RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218

INJEÇÃO DE AMÔNIA EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA: REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

AMMONIA INJECTION IN INTERNAL COMBUSTION ENGINES: SYSTEMATIC REVIEW OF THE LITERATURE

INYECCIÓN DE AMONÍACO EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA: REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LA LITERATURA

Ana Vitória das Chagas Motta[1], Masoud Ghanbari Kashani[1], Enzo Manghani Yamamoto[2], Gabriel Coelho Rodrigues Alvares[1], Alex Pereira da Cunha[1], Paulo Sérgio Barbosa dos Santos[1]

e656355
https://doi.org/10.47820/recima21.v6i5.6355

PUBLICADO: 5/2025

RESUMO

A amônia é uma alternativa promissora aos combustíveis fosseis devido à sua capacidade de queimar sem emitir dióxido de carbono (CO_2), contribuindo para a redução de gases de efeito estufa. Sua aplicação em motores de combustão interna, especialmente em misturas com diesel, tem demonstrado potencial significativo para reduzir emissões e aumentar a eficiência energética. Apesar de suas vantagens, a amônia apresenta desafios técnicos, como baixa reatividade e alta temperatura de autoignição, que exigem soluções inovadoras. Tecnologias como sistemas de injeção dupla, mistura com hidrogênio e recirculação de gases reformados têm sido desenvolvidas para superar esses obstáculos, garantindo maior eficiência e controle de emissões. Esta revisão sistemática tem como objetivo reunir e classificar estudos sobre o tema, fazendo o uso do *software* StArt, que guia a revisão através de diversas etapas bem estruturadas que avaliam os estudos através de critérios rigorosamente definidos. Os resultados encontrados evidenciaram que o uso da amônia como combustível pode reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa ao mesmo tempo que mantém a eficiência do motor, mas ainda são necessários estudos mais aprofundados para que seja feita a aplicação em larga escala.

PALAVRAS-CHAVE: Amônia. Combustíveis sustentáveis. Eficiência energética. Redução de emissões. Sistemas de combustão avançados. Transição energética.

ABSTRACT

Ammonia is a promising alternative to fossil fuels due to its ability to burn without emitting carbon dioxide (CO_2), contributing to the reduction of greenhouse gas emissions. Its application in internal combustion engines, especially in mixtures with diesel, has shown significant potential to reduce emissions and increase energy efficiency. Despite its advantages, ammonia presents technical challenges, such as low reactivity and high autoignition temperature, which require innovative solutions. Technologies such as dual injection systems, hydrogen blending, and reformed gas recirculation have been developed to overcome these obstacles, ensuring greater efficiency and emission control. This systematic review aims to gather and classify studies on the topic, using the StArt software, which guides the review through well-structured stages that evaluate studies based on rigorously defined criteria. The results show that the use of ammonia as a fuel can significantly reduce greenhouse gas emissions while maintaining engine efficiency. However, further studies are still needed to enable its large-scale application.

KEYWORDS: *Advanced combustion systems. Ammonia. Energy efficiency. Emission reduction. Renewable fuels. Energy transition.*

RESUMEN

El amoníaco es una alternativa prometedora a los combustibles fósiles debido a su capacidad de quemarse sin emitir dióxido de carbono (CO_2), contribuyendo a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Su aplicación en motores de combustión interna, especialmente en mezclas con diésel, ha demostrado un potencial significativo para reducir emisiones y aumentar la eficiencia

[1] UNESP - Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho".
[2] UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais.

RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218

energética. A pesar de sus ventajas, el amoníaco presenta desafíos técnicos, como baja reactividad y alta temperatura de autoignición, que requieren soluciones innovadoras. Se han desarrollado tecnologías como sistemas de inyección dual, mezcla con hidrógeno y recirculación de gases reformados para superar estos obstáculos, garantizando una mayor eficiencia y control de emisiones. Esta revisión sistemática tiene como objetivo recopilar y clasificar estudios sobre el tema, utilizando el software StArt, que guía la revisión a través de etapas bien estructuradas que evalúan los estudios con criterios rigurosamente definidos. Los resultados muestran que el uso del amoníaco como combustible puede reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero sin comprometer la eficiencia del motor. Sin embargo, aún se necesitan estudios más profundos para viabilizar su aplicación a gran escala.

***PALABRAS CLAVE**: Amoníaco. Combustibles sostenibles. Eficiencia energética. Reducción de emisiones. Sistemas de combustión avanzados. Transición energética.*

1. INTRODUÇÃO

O aumento das emissões de gases de efeito estufa é uma das questões mais urgentes da atualidade, impactando diretamente o equilíbrio ambiental e o bem-estar das futuras gerações. As crescentes preocupações com a sustentabilidade ambiental têm incentivado a busca por combustíveis alternativos, capazes de reduzir o impacto ambiental dos motores de combustão interna, amplamente utilizados nos transportes e na indústria. Nesse cenário, a amônia surge como uma alternativa promissora, destacando-se por sua capacidade de queimar sem emitir dióxido de carbono (CO_2), um dos principais responsáveis pelo aquecimento global. Assim, ela representa uma possibilidade concreta de contribuir para a redução das emissões de gases poluentes, ao mesmo tempo em que mantém a eficiência energética necessária para o funcionamento desses motores.

Diferentemente dos combustíveis fósseis, cuja queima está associada a altos níveis de emissões, a amônia possui uma composição que permite ciclos de combustão mais limpos. Quando controlados adequadamente, esses ciclos resultam em uma menor liberação de gases poluentes, tornando a amônia uma opção atrativa para substituir parcialmente o diesel em aplicações industriais e no transporte.

No entanto, a introdução da amônia como combustível auxiliar não é isenta de desafios. Por ser menos reativa que o diesel e possuir uma alta temperatura de autoignição, sua utilização exige soluções técnicas avançadas, como os sistemas de injeção dupla. Nesse sistema, a amônia é combinada com uma injeção inicial de diesel, essencial para iniciar o processo de combustão. Essa abordagem inovadora não apenas melhora a eficiência energética da amônia, mas também permite que os motores funcionem com emissões significativamente menores de CO_2. Esses avanços mostram que, apesar das dificuldades, é possível alinhar o progresso tecnológico à preservação ambiental.

Mais do que uma solução técnica, a adoção da amônia como combustível complementar está diretamente conectada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas. Em particular, ela reflete os princípios dos ODS 7 e 13, sendo que o 7 defende o acesso universal a fontes de energia acessíveis, confiáveis e limpas, enquanto o objetivo 13 enfatiza a necessidade de ações urgentes contra as mudanças climáticas, promovendo tecnologias que reduzam as emissões de gases de efeito estufa.

RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218

Portanto, esta pesquisa busca avaliar a performance da amônia como segundo combustível, investigando de que forma essa inovação tecnológica pode contribuir para a redução das emissões de poluentes, como NO_x e CO_2, sem comprometer a eficiência energética dos motores. Seu uso representa um passo em direção a um mundