RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218

# SISTEMA INDEPENDENTE DE INJEÇÃO DE ETANOL EM MOTORES DE IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO: REVISÃO SISTEMÁTICA

## *INDEPENDENT ETHANOL INJECTION SYSTEM IN COMPRESSION IGNITION ENGINES: SYSTEMATIC REVIEW*

## *SISTEMA DE INYECCIÓN INDEPENDIENTE DE ETANOL EN MOTORES DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN: REVISIÓN SISTEMÁTICA*

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

e646417
https://doi.org/10.47820/recima21.v6i4.6417

PUBLICADO: 4/2025

**RESUMO**

A injeção eletrônica de combustível revolucionou os motores de combustão interna, substituindo os carburadores e proporcionando um controle mais preciso sobre a mistura de ar e combustível, o que aumentou a eficiência, o desempenho e reduziu as emissões de poluentes. A inovação dos sistemas de injeção de etanol, que otimizam o uso do etanol como combustível renovável, também contribui para uma queima mais limpa e menor emissão de poluentes em comparação com combustíveis fósseis. O trabalho está alinhado com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, focando em áreas como sustentabilidade ambiental, inovação tecnológica e redução das emissões de gases. Os ODS abordados incluem: ODS 7 (Energia Acessível e Limpa), com a promoção de combustíveis mais sustentáveis; ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), com avanços tecnológicos no setor automotivo; ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), com a melhoria da qualidade do ar nas cidades; ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), promovendo práticas sustentáveis; e ODS 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima), com a mitigação das mudanças climáticas por meio do uso de etanol, contribuindo para um futuro mais sustentável.

**PALAVRAS-CHAVE:** Diesel. Tecnologia automotiva. Injeção eletrônica de combustível. Motores de combustão interna.

***ABSTRACT***

*Electronic fuel injection has revolutionized internal combustion engines by upgrading carburetors and providing more precise control over the air and fuel mixture, which has improved efficiency, performance and emissions. The innovation of ethanol injection systems, which optimize the use of ethanol as a renewable fuel, also contributes to cleaner burning and lower emissions compared to fossil fuels. The work is aligned with the UN Sustainable Development Goals (SDGs), focusing on areas such as environmental sustainability, technological innovation and reducing gas emissions. The SDGs included include: SDG 7 (Affordable and Clean Energy), with the promotion of more sustainable fuels; SDG 9 (Industry, Innovation and Infrastructure), with technological advances in the automotive sector; SDG 11 (Sustainable Cities and Communities), with improving the quality of cities; SDG 12 (Responsible Consumption and Production), promoting sustainable practices; and SDG 13 (Action against Global Climate Change), with the mitigation of climate change through the use of ethanol, contributing to a more sustainable future.*

***KEYWORDS:*** *Diesel. Automotive technology. Electronic fuel injection. Internal combustion engines.*

***RESUMEN***

*La inyección electrónica de combustible ha revolucionado los motores de combustión interna al mejorar los carburadores y proporcionar un control más preciso sobre la mezcla de aire y combustible, lo que ha mejorado la eficiencia, el rendimiento y las emisiones. La innovación de los sistemas de inyección de etanol, que optimizan el uso del etanol como combustible renovable, también contribuye a una combustión más limpia y a menores emisiones en comparación con los combustibles fósiles. El trabajo está alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la*

[1] Universidade Estadual Paulista - Unesp.

RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218



*ONU, centrándose en áreas como la sostenibilidad ambiental, la innovación tecnológica y la reducción de emisiones de gases. Los ODS incluidos incluyen: ODS 7 (Energía asequible y no contaminante), con la promoción de combustibles más sostenibles; ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructura), con avances tecnológicos en el sector automotriz; ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles), con la mejora de la calidad de las ciudades; ODS 12 (Consumo y producción responsables), promoción de prácticas sostenibles; y el ODS 13 (Acción contra el Cambio Climático Global), con la mitigación del cambio climático mediante el uso de etanol, contribuyendo a un futuro más sostenible.*

***PALABRAS CLAVE:*** *Diesel. Tecnología automotriz. Inyección electrónica de combustible. Motores de combustión interna.*

## INTRODUÇÃO

A injeção eletrônica de combustível transformou profundamente o funcionamento dos motores de combustão interna, substituindo os carburadores e proporcionando um controle muito mais preciso sobre a mistura de ar e combustível nos cilindros. Esse avanço não apenas otimizou a eficiência e o desempenho dos motores, mas também foi fundamental para a redução das emissões poluentes, contribuindo para um ambiente mais limpo (Gomes, 2024).

Os sistemas independentes de injeção de etanol em motores de ignição por compressão configuram uma inovação que visa otimizar o uso de etanol como combustível, uma vez que este combustível se afirmou nas últimas três décadas como opção de combustível renovável para motores que utilizam diesel ou gasolina. Esse sistema permite que o etanol seja injetado de forma separada, o que pode melhorar a eficiência da combustão e reduzir emissões (Oliveira Pauferro, 2012).

A injeção de etanol pode ajudar a reduzir a emissão de poluentes, uma vez que o etanol queima de forma mais limpa em comparação com combustíveis fósseis. Isso porque sua produção emite até 80% menos de gases de efeito estufa (GEE) - como dióxido de carbono ($CO_2$), gás metano ($CH_4$) e óxido nitroso ($NO_2$), quando comparado à gasolina. Essa abordagem é relevante em contextos em que a sustentabilidade e a redução de carbono são prioridades (Raízen, 2022).

O presente trabalho tem como objetivo contribuir para o avanço das metas dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, com foco em áreas essenciais como sustentabilidade ambiental, inovação tecnológica e redução das emissões de gases de efeito estufa. Entre os ODS que mais se alinham com a proposta deste estudo, destacam-se aqueles voltados para a promoção de fontes de energia limpas e acessíveis, a inovação na indústria, a produção responsável e a ação eficaz contra as mudanças climáticas:

- ODS 7 - Energia Acessível e Limpa: O uso de etanol como combustível renovável está relacionado com a promoção de fontes de energia mais limpas e sustentáveis, contribuindo para a transição energética.

RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218



- ODS 9 - Indústria, Inovação e Infraestrutura: A inovação nos sistemas de injeção de etanol e o desenvolvimento de motores mais eficientes representam avanços tecnológicos que podem transformar a indústria automotiva, tornando-a mais sustentável e eficiente.
- ODS 11 - Cidades e Comunidades Sustentáveis: A utilização de combustíveis mais limpos e a redução das emissões de poluentes contribuem para a melhoria da qualidade do ar nas cidades e comunidades. Isso impacta positivamente a saúde pública e a qualidade de vida nas áreas urbanas, com a redução das emissões de gases poluentes provenientes do transporte.
- ODS 12 - Consumo e Produção Responsáveis: A adoção de combustíveis renováveis como o etanol está alinhada com o objetivo de promover práticas de consumo e produção mais sustentáveis, especialmente no setor automotivo. O uso de etanol pode diminuir a pegada de carbono da indústria automobilística e promover a produção e o consumo responsável de energia.
- ODS 13 - Ação contra a Mudança Global do Clima: O etanol, como combustível renovável, pode emitir menos gases de efeito estufa do que combustíveis fósseis, como gasolina e diesel, o que ajuda a mitigar as mudanças climáticas. O desenvolvimento de tecnologias que otimizam o uso de etanol e reduzem as emissões de gases poluentes contribui diretamente para a luta contra a mudança climática.

A inovação no setor automotivo, através do uso de etanol como combustível mais limpo, é uma maneira eficaz de apoiar os esforços globais para combater as mudanças climáticas e promover um futuro mais sustentável.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### 1. REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Revisão da literatura é o processo de busca, análise e descrição de um corpo do conhecimento em busca de resposta a uma pergunta específica. “Literatura” cobre todo o material relevante que é escrito sobre um tema: livros, artigos de periódicos, artigos de jornais, registros históricos, relatórios governamentais, teses e dissertações e outros tipos (UNESP, 2015). Revisão Sistemática (RS) é uma técnica de pesquisa por evidências em literatura científica conduzida de maneira formal, seguindo etapas bem definidas, de acordo com um protocolo previamente elaborado.

Revisar a literatura é essencial no desenvolvimento de trabalhos acadêmicos e científicos. A realização de uma revisão de literatura evita a duplicação de pesquisas e o reaproveitamento e a aplicação de pesquisas em diferentes escalas e contextos. Permite observar possíveis falhas nos estudos realizados, conhecer os recursos necessários para a construção de um estudo, desenvolver estudos que cubram brechas na literatura trazendo real contribuição para um campo científico (Barbosa Galvão *et al*., 2019).

RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218



## 2. *SOFTWARE* START

Com o objetivo de aprimorar a qualidade das pesquisas e das aplicações nas revisões sistemáticas (RS), foi criada a ferramenta StArt (*State of the Art through Systematic Reviews*) pelo Laboratório de Pesquisa em Engenharia de *Software* (LaPES). Sua principal finalidade é oferecer suporte ao pesquisador, facilitando a aplicação dessa técnica de forma mais eficiente e estruturada (Lapes, 2025).

O StArt é uma ferramenta desenvolvida para auxiliar pesquisadores na condução de revisões sistemáticas da literatura científica, um tipo de estudo essencial para sintetizar conhecimento e identificar lacunas em pesquisas. Ele organiza e gerencia as etapas principais de uma revisão sistemática, foi desenvolvido pelo Laboratório de Engenharia de *Software* da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), no Brasil (Lapes, 2025).

Ao iniciar o *software,* cria-se um arquivo destinado à realização da Revisão Sistemática da Literatura (RSL), como ilustrado na Figura 1A. Em seguida, uma aba com informações iniciais sobre o processo exibida na Figura 1B.

O processo começa com o preenchimento do título da RSL e dos dados dos pesquisadores envolvidos (Figura 1C). Após isso, é necessário fornecer uma descrição dos fundamentos da pesquisa (Figura 1D), utilizando as abas de diálogo apresentadas ao usuário (Figura 2).

A navegação entre as telas é feita clicando nos botões (*Next*) para avançar ou (*Back*) para retornar. Após completar todas as etapas, o usuário clica em (*Finish*) (Figura 1E), o que marca o início da árvore de projeto da RSL, como mostrado na Figura 1F.

RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
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 arvore de projeto da RSL

Fonte: Autores 2025.

## 3. PROTOCOLO DA RSL

Foi elaborada uma sequência de palavras-chave e seus respectivos sinônimos em inglês (Quadro 1), com base nas questões centrais da pesquisa. A partir dessa lista, foi desenvolvida uma *string* de busca específica para cada base de dados, seguindo as regras de busca lógica definidas pelos manuais de cada plataforma.

RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218



Quadro 1: Parâmetros iniciais para RSL

| **Questão** | Quais são os efeitos da injeção dupla de combustível no desempenho e nas emissões? |
|---|---|
| **Base de dados** | ***String* de Busca** |
| IEEE | *("Intake Manifold Injection") AND ("Intake Manifold Design") AND ("Diesel Engine" OR "Compression Ignition")* |
| Scielo | *("Intake Manifold Injection") AND ("Intake Manifold Design") AND ("Diesel Engine" OR "Compression Ignition")* |
| ScienceDirect | *("Intake Manifold Injection") AND ("Intake Manifold Design") AND ("Diesel Engine" OR "Compression Ignition")* |
| Scopus | *("Intake Manifold Injection") AND ("Intake Manifold Design") AND ("Diesel Engine" OR "Compression Ignition")* |
| Web of Science | *("Intake Manifold Injection") AND ("Intake Manifold Design") AND ("Diesel Engine" OR "Compression Ignition")* |

Fonte: Autores 2025.

Após a definição dos termos, foram estabelecidos critérios de inclusão e exclusão, apresentados no Quadro 2. Esses critérios servem como parâmetros fundamentais para orientar a seleção dos artigos, garantindo um processo mais rigoroso e estratégico na identificação dos estudos relevantes.

Quadro 2: Critérios de inclusão ou exclusão

| **Critério** | **Descrição do critério de inclusão** |
|---|---|
| CI1 | *Utilizing Dual-Fuel injection in Diesel Engines* |
| CI2 | *Injection of Secondary Fuel into the Air Manifold of a Diesel Engine* |
| CI3 | *Control of Dual-Fuel Injection in a Diesel Engine* |

Fonte: Autores 2025.

Com os dados de entrada em mãos, foram inseridos no *software* na aba de planejamento, conforme descrito no protocolo. A questão principal pode incluir uma subquestão, como ilustrado na Figura 2A. Os artigos a serem selecionados devem atender a critérios específicos, como ano de publicação, originalidade e idioma (inglês ou português), todos devidamente especificados no protocolo (Figura 2B). Para selecionar uma base de dados, deve-se marcá-la na caixa de seleção e adicioná-la utilizando o botão "*Add*" (Figura 2B). Este processo deve ser repetido para todas as bases de dados nas quais se deseja realizar a pesquisa da Revisão Sistemática da Literatura (RSL).

Os critérios de inclusão ou exclusão de artigos (Quadro 2) são registrados no mesmo campo, diferenciados por meio de uma caixa de seleção onde é possível optar entre *Inclusion* ou *Exclusion*

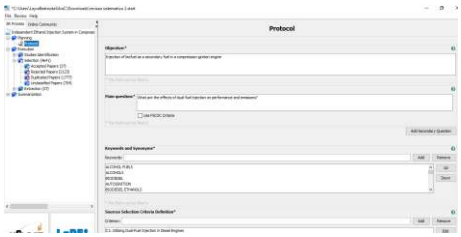
RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218



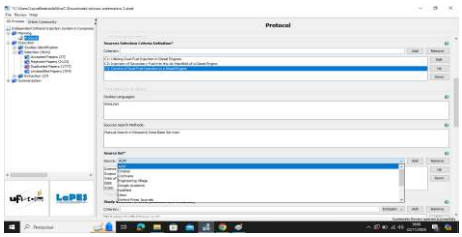
(Figura 2C). No protocolo, também há a possibilidade de atribuir um fator de qualidade (Figura 2D), que pode ser representado por uma nota ou uma avaliação mais detalhada. Além disso, foram incluídos campos para os elementos de extração (Figura 2E).

Os elementos de extração correspondem aos aspectos do artigo que são de interesse para a pesquisa, geralmente resumidos em três perguntas principais: “O que foi feito?”, “Como foi feito?” e “Quais foram os resultados obtidos?”. Também foram adicionados campos para registrar os locais dos estudos e informações relacionadas ao uso de sensores e observações, com o objetivo de facilitar a organização dos dados no relatório final.

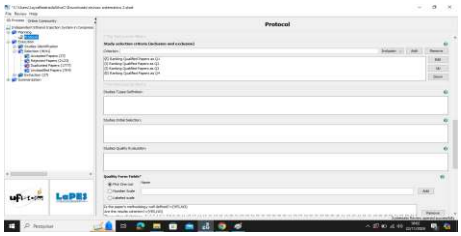
Figura 2: Campus do protocolo da RSL



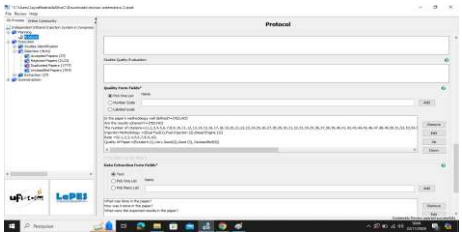
A) Questão principal e palavras chaves



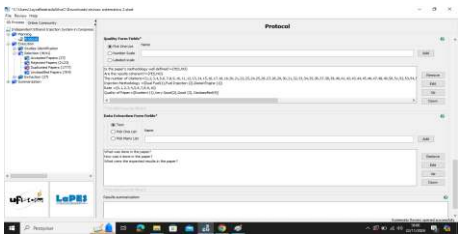
B) Fontes e Adicionar base de dados



C) Critérios



D) Qualidade.



E) Campos de extração

Fonte: Autores 2025.

## 4. PROCESSAMENTO DOS ARTIGOS

Utilizando as *strings* de busca previamente definidas, realiza-se a pesquisa de artigos nas bases de dados. Após a coleta, os arquivos são baixados nos formatos ".bib" ou ".ris". A análise foi conduzida com o auxílio da *Virtual Private Network* (VPN) da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, que oferece acesso à rede eduroam. Por meio de convênios, essa rede disponibiliza acesso a periódicos, artigos, revistas e outras bases científicas exclusivas para assinantes.

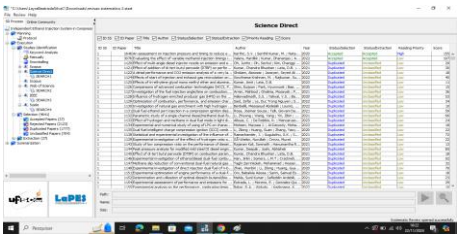
RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218



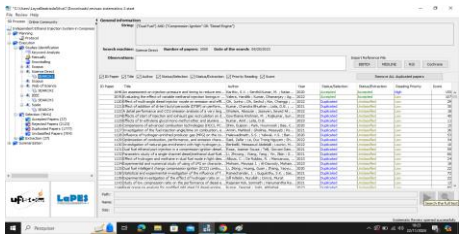
Após salvar todos os arquivos em um computador local ou conectado à VPN, eles são inseridos no *software* StArt, como ilustrado na Figura 3A. As bases de dados utilizadas devem ser aquelas especificadas no protocolo inicial (Figura 3B). Para isso, basta clicar com o botão direito do mouse e selecionar a opção *"Add search session"* (Figura 3A). Esse comando abre uma sequência de janelas, que devem ser preenchidas com a *string* de busca criada (Figura 3B).

Observações importantes sobre a busca podem ser registradas durante o processo, e a finalização exige abrir uma caixa de diálogo para carregar os arquivos (Figura 3C). Nessa etapa, seleciona-se o formato do arquivo baixado. Após a escolha, é possível optar pela marcação automática de entradas duplicadas. Um *pop-up* de confirmação será exibido quando os arquivos forem carregados com sucesso. Caso sejam identificadas duplicatas, elas podem ser removidas facilmente utilizando o botão "*Remove ALL duplicate papers*" (Figura 3C).

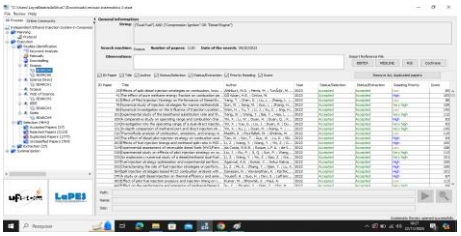
Figura 3: Inserção de arquivo contendo referências bibliográficas no StArt

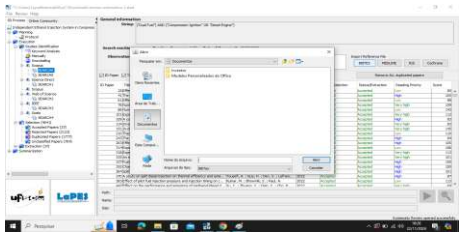


A) Adição de novo arquivo



B) Inserção da *String* de busca





C) Interface de seleção do arquivo "bib" ou "ris"

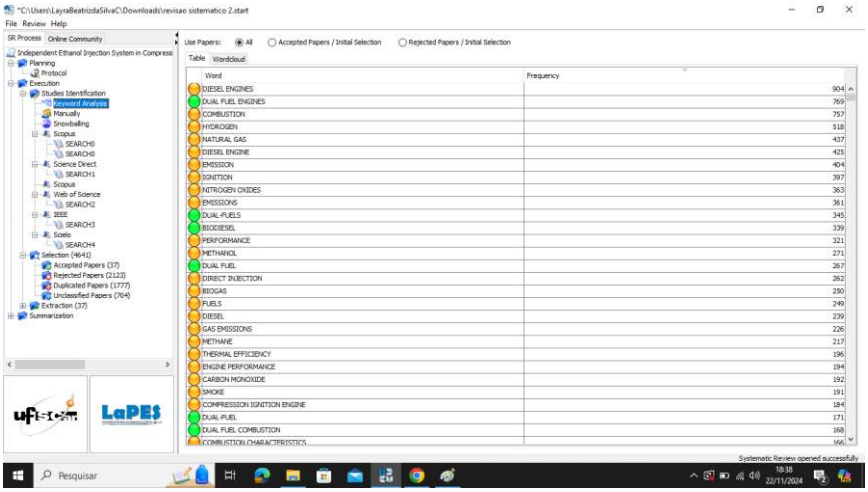
Fonte: Autores 2025.

Após inserir todos os arquivos no *software*, é possível analisar a frequência e regularidade com que certas palavras aparecem. A Figura 4 apresenta uma análise das palavras-chave previamente definidas no protocolo inicial. O *software* utiliza um sistema de cores para indicar a relação entre as palavras-chave inseridas e aquelas identificadas nos artigos: laranja para palavras distintas, verde para palavras idênticas e amarelo para palavras semelhantes (Figura 4).

RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218



Figura 4: Análise da frequência das palavras das referências bibliográficas

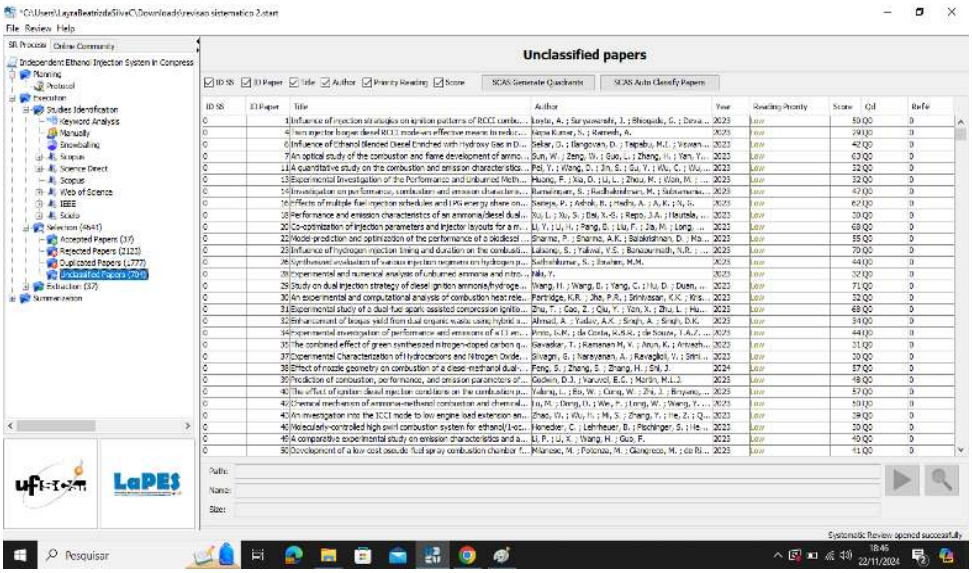


Fonte: Autores 2025.

Destacando o terceiro critério de exclusão, utiliza-se a ferramenta do *software* StArt, conforme ilustrado na Figura 5, para filtrar e selecionar os artigos com base nas palavras-chave definidas no protocolo. A divisão é feita por pontuação, o que permite classificar os artigos de acordo com sua relevância. Esse procedimento deve ser realizado somente após a inserção de todos os arquivos no *software*.

Os quadrantes gerados pelo *software* são organizados em segmentos, possibilitando a eliminação dos quadrantes inferiores, que geralmente apresentam menor aderência às questões principais da pesquisa. Essa abordagem otimiza o processo de seleção, concentrando-se nos artigos mais alinhados aos objetivos do estudo.

Figura 5: Geração de quadrantes e exclusão dos inferiores



Fonte: Autores 2025.

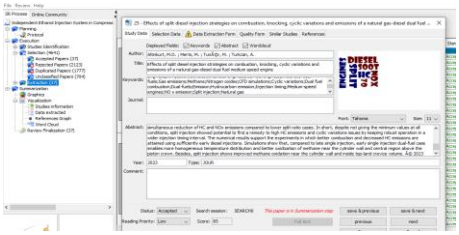
RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218



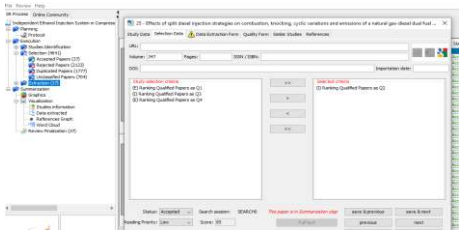
O próximo passo consiste em realizar um sequenciamento de pontuação *score* para cada artigo, avaliando o título e o resumo para verificar se atendem aos critérios de inclusão ou exclusão definidos no protocolo. Os resumos podem ser consultados com um duplo clique no artigo correspondente (Figura 6A).

Após essa análise, os artigos são classificados (Figura 6B) e encaminhados para a etapa de extração. Nessa fase, realiza-se a leitura completa do artigo, preenchendo os campos de interesse definidos no protocolo para a construção da pesquisa. Com base nessa análise, determina-se se o artigo será incluído no relatório final (Figura 6C).

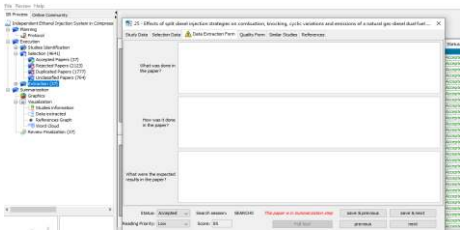
Figura 6: Avaliação individual e extração de dados



A) Consulta ao resumo



B) Atribuição dos critérios



C) Extração dos dados dos artigos

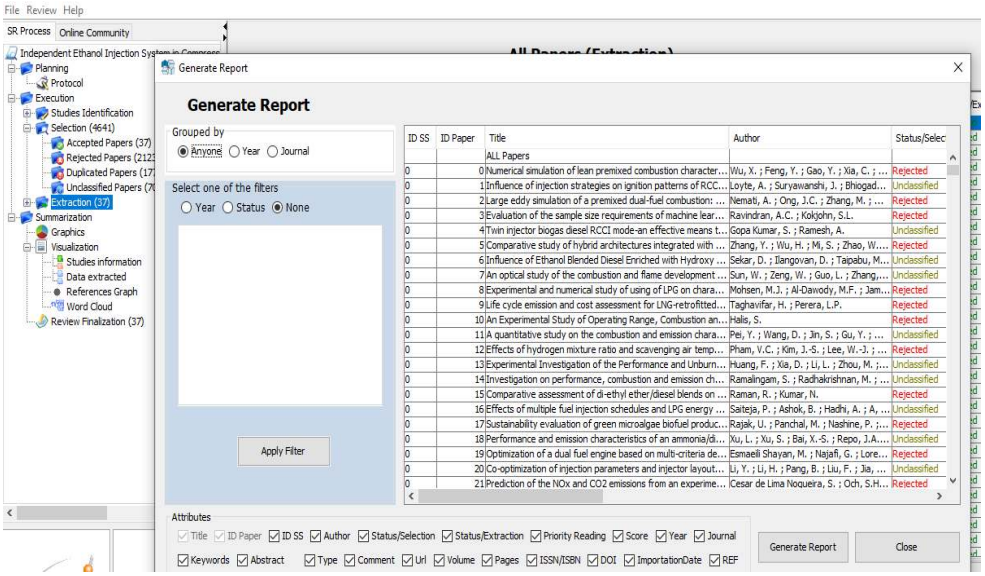
Fonte: Autores 2025.

O *software* possibilita a geração de um arquivo com extensão ".xlsx", contendo todos os dados extraídos dos artigos. Para isso, basta acessar a opção "Geração de Relatório" no menu superior e selecionar os filtros desejados (Figura 7). Além disso, é possível definir o local onde o arquivo será salvo, garantindo maior organização e acessibilidade aos dados.

RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218



Figura 7: Geração de relatório ".xlsx"




Fonte: Autores 2025.

A Figura 8 apresenta o organograma do *software* StArt, ilustrando a organização dos blocos de funções. Esses blocos podem ser seguidos sequencialmente ou conforme as etapas definidas no protocolo, permitindo ajustes ao longo do processo para obter resultados mais precisos. A imagem também detalha o quantitativo de artigos classificados em cada etapa do processo da RSL, oferecendo uma visão clara e estruturada do andamento deste trabalho.

Figura 8: Organograma do *software* StArt.




Fonte: Autores 2025.

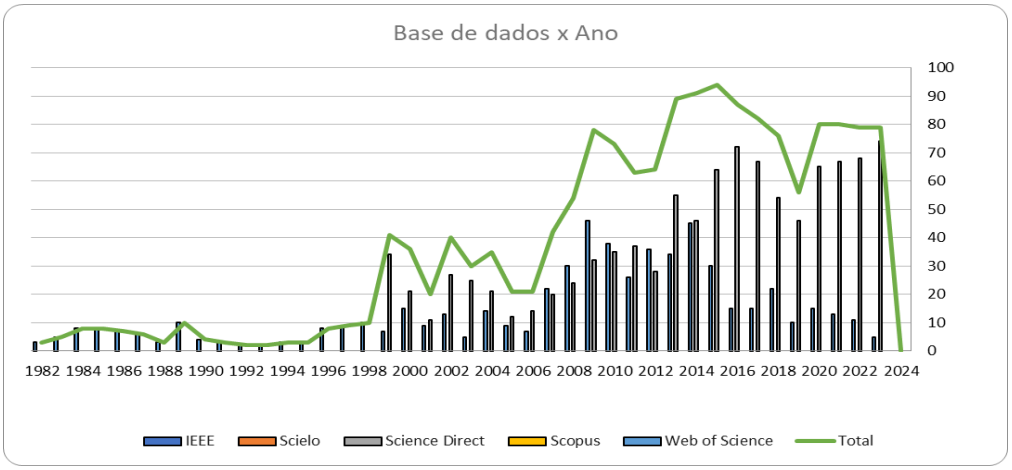
RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218



## RESULTADO E DISCUSSÕES

O Gráfico 1 apresenta a distribuição dos artigos de acordo com as bases de dados pesquisadas. Ao analisá-lo, nota-se que a maior parte dos artigos relacionados à pesquisa foi desenvolvida em maior escala a partir de 2019, evidenciando uma crescente produção científica nesse período.

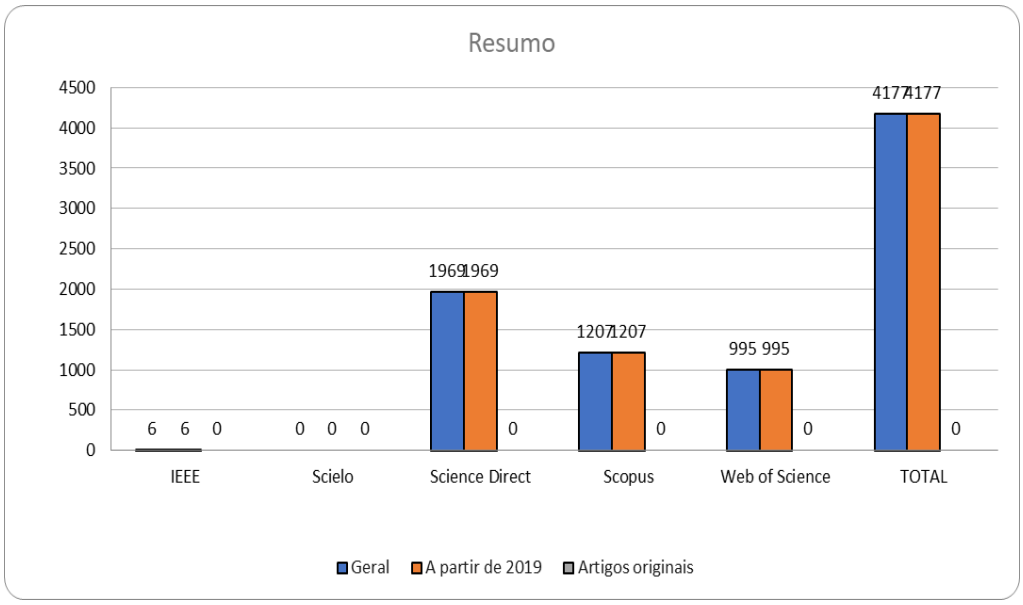
Gráfico 1 - Distribuição dos artigos segundo as bases de dados




Fonte: Autores 2025.

Para dar início à Revisão Sistemática da Literatura (RSL), foram realizadas buscas em cinco bases de dados utilizando a *string* de busca definida: IEEE, *Scielo*, *Science Direct, Scopus* e *Web of Science*. As pesquisas resultaram na identificação dos seguintes resultados (Gráfico 2).

Gráfico 2: Quantidade de publicações durante os anos




Fonte: Autores 2025.

RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218



Para garantir a seleção de pesquisas com dados mais atualizados, foi definido um intervalo de tempo entre 2019 e 2024. Nesse período, foram selecionados 4177 artigos, conforme apresentado na Tabela 1, que detalha a quantidade de textos selecionados em cada base de dados. Destaca-se que a base *Science Direct* apresentou o maior número de artigos selecionados, evidenciando sua relevância na área de estudo. Esse resultado ressalta como a técnica de Revisão Sistemática da Literatura (RSL) contribui para a extração de resultados mais precisos e relevantes.

Tabela 1 - Quantitativos de artigos adquiridos nas bases de dados

| Base de Dados | Geral |
|---|---|
| IEEE | 6 |
| *Scielo* | 0 |
| *Science Direct* | 1969 |
| *Scopus* | 1207 |
| *Web of Science* | 955 |
| Total | 4137 |

Fonte: Autores 2025.

Após os processos de pesquisa, foram selecionados 35 artigos que melhor se alinham com o objetivo do trabalho. A partir desses artigos extraídos do *software* StArt, foi gerada uma nuvem de palavras-chave, apresentada na Figura 9, que destaca os termos mais relevantes relacionados ao tema da pesquisa.

Figura 9: Nuvem de palavras




Fonte: Autores 2025.

Por fim, foi realizado um resumo dos 35 artigos extraídos, destacando seus objetivos, metodologias empregadas e os resultados obtidos.

O estudo investigou os efeitos do tempo de injeção piloto de diesel e da porcentagem de massa piloto nas características de combustão e emissões de um motor diesel adaptado para

RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218



funcionar com combustível duplo (diesel e metanol). Os resultados indicam que a injeção piloto acelera o tempo de ignição, aumentando a pressão e a taxa de liberação de calor. Com o avanço do tempo de injeção piloto, o atraso de ignição e a eficiência térmica diminuem, enquanto as emissões de NOx variam (primeiro diminuem e depois aumentam), e a emissão de fumaça segue a tendência oposta. O aumento da porcentagem de massa piloto leva a uma maior pressão no cilindro e um aumento na taxa de liberação de calor, avançando o tempo de ignição. As emissões de NOx aumentam, enquanto as de fumaça diminuem. O estudo também observa que o aumento da taxa de substituição de metanol (MSR) melhora a eficiência térmica e reduz as emissões de NOx e fumaça. O metanol, por sua vez, melhora a combustão devido ao seu conteúdo de oxigênio, mas pode aumentar as emissões de NOx devido ao aumento da temperatura de combustão. O estudo também observa que a combinação do metanol com o diesel reduz as emissões de fumaça, mas a eficiência térmica pode ser afetada, dependendo do momento da injeção. Em conclusão, o estudo oferece *insights* sobre como o tempo de injeção piloto e a porcentagem de massa piloto influenciam a combustão e as emissões, sugerindo que ajustes nesses parâmetros podem otimizar o desempenho de motores diesel-metanol (Liu *et al.,* 2019).

O impacto da estratégia de injeção direta dupla de metanol/diesel nas características de operação, combustão e emissões de um motor. Os resultados revelam que a faixa de operação do motor depende da combustão instável quando o metanol é injetado diretamente durante o curso de admissão. A eficiência térmica pode ser aumentada com o aumento da carga do motor, mas a relação de resignação de energia do metanol (ESR) deve ser gerida com cuidado. A adição de metanol melhora a economia de combustível, especialmente quando injetado a −60° CA (Corrente Alternada), aTDC (*after top dead center*), mas pode aumentar as emissões de CO devido ao efeito de resfriamento do metanol. Em comparação com motores a diesel puro, o modo de combustão de combustível duplo mostra melhor eficiência térmica e menores emissões de NOx. O estudo também observa que a otimização das estratégias de injeção pode reduzir ainda mais as emissões, com foco em melhorar o desempenho e a eficiência do motor (Huang *et al.,* 2019).

Os efeitos do tempo de injeção de diesel (DIT) no desempenho de um motor diesel de combustível duplo (NG/diesel) sob condições de carga baixa a média. O foco é no uso de gás natural (NG) como combustível alternativo, devido às suas vantagens, como alta relação hidrogênio-carbono, alta temperatura de autoignição e custo acessível. O motor foi operado em diferentes taxas de substituição de NG (40%, 60%, 80%) e a 1600 r/min, com a pesquisa destacando o impacto do DIT nas emissões e eficiência do motor. Os resultados mostram que, com 40% de NG e 27° CA (Corrente Alternada ou Certificado de Aprovação), BTDC (graus de rotação do virabrequim antes do ponto morto superior), o DIT aumentou a potência do motor em 9,03%, reduziu o consumo de energia em 13,33% e diminuiu as emissões de CO, $CO_2$ e HC. Com 80% de NG e 25° CA BTDC, a potência aumentou em 14,62%, o BSEC foi reduzido em 11,73% e as emissões também foram menores. O estudo destaca que, enquanto motores de combustível duplo podem reduzir significativamente as

RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218



emissões de fuligem e óxido de nitrogênio (NOx) em comparação aos motores a diesel convencionais, ainda ocorrem emissões de CO e HC, especialmente sob condições de carga baixa a média. A relação de ar/combustível e o controle do fluxo de ar influenciam as emissões de NOx e a eficiência da combustão. Os dados também indicam que o ajuste adequado do DIT pode melhorar a eficiência do combustível, reduzir as emissões de CO, $CO_2$, HC e fuligem, mas o aumento do DIT pode elevar as emissões de NOx. Portanto, a otimização do DIT é essencial para equilibrar desempenho, eficiência e emissões em motores de combustível duplo. O estudo sugere que, ao controlar o DIT moderadamente, é possível obter um bom desempenho com menores emissões, promovendo motores mais ecológicos (Zhou *et al.,* 2019).

A faixa de operação de um motor de injeção direta de combustível duplo (metanol e diesel) e seus efeitos sobre a combustão, emissões e eficiência. O estudo demonstra que a injeção direta de combustível duplo pode melhorar a economia de combustível e reduzir as emissões de NOx, mas enfrenta desafios, como a combustão de rugido em alta carga. O máximo de substituição de energia do metanol (ESR) atingiu 65,1%, mas foi limitado pela combustão do rugido em alta carga. A eficiência térmica máxima foi de 43,4% com 52,4% de ESR. Em cargas médias a altas, a adição de metanol melhora a estabilidade da combustão e reduz as emissões de NOx, enquanto em baixas cargas, a adição de metanol pode prejudicar a estabilidade. As emissões de NOx diminuem com o aumento do ESR, mas as emissões de CO e HC aumentam. O estudo também revela que a fase de combustão do combustível duplo inclui três estágios: combustão do combustível piloto, combustão por difusão de metanol-ar e combustão final do metanol. Além disso, o aumento do ESR melhora a estabilidade da combustão em altas cargas, mas pode levar a uma maior emissão de CO e HC. Em resumo, o modo de combustão de combustível duplo com metanol e diesel pode ser eficiente e limpo, mas ainda há desafios relacionados à estabilidade da combustão, especialmente em baixas cargas, e ao controle das emissões. O estudo fornece informações valiosas para otimizar o desempenho desses motores (Yousefi *et al.,* 2019).

O impacto da estratégia de injeção de diesel dividida em um motor de combustível duplo amônia/diesel (ADDF), focando em condições de carga média. Os resultados mostram que, com a injeção de diesel única, o modo ADDF apresenta menor eficiência térmica (ITE) em comparação com o modo de combustão somente diesel. No entanto, a injeção dividida aumenta o ITE do ADDF em até 39,72%, superando ambos os modos com injeção única. Além disso, essa estratégia reduz as emissões de amônia não queimada em até 83,5%, comparado com a injeção única. As emissões de gases de efeito estufa (GEE) podem ser reduzidas em até 30,6%, embora isso resulte em mais emissões de óxidos de nitrogênio (NOx) e menor ITE. O estudo também sugere dois pontos ideais para otimizar as emissões de GEE, alcançando uma redução de 23,7% no primeiro ponto, com um leve aumento de ITE (cerca de 2%), mas com aumento de 10% nas emissões de NOx. No segundo ponto, as emissões de GEE caem 30,6%, mas o ITE diminui 2,2% e as emissões de NOx aumentam 52,4%. Em ambos os casos, as emissões de amônia não queimada são significativamente menores,

RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218



abaixo de 900 ppm, mas ainda acima dos limites recomendados. O estudo também destaca que, embora a amônia tenha sido considerada como alternativa ao diesel por ser livre de carbono, seu uso deve ser combinado com dispositivos pós-tratamento devido às emissões de amônia não queimada. A pesquisa inclui experimentos e simulações numéricas para entender melhor o desempenho da combustão e otimizar as condições de operação do motor ADDF (Huang *et al.,* 2020).

O uso de injeções divididas de diesel com tempos e taxas de divisão variáveis para melhorar a combustão e reduzir as emissões em motores marítimos de médio porte que operam com combustível duplo a gás natural e diesel em baixas cargas. A pesquisa experimental e numérica compara injeções únicas e divididas, mostrando que as injeções divididas aumentam a eficiência da combustão e reduzem as emissões, especialmente de hidrocarbonetos não queimados (HC) e NOx. O uso de injeções precoces evita picos de NOx e batidas, enquanto taxas de divisão de 70% com injeções tardias melhoram ainda mais a eficiência e reduzem as emissões. As simulações numéricas confirmam esses resultados, evidenciando uma melhor distribuição de temperatura e oxidação do metano. O estudo destaca a injeção dividida como uma estratégia promissora para motores marítimos, contribuindo para a transição para combustíveis de baixo carbono no setor de transporte (Ning *et al.,* 2020).

O uso de etanol para melhorar a transição da combustão de biodiesel para regimes RCCI (Ignição por Compressão Controlada por Reatividade) em motores de compressão. Os resultados mostram que a injeção dividida de biodiesel-etanol oferece estabilidade de desempenho e emissões mais controladas. Comparado com o biodiesel puro, a operação com biodiesel-etanol apresentou melhores eficiências de energia e menores emissões de NOx, fuligem e UHC. Além disso, o etanol contribui para a redução das emissões de NOx e fuligem, embora aumente as emissões de UHC em algumas condições. A análise também destaca o potencial do biodiesel de Mahua como fonte renovável de energia, com a possibilidade de reduzir a dependência de combustíveis fósseis na Índia. O estudo sugere que técnicas avançadas de injeção, como a injeção dividida, podem melhorar a eficiência do motor e reduzir as emissões de poluentes. Em geral, a combinação de biodiesel Mahua com etanol, utilizando estratégias de injeção dividida, mostrou-se promissora para otimizar o desempenho do motor e reduzir as emissões (You *et al.,* 2020).

Os desafios dos regulamentos de emissões para motores a diesel pesados e exploraram o potencial da combustão de combustível duplo diesel-metanol (DMDF) como uma alternativa para mitigar as emissões de óxido de nitrogênio (NOx) e fuligem. Estudos experimentais são realizados em um motor diesel pesado de cilindro único para analisar os efeitos da recirculação de gases de escape (EGR), resfriamento de admissão e o ciclo Miller na operação DMDF de alta carga. Os resultados indicam que a operação convencional de DMDF tem limitações devido à alta temperatura de combustão e à taxa de aumento da pressão, restringindo a fração de energia do metanol a 28%. No entanto, a operação otimizada do DMDF com uma menor taxa de compressão efetiva (ECR) e temperatura do ar de admissão mostra resultados promissores, alcançando a maior eficiência líquida

RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218



indicada (NIE) de 47,4%, reduzindo as emissões de NOx em 37% e tendo um impacto mínimo nas emissões de fuligem. Combinar o ciclo Miller e as estratégias de resfriamento de ar de admissão melhora a homogeneidade da combustão, reduz as perdas de transferência de calor e melhora a eficiência térmica do motor. Mesmo que seja difícil controlar as emissões de NOx, o estudo mostra que o uso de DMDF junto com estratégias avançadas de controle de combustão pode efetivamente reduzir as emissões e melhorar o desempenho do motor. Isso mostra que poderia ser uma boa solução para motores a diesel pesados que precisam seguir regulamentos rígidos de emissões (Guan *et al.,* 2021).

O uso de metanol em motores a diesel pesados, especialmente para os setores de transporte, agricultura, marítimo e geração de energia. A tecnologia de combustão de combustível duplo (DFC) diesel-metanol foi investigada em um motor Genset adaptado, com o objetivo de melhorar a eficiência e reduzir as emissões. O metanol, com poucas modificações de hardware, pode aumentar a eficiência térmica, embora aumente as emissões de hidrocarbonetos (HC) e monóxido de carbono (CO) em frações mais altas. A pesquisa variou a proporção de metanol (MPR) e os tempos de injeção de diesel, analisando seu impacto na eficiência e nas emissões. Descobriu-se que o metanol pode melhorar a eficiência do motor, especialmente com 30% de deslocamento de diesel, mas também pode aumentar as emissões de HC. A otimização dos parâmetros de injeção, como um tempo de injeção de diesel de 3°CA (corrente alternada), bTDC (graus de rotação do virabrequim antes do ponto morto superior) e pressão de injeção de 750 bar, ajudou a reduzir as emissões de NOx e HC. Os resultados indicam que a adaptação ao metanol pode ser feita com modificações mínimas, permitindo uma transição mais rápida para motores a diesel mais ecológicos. O estudo conclui que a tecnologia DFC pode melhorar a eficiência dos motores Genset e reduzir as emissões, especialmente ao equilibrar a proporção de metanol e os parâmetros de injeção (Biswas *et al.,* 2021).

O tempo, direção e posição da injeção de gás natural afetam a combustão e as emissões em motores de combustível duplo a diesel/gás natural. Realizado em um motor turboalimentado de 6 cilindros, o estudo mostra que o tempo ideal de injeção de gás natural é de aproximadamente 300°CA (corrente alternada), BTDC (graus de rotação do virabrequim antes do ponto morto superior), melhorando a uniformidade da mistura, a eficiência da combustão e reduzindo as emissões. O tempo de injeção muito precoce prejudica a combustão, enquanto o avanço da injeção melhora o $CO_2$ e NOx, mas aumenta o THC e CO devido à mistura não uniforme. A direção e posição da injeção têm menor impacto no desempenho do motor, mas a injeção perpendicular para baixo melhora a uniformidade da mistura e o desempenho do motor, enquanto a injeção próxima à válvula de admissão deteriora a combustão. A análise da taxa de liberação de calor (PHRR1 e PHRR2) mostra que o PHRR2 tem uma forte correlação com o Pmax, destacando sua importância na eficiência da combustão. Em resumo, o estudo enfatiza a importância do tempo de injeção otimizado e de uma distribuição uniforme da mistura para melhorar a combustão, reduzir as emissões e otimizar o desempenho do motor em motores de combustível duplo a diesel/gás natural (Yousefi *et al.,* 2021B).

RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218



O impacto das estratégias de injeção de diesel (simples e dividida) no desempenho e nas emissões de motores de combustível duplo metano/diesel. Os resultados mostraram que a injeção dividida melhora significativamente a eficiência térmica, com um aumento de 26,6% em baixa carga, e reduz o consumo de combustível específico do freio em 20,4%. Essa estratégia também contribuiu para a redução das emissões de NOx e ruído de combustão, com uma leve diminuição das emissões de hidrocarbonetos. A injeção dividida/múltipla divide a injeção principal em dois ou mais pulsos, melhorando a eficiência térmica e diminuindo as emissões de HC e CO, embora aumente as emissões de NOx. A pesquisa também mostrou que a utilização de tempos otimizados de pré e pós-injeção contribui para um equilíbrio entre a redução de emissões e o desempenho do motor. Além disso, a injeção dividida alterou a taxa de liberação de calor (HRR), avançando o pico de pressão no cilindro, e melhorou a duração da combustão. A conclusão do estudo é que a injeção dividida é uma estratégia promissora para melhorar a eficiência e reduzir as emissões em motores de combustível duplo metano/diesel, equilibrando a redução de NOx e a otimização do desempenho do motor (Yousefi *et al.,* 2021A).

Os motores de combustível duplo, a gás natural e diesel, oferecem a vantagem de reduzir as emissões de fuligem e mitigar a crise do petróleo, mas apresentam desafios como baixa eficiência térmica e altas emissões de metano e monóxido de carbono. A injeção múltipla é crucial para melhorar o desempenho e reduzir as emissões. Este estudo experimental e numérico investiga os efeitos da injeção múltipla nas características de combustão e emissão de motores de combustível duplo em condições de baixa carga. Os resultados indicam que, ao avançar o primeiro tempo de injeção de diesel, a eficiência térmica e as emissões de óxido de nitrogênio aumentam inicialmente, mas depois diminuem, enquanto as emissões de monóxido de carbono e metano seguem um padrão oposto. A combustão ocorre em quatro estágios, sendo a proporção de combustão pré-misturada e a duração da chama determinantes na emissão de metano. A pesquisa também destaca que a estratégia de injeção de diesel influencia a ignição e a qualidade da combustão, com o avanço do tempo de injeção melhorando a eficiência térmica e reduzindo emissões de CO e partículas. A simulação numérica com mecanismo reduzido é usada para entender melhor esses processos. O estudo observa que a geração de NOx depende da temperatura e da concentração de oxigênio, enquanto as emissões de CO diminuem inicialmente, mas podem aumentar em fases posteriores devido à combustão incompleta. Em resumo, a combinação ideal de estratégias de injeção de diesel, como avançar o tempo de injeção e aumentar a taxa de injeção, pode melhorar a eficiência e reduzir as emissões, oferecendo um potencial significativo para otimizar o desempenho dos motores de combustível duplo (Li *et al.,* 2021).

Os efeitos da taxa de substituição de bioetanol (ESR) e de diferentes estratégias de injeção de diesel em motores de injeção direta de combustível duplo (DFDI), visando melhorar o desempenho e reduzir emissões. Utilizando um motor de cilindro único modificado, o estudo avalia o impacto do ESR, do tempo de injeção de diesel (Dinj) e da injeção dividida de diesel (Sinj) nas

RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218



emissões e eficiência térmica do motor (BTE). Os resultados mostram que ESR moderado no modo DFDI proporciona maior BTE e menores emissões de NOx e fuligem em comparação ao diesel puro. A injeção precoce de diesel aumenta a eficiência, mas eleva o NOx, enquanto a injeção dividida reduz CO, HC e fuligem, embora eleve o NOx. Estratégias como a combinação de 45° e 30° CA BTDC demonstraram as menores emissões gerais. O estudo destaca que o bioetanol, por suas propriedades sustentáveis e potencial para reduzir NOx e fuligem, é uma alternativa viável ao diesel. Ele conclui que otimizações no ESR e nas estratégias de injeção podem melhorar significativamente o desempenho de motores DFDI, promovendo maior eficiência energética e menor impacto ambiental (Madihi *et al.,* 2022).

O impacto de estratégias de injeção de diesel em motores de combustível duplo metano-diesel, visando melhorar a eficiência e reduzir emissões. Utilizando simulações numéricas e validação experimental, o trabalho destaca que: Injeção única: Um tempo de injeção de 8° BTDC (graus de rotação do virabrequim antes do ponto morto superior) otimiza o desempenho, reduz HC, CO e fuligem, mas eleva emissões de NOx. Injeção dividida: Avançar o tempo de injeção piloto para 24° BTDC diminui o deslizamento de metano, HC e CO, sendo 15% de combustível piloto a quantidade ideal. No entanto, maiores quantidades de injeção piloto aumentam HC e CO. As técnicas otimizadas, especialmente a injeção dividida, abordam desafios como baixa eficiência de combustão e altas emissões, destacando a necessidade de validação experimental para potencializar o uso dessa tecnologia (Tao *et al.,* 2022).

O desempenho e as emissões de um motor pesado de combustível duplo (biodiesel/gás natural) no modo RCCI *(Ignition* por Compressão Controlada por Reatividade). A pesquisa utiliza o motor Caterpillar 3401E e simulações com o *software* CONVERGE CFD e o modelo de combustão SAGE. Os principais achados indicam que o biodiesel resulta em uma pressão mais alta na câmara de combustão do que o diesel, com emissões de CO maiores e emissões de HC semelhantes. A redução do tempo de injeção de combustível aumenta a pressão, a taxa de liberação de calor e avança a combustão, ao mesmo tempo em que diminui as emissões de .fuligem. O estudo também destaca que o biodiesel, devido à sua composição, gera mais NOx, enquanto o diesel tem menores emissões desse poluente. O impacto do tempo e da taxa de injeção de combustível nas emissões e no desempenho é significativo, sugerindo que otimizar esses parâmetros pode melhorar a eficiência e reduzir poluentes no motor RCCI (Li *et al.,* 2022B).

A substituição do diesel por metanol em motores de locomotivas com sistema de injeção de combustível coaxial, analisando diferentes tempos de injeção de metanol e o impacto de quatro projetos de injetores coaxiais. O objetivo era otimizar o desempenho, as emissões e a eficiência do motor.

As principais descobertas foram:

1. ITM1 (injeção antecipada de metanol) foi a estratégia mais eficaz, produzindo maior pressão no cilindro, melhor taxa de liberação de calor (HRR) e menores emissões de NOx em

RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218



comparação com o diesel convencional. A injeção precoce de metanol foi essencial para uma combustão eficiente.

2. ITM2 (injeção retardada de metanol) resultou em baixo desempenho devido à evaporação insuficiente do metanol.

3. ITM3 (injeção ligeiramente atrasada) obteve desempenho comparável ao diesel, com menores emissões de NOx.

O estudo concluiu que o metanol, quando injetado corretamente, pode substituir o diesel em motores de locomotivas, melhorando as emissões e o desempenho. No entanto, a pesquisa sugere que mais estudos em 3D são necessários para validar os resultados em condições reais. A utilização de metanol também pode reduzir os impactos ambientais do uso de combustíveis fósseis (Costa *et al.*, 2022).

O uso de combustíveis diesel renováveis (HVO e farnesene) e bioetanol no modo de combustível duplo para geração de energia em pequena escala no Brasil. A pesquisa, realizada em um motor de cilindro único com injeção de combustível de porto, mostra que os combustíveis renováveis resultam em menor atraso de ignição, menor taxa de pico de liberação de calor e temperaturas e pressões mais baixas no cilindro em comparação ao diesel convencional. Além disso, há uma redução significativa nas emissões de NOx, CO, $CO_2$, HC e material particulado. A operação de combustível duplo com bioetanol foi estável em até 40% da fração de energia do bioetanol, reduzindo em até 82% as emissões de partículas e até 43% de NOx, comparado ao diesel puro. No entanto, para taxas mais altas de substituição de energia, as emissões de CO e HC aumentaram. A pesquisa também observa que o uso de HVO e farnesene como substitutos do diesel tradicional apresenta vantagens, como menor consumo de combustível e emissões mais baixas, apesar de um processo de produção mais complexo e mais caro. Além disso, a operação de combustível duplo mostrou ser uma opção promissora para um fornecimento de energia sustentável com pegada de carbono reduzida. O estudo destaca a necessidade de otimizar as estratégias de injeção para melhorar a eficiência do motor e reduzir as emissões. Em resumo, a utilização de HVO, farnesene e bioetanol em motores de combustão interna pode ser uma solução viável para a geração de energia em pequena escala com benefícios ambientais substanciais (Liu *et al.,* 2022).

O efeito da fração de energia do metano (MEF) no desempenho de combustão, emissões e análise de energia em um motor diesel de combustível duplo (metano-diesel) de cilindro único. Os testes foram realizados com diferentes níveis de MEF (0%, 25%, 50%) e tempos de injeção variáveis, com o objetivo de determinar o tempo ideal de injeção de diesel e avaliar o impacto das frações de metano. Os principais achados indicam que o tempo de injeção ideal de 11°CA BTDC reduz o atraso de ignição, a duração da combustão e as emissões, proporcionando melhor desempenho do motor em condições de carga variável. A adição de metano resultou na redução significativa das emissões de óxidos de nitrogênio (NO) e fumaça, com melhorias de até 67% e 82%, respectivamente, em comparação com o diesel puro. No entanto, as emissões de hidrocarbonetos (HC) e monóxido de

RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218



carbono (CO) aumentaram, especialmente sob cargas baixas e médias, devido à combustão incompleta e menor temperatura de combustão. A análise econômica e ambiental indicou que o aumento da proporção de metano melhora os indicadores ambientais, ao reduzir as emissões nocivas e aumentar a eficiência energética. Em conclusão, a substituição parcial de diesel por metano pode ser uma solução promissora para reduzir as emissões de NO e fumaça em motores diesel, embora mais estudos sejam necessários para otimizar as emissões de HC e CO em baixas e médias cargas (Li *et al.,* 2022A).

O impacto da estratégia de injeção de diesel pré-principal-pós em motores de gás natural/diesel de combustível duplo (NDDF) sob condições de alta carga, com o objetivo de melhorar a eficiência térmica indicada (ITE) e reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e óxido de nitrogênio (NOx), sem comprometer as emissões de metano não queimado. A pesquisa combina experimentos em um motor diesel modificado e simulações computacionais de dinâmica de fluidos (CFD) para analisar os efeitos de diferentes tempos de injeção de diesel na fase de combustão e nas emissões. Os resultados mostram que ajustar o tempo de injeção pré-diesel oferece maior controle sobre a fase de combustão em comparação com os tempos de injeção principal e pós-diesel. Uma mistura mais homogênea de diesel pré-injetado, gás natural e ar retarda a combustão, resultando em maior eficiência térmica e menores emissões de GEE. A estratégia de injeção pré-principal-após com um tempo de injeção pré-diesel avançado (-80° ATDC) alcançou as menores emissões de GEE (600,68 g/kW.h) e a maior eficiência térmica (41,09%). O estudo destaca o potencial dessa estratégia para melhorar o desempenho de motores NDDF, contribuindo para tecnologias de transporte mais limpas e alinhadas com metas globais de redução de emissões (Agarwal *et al.,* 2022).

Os efeitos das estratégias de injeção de combustível na combustão e nas emissões no modo de ignição por compressão de carga inteligente (ICCI), utilizando metanol e biodiesel como combustíveis. O foco está nos tempos de injeção de ambos os combustíveis e como esses parâmetros influenciam a estabilidade da combustão, a eficiência térmica e as emissões reguladas e não reguladas. Os motores de ignição por compressão (CI) são conhecidos por sua alta eficiência, mas enfrentam desafios relacionados às emissões de fuligem e NOx. Modos avançados de combustão, como HCCI, PPCI e RCCI, foram desenvolvidos para melhorar a eficiência e reduzir emissões, mas apresentam limitações, como dificuldades no controle do tempo de ignição e na operação em altas cargas. O modo ICCI surge como uma alternativa promissora, permitindo maior controle sobre a combustão e as emissões. O estudo foi realizado em um motor diesel de quatro cilindros modificado para operar no modo ICCI, com injeção direta de metanol (combustível de baixa reatividade) e biodiesel (combustível de alta reatividade). Parâmetros como tempos de injeção e razões de energia de metanol (MER) foram ajustados para avaliar os efeitos na combustão e nas emissões. Sensores avançados e analisadores foram utilizados para medir o desempenho do motor e as emissões. Os resultados mostraram que a injeção avançada de metanol melhora a mistura com o ar, resultando em uma combustão mais uniforme e estável. Por outro lado, atrasar a injeção de

RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218



biodiesel reduz a reatividade local, atrasando a combustão e diminuindo a pressão máxima no cilindro (Ppeak) e a taxa máxima de liberação de calor (HRRmax). O modo ICCI alcançou uma eficiência térmica indicada (ITE) superior a 47,5%, com emissões de NOx abaixo de 0,6 g/kWh. Em relação às emissões reguladas, as emissões de NOx diminuem com o atraso na injeção de metanol devido à redução da temperatura no cilindro. Já as emissões de CO e HC são reduzidas com a injeção de dois estágios de metanol, mas aumentam com a injeção de dois estágios de biodiesel em altas cargas. Quanto às emissões não reguladas, formaldeído, etileno e ciclohexano foram identificados como os principais compostos emitidos. Atrasos na injeção de metanol aumentam as emissões de formaldeído e metanol, enquanto atrasos na injeção de biodiesel reduzem essas emissões. Os tempos ideais de injeção para etanol e biodiesel foram identificados como -343 °CA ATDC e -42,5 °CA ATDC, respectivamente, para MER50 e MER60. A injeção de dois estágios de metanol mostrou-se eficaz para reduzir as emissões de CO e HC. No entanto, mais pesquisas são necessárias para explorar o desempenho em uma faixa de carga mais ampla e abordar as emissões não regulamentadas, como formaldeído e hidrocarbonetos insaturados. O estudo conclui que o modo ICCI com metanol e biodiesel é uma solução promissora para alcançar alta eficiência e baixas emissões em motores CI. Ajustes nos tempos de injeção de ambos os combustíveis permitem controlar a combustão e otimizar as emissões, fornecendo uma base para o desenvolvimento de estratégias de injeção de múltiplos estágios em motores de combustível duplo (Li *et al.,* 2022C).

Os efeitos do tempo de injeção piloto (PIT) de combustível diesel, a porcentagem de massa piloto e a taxa de substituição de metanol (MSR) na combustão e emissões de um motor diesel alimentado com combustível duplo (diesel-metano). Experimentos foram realizados em um motor diesel modificado com injeção de metanol, com ênfase na melhoria da combustão e redução das emissões. Os resultados mostram que o avanço do PIT acelera o tempo de ignição e aumenta a pressão no cilindro, mas pode reduzir a eficiência térmica indicada (ITE) e aumentar as emissões de NOx. Por outro lado, a adição de metanol resulta em aumento da pré-mistura de combustível e melhora a combustão, reduzindo as emissões de fumaça e aumentando as emissões de NOx. Quando a porcentagem de massa do piloto foi aumentada, a pressão máxima do cilindro e o pico da taxa de liberação de calor (HRR) aumentaram, e a eficiência térmica melhorou, com a redução das emissões de fumaça. A pesquisa também destaca que a eficiência térmica e as emissões podem ser otimizadas ao ajustar a combinação de PIT, MSR e o uso de recirculação de gases de escape (EGR). No geral, o estudo sugere que uma estratégia de injeção avançada, com maior porcentagem de massa piloto e uso de metanol, pode melhorar a eficiência térmica e reduzir as emissões, aproximando-se do modo de combustão RCCI (Ganesan *et al.,* 2022).

Os efeitos dos tempos de injeção de combustível e da razão de divisão do metanol em um motor de injeção direta de combustível duplo diesel/metanol em alta carga. A estratégia M/D/M, que combina injeção de metanol durante a compressão e diesel perto do ponto morto superior, é avaliada por meio de simulações numéricas. O metanol é uma alternativa ao diesel, oferecendo benefícios

RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218



como custos baixos e melhor desempenho anti-batida, mas apresenta desafios devido à sua alta temperatura de autoignição. O estudo explora as vantagens e desvantagens de várias estratégias de injeção, como D/M, M/D, e M/D/M, sendo que a última combina os pontos fortes das duas anteriores. A estratégia M/D/M, em particular, oferece bons resultados tanto em baixas quanto em altas cargas, ao alcançar uma alta taxa de substituição de metanol e boas emissões. Os principais fatores investigados são os tempos de injeção de metanol e diesel, e a proporção de divisão do metanol. Os resultados indicam que, com o atraso do DSOI (tempo de injeção de diesel), as emissões de NOx são reduzidas e a intensidade de batida diminui. Além disso, a proporção de metanol na mistura também afeta a pressão no cilindro, a taxa de liberação de calor e a eficiência de combustível. Em geral, a melhor economia de combustível ocorre com uma divisão de metanol de 30:70 e tempos de injeção otimizados. O estudo conclui que a estratégia M/D/M, especialmente com uma divisão de metanol controlada, oferece um bom equilíbrio entre desempenho, eficiência de combustível e redução de emissões, sendo promissora para motores de alta carga (Yousefi *et al.,* 2022).

Os efeitos do número de bicos, diâmetro do bico e ângulo de pulverização em um injetor de combustível duplo a diesel/metanol, com foco na melhoria da economia de combustível e redução das emissões. A pesquisa usou simulação tridimensional para avaliar como essas variáveis afetam a combustão e as emissões. Os resultados indicaram que mais bicos e menores diâmetros melhoram a economia de combustível e reduzem as emissões, mas aumentam as emissões de NOx. O número ideal de bicos foi encontrado como 8, e o ângulo de pulverização de 10° otimiza o desempenho. Além disso, o estudo aborda a combustão de baixa temperatura (LTC) como alternativa à combustão a diesel convencional, destacando estratégias como HCCI, PCCI, RCCI e DDFS para melhorar a eficiência e reduzir poluentes. Estratégias de injeção direta, como as de metanol/diesel, foram exploradas para otimizar a eficiência térmica, controlar a combustão e reduzir as emissões. O desenvolvimento de injetores de combustível duplo a diesel/metanol foi identificado como promissor para promover o uso de metanol em motores a diesel, resultando em melhor desempenho e menores emissões (Kumar *et al.,* 2022).

O estudo investigou os efeitos do tempo de injeção de metanol (MIT) e da porcentagem de substituição de metanol (MSP) na combustão e emissões de um motor de injeção direta de combustível duplo (metanol/diesel). O desempenho do motor foi analisado para diferentes misturas de metanol/diesel, com MSPs variando entre 10% e 40%. O MIT retardado permitiu um avanço no tempo de injeção de diesel, melhorando a eficiência térmica (BTE) e o coeficiente de variação da pressão média (COVIMEP), mas aumentando as emissões de hidrocarbonetos totais (THC) e óxidos de nitrogênio (NOx), e diminuindo as de monóxido de carbono (CO) e fuligem. A adição de metanol também afetou a pressão de pico no cilindro e a taxa máxima de liberação de calor. Com o aumento do MSP, houve aumento na duração do atraso de ignição e na eficiência térmica, mas também aumento da intensidade de batida (KI) e das emissões de THC e NOx. O estudo mostra que o aumento do MSP melhora a eficiência térmica, mas gera maiores emissões de COVIMEP e KI. O MIT

RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218



retardado melhorou a mistura e a combustão do metanol, resultando em menores emissões de THC e CO. No entanto, a temperatura no cilindro aumentou, o que elevou as emissões de NOx. Em conclusão, o estudo destaca o potencial da tecnologia de injeção direta de combustível duplo, sugerindo que ajustes adicionais nos parâmetros de injeção, como pressão e tempo de injeção, podem otimizar ainda mais o desempenho e reduzir as emissões. Mais pesquisas são necessárias para minimizar as emissões de NOx (Xu *et al.,* 2022).

O trabalho avalia o efeito combinado da injeção dividida e da combustão de combustível duplo RCCI em um motor de cilindro único, utilizando óleo de cozinha usado (WCO) e metanol. Os testes, realizados a 1500 rpm, exploraram diferentes pressões e tempos de injeção. Os resultados mostraram uma eficiência térmica de 32,4% com a combinação das duas técnicas, além de uma redução significativa nas emissões de NOx e fumaça. O uso do WCO como biocombustível mostrou menor eficiência térmica que o diesel devido à sua alta viscosidade e má vaporização, mas a otimização da pressão de injeção melhorou o desempenho. A injeção dividida foi eficaz na redução das emissões de NOx e fumaça, com um atraso de ignição menor em comparação com a injeção única. Já o modo RCCI aumentou a eficiência térmica conforme a participação de metanol aumentava até 20%. O estudo também revelou que a adição de metanol, sob o modo RCCI, resultou em menor emissão de NOx e fumaça, enquanto o aumento na pressão de injeção e o tempo otimizado contribuíram para melhorar a atomização do combustível e a eficiência da combustão. O biocombustível WCO apresentou desempenho promissor, com reduções significativas nas emissões de CO e hidrocarbonetos, destacando-se como uma alternativa viável para motores a diesel em termos de eficiência e emissões (Tripathi *et al.,* 2022).

O impacto das estratégias de injeção de combustível em um motor monocilíndrico modificado com ignição de compressão de carga inteligente (ICCI), comparando injeções únicas e múltiplas de combustível de alta reatividade (HRF). O foco está em parâmetros como estratificação no cilindro, formação de mistura, taxa de liberação de calor, fase de combustão, eficiência térmica, consumo de combustível e emissões. Os resultados indicam que a injeção única oferece a maior eficiência térmica, mas com influência limitada na liberação de calor. As múltiplas injeções de combustível de alta reatividade melhoram a eficiência da combustão e reduzem as emissões, especialmente de CO e THC. O ajuste no tempo de injeção de diesel afeta a fase de combustão e a taxa de liberação de calor. Injeções múltiplas ajudam a reduzir a pressão excessiva no cilindro e a intensidade do ruído de combustão, enquanto melhoram a estabilidade. A injeção de diesel em 60°CA BTDC resulta nas melhores emissões, com NOx abaixo de 0,5 g/kWh. A pesquisa sugere que combinar diferentes combustíveis e estratégias de injeção pode otimizar a formação da mistura, a liberação de calor e as emissões, melhorando a eficiência térmica e reduzindo a carga mecânica no motor. A combinação de injeções únicas e múltiplas de diesel e gasolina oferece vantagens significativas em termos de desempenho e emissões (Ouchikh *et al.,* 2022).

RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218



O artigo explora o impacto de uma estratégia de injeção piloto de combustível diesel no desempenho de um motor diesel de combustível duplo com etanol/F-T, com o objetivo de mitigar as emissões, mantendo a eficiência de combustão e a economia de combustível. Os resultados revelam que, à medida que a quantidade de injeção piloto aumenta, as emissões de fuligem, NOx e CO tendem a diminuir, fornecendo informações para formular uma estratégia eficaz de injeção de combustível para combustão de combustível duplo a diesel de etanol/F-T. A pesquisa envolve a análise dos parâmetros característicos da combustão, como a taxa de liberação de calor (HRR), em 200 ciclos consecutivos do motor usando dados de pressão no cilindro e vários tempos de injeção piloto. Verificou-se que o ajuste do tempo e da quantidade de injeção piloto influencia a estabilidade da combustão e a eficiência térmica, com um ligeiro aumento no tempo e na quantidade de injeção do piloto, levando a emissões de NOx significativamente mais baixas sem comprometer a combustão ou a economia de combustível. O estudo sugere que os combustíveis alternativos à base de carvão no modo de combustível duplo podem oferecer soluções ecologicamente corretas, fornecendo orientações valiosas para aplicações futuras na redução de emissões e na melhoria da eficiência em motores a diesel (Yang *et al.,* 2023A).

O impacto do tempo de injeção de diesel na combustão e nas emissões de motores a gás natural/diesel de combustível duplo, operando sob diferentes condições de velocidade e carga. Os resultados mostram que o avanço no tempo de injeção de diesel melhora a eficiência térmica e aumenta a pressão de pico, mas também eleva as emissões de NOx. Em contrapartida, ele reduz significativamente as emissões de metano e $CO_2$ não queimados em condições de baixa carga e baixa velocidade, mas pode aumentar ligeiramente as emissões de metano em certas condições de carga e velocidade. A pesquisa, que utiliza simulações de dinâmica de fluidos computacional (CFD) validadas por experimentos, sugere que, embora o avanço do tempo de injeção otimiza a combustão e melhore a eficiência, há um *trade-off* relacionado ao aumento das emissões de metano não queimado, o que deve ser considerado para otimizar o desempenho e reduzir os impactos ambientais. O estudo é apoiado por várias instituições, incluindo a Universidade de Manitoba e a Natural Resources Canada (Altinkurt *et al.,* 2023).

O uso do metanol renovável e da tecnologia de estratificação direta de combustível duplo (DDFS) em motores de combustão interna marítima, focando na substituição de diesel por metanol e na otimização da combustão. A pesquisa valida um modelo numérico para simulação de motores DDFS etanol/diesel e introduz o consumo de combustível específico indicado equivalente (EISFC) como métrica de eficiência. Os resultados destacam que o processo de mistura de combustível é essencial para o controle da combustão e o desempenho do motor. Estratégias com o início da duração da injeção (SOID) antes do início da injeção de metanol (SOIM) demonstraram maior eficiência e estabilidade, reduzindo emissões de CO, HC e fuligem. Uma estratégia de injeção de metanol em dois estágios foi otimizada, alcançando economia de combustível 3,95% maior, mas com emissões levemente aumentadas. O metanol mostrou-se promissor como combustível marítimo

RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218



devido à alta eficiência e emissões reduzidas de CO2, mas desafios técnicos, como controle da combustão e emissões, ainda demandam pesquisa. O estudo conclui que o metanol DDFS pode contribuir para motores marítimos mais limpos e eficientes, equilibrando desempenho e impacto ambiental (Gülcan; Ciniviz, 2023).

O texto apresenta duas estratégias de injeção de metanol em motores de combustível duplo metanol/diesel: injeção de porta (no coletor de admissão) e injeção direta (no cilindro). A injeção direta mostrou-se superior em termos de economia de combustível, eficiência térmica (alcançando até 41,55% em determinadas condições) e controle da liberação de calor. No entanto, apresentou maiores emissões de NOx, fuligem e hidrocarbonetos (HC), enquanto a injeção de porta exibiu menores emissões de CO e maior homogeneidade da mistura. A pesquisa também destaca que o atraso na ignição aumenta com a razão metanol-diesel (ESR) devido ao resfriamento pela evaporação do metanol, mas a injeção direta reduz a duração da combustão e antecipa sua fase. O estudo enfatiza que estratégias como a estratificação da mistura combustível-ar, utilizando sistemas de injeção independentes, podem melhorar o desempenho e reduzir emissões. Embora a injeção direta apresente vantagens em eficiência, desafios relacionados às emissões precisam ser abordados para seu uso prático. Esses achados oferecem orientações para o *design* de motores, considerando os compromissos entre eficiência e emissões, dependendo da estratégia de injeção adotada (Sun *et al.,* 2023).

O potencial dos motores diesel/metanol de injeção direta de alta pressão para reduzir emissões e melhorar a eficiência. Focado na influência de parâmetros como localização, duração e pressão da injeção de metanol, a pesquisa destaca que a posição de injeção tem impacto limitado nas características de combustão, enquanto a duração e a pressão afetam significativamente o desempenho do motor e as emissões. Os resultados mostram que uma distância axial maior do bocal favorece uma mistura mais homogênea, melhorando a economia do motor. As emissões reduzidas de NOX, fuligem, CO e HC foram alcançadas com uma distância radial de 2,5 mm e axial de 0,5 mm. A duração curta da injeção, combinada com alta pressão (44,4 MPa), acelera a atomização do metanol, melhorando a mistura e a eficiência térmica. A pesquisa conclui que ajustes precisos na estratégia de injeção são cruciais para maximizar os benefícios desses motores, fornecendo diretrizes valiosas para seu desenvolvimento e *design* futuro (Wen *et al.,* 2023).

O impacto de duas estratégias de injeção de diesel, *main-post* e *pré-main-post,* na combustão de gás natural/diesel de combustível duplo (NDDF) sob condições de alta carga. A estratégia de injeção *pré-main-post* avançou o início da combustão, aumentou a pressão do cilindro e reduziu as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e óxido de nitrogênio (NOx) em 10% e 47%, respectivamente. A pesquisa também revelou que, enquanto a estratégia main-post não alterou significativamente o início da combustão, a combinação de pré-principal e pós-injeção de diesel melhorou a eficiência de combustível e reduziu as emissões de metano não queimado. Além disso, o estudo destacou que o uso de combustíveis alternativos, como o gás natural, é promissor para

RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218



reduzir as emissões de GEE nos motores de combustão NDDF, especialmente em condições de carga média-alta. A adição de pós-injeção de diesel, embora não alterasse o início da combustão, ajudou a diminuir as emissões de metano não queimado e melhorou a eficiência do combustível. No entanto, atrasos nas injeções pós-principal de diesel aumentaram ligeiramente as emissões de GEE, indicando que é necessário um equilíbrio nas estratégias de injeção para otimizar o desempenho e reduzir as emissões (Yang *et al.,* 2023B).

Os efeitos de três estratégias de injeção em um motor de injeção direta de combustível duplo diesel/metanol: D/M (diesel primeiro), M/D (metanol primeiro) e M/D/M (metanol antes e depois do diesel). Os resultados indicam que o modo D/M otimiza a economia de combustível e evita batidas, enquanto o modo M/D é mais eficaz em cargas baixas e altas. O metanol é destacado como um combustível alternativo promissor, embora a necessidade de emulsificantes caros e altas proporções de metanol para desempenho ideal e redução de emissões seja um desafio. O estudo também explora a injeção de metanol via porta e diretamente no cilindro. A injeção de porta pode reduzir a temperatura do ar de admissão, afetando a eficiência térmica e as emissões, enquanto a injeção direta de metanol, combinada com diesel, resulta em menores emissões e maior eficiência térmica. Além disso, o artigo destaca como o tempo de injeção de metanol e a porcentagem de substituição de metanol afetam a combustão e as emissões, com o modo M/D apresentando melhores resultados em termos de controle de batidas e redução de emissões. A estratégia M/D/M é considerada a mais eficiente em ambos os cenários de carga baixa e alta, devido à combinação otimizada de injeção de metanol e diesel. Por fim, o estudo conclui que a injeção retardada de diesel pode controlar a intensidade da batida, mas pode resultar em combustão ineficiente. Em comparação com as outras estratégias, o modo M/D/M apresenta o melhor desempenho em termos de eficiência de combustível e redução de emissões, consolidando-o como a estratégia de injeção mais eficaz (Yin *et al.,* 2023C).

Este estudo investigou os efeitos da estratégia de injeção piloto em motores de combustível duplo diesel/metanol sob baixa carga. A pesquisa foi realizada em um motor turboalimentado, com foco nas relações de metanol e nos parâmetros de injeção de diesel e metanol. A principal descoberta foi que a adição da injeção piloto transformou a combustão de dois estágios para um único estágio, permitindo um aumento na proporção de metanol de até 60%. Isso resultou em uma redução das emissões de hidrocarbonetos (HC) e variação cíclica (COV), além de um aumento significativo na eficiência térmica do freio (BTE). A estratégia de injeção piloto/principal otimizada avançou as fases de combustão, aumentando as emissões de NOx e diminuindo as de fuligem, CO e HC. O aumento da injeção piloto levou a maior duração da combustão e melhor desempenho de emissão e combustão, com maior eficiência em condições de baixa carga e alta taxa de metanol. O estudo concluiu que, ao ajustar o tempo de injeção e aumentar a quantidade de injeção piloto, é possível melhorar o desempenho e as emissões de motores de combustível duplo diesel/metanol. Essa otimização oferece um caminho promissor para motores mais limpos e eficientes, especialmente sob condições de baixa carga (Yin *et al.,* 2023A).

RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218



O impacto da pressão de injeção de combustível (FIP) e do tempo de injeção de combustível (FIT) do biodiesel de Jatropha como combustível piloto no desempenho, combustão e emissões de um motor de combustível duplo a hidrogênio. Foram testadas três taxas de fluxo de hidrogênio (5, 7 e 9 litros/min), três pressões de injeção (500, 1000 e 1500 bar) e três tempos de injeção (5, 11 e 17° antes do ponto morto superior - BTDC). Os resultados demonstraram que FIPs e FITs mais altos aumentaram a eficiência térmica do motor, a pressão do cilindro e a taxa de liberação de calor (HRR). Além disso, as emissões de hidrocarbonetos não queimados (UHC) e fuligem reduziram significativamente, mas houve aumento de 20,61% nas emissões de NOx. O biodiesel de Jatropha, devido ao seu alto índice de cetano, valor calórico e teor de oxigênio, mostrou-se adequado como substituto parcial ou total do diesel, especialmente quando combinado com hidrogênio. A pesquisa reforçou o potencial do hidrogênio como uma fonte de energia limpa e eficiente para motores de combustão interna. Ele reduz emissões de UHC e $CO_2$, enquanto promove uma melhor homogeneidade na mistura ar-combustível. Por meio de experimentos com diferentes configurações, observou-se que o uso combinado de hidrogênio e biodiesel melhora o desempenho do motor e reduz emissões, apesar do aumento em NOx. Em geral, o estudo destaca o papel das condições de injeção na otimização de motores de combustível duplo para maior eficiência e menor impacto ambiental (Yin *et al.,* 2023B).

## 5. CONSIDERAÇÕES

A análise apresentada ao longo deste trabalho evidencia avanços significativos proporcionados pela injeção eletrônica de combustível, que, ao substituir os carburadores, revolucionou o funcionamento dos motores de combustão interna. Este sistema não só otimizou a performance dos motores, mas também permitiu um controle mais preciso da mistura de ar e combustível, contribuindo para a redução das emissões de poluentes e, consequentemente, para um ambiente mais limpo. A adoção de tecnologias inovadoras, como a injeção independente de etanol, tem se mostrado uma alternativa promissora para a sustentabilidade energética, considerando que o etanol, como combustível renovável, apresenta menor impacto ambiental em comparação aos combustíveis fósseis.

A utilização do etanol como uma alternativa aos combustíveis fósseis, além de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, auxilia no processo de mitigação das mudanças climáticas. Portanto, as inovações tecnológicas no setor automotivo não apenas promovem um futuro mais sustentável, mas também se tornam uma ferramenta essencial no combate à crise climática.

Trabalhos futuros também poderiam investigar a viabilidade de integrar a injeção eletrônica de etanol com outras tecnologias emergentes, como a inteligência artificial e a análise de dados em tempo real, para otimizar ainda mais a eficiência dos motores e reduzir os impactos ambientais. O estudo de políticas públicas voltadas para a promoção do uso de etanol e outras fontes de energia renováveis, bem como a análise de seus efeitos econômicos e sociais, também são áreas

RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218



promissoras que podem gerar percepções valiosas para a implementação de soluções mais eficazes no setor automotivo.

Em suma, o desenvolvimento de tecnologias como a injeção eletrônica de etanol é um passo crucial para a construção de um futuro mais sustentável, alinhado com os ODS e com a necessidade urgente de reduzir as emissões de gases poluentes. O caminho para a transformação do setor automotivo, por meio da inovação tecnológica e do uso de fontes de energia renováveis, tem se mostrado uma resposta eficaz aos desafios ambientais globais, com o potencial de gerar benefícios duradouros para as próximas gerações.

## REFERÊNCIAS

AGARWAL, A. K.; KUMAR, V.; JENA, A.; KALWAR, A. Fuel injection strategy optimization and experimental performance and emissions evaluation of diesel displacement by port fuel injected methanol in a retrofitted mid-size genset engine prototype. **Energy**, v. 248, p. 123593, 2022. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123593.

ALTINKURT DENIZ, M.; MERTS, M.; TUNÉR, M.; TURKCAN, A. Effects of split diesel injection strategies on combustion, knocking, cyclic variations and emissions of a natural gas-diesel dual fuel medium speed engine. **Fuel**, v. 347, p. 128517, 2023. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128517.

