHAVE: Gás oxi-hidrogênio (HHO). Motores diesel. Redução de emissões. Emissões de Nox. Combustão interna.

ABSTRACT

The growing demand for sustainable solutions in the transportation sector has driven the search for alternatives that reduce pollutant emissions from internal combustion engines. In this context, the use of oxyhydrogen gas (HHO) as a supplement to diesel in dual-fuel engines stands out. Research indicates significant improvements in engine performance, such as increased torque, thermal efficiency, and reduced specific fuel consumption. Furthermore, a significant decrease in carbon emissions has been observed, although strict control is required to prevent an increase in NOx.

KEYWORDS: *Oxyhydrogen gas (HHO). Diesel engines. Emissions reduction. Nox emissions. Internal combustion.*

RESUMEN

La creciente demanda de soluciones sostenibles en el sector del transporte ha impulsado la búsqueda de alternativas que reduzcan las emisiones contaminantes de los motores de combustión interna. En este contexto, destaca el uso de gas oxhídrico (HHO) como complemento del diésel en motores de doble combustible. Las investigaciones indican mejoras significativas en el rendimiento del motor, como un mayor par motor, mayor eficiencia térmica y una reducción del consumo específico de combustible. Además, se ha observado una disminución significativa de las emisiones de carbono, si bien se requiere un control estricto para evitar un aumento de NOx.

PALABRAS CLAVE: *Gas oxohidrógeno (HHO). Motores diésel. Reducción de emisiones. Emisiones de NO. Combustión interna.*

[1] UNESP - Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho".

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21

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.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

1. INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com as emissões de gases poluentes e a busca por fontes energéticas mais limpas têm incentivado o desenvolvimento de tecnologias voltadas à sustentabilidade dos motores de combustão interna. Nesse contexto, os motores diesel, amplamente empregados em veículos pesados e em aplicações industriais, permanecem como objeto de intensas pesquisas, principalmente no que diz respeito à redução de impactos ambientais e ao aumento da eficiência energética. Dentre as alternativas tecnológicas investigadas, a injeção de hidrogênio tem se destacado como uma abordagem promissora para operar em conjunto com o diesel, promovendo uma combustão mais limpa e eficiente (Zhen *et al.,* 2017).

Uma das estratégias mais estudadas é a aplicação do gás oxi-hidrogênio (HHO) em sistemas de combustão dual (*dual-fuel*), nos quais o hidrogênio é introduzido no coletor de admissão, mantendo-se o diesel como combustível principal. Diversos estudos experimentais indicam que essa configuração pode gerar ganhos consideráveis de desempenho, como aumento no torque, redução no consumo específico de combustível e elevação na eficiência térmica, especialmente em regimes de alta rotação (Felayati *et al.,* 2024). Essa abordagem explora a elevada reatividade do hidrogênio, aliada à robustez do ciclo diesel, resultando em melhorias no funcionamento do motor e na redução das emissões de poluentes atmosféricos.

Diante desse cenário, emerge a seguinte questão que guia o estudo: quais são os impactos técnicos e ambientais da injeção de hidrogênio em motores diesel, segundo a literatura científica atual? Essa indagação é fundamental para compreender os reais benefícios e limitações da tecnologia, bem como para avaliar sua viabilidade na transição energética.

Pesquisas recentes — como as de Felayati *et al.* (2024), Shirneshan *et al.* (2025), Ayad *et al.* (2024) e Jayabal (2024) — demonstram que, além dos ganhos de desempenho, a injeção de hidrogênio em motores diesel pode proporcionar importantes reduções nas emissões de carbono. No entanto, ressalta-se que, em determinadas condições operacionais, a presença de hidrogênio pode resultar no aumento das emissões de óxidos de nitrogênio (NOx), exigindo um controle rigoroso dos parâmetros de injeção e da dinâmica da combustão para garantir que os benefícios ambientais não sejam comprometidos.

Nesse sentido, o presente trabalho busca contribuir para o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos pela Organização das Nações Unidas (ONU), com foco nos ODS 7 (Energia limpa e acessível), ODS 9 (Indústria, inovação e infraestrutura) e ODS 13 (Ação contra a mudança do clima). A proposta visa investigar o uso do hidrogênio como combustível complementar no ciclo diesel, promovendo a inovação no setor de transportes e contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Estudos como o de Li *et al.*

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21
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.

(2023) destacam a relevância dos ODS 7 e 9 para a construção de um futuro energético sustentável baseado no hidrogênio, reforçando a importância da integração entre energia limpa, inovação tecnológica e ação climática.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Revisão sistemática da literatura

A revisão da literatura consiste em buscar, analisar e descrever um conjunto de conhecimentos existentes com o objetivo de responder a uma pergunta específica. O termo "literatura" abrange todas as fontes relevantes já publicadas sobre o tema, incluindo livros, artigos de periódicos e jornais, registros históricos, relatórios governamentais, teses, dissertações, entre outros (UNESP, 2015). Já a Revisão Sistemática (RS) é um método estruturado de investigação baseado em evidências da literatura científica. Essa técnica segue um protocolo previamente definido e etapas rigorosas, garantindo maior transparência e reprodutibilidade na coleta e análise das informações.

A revisão da literatura desempenha um papel fundamental na elaboração de trabalhos acadêmicos e científicos. Esse processo contribui para evitar a repetição de estudos já existentes, possibilita a reutilização e adaptação de pesquisas em diferentes contextos e escalas, e oferece uma base sólida para novas investigações. Além disso, permite identificar lacunas, limitações e inconsistências em estudos anteriores, bem como compreender os recursos metodológicos necessários para o desenvolvimento de uma pesquisa. Dessa forma, a revisão crítica da literatura fortalece a originalidade e a relevância científica de novos trabalhos, promovendo avanços significativos na área de estudo (Galvão *et al.,* 2019).

2.2. *Software* Start

Com o intuito de aprimorar a qualidade das pesquisas e otimizar as Revisões Sistemáticas (RS), o Laboratório de Pesquisa em Engenharia de *Software* (LaPES) desenvolveu a ferramenta StArt *(State of the Art through Systematic Reviews).* Seu objetivo é oferecer suporte aos pesquisadores, tornando a aplicação dessa metodologia mais estruturada, organizada e eficiente (LAPES, 2025).

O StArt foi criado para facilitar a realização de revisões sistemáticas da literatura científica, um tipo de estudo essencial para a síntese do conhecimento e para a identificação de lacunas em áreas específicas de pesquisa. A ferramenta gerencia e organiza as principais etapas envolvidas na RS e foi desenvolvida no Laboratório de Engenharia de *Software* da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), (LAPES, 2025).

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.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Ao iniciar o uso do *software*, o pesquisador cria um projeto de Revisão Sistemática da Literatura (RSL), como mostrado na Figura 1A. Na sequência, uma aba contendo as informações iniciais sobre o processo é exibida, conforme apresentado na Figura 1B.

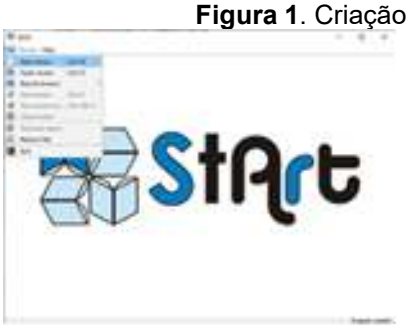
O processo tem início com o preenchimento do título da Revisão Sistemática da Literatura (RSL) e das informações dos pesquisadores participantes, conforme ilustrado na Figura 1C. Em seguida, o usuário deve inserir a descrição dos fundamentos da pesquisa, utilizando as abas de diálogo fornecidas pelo sistema (Figura 2), que orientam a estruturação inicial do estudo (Figura 1D).

A navegação entre as etapas ocorre por meio dos botões "*Next*", que permitem avançar, e *"Back",* que possibilitam retornar às telas anteriores. Após o preenchimento completo das informações solicitadas, o pesquisador finaliza essa etapa clicando no botão *"Finish"* (Figura 1E). Esse comando dá início à construção da árvore do projeto da RSL, conforme representado na Figura 1F.

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21
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.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Figura 1. Criação do projeto da RSL no *software* StArt.



A) Criação de arquivo para RSL



B) Caixa de orientações



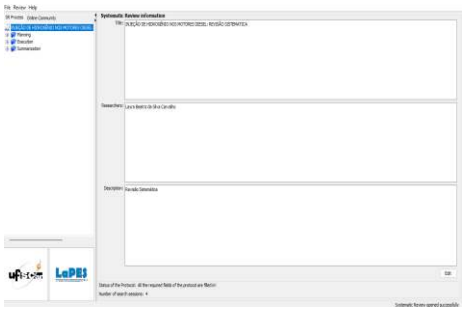
C) Título e Pesquisadores



D) Descrição da pesquisa



E) Última tela da caixa de diálogo



F) Tela do início da árvore de projeto da RSL

Fonte: Autores 2025

2.3. Protocolo da RSL

Com base nas questões centrais da pesquisa, foi elaborada uma lista de palavras-chave acompanhadas de seus respectivos sinônimos em inglês, conforme apresentado no Quadro 1. A partir dessa seleção, foram construídas *strings* de busca específicas para cada base de dados, respeitando as regras de operadores lógicos e sintaxe definidas nos manuais de uso de cada plataforma consultada.

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21

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.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Quadro 1. Parâmetros iniciais para RSL

Questão	Quais são os impactos técnicos e ambientais da injeção de hidrogênio em motores diesel, segundo a literatura científica atual?
Base de dados	***String* de Busca**
Scielo	*("hydrogen") AND ("Compression Ignition" OR "Diesel Engine")*
ScienceDirect	*("hydrogen") AND ("Compression Ignition" OR "Diesel Engine")*
Scopus	*("hydrogen") AND ("Compression Ignition" OR "Diesel Engine")*
Web of Science	*("hydrogen") AND ("Compression Ignition" OR "Diesel Engine")*

Fonte: Autores 2025

Após a definição dos termos de busca, foram determinados os critérios de inclusão e exclusão, descritos no Quadro 2. Esses critérios funcionam como diretrizes essenciais para a triagem dos estudos, assegurando maior rigor metodológico e precisão na seleção dos artigos mais pertinentes ao escopo da pesquisa.

Quadro 2. Critérios de inclusão ou exclusão

Critérios de Inclusão	**Critérios de Exclusão**
Idioma Inglês e/ou Português.	Outros idiomas.
Pesquisas que comparem motor diesel puro com motor diesel com hidrogênio.	Artigos com metodologia insuficiente ou sem dados claros.
Artigos com fontes confiáveis e atualizadas.	Baixa relação com a *Sting.*

Fonte: Autores 2025

Com os dados iniciais definidos, as informações foram inseridas no *software* StArt por meio da aba de planejamento, conforme orientado no protocolo da pesquisa. A questão central da Revisão Sistemática da Literatura (RSL) pode incluir subquestões. A seleção dos artigos é orientada por critérios previamente estabelecidos, como ano de publicação, originalidade e idioma (inglês ou português), todos especificados no protocolo.

Para incluir uma base de dados, o pesquisador deve marcá-la na caixa de seleção e adicioná-la clicando no botão *"Add"*. Esse procedimento deve ser repetido para cada base de dados na qual a busca será realizada. Os critérios de inclusão e exclusão (Quadro 2) são cadastrados em um único campo, sendo diferenciados por uma opção de seleção que permite marcar como *"Inclusion"* ou *"Exclusion"*.

O protocolo também permite a atribuição de um fator de qualidade aos estudos, que pode ser expresso por meio de uma pontuação ou por uma avaliação mais detalhada. Além disso, foram incluídos campos destinados aos elementos de extração, os quais representam os principais aspectos a serem analisados nos artigos selecionados.

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21
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.

Esses elementos são geralmente sintetizados em três perguntas-chave: “O que foi feito?”, “Como foi feito?” e “Quais foram os resultados obtidos?”.

Para complementar a organização e análise dos dados, também foram adicionados campos específicos para registrar informações sobre os locais dos estudos, bem como o uso de sensores e observações relevantes. Esses dados visam facilitar a sistematização das evidências e a elaboração do relatório final da RSL.

2.4. Processamento dos artigos

Com as *strings* de busca definidas, a pesquisa por artigos científicos foi realizada nas bases de dados selecionadas. Após a coleta, os arquivos foram baixados nos formatos *"bibtex"* ou *"ris",* compatíveis com o *software* StArt. A busca foi realizada com o suporte da *Virtual Private Network* (VPN) da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), que, por meio da Rede Eduroam e convênios institucionais, permite o acesso aos periódicos como, revistas científicas e bases de dados restritas.

Uma vez salvos em um computador local ou em uma máquina conectada à VPN, os arquivos foram importados para o *software* StArt, conforme exemplificado na Figura 2A. As bases utilizadas devem corresponder àquelas previamente definidas no protocolo de revisão (Figura 2B). Para iniciar o carregamento dos resultados, o usuário deve clicar com o botão direito sobre o projeto e selecionar a opção *“Add search session”* (Figura 2A), o que abre uma sequência de janelas para inserção da *string* de busca correspondente (Figura 2B).

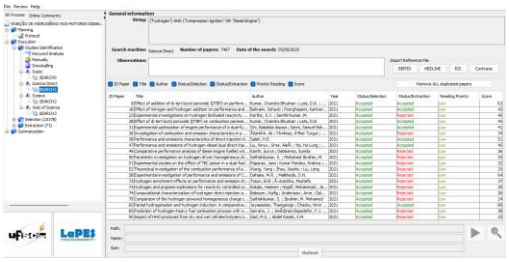
Durante esse processo, é possível registrar observações relevantes sobre a busca realizada. Para finalizar a etapa, abre-se uma caixa de diálogo para o carregamento dos arquivos (Figura 2C), onde se deve selecionar o formato apropriado *(bibtex* ou *ris*). O *software* também oferece a opção de identificação automática de entradas duplicadas. Após o carregamento bem-sucedido, um *pop-up* de confirmação é exibido. Caso haja registros repetidos, é possível eliminá-los facilmente com o comando *“Remove ALL duplicate papers”* (Figura 2C e D), garantindo a integridade e a organização dos dados coletados.

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21
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.

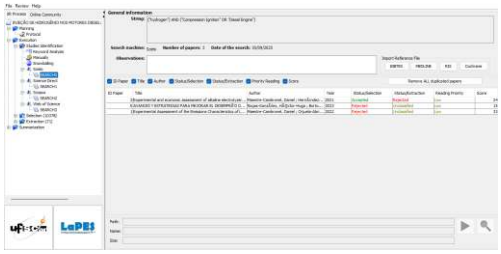
Figura 2. Inserção de arquivo contendo referências bibliográficas no StArt



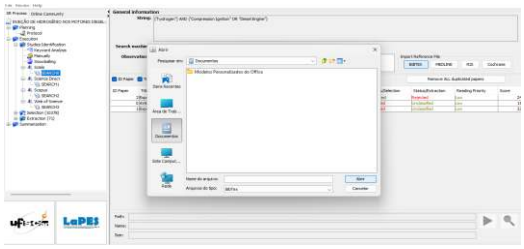
a) Adição de novo arquivo



b) Inserção da *String* de busca



c) Interface de seleção do arquivo *"bibtex"* ou *"ris"*



d) Interface de seleção do arquivo *"bibtex"* ou *"ris"*

Fonte: Autores 2025

Após a inserção de todos os arquivos no *software* StArt, é possível realizar uma análise da frequência das palavras-chave previamente definidas no protocolo. Essa funcionalidade permite verificar a aderência dos artigos recuperados aos termos de interesse da pesquisa. A Figura 4 ilustra essa análise, destacando visualmente a correspondência entre as palavras-chave do protocolo e aquelas encontradas nos títulos, resumos e palavras-chave dos artigos.

O *software* adota um sistema de cores para facilitar a interpretação dos resultados: verde indica correspondência exata entre os termos; amarelo, similaridade parcial ou palavras semanticamente próximas; e laranja, termos diferentes dos originalmente especificados. Essa visualização contribui para uma triagem inicial mais precisa, auxiliando na identificação de estudos potencialmente relevantes para a Revisão Sistemática da Literatura (RSL).

O *software* StArt oferece uma funcionalidade específica para filtrar e classificar os artigos com base nas palavras-chave estabelecidas no protocolo da pesquisa. Essa ferramenta permite avaliar os artigos por meio de uma pontuação atribuída à correspondência dos termos, organizando os resultados em uma matriz de quadrantes.

A classificação por pontuação facilita a identificação da relevância dos estudos: os artigos com maior aderência às palavras-chave obtêm pontuações mais altas e são posicionados nos quadrantes superiores, enquanto os de menor pertinência são alocados nos quadrantes inferiores.

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21
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.

Essa organização visual permite que os quadrantes com baixa pontuação _ geralmente associados a conteúdos menos relacionados às questões centrais da RSL, sejam facilmente descartados.

É importante ressaltar que esse procedimento de filtragem e exclusão deve ser realizado apenas após a inserção de todos os arquivos no sistema. Essa abordagem torna o processo de seleção mais ágil e eficiente, garantindo que o foco permaneça nos artigos mais relevantes para os objetivos do estudo.

A etapa seguinte envolve a atribuição de uma pontuação (score) a cada artigo, com base na análise do título e do resumo, a fim de verificar sua conformidade com os critérios de inclusão e exclusão estabelecidos no protocolo. Para facilitar essa avaliação, o *software* permite a visualização rápida dos resumos por meio de um duplo clique sobre o artigo selecionado. Após essa triagem inicial, os artigos são classificados conforme sua relevância e encaminhados para a fase de extração de dados. Nessa etapa, é realizada a leitura completa de cada estudo, com o preenchimento dos campos previamente definidos no protocolo como objetivos, metodologia, resultados e demais elementos considerados essenciais para a construção da pesquisa.

Com base nessa análise detalhada, decide-se se o artigo será ou não incluído no relatório final da Revisão Sistemática da Literatura, garantindo que apenas os estudos mais alinhados com os objetivos e critérios da pesquisa componham os resultados

O *software* StArt permite a exportação dos dados extraídos em um arquivo com extensão ".xlsx", facilitando a organização e análise dos resultados. Para gerar esse relatório, o usuário deve acessar a opção "Geração de Relatório" no menu superior e, em seguida, selecionar os filtros e parâmetros desejados.

É possível personalizar quais informações serão incluídas no arquivo, como critérios aplicados, respostas aos elementos de extração, fatores de qualidade, entre outros. O sistema também permite definir o diretório de destino para o salvamento do arquivo, promovendo maior organização, segurança e acessibilidade aos dados consolidados da Revisão Sistemática da Literatura.

A Figura 3 exibe o organograma do *software* StArt, que representa a organização funcional dos blocos de atividades disponíveis na ferramenta. Esses blocos refletem as principais etapas da Revisão Sistemática da Literatura (RSL) e podem ser seguidos de forma sequencial ou de acordo com a lógica definida no protocolo de pesquisa, permitindo ajustes dinâmicos ao longo do processo para garantir maior precisão nos resultados.

Além de mostrar o fluxo de trabalho, o organograma apresenta o número de artigos classificados em cada fase, desde a busca inicial até a seleção final. Essa visualização facilita o acompanhamento do progresso da RSL, proporcionando uma visão geral clara, estruturada e orientada por dados sobre o desenvolvimento da revisão.

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21
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.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Figura 3. Organograma do *software* StArt



Fonte: Autores 2025

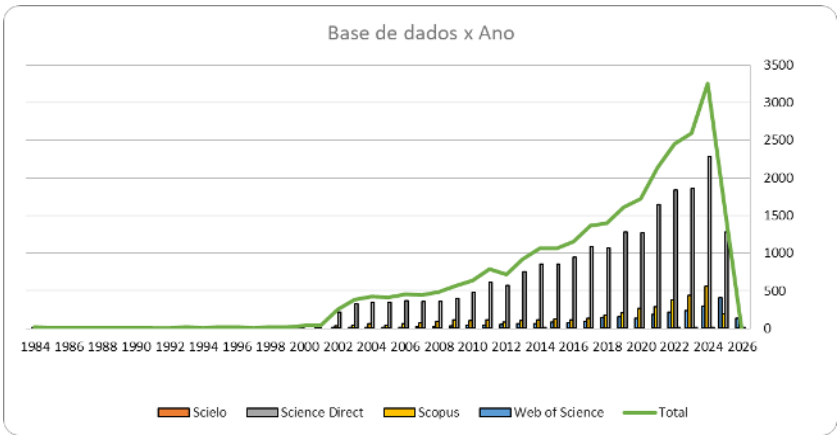
3. RESULTADO E DISCUSSÕES

O Gráfico 1 ilustra a distribuição dos artigos conforme as bases de dados utilizadas na pesquisa. A análise do gráfico revela que a maioria dos estudos relevantes foi publicada a partir de 2019, indicando um aumento significativo na produção científica sobre o tema nos últimos anos. Esse crescimento evidencia o fortalecimento do interesse da comunidade acadêmica e científica na área abordada, refletindo tendências atuais e contribuindo para a consolidação do conhecimento no campo investigado.

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21
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.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Gráfico 1. Distribuição dos artigos segundo as bases de dados

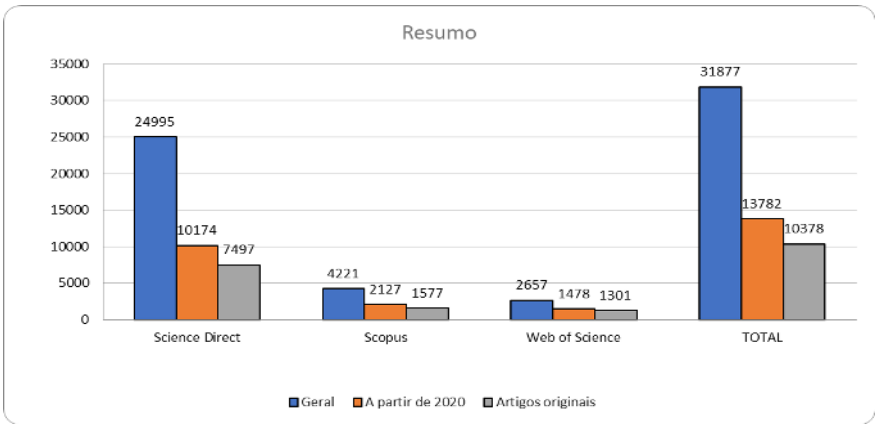


Fonte: Autores 2025

Para começar a Revisão Sistemática da Literatura (RSL), foram feitas buscas em cinco bases de dados: IEEE, SciELO, Science Direct, Scopus e Web of Science, usando a *string* de busca definida anteriormente. Essas buscas permitiram encontrar uma quantidade significativa de artigos relacionados ao tema da pesquisa.

Os resultados obtidos em cada base estão apresentados no Gráfico 2, que ilustra de forma simples quantos artigos foram encontrados em cada uma delas. Esse levantamento inicial ajuda a entender quais bases trazem mais conteúdo sobre o assunto estudado.

Gráfico 2. Quantidade de publicações durante os anos



Fonte: Autores 2025

Para garantir a escolha de estudos mais recentes, foi definido um recorte temporal entre os anos de 2020 ha 2026. Dentro desse período, foram selecionados 10378 artigos, conforme mostrado na Tabela 1, que apresenta a quantidade de textos encontrados em cada base de

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21
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.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

dados. Entre as bases utilizadas, Science Direct foi a que teve o maior número de artigos selecionados, destacando-se como uma das mais relevantes para o tema da pesquisa. Esses dados reforçam como o uso da técnica de Revisão Sistemática da Literatura (RSL) contribui para identificar, de forma mais clara e objetiva, os estudos mais adequados e atualizados para a construção do trabalho.

Tabela 1. Quantitativos de artigos adquiridos nas bases de dados

Base de Dados	Geral
Scielo	4
Science Direct	24995
Scopus	4221
Web of Science	2657
Total	31877

Fonte: Autores 2025

Após a etapa de pesquisa e filtragem, foram selecionados 30 artigos que apresentaram maior alinhamento com os objetivos do estudo. Com base nesses trabalhos, extraídos por meio do *software* StArt, foi criada uma nuvem de palavras-chave, ilustrada na Figura 4.

Essa nuvem destaca os termos mais frequentes e relevantes encontrados nos artigos selecionados, permitindo uma visualização clara dos conceitos mais recorrentes e diretamente ligados ao tema da pesquisa. Esse recurso contribui para reforçar a compreensão sobre os focos principais abordados na literatura científica analisada.

Figura 4. Nuvem de palavras



Fonte: Autores 2025

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21
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.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Por fim, foi elaborado um resumo dos 30 artigos selecionados, com o objetivo de sintetizar as principais informações de cada estudo. Esse resumo destaca os objetivos de pesquisa, as metodologias utilizadas e os resultados alcançados, permitindo uma compreensão clara e comparativa dos conteúdos analisados.

Essa etapa final é essencial para consolidar o conhecimento extraído da literatura, identificar padrões, contribuições relevantes e possíveis lacunas, além de fornecer uma base sólida para a discussão e o desenvolvimento de novas pesquisas na área.

O estudo avaliou o desempenho e as emissões de um motor diesel modificado para operar com injeção de hidrogênio em diferentes proporções, mantendo o diesel como combustível principal. Os ensaios em bancada foram realizados sob distintas cargas e rotações, analisando torque, consumo específico de combustível, eficiência térmica e emissões de CO_2, NOx e hidrocarbonetos. Os resultados mostraram que a adição de hidrogênio elevou a eficiência térmica e reduziu o consumo de diesel, além de diminuir significativamente as emissões de CO_2 e HC. Contudo, em determinadas condições, verificou-se aumento nas emissões de NOx, apontando a necessidade de estratégias de controle adicionais. De forma geral, a combinação de hidrogênio e diesel se apresenta como alternativa promissora para tornar os motores de ignição por compressão mais limpos e eficientes (Zhen *et.al,* 2020).

A pesquisa investigou o desempenho e as emissões de um motor diesel em modo *dual fuel*, operando com hidrogênio como combustível secundário e adição do aditivo *di-tert butyl peroxide* (DTBP). O estudo utilizou um motor monocilíndrico de 3,5 kW, adaptado para injeção de hidrogênio na admissão. Foram testadas misturas com 1% a 5% de DTBP e até 40% de substituição do diesel por hidrogênio, em diferentes condições de carga. Os melhores resultados foram obtidos com 1% de DTBP e 40% de hidrogênio, atingindo 87,5% de eficiência térmica e expressivas reduções nas emissões: NOx (33,82%), CO (38,66%), HC (35,56%) e fumaça (39,34%). O DTBP contribuiu para o aumento do número de cetano, favorecendo a ignição, enquanto o hidrogênio, devido à sua alta reatividade, intensificou a combustão. A combinação de ambos mostrou ser mais eficaz para melhorar a eficiência do motor e reduzir impactos ambientais (Kumar *et al.,* 2020).

O estudo avaliou o uso combinado de hidrogênio e biocombustível derivado da casca da castanha de caju (TC-CNSL) em motores diesel no modo bicombustível, visando redução de emissões e melhoria do desempenho. O biocombustível foi produzido por craqueamento térmico e utilizado em mistura B20 com diesel. O motor monocilíndrico operou com diferentes fluxos de hidrogênio e sistema EGR resfriado para mitigar as emissões de NOx. Os resultados experimentais mostraram que o enriquecimento com hidrogênio aumentou a eficiência térmica e reduziu HC, CO e fuligem, embora tenha elevado NOx, compensado pela aplicação de EGR entre 10% e 30%. A combinação otimizada de B20, hidrogênio e EGR proporcionou bom desempenho

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.

do motor, menores emissões de poluentes e viabilidade no uso de um combustível alternativo renovável e de baixo custo (Loganathan *et al*, 2020).

O estudo analisou o uso combinado de biodiesel hidrogenado de Karanja e a indução de hidrogênio no ar de admissão em um motor diesel turboalimentado operando com B20. Duas estratégias foram testadas: hidrogenação do biodiesel, para melhorar sua qualidade de combustão, e injeção de hidrogênio, visando aumentar a eficiência. Os resultados mostraram que o hidrogênio melhorou a eficiência térmica e a combustão, enquanto o biodiesel hidrogenado reduziu as emissões de NO. No entanto, a indução de hidrogênio aumentou as emissões de NOx, evidenciando o desafio de equilibrar desempenho e emissões. A combinação das abordagens se mostrou promissora para otimizar motores a B20 (Jeyaseelan *et al*, 2021).

O estudo avaliou numericamente os efeitos da injeção direta de hidrogênio em um motor diesel monocilíndrico a 25% de carga, utilizando o *software* ANSYS Forte, validado com dados experimentais. Foram simuladas três taxas de injeção (H5, H10 e H15) e três tempos de injeção (10°, 15° e 20° antes do PMS). Os resultados indicaram que a pressão e temperatura máximas no cilindro, a eficiência térmica e o IMEP aumentaram com o acréscimo de hidrogênio e injeções mais antecipadas. A pressão máxima subiu de 56,4 bar (diesel puro) para 64,7 bar (H15), e a eficiência térmica de 43,4% para 58,8%. Houve aumento nas emissões de NOx e redução de CO. A melhor performance foi obtida com injeção a 20° BTDC, mostrando que a estratégia é eficaz, mas requer controle rigoroso das emissões (Bayramoğlu *et al*, 2021).

A análise avaliou o desempenho e as emissões de um motor diesel de injeção direta utilizando misturas de diesel, óleo de jojoba e butanol, com adição de peróxido de hidrogênio (H_2O_2). Os testes foram conduzidos a 1500 rpm sob diferentes cargas, sem modificações no motor. Inicialmente, determinou-se que a mistura ideal era composta por 87% diesel, 5% óleo de jojoba e 8% butanol (DJ5B8), apresentando bom desempenho e redução de CO e HC, embora com aumento de NOx. Em seguida, a mistura DJ5B8 foi emulsificada com H_2O_2 em proporções de 5% a 20%. A adição de 5% de H_2O_2 proporcionou a melhor eficiência térmica e reduziu NOx em 13,5%, sem aumento significativo no consumo específico de combustível. Misturas com mais de 10% de H_2O_2 reduziram NOx em até 39%, mas elevaram CO, HC e consumo. Assim, a configuração DJ5B8 com 5% de H_2O_2 mostrou o melhor equilíbrio entre desempenho e emissões (Saleh, 2021).

O estudo explorou o desempenho e as emissões de um motor de ignição por compressão operando com injeção direta dupla de hidrogênio e diesel (H2DDI). Um motor diesel monocilíndrico foi modificado para incluir um injetor de hidrogênio de alta pressão no cabeçote, operando com substituição energética de até 50% por hidrogênio. Foram testadas diferentes temporizações de injeção de H_2 (de 180 a 20 °CA antes do ponto morto superior), mantendo constante a fase de combustão. Os resultados mostraram que a injeção direta de hidrogênio

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.

permite evitar pré-ignição e detonação, além de melhorar a eficiência térmica (atingindo até 47%) e reduzir ruídos em até 6 dB. As emissões de NOx aumentaram moderadamente (até 11 g/kWh), mas houve queda significativa na opacidade da fumaça e nos níveis de CO e hidrocarbonetos não queimados. A melhor combinação entre eficiência e emissões foi alcançada com 50% de hidrogênio e injeção a 40 °CA bTDC (Ângulo de Virabrequim antes do Ponto Morto Superior) (Liu *et.al*, 2021).

O estudo avaliou, por meio de simulação Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) validada experimentalmente, o efeito da adição de hidrogênio e nitrogênio no desempenho e nas emissões de um motor operando em modo de ignição por compressão controlada por reatividade (RCCI), com gasolina e diesel como combustíveis base. O hidrogênio foi injetado diretamente na câmara de combustão em proporções de 1% a 4%, e o impacto combinado com o nitrogênio foi analisado. Os resultados indicaram que o hidrogênio aumentou a pressão e a temperatura no cilindro, devido à sua alta reatividade e poder calorífico, atingindo até 15,12 MPa e 3578,5 K. Observou-se redução significativa na emissão de fuligem, enquanto NOx, CO e HC aumentaram, principalmente devido à diminuição do oxigênio disponível e à formação de zonas de combustão incompleta. Conclui-se que a adição de hidrogênio pode melhorar o desempenho do motor, mas requer controle preciso para equilibrar eficiência e emissões (Bahrami *et al*, 2021).

A pesquisa avaliou os efeitos do aditivo DTBP no diesel em um motor de ignição por compressão operando em modo bicombustível com hidrogênio. Testes foram realizados em um motor monocilíndrico de 3,5 kW, variando as proporções de hidrogênio (14% a 40%) e DTBP (1% a 5%), sob diferentes cargas. Os resultados mostraram que o hidrogênio aumentou as emissões de NOx em altas cargas, enquanto o DTBP ajudou a reduzir o pico de liberação de calor e a temperatura no cilindro. A melhor combinação foi com 14% de hidrogênio e 1% de DTBP, reduzindo a temperatura e o calor em até 10% e 2%, respectivamente, embora as emissões de NOx ainda tenham aumentado em 60%. O estudo concluiu que o uso combinado pode controlar a combustão, mas exige ajuste cuidadoso para minimizar impactos ambientais (Kumar *et al*, 2021).

O levantamento observou os resultados do uso de misturas de gás natural comprimido com hidrogênio (HCNG) e biodiesel de Moringa como combustível alternativo em motores de ignição por compressão, visando reduzir emissões e melhorar o desempenho. A literatura base foi revisada para destacar os benefícios ambientais do uso de hidrogênio e gás natural, como maior eficiência térmica, menor emissão de CO, HC e CO_2, mas com aumento de NOx. A pesquisa avançou ao propor o uso inédito do biodiesel de Moringa combinado com diferentes proporções de HCNG. Misturas foram preparadas experimentalmente e testadas em motores CI para determinar a melhor combinação em termos de desempenho, combustão e emissões. Os resultados indicaram que o uso combinado de HCNG e biodiesel de Moringa melhora a eficiência

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.

do motor, proporciona combustão mais limpa e reduz substancialmente as emissões, com potencial sustentável e ecológico para substituir combustíveis fósseis (Oni *et al*, 2021).

O estudo focou nas repercussões do uso de hidrogênio como combustível suplementar em motores diesel (ignição por compressão) operando em modo bicombustível, utilizando também misturas de 1-pentanol e diesel (D70P30). O experimento foi realizado em um motor monocilíndrico CRDI refrigerado a água, com variações no tempo de injeção (9°, 12° e 15°bTDC) e diferentes cargas, com hidrogênio injetado no coletor de admissão a 12 LPM. As análises abrangeram desempenho, emissões e características de combustão com auxílio de sensores e analisadores de gases AVL. Os resultados mostraram que o enriquecimento com hidrogênio reduziu as emissões de CO, HC e CO_2 em todas as cargas, melhorou a eficiência térmica em certas condições, mas aumentou NOx em altas taxas de hidrogênio. O tempo de injeção influenciou significativamente os parâmetros de combustão e desempenho, e a combinação D70P30 com hidrogênio demonstrou ser uma alternativa viável para atender aos padrões de emissão BS-VI e melhorar a sustentabilidade energética (Seelam *et al*, 2022).

O estudo analisou o uso de hidrogênio e GLP como combustíveis secundários em motores diesel operando no modo bicombustível, com foco em desempenho, emissões e estabilidade. Foram aplicadas estratégias avançadas de injeção (como PPCI-RCCI e injeção dividida) para avaliar o impacto do atraso de ignição (ID). Utilizando a Metodologia de Superfície de Resposta (RSM), foram otimizados múltiplos parâmetros simultaneamente, superando abordagens tradicionais baseadas em um fator por vez (OFAT). Os resultados mostraram que o hidrogênio reduziu CO, CO_2 e fuligem, mas elevou NOx em altas proporções. A estratégia multifatorial melhorou a eficiência térmica e a estabilidade, com boa correlação entre modelos e dados experimentais. O estudo se destaca por integrar ID, estabilidade e desempenho em motores bicombustíveis com hidrogênio e GLP (Amitav *et al*, 2022).

A pesquisa discutiu as influências do efeito do enriquecimento do gás natural com hidrogênio no desempenho e nas emissões de um motor diesel de ignição por compressão operando em modo duplo combustível. Foram utilizadas seis misturas de diesel com gás natural e gás natural-hidrogênio em diferentes proporções (até 20% H_2), aplicadas ao ar de admissão do motor Lombardini LDW 1003. Os testes foram conduzidos em dois regimes de rotação (1500 e 1750 rpm) e quatro níveis de carga. Os resultados mostraram que a mistura com 20% de hidrogênio (Mix6) gerou a maior pressão no cilindro (59,9 bar), indicando melhor combustão. A eficiência térmica (BTE) aumentou com a carga, atingindo 36% com Mix2. A menor emissão de CO, HC e CO_2 foi obtida com Mix1, enquanto o NO_x teve aumento nas misturas com maior teor de H_2. O consumo específico de combustível (BSFC) caiu até 57% com algumas misturas em alta carga. Conclui-se que o uso de gás natural enriquecido com hidrogênio melhora a eficiência do

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21
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.

motor e reduz emissões nocivas, sendo Mix3 a mistura mais equilibrada em desempenho e emissões em alta carga (Esenay *et al*, 2022).

A análise concentrou-se nos efeitos do uso de biogás reformado, rico em hidrogênio, em um motor diesel *common Rail* operando em modo de duplo combustível. O biogás simulado foi enriquecido com hidrogênio por meio de reforma seca e parcial oxidativa em reator catalítico, resultando em uma mistura contendo 48% de H_2. Este combustível foi injetado em um motor monocilíndrico de ignição por compressão (CI) com diesel como combustível piloto. Avaliaram-se parâmetros de desempenho e emissão em duas taxas de fluxo de gás (0,5 e 1,5 kg/h) sob diferentes cargas. Os resultados mostraram que a adição de 0,5 kg/h melhorou a eficiência térmica em até 10,5% e reduziu o consumo específico de energia em 13,6%. Emissões de HC, NO_x e CO_2 diminuíram consideravelmente, enquanto CO aumentou com maiores fluxos de gás. A substituição parcial do diesel foi eficiente, especialmente em cargas elevadas, devido à melhor inflamabilidade e velocidade de chama do hidrogênio, embora fluxos excessivos prejudicassem o desempenho pela combustão incompleta. O estudo conclui que a mistura reformada é promissora para motores diesel, com potencial de redução de emissões e melhor aproveitamento energético (Himanshu *et al,* 2022).

A pesquisa mapeou os resultados obtidos através do desempenho e as emissões de um motor a diesel de ignição por compressão modificado para operar com hidrogênio como combustível alternativo. Utilizou-se um motor diesel de quatro cilindros, refrigerado a água, com injeção direta, no qual o hidrogênio foi introduzido a uma taxa controlada de 25 L/min, com e sem recirculação de gases de escape (EGR). A eficiência térmica aumentou cerca de 5% em relação ao diesel puro (atingindo 23,5% sem EGR), devido à melhor mistura e combustão do hidrogênio. Observou-se ainda que a adição de hidrogênio reduziu significativamente as emissões de CO_2, já que o hidrogênio não contém carbono. No entanto, a introdução de EGR reduziu levemente a eficiência térmica. O estudo conclui que, além do ganho em desempenho e redução de emissões, o uso de hidrogênio em motores diesel exige uma estrutura regulatória de longo prazo e integração entre setores para viabilizar sua adoção em escala comercial (Johari *et al*, 2022).

Este estudo, parte do projeto HYMAR, investigou os efeitos da adição de hidrogênio em um motor diesel auxiliar marítimo antigo (Deutz A12L 714, 12 cilindros, 19 L, sem EGR), operando a 20% da carga nominal. Hidrogênio de alta pureza foi introduzido na admissão de ar em diferentes taxas de fluxo (até 1,7% do volume de ar admitido). Foram monitoradas variáveis como temperatura dos gases de escape, emissões de CO, CO_2, NO, NO_2, UHCs e opacidade da fumaça. Os resultados mostraram que a adição de hidrogênio levou à redução das emissões de hidrocarbonetos não queimados (UHC) em até 30% e do NO em cerca de 18%, sem ocorrer fenômenos de detonação ou mudanças significativas na pressão do cilindro. As emissões de CO_2 e fumaça permaneceram praticamente constantes, e a temperatura dos gases de escape não

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.

variou significativamente. Apesar de a literatura indicar possível aumento de NOx com hidrogênio, neste experimento a redução de NO foi observada, possivelmente devido à baixa carga e à pequena quantidade de hidrogênio adicionada. Os resultados são promissores e indicam que pequenas adições de hidrogênio já podem contribuir para reduzir emissões nocivas em motores diesel marítimos (Mallouppas *et al*, 2022).

Investigou-se numericamente os efeitos da adição de hidrogênio em um motor monocilíndrico diesel operando em modo *dual fuel* com gás natural sob carga parcial, utilizando o *software* ANSYS Forte, o modelo CFD foi validado com dados experimentais. Dois modos foram analisados: no primeiro, a energia dos gases foi dividida entre hidrogênio e gás natural mantendo constante o diesel (25% da energia); no segundo, o hidrogênio foi adicionado como energia extra. Observou-se que a adição de hidrogênio melhorou a eficiência térmica em até 21% (Modo 1) e 18% (Modo 2), com ganhos de até 36% em potência e 30% na redução do consumo específico de combustível. As emissões de HC, CO e material particulado diminuíram em até 89%, 86% e 84%, respectivamente. Em contrapartida, as emissões de NOx aumentaram (11–12%) devido ao aumento da temperatura local causado pela rápida combustão do hidrogênio. A proporção ideal foi de 25% de hidrogênio e 50% de gás natural no Modo 1 e 15% de hidrogênio com 75% de gás natural no Modo 2. O estudo conclui que a combinação adequada de hidrogênio e gás natural pode melhorar significativamente o desempenho e reduzir emissões indesejadas, exceto NOx, que requerem estratégias adicionais de mitigação (Ekin *et al*, 2022).

No impacto da injeção de gás oxi-hidrogênio em motores diesel quanto ao desempenho e às emissões de carbono, o experimento foi conduzido com variações na rotação (1400 a 2200 rpm), carga (baixa e média) e diâmetros de injetores (4, 6 e 8 mm) de oxi-hidrogênio. O gás foi gerado por eletrólise e injetado no coletor de admissão, enquanto o diesel foi injetado convencionalmente na câmara de combustão. Os resultados mostraram que a adição de oxi-hidrogênio melhorou o torque, reduziu o consumo específico de combustível e aumentou a eficiência térmica, especialmente em rotações elevadas. As emissões de CO_2 e CO diminuíram significativamente com determinados diâmetros de injetores, sendo o de 4 mm mais eficaz em carga média. A rápida combustão do hidrogênio após a ignição do diesel foi o principal fator para essas melhorias. O estudo destaca o potencial dessa tecnologia para motores mais limpos e eficientes (Bayramoğlu *et al,* 2023).

Foram simuladas três estratégias de turboalimentação em motores de combustão interna a hidrogênio (H_2ICE) visando melhor desempenho e menor emissão de NOx: FGT, VGT e 2-stage. O modelo foi validado com dados de dinamômetro em motor pesado com injeção direta de baixa pressão e ignição por centelha, operando com CMR de 2,4, condição que assegura baixas emissões. Todos os sistemas alcançaram carga plena dentro dos limites de NOx. O VGT apresentou a maior eficiência térmica de freio (BTE). O 2-stage obteve melhor desempenho em

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.

altitudes elevadas. Já o FGT mostrou menor margem operacional. Conclui-se que a escolha da estratégia de turboalimentação impacta fortemente desempenho, eficiência e aplicabilidade do H_2ICE, sendo o 2-stage o mais indicado para aplicações severas e em grande altitude (Baris *et al*, 2023).

Para o uso de misturas enriquecidas com hidrogênio e nanopartículas de óxido de magnésio (MgO) em um motor diesel de ignição por compressão (CI), foram testadas quatro amostras: diesel puro, diesel com 50 ppm de MgO, e duas misturas com 10% e 20% de hidrogênio, ambas contendo 50 ppm de MgO. Os testes foram realizados em diferentes cargas (6 a 24 N-m) em um motor monocilíndrico de quatro tempos, avaliando desempenho, consumo, combustão e emissões. Os resultados mostraram que a mistura com 20% de hidrogênio e MgO apresentou o melhor desempenho, com eficiência térmica de 37% e taxa de liberação de calor de 75 J/°grau. Além disso, houve redução significativa das emissões de CO, HC, CO_2 e NOx, devido à melhor queima, menor conteúdo de carbono e maior presença de oxigênio no combustível. O estudo conclui que a adição de hidrogênio combinada com nanopartículas melhora a eficiência e reduz poluentes sem comprometer o desempenho do motor (Anupong *et al,* 2023).

Este estudo experimental analisou o uso de óleo de pirólise de plástico *Low-density Polyethylene* (LDPE), óleo de pirólise de resíduos de polietileno de baixa densidade (WLPO) como combustível principal em um motor de ignição por compressão (CI) de 5,2 kW, com enriquecimento por hidrogênio em modo *dual-fuel.* O WLPO foi produzido via pirólise de resíduos plásticos de uso único e testado com diferentes taxas de indução de hidrogênio (3, 6, 9 e 12 lpm). O desempenho, combustão e emissões foram comparados com diesel e WLPO puro. A indução de 12 lpm de hidrogênio proporcionou a melhor eficiência térmica (39,48%), maior pressão no cilindro (75,05 bar) e menor atraso de ignição. Também resultou em grandes reduções nas emissões de CO (−71%), HC (−30%), CO_2 (−50%) e fumaça (−36%) em comparação ao diesel. Porém, houve um aumento de NO_x (+12%). O estudo conclui que a combinação WLPO+hidrogênio é uma alternativa promissora para motores CI, promovendo o reaproveitamento de plásticos e redução de poluentes, com necessidade de controle adicional de NO_x (Muthukumar *et al,* 2024).

Foram realizados experimentos comparativos com um motor diesel de ignição por compressão (CI) operando em modo *dual-fuel*, utilizando misturas de hidrogênio/diesel e amônia/diesel. O motor foi testado em regime de carga e rotação constantes (0,7 MPa e 1500 rpm), com diferentes frações energéticas de combustíveis alternativos (8%, 12%, 24% e 32%). A análise abrangeu características de combustão, estabilidade operacional, desempenho e emissões. Para o caso com hidrogênio, a fração ótima foi de 24%, resultando na maior eficiência térmica (39,8%), operação estável e menores emissões de HC, CO, CO_2 e material particulado. Contudo, houve um aumento expressivo nas emissões de NO_x. Os dados foram coletados por

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.

meio de sensores de pressão, analisadores de gases e equipamentos de aquisição em um motor modificado com alimentação de gás pelo coletor de admissão. Os resultados indicam que o uso de hidrogênio em motores CI é promissor em termos de desempenho e emissões, embora exija estratégias para mitigar o aumento de NO_x (Jamrozik *et al*, 2024).

Propõe-se modelos preditivos de emissão de NOx em motores de ignição por compressão (diesel) operando com hidrogênio no modo *dual fuel.* Foram desenvolvidos três tipos de modelos: modelos de estado estacionário (SSM), quase-estacionário (QSSM) e sequencial de transientes (TSM), usando redes neurais artificiais e redes recorrentes (LSTM e GRU), com abordagens *black-box* (BB) e *Gray-box* (GB). O motor experimental utilizado foi um diesel de médio porte, modificado para injetar hidrogênio no coletor de admissão. A base de dados envolveu mais de 82 mil ciclos de motor em regime altamente transiente. Os modelos GB incorporaram saídas de modelos físicos 1D, aumentando a precisão. Os resultados mostraram que os modelos TSM foram os mais precisos, com o modelo GB-LSTM alcançando $R^2 > 0,97$ e MAPE de 7,4%. Já o modelo BB-GRU, com $R^2 > 0,96$ e previsão em tempo real, foi indicado para aplicações com restrições computacionais. O estudo conclui que a modelagem híbrida é eficaz para prever emissões transientes de NOx em motores diesel-hidrogênio, com potencial para uso em controle embarcado e *hardware-in-the-loop* (Shahpouri *et al,* 2024).

Quanto aos efeitos da adição de hidrogênio em um motor de ignição por compressão (diesel) alimentado com biodiesel de óleo de palma (B100), utilizando configuração *dual-fuel*, foi realizado um experimento com motor monocilíndrico, operando a 50% de carga e rotação constante, variando o fluxo de hidrogênio entre 2,5 e 10 l/min. A alimentação de hidrogênio ocorreu pelo coletor de admissão, enquanto o biodiesel foi injetado diretamente. Os resultados mostraram que a adição de hidrogênio aumentou a potência do motor em até 0,8%, melhorou a eficiência térmica em até 65% e reduziu o consumo específico de combustível em até 82,35%. Houve também diminuição significativa das emissões de fumaça (de 62,9% para 17,5%), mas um aumento de 18,3% nas emissões de NO. A temperatura dos gases de escape também subiu, devido ao maior poder calorífico do hidrogênio. Conclui-se que o uso de hidrogênio melhora o desempenho e reduz algumas emissões, sendo promissor para motores diesel (2024).

Para efeitos combinados da adição de hidrogênio e da recirculação de gases de escape (EGR) em um motor de ignição por compressão (CI) alimentado com biodiesel de microalgas, foram utilizadas cinco taxas de substituição de hidrogênio (de 10,4 a 54 g/h) e três níveis de EGR (5%, 10% e 15%) para avaliar a eficiência térmica, consumo energético e emissões. Os testes foram realizados em um motor monocilíndrico de 5,2 kW, com medições padronizadas em diferentes cargas. Os resultados mostraram que a mistura de biodiesel com 43,2 g/h de H_2 produziu o melhor desempenho, aumentando a eficiência térmica em até 17,3% e reduzindo o consumo específico de energia em até 33,3%, comparado ao biodiesel puro. As emissões de CO,

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.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

HC e fumaça também diminuíram significativamente, enquanto o NOx aumentou, sendo mitigado pela aplicação de EGR. O uso combinado de H_2 e EGR demonstrou ser promissor para melhorar o desempenho do motor CI e reduzir emissões poluentes (Annamalai *et al,* 2024).

O trabalho monitorou os impactos dos efeitos da pressão e do tempo de injeção de hidrogênio nas emissões de escape, vibração mecânica e ruído em um motor de ignição por compressão (CI) operando em modo *dual-fuel* (hidrogênio-diesel). O experimento foi conduzido com carga constante de 5 Nm, rotação de 1850 rpm, razão energética fixa de hidrogênio de 12%, quatro pressões de injeção (1 a 2,5 bar) e cinco momentos de início de injeção (25° a 65° CA após o ponto morto superior). Os dados foram obtidos por meio de um sistema de controle eletrônico para combustível líquido e gasoso. Os resultados indicaram que, com 2,5 bar de pressão e início de injeção a 25° CA, houve redução de 33,4% nas emissões de CO_2 e 40,7% nas de material particulado (PM). Por outro lado, as emissões de NO aumentaram em 8,7%, a vibração mecânica em 19,9% e o ruído em 2 dBA. O estudo reforça que a estratégia de injeção de hidrogênio é crucial para mitigar impactos ambientais e operacionais (Gultekin *et al,* 2024).

Para a injeção de gás oxi-hidrogênio em motores diesel operando em baixas e médias cargas, variando os diâmetros dos injetores e as rotações do motor, a metodologia consistiu na injeção de diesel diretamente na câmara de combustão e de oxi-hidrogênio no coletor de admissão, com a medição do torque, consumo específico de combustível, eficiência térmica e emissões de CO e CO_2. Os resultados mostraram que a adição de oxi-hidrogênio melhorou significativamente o desempenho do motor e reduziu as emissões de carbono, especialmente em rotações elevadas (2200 rpm). Diâmetros menores de injetores (4 mm) foram mais eficazes em cargas médias, enquanto injetores maiores (6 mm) foram mais eficientes em baixas cargas. A eficiência térmica aumentou em até 23,3%, e o consumo específico de combustível e as emissões foram reduzidos em até 18,9% e 18,1%, respectivamente, indicando o potencial do uso de oxi-hidrogênio para motores mais limpos e eficientes (Jayabal, 2024).

Quando se avaliou o impacto da injeção de gás oxi-hidrogênio em um motor diesel de ignição por compressão, operando em modo *dual-fuel,* o gás foi gerado por eletrólise e injetado no coletor de admissão, enquanto o diesel era injetado diretamente na câmara de combustão. O objetivo foi analisar como variações no diâmetro do injetor de oxi-hidrogênio (4 mm, 6 mm e 8 mm) influenciam o desempenho do motor e as emissões de carbono sob diferentes cargas e velocidades. Os testes mostraram que a adição de oxi-hidrogênio melhorou o torque, reduziu o consumo específico de combustível e aumentou a eficiência térmica, especialmente em altas rotações. As emissões de CO e CO_2 foram significativamente reduzidas com certos tamanhos de injetores, em especial com 4 mm a 2200 rpm. Constatou-se que o uso de oxi-hidrogênio pode ser uma estratégia eficaz para melhorar a eficiência e reduzir emissões em motores diesel, aproximando-se do conceito de emissão zero (Ayad *et al,* 2024).

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21

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.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Na busca por compreender os efeitos da injeção de gás oxi-hidrogênio em motores diesel operando em modo dual-fuel, com foco no desempenho e nas emissões de carbono, o estudo foi realizado em um motor diesel monocilíndrico, avaliando diferentes diâmetros de injetores de oxi-hidrogênio (4 mm, 6 mm e 8 mm) sob cargas baixa (1 kW) e média (2 kW), em velocidades de 1400 a 2200 rpm. Os resultados mostraram que, em baixa carga, o desempenho do motor melhorou com o injetor de 6 mm, enquanto em média carga o injetor de 4 mm foi mais eficiente. Houve aumento no torque, redução no consumo específico de combustível e melhora na eficiência térmica. Emissões de CO e CO_2 também foram reduzidas, com destaque para 32% e 41,2% de redução em CO nas cargas baixa e média, respectivamente. A eficiência térmica chegou a aumentar em até 23,3%. O estudo conclui que a adição de oxi-hidrogênio melhora o desempenho e reduz as emissões de carbono, sendo uma alternativa promissora para a descarbonização de motores diesel (Felayati *et al,* 2024).

O trabalho monitorou os impactos da injeção de gás oxi-hidrogênio (HHO) em motores diesel de ignição por compressão operando em condições de baixa e média carga. Utilizando um motor diesel de injeção direta, o gás oxi-hidrogênio foi introduzido na porta de admissão, enquanto o diesel foi mantido como combustível principal, e variou-se o diâmetro do injetor de HHO para avaliar seu impacto. Os testes foram realizados em três velocidades (1400, 1800 e 2200 rpm) e os parâmetros analisados incluíram torque, consumo específico de combustível, eficiência térmica e emissões de CO e CO_2. Os resultados indicaram que a adição de HHO melhorou o desempenho do motor e reduziu as emissões de carbono, especialmente em altas rotações. Injetores menores de HHO apresentaram bons resultados em cargas médias, enquanto injetores maiores foram mais eficazes em baixas cargas. O estudo conclui que o uso combinado de diesel e oxi-hidrogênio pode ser uma estratégia promissora para a redução de emissões e melhoria de eficiência em motores diesel (Shirneshan *et al*, 2025).

A análise de diferentes estudos revelou que a introdução do gás HHO no sistema de admissão de motores diesel oferece melhorias expressivas em diversas métricas de desempenho. Entre os resultados observados estão o aumento no torque e na eficiência térmica especialmente em altas rotações, a mistura ar-combustível enriquecida com HHO promove uma combustão mais rápida e completa. Na redução no consumo específico de combustível (BSFC), a combustão mais eficiente resulta em menor consumo de diesel, o que implica economia operacional. Quanto à redução nas emissões de CO e HC, a combustão do hidrogênio, que não contém carbono, contribui para a diminuição desses poluentes.

Contudo, os estudos também apontam um aumento potencial nas emissões de NOx, devido às temperaturas elevadas na câmara de combustão durante a queima do hidrogênio. Isso requer o desenvolvimento de estratégias de controle, como ajuste no tempo de injeção e uso de

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21
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.

tecnologias de pós-tratamento, para garantir que os benefícios ambientais não sejam comprometidos.

Os dados obtidos demonstram a viabilidade da aplicação do HHO como combustível auxiliar, desde que sejam considerados os parâmetros operacionais ideais. Esta tecnologia mostra-se especialmente relevante em um momento de transição energética e de busca por fontes limpas e eficientes.

4. CONSIDERAÇÕES

Diante dos desafios globais relacionados às mudanças climáticas e à necessidade urgente de descarbonização do setor de transportes, a injeção de gás oxi-hidrogênio (HHO) em motores diesel configura-se como uma alternativa tecnológica promissora, capaz de promover ganhos de desempenho e reduções significativas nas emissões de carbono. Entretanto, os estudos analisados evidenciam limitações importantes, em especial o aumento das emissões de NOx em determinadas condições operacionais, o que reforça a necessidade de estratégias de controle de combustão mais precisas e do desenvolvimento de tecnologias complementares de mitigação. Além disso, a predominância de investigações experimentais em bancada indica a carência de análises em condições reais de operação, sobretudo em aplicações industriais e de transporte pesado.

Assim, recomenda-se que pesquisas futuras explorem a otimização dos parâmetros de injeção, a integração com sistemas de pós-tratamento e a viabilidade econômica da tecnologia em larga escala. Conclui-se que, embora persistam desafios técnicos e ambientais, os benefícios superam as limitações atuais, posicionando a injeção de HHO como uma via relevante para a inovação sustentável e em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU.

REFERÊNCIAS

AMITAV, C.; SRIJIT, B.; SARATCHANDRA, M.; ANINDITA, S.; DIPANKAR, K. I.; BANERJEE, R. Examining the significance of the ignition characteristics of hydrogen and liquefied petroleum-gas on the reactivity controlled compression ignition and its interspersed profiles induced in an existing diesel engine: A comparative perspective. **Energy Conversion and Management**, v. 268, 11597, 2022. ISSN 0196-8904. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115976.

ANNAMALAI, B.; MURUGESAN, P. The combined effect of hydrogen enrichment and exhaust gas recirculation on the combustion stability, performance and emissions of CI engine energized by algae biodiesel. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 50, p. 524–546, 2 jan. 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.278.

ANUPONG, W.; RUANGWONG, O.; JUTAMAS, K.; GAVUROVÁ, B.; CHINNATHAMBI, A.; ALAHMADI, T, A.; SEKAR, M.; BRINTHADEVI, K.; PUGAZHENDHI, A. Utilization of enriched hydrogen blends in the diesel engine with MgO nanoparticles for effective engine performance and

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.

emission control. **Fuel**, v. 334, 126552, 15 fev. 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126552.

AYAD, S. M. M. E.; IGOR, Z.; CRISTIANO, H. G. B.; EDSON, R. T.; CARLOS, R. P. B.; PRANDY, L. O.; FILIPE, B.; HELIO, H. V, GUENTHER, C. K. F. Study on the effects of micro-addition of hydrogen in diesel combustion in an optically accessible engine. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 75, 363–87, 19 Jul. 2024 Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.02.130.

BAHRAMI, S.; POORGHASEMI, K.; SOLMAZ, H.; CALAM, A.; İPCI, D. Effect of nitrogen and hydrogen addition on performance and emissions in reactivity-controlled compression ignition. **Fuel**, [S. l.], v. 292, 120330, 15 maio 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120330.

BARIŞ, O.; GÜLER, İ.; YAŞGÜL, A. The effect of different charging concepts on hydrogen fuelled internal combustion engines. **Fuel**, v. 343, 127983, 1 jul. 2023 Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127983.

BAYRAMOĞLU, K.; BAHLEKEH, A.; MASERA, K. Numerical investigation of the hydrogen, ammonia and methane fuel blends on the combustion emissions and performance. **Integrated Hydrogen Energy Systems**, v. 48, n. 99, 39586–98, 25 Dez. 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.06.079.

BAYRAMOĞLU, K.; YILMAZ, S. Emission and performance estimation in hydrogen injection strategies on diesel engines. **Hydrogen Energy Systems**, v. 46, n. 57, 29732–44, 18 ago. 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.135.

EKIN, F.; OZSOYSAL, O. A.; ARSLAN, H. The effect of using hydrogen at partial load in a diesel-natural gas dual fuel engine. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, n. 42, 18532–50, 15 maio 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.03.287.

ESENAY, A.; NAFIZ, K. The effects of hydrogen enriched natural gas under different engine loads in a diesel engine. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, Issue 24, p. 12410-12420, 2022. ISSN 0360-3199, Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.09.016.

FELAYATI, A.; SALEH, B.; HOSSEINZADEH, B.; MOUSAVI, A. Improving performance and reducing emissions of a diesel engine using oxy-hydrogen (HHO) gas in dual-fuel mode. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 49, n. 4, p. 2397–2408, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.10.177.

FELAYATI, F. M.; PRASUTIYON, H.; JANAH, S.; WIJAYA, D. H.; SAPUTRA, M. B.; SEMIN, S. Performance and carbon emissions of a diesel/oxy-hydrogen dual-fuel engine with oxy-hydrogen injection variation under low and medium load conditions. **International Journal of Renewable Energy Development,** v. 13, n. 2, 235–44, 1 Mar. 2024 Disponível em: https://doi.org/10.61435/ijred.2024.57983.

GALVÃO, M. C. B.; RICARTE, I. L. M. Revisão sistemática da literatura: conceituação, produção e publicação. **Logeion: Filosofia da Informação,** v. 6, n. 1, 57–73, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.21728/logeion.2019v6n1.p57-73.

GÜLTEKIN, N.; GÜLCAN, H. E.; CINIVIZ, M. The impact of hydrogen injection pressure and timing on exhaust, mechanical vibration, and noise emissions in a CI engine fueled with hydrogen-diesel.

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.

International Journal of Hydrogen Energy, v. 78, 871–78, 12 ago. 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.06.356.

HIMANSHU, S.; SUNIL, K. M.; AMIT, D. Effect of utilization of hydrogen-rich reformed biogas on the performance and emission characteristics of common rail diesel engine. International **Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, Issue 18, p. 10409-10419, 2022. ISSN 0360-3199. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.01.073.

JAMROZIK, A; TUTAK, W. The impact of ammonia and hydrogen additives on the combustion characteristics, performance, stability and emissions of an industrial DF diesel engine. **Applied Thermal Engineering**, *[S. l.],* v. 257, 124189, 1 Dez. 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124189.

JAYABAL, R. Effect of hydrogen/sapota seed biodiesel as an alternative fuel in a diesel engine using dual-fuel mode. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 183, 890–900, 1 mar. 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.01.046.

JEYASEELAN, T.; CHACKO, N.; PUSHYANTH, N.; KRISHNA, S. M.; ALEXANDER, J.; PORPATHAM, E. Partial hydrogenation and hydrogen induction: A comparative study with B20 operation in a turbocharged CRDI diesel engine. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, n. 43, 22659–69, 23 Jun. 2021 Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.068.

JOHARI, A; SINGH, S; VIDYA, S. *Engine performance analysis for diesel engine using hydrogen as an alternative fuel*. **International Conference on Materials, Machines and Information Technology**, v. 56, 342–46, 1 Jan. 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.180.

KUMAR, C. B.; LATA, D. B. “Effect of di-tert butyl peroxide (DTBP) on combustion parameters and NOx in dual fuel diesel engine with hydrogen as a secondary fuel”. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, n. 5, p. 4507–25, 19 jan. 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.10.235.

KUMAR, C. B.; LATA, D. B.; MAHTO, D. Effect of addition of di-tert butyl peroxide (DTBP) on performance and exhaust emissions of dual fuel diesel engine with hydrogen as a secondary fuel. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, n. 14, 9595–9612, 24 fev. 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.12.129.

LAPES **-** LABORATÓRIO DE PESQUISA EM ENGENHARIA DE SOFTWARE. **Tools**. [S. l.]: Lapes, 2025. Disponível em: https://www.lapes.ufscar.br/resources/tools.

LI, H.; YAZDI, M.; MORADI, R.; GHASEMI, P. R.; NEDJATI, A. Synergistic integration of hydrogen energy economy with UK’s sustainable development goals: a holistic approach to enhancing safety and risk mitigation. **Fire**, v. 6, 11 out. 2023. Disponível em: https://doi.org/10.3390/fire6100391.

LIU, Xi; SRNA, A.; YIP, H. L.; KOOK, S.; CHAN, Q. N.; HAWKES, E. R. Performance and emissions of hydrogen-diesel dual direct injection (H2DDI) in a single-cylinder compression-ignition engine. **International Journal of Hydrogen Energy**, *[S. l.],* v. 46, n. 1, 1302–14, 1 Jan. 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.10.006.

LOGANATHAN, M.; THANIGAIVELAN, V.; MADHAVAN, V. M.; ANBARASU, A. Velmurugan. The synergetic effect between hydrogen addition and EGR on cashew nut shell liquid biofuel diesel

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.

operated engine. **Fuel**, v. 266, 117004, 2020. ISSN 0016-2361, Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.117004.

MALLOUPPAS, G.; YFANTIS, E. A.; FRANTZIS, C.; ZANNIS, T.; SAVVA, P. G. O efeito da adição de hidrogênio nas emissões de poluentes de um grupo gerador de motor de combustão interna marítimo. **Energies**, *[S. l.],* v. 15, n. 19, 7206, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.3390/en15197206.

MUTHUKUMAR, K.; KASIRAMAN, G. Utilization of fuel energy from single-use Low-density polyethylene plastic waste on CI engine with hydrogen enrichment – An experimental study. **Energy**, v. 289, 129926, 15 fev. 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129926.

ONI, B. A.; SANNI, S. E.; IBEGBU, A. J.; ADUOJO, A. A. Experimental optimization of engine performance of a dual-fuel compression-ignition engine operating on hydrogen-compressed natural gas and Moringa biodiesel. **Energy Reports**, v. 7, p. 607–619, 2021. ISSN 2352-4847. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.01.019.

SALEH, H. E. Performance and emissions characteristics of direct injection diesel engine fueled by diesel-jojoba oil-butanol blends with hydrogen peroxide. **Fuel,** v. 285, 119048, 1 fev. 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119048.

SEELAM, N.; GUGULOTHU, S. K.; REDDY, R. V.; JAGADESHWAR, K. Influence of 1-pentanol as the renewable fuel blended with hydrogen on the diesel engine characteristics and trade-off study with variable injection timing. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, n. 20, p. 11068–11082, 2022. ISSN 0360-3199. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.01.148.

SHAHPOURI, S.; GORDON, D.; SHAHBAKHTI, M.; KOCH, C. R. Modelagem transitória de emissão de NOx de um motor hidrogênio-diesel usando métodos híbridos de aprendizado de máquina. **Jornal Internacional de Pesquisa de Motores**, v. 25, n. 12, 2249-2266, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1177/14680874241272898.

SHIRNESHAN, A.; KANBEROGLU, B.; GONCA, G. Experimental investigation and parametric modeling of the effect of alcohol addiction on the performance and emissions characteristics of a diesel engine fueled with biodiesel-diesel-hydrogen fuel mixtures. **Fuel,** v. 381, 133489, 1 fev. 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.133489.

UNESP – FCA. **Tipos de revisão de literatura**. São Paulo: UNESP – FCA, 2015. p. 1–9. Disponível em: https://www.fca.unesp.br/Home/Biblioteca/tipos-de-evisao-de-literatura.pdf.

WINANGUN, K. *et al.* THE IMPACT OF ADDING HYDROGEN ON THE PERFORMANCE OF A CI ENGINE FUELED BY PALM BIODIESEL. **BIS Energy and Engineering**, v. 1, V124024, 10 Nov. 2024. Disponível em: https://doi.org/10.31603/biseeng.75.

ZHEN, X.; LI, X.; WANG, Y.; LIU, D.; TIAN, Z. Comparative study on combustion and emission characteristics of methanol/hydrogen, ethanol/hydrogen and methane/hydrogen blends in high compression ratio SI engine. **Fuel,** v. 267, 117193, 1 maio 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117193.

ZHEN, X.; WANG, Y.; XU, S.; LI, Y.; TAO, C.; XU, T.; LI, X. Progress in hydrogen enriched gasoline engines: A review. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, n. 38, p. 24565–24579, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.07.024.

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.