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

BISWAS, S.; KAKATI, D.; CHAKRABORTI, P.; BANERJEE, R. Assessing the potential of ethanol in the transition of biodiesel combustion to RCCI regimes under varying injection phasing strategies: A performance-emission-stability and tribological perspective. **Fuel,** v. 304, p. 121346, 2021. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121346.

COSTA, R. B. R. DA; ROQUE, L. F. A.; DE SOUZA, T. A. Z.; CORONADO, C. J. R.; PINTO, G. M.; CINTRA, A. J. A.; RAATS, O. O.; OLIVEIRA, B. M.; FREZ, G. V.; DA SILVA, M. H. Experimental assessment of renewable diesel fuels (HVO/Farnesane) and bioethanol on dual-fuel mode. **Energy Conversion and Management**, v. 258, p. 115554, 2022. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115554.

GANESAN, N.; VISWANATHAN, K.; KARTHIC, S. V.; EKAMBARAM, P.; WU, W.; VO, D.-V. N. Split injection strategies based RCCI combustion analysis with waste cooking oil biofuel and methanol in an open ECU assisted CRDI engine. **Fuel**, v. 319, p. 123710, 2022. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123710.

GOMES, G. A injeção eletrônica e sua importância na redução de poluentes. **Injesan**, 10 jun. 2024. https://injesan.com.br/blog/blog-p/pecas-eletricas/a-injecao-eletronica-e-sua-importancia-na-reducao-de-poluentes.

GUAN, W.; WANG, X.; LIU, H.; ZHAO, H. Exploring the high load potential of diesel-methanol dual-fuel operation with Miller cycle, exhaust gas recirculation and intake air cooling on a heavy-duty diesel engine. **International Journal of Engine Research**, 2020. https://doi.org/10.1177/1468087420926775.

GÜLCAN, H. E.; CINIVIZ, M. The effect of pure methane energy fraction on combustion performance, energy analysis and environmental - economic cost indicators in a single-cylinder common rail

RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218



methane-diesel dual fuel engine. **Applied Thermal Engineering**, v. 230, p. 120712, 2023. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120712.

HUANG, G.; LI, Z.; ZHAO, W.; ZHANG, Y.; LI, J.; HE, Z.; QIAN, Y.; ZHU, L.; LU, X. Effects of fuel injection strategies on combustion and emissions of intelligent charge compression ignition (ICCI) mode fueled with methanol and biodiesel. **Fuel**, v. 274, p. 117851, 2020. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117851.

HUANG, H.; ZHU, Z.; CHEN, Y.; CHEN, Y.; LV, D.; ZHU, J.; OUYANG, T. Estudo experimental e numérico dos efeitos de injeção múltipla nas características de combustão e emissão de motores bicombustíveis a gás natural e diesel. **Energy Conversion and Management**, v. 183, p. 84-96, 2019. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117851.

KARTHIC, S. V.; SENTHIL KUMAR, M.; NATARAJ, G.; PRADEEP, P. An assessment on injection pressure and timing to reduce emissions on diesel engine powered by renewable fuel. **Journal of Cleaner Production,** v. 255, p. 120186, 2020. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120186.

KUMAR, M.; BHOWMIK, S.; PAUL, A. Effect of pilot fuel injection pressure and injection timing on combustion, performance and emission of hydrogen-biodiesel dual fuel engine. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, n. 68, p. 29554–29567, 2022. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.06.260.

LAPES - LABORATÓRIO DE PESQUISA EM ENGENHARIA DE SOFTWARE. **Tools.** São Carlos, SP: Lapes, 2025. https://www.lapes.ufscar.br/resources/tools.

LI, Z.; MI, S.; ZHANG, Y.; QIAN, Y.; LU, X. Characterizing the role of fuel injection strategies on performance, combustion, and emissions in intelligent charge compression ignition (ICCI) mode. **Applied Thermal Engineering**, v. 207, p. 118169, 2022. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118169.

LI, Z.; WANG, Y.; WANG, Y.; YIN, Z.; GAO, Z.; YE, Z.; ZHEN, X. Effects of fuel injection timings and methanol split ratio in M/D/M strategy on a diesel/methanol dual-fuel direct injection engine. **Fuel**, v. 325, p. 124970, 2022. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124970.

LI, Z.; WANG, Y.; YIN, Z.; GAO, Z.; WANG, Y.; ZHEN, X. An exploratory numerical study of a diesel/methanol dual-fuel injector: Effects of nozzle number, nozzle diameter and spray spacial angle on a diesel/methanol dual-fuel direct injection engine. **Fuel**, v. 318, p. 123700, 2022. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123700.

LI, Z.; WANG, Y.; YIN, Z.; GENG, H.; ZHU, R.; ZHEN, X. Effect of injection strategy on a diesel/methanol dual-fuel direct-injection engine. **Applied Thermal Engineering**, v. 189, p. 116691, 2021. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116691.

LIU, J.; WU, P.; JI, Q.; SUN, P.; WANG, P.; MENG, Z.; MA, H. Experimental study on effects of pilot injection strategy on combustion and emission characteristics of diesel/methanol dual-fuel engine under low load. **Energy**, v. 247, p. 123464, 2022. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123464.

LIU, J.; ZHAO, H.; WANG, J.; ZHANG, N. Optimization of the injection parameters of a diesel/natural gas dual fuel engine with multi-objective evolutionary algorithms. **Applied Thermal Engineering**, v. 150, p. 70–79, 2019. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.12.171.

MADIHI, R.; POURFALLAH, M.; GHOLINIA, M.; ARMIN, M.; GHADI, A. Z. Thermofluids analysis of combustion, emissions, and energy in a biodiesel (C11H22O2) / natural gas heavy-duty engine with RCCI mode (Part II: Fuel injection time/ Fuel injection rate). **International Journal of Thermofluids**, v. 16, p. 100200, 2022. https://doi.org/10.1016/j.ijft.2022.100200.

RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218



NING, L.; DUAN, Q.; KOU, H.; ZENG, K. Parametric study on effects of methanol injection timing and methanol substitution percentage on combustion and emissions of methanol/diesel dual-fuel direct injection engine at full load. **Fuel,** v. 279, p. 118424, 2020. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118424.

OLIVEIRA PAUFERRO, M. T. **Uso do etanol como combustível para motores diesel:** uma discussão sobre a viabilidade. 2012. 53f. Monografia (MBA em Gestão Ambiental e Práticas de Sustentabilidade) - Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetanos do Sil, SP, 2012. https://maua.br/files/monografias/uso-do-etanol-como-combustivel-para-motores-diesel-uma-discussao-sobre-a-viabilidade.pdf

OUCHIK, S.; LOUNICI, M. S.; LOUBAR, K.; TARABET, L.; TAZEROUT, M. Effect of diesel injection strategy on performance and emissions of $CH_4$/diesel dual-fuel engine. **Fuel**, v. 308, p. 121911, 2022. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121911.

RAÍZEN. **Etanol**: o que é e como é usado no Brasil. Time de Produção de Etanol da Raízen. [S. l.]: Raízen, 2022. https://www.raizen.com.br/blog/etanol#:~:text=Al%C3%A9m%20de%20renov%C3%A1vel%2C%20o%20etanol,)%2C%20quando%20comparado%20%C3%A0%20gasolina.

SUN, W.; JIANG, M.; GUO, L.; ZHANG, H.; JIA, Z.; QIN, Z.; ZENG, W. *et al.* Numerical study of injection strategies for marine methanol/diesel direct dual fuel stratification engine. **Journal of Cleaner Production**, v. 421, p. 138505, 2023. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138505.

TAO, W.; SUN, T.; GUO, W.; LU, K.; SHI, L.; LIN, H. The effect of diesel pilot injection strategy on combustion and emission characteristic of diesel/methanol dual fuel engine. **Fuel,** v. 324, p. 124653, 2022. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124653.

TRIPATHI, G.; SHARMA, P.; DHAR, A. Computational study of diesel injection strategies for methane-diesel dual fuel engine. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 6, p. 100393, 2022. https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100393.

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

VALERA, H.; KUMAR, D.; AGARWAL, A. K. Evaluating the effect of variable methanol injection timings in a novel co-axial fuel injection system equipped locomotive engine. **Journal of Cleaner Production**, v. 349, p. 131452, 2022. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131452.

WEN, H.; YU, Y.; LI, J.; XU, C.; JING, H.; SHEN, J. Numerical investigation on the influence of injection location and injection strategy on a high-pressure direct injection diesel/methanol dual-fuel engine. **Energies**, v. 16, n. 11, p. 4518, 2023. https://doi.org/10.3390/en16114518.

XU, C.; ZHUANG, Y.; QIAN, Y.; CHO, H. Effect on the performance and emissions of methanol/diesel dual-fuel engine with different methanol injection positions. **Fuel**, v. 307, p. 121868, 2022. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121868.

YANG, T.; CHEN, D.; LIU, L.; ZHANG, L.; WANG, A.; LI, G.; CHEN, H.; CHEN, Y. Efeito da estratégia de injeção piloto no desempenho do motor diesel sob modo de combustão dupla etanol/FT diesel. **Processes**, v. 347, 2023. https://doi.org/10.3390/pr11071919.

YANG, W.; WANG, Y.; BAI, Y.; HAO, L.; LIU, X. Experimental study of the bioethanol substitution rate and the diesel injection strategies on combustion and emission characteristics of dual-fuel-direct-injection (DFDI) engines. **Journal of the Energy Institute**, v. 106, p. 101153, 2023. https://doi.org/10.1016/j.joei.2022.101153.

RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218



YIN, X.; LI, W.; DUAN, H.; DUAN, Q.; KOU, H.; WANG, Y.; YANG, B.; ZENG, K. A comparative study on operating range and combustion characteristics of methanol/diesel dual direct injection engines with different methanol injection timings. **Fuel,** v. 334, p. 126646, 2023. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126646.

YIN, X.; XU, L.; DUAN, H.; WANG, Y.; WANG, X.; ZENG, K.; WANG, Y. In-depth comparison of methanol port and direct injection strategies in a methanol/diesel dual fuel engine. **Fuel Processing Technology**, v. 241, p. 107607, 2023. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2022.107607.

YIN, X.; YUE, G.; LIU, J.; DUAN, H.; DUAN, Q.; KOU, H.; WANG, Y.; YANG, B.; ZENG, K. Investigation into the operating range of a dual-direct injection engine fueled with methanol and diesel. **Energy**, v. 267, p. 126625, 2023. https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126625.

YOU, J.; LIU, Z.; WANG, Z.; WANG, D.; XU, Y. Impact of natural gas injection strategies on combustion and emissions of a dual fuel natural gas engine ignited with diesel at low loads. **Fuel**, v. 260, p. 116414, 2020. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116414

YOUSEFI, A.; GUO, H.; BIROUK, M. Effect of diesel injection timing on the combustion of natural gas/diesel dual-fuel engine at low-high load and low-high speed conditions. **Fuel**, v. 235, p. 838–846, 2019. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.08.064.

YOUSEFI, A.; GUO, H.; BIROUK, M.; LIKO, B.; LAFRANCE, S. Effect of post-injection strategy on greenhouse gas emissions of natural gas/diesel dual-fuel engines at high load conditions. **Fuel,** v. 290, p. 120071, 2021a. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.120071.

YOUSEFI, A.; GUO, H.; DEV, S.; LAFRANCE, S.; LIKO, B. A study on split diesel injection on thermal efficiency and emissions of an ammonia/diesel dual-fuel engine. **Fuel**, v. 316, p. 123412, 2022. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123412.

YOUSEFI, A.; GUO, H.; DEV, S.; LIKO, B.; LAFRANCE, S. Effect of pre-main-post diesel injection strategy on greenhouse gas and nitrogen oxide emissions of natural gas/diesel dual-fuel engine at high load conditions. **Fuel**, v. 302, p. 121110, 2021b. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121110.

ZHOU, H.; ZHAO, H.-W.; HUANG, Y.-P.; WEI, J.-H.; PENG, Y.-H. Effects of injection timing on combustion and emission performance of dual-fuel diesel engines under low to medium load conditions. **Energies**, v. 12, n. 12, p. 2349, 2019. https://doi.org/10.3390/en12122349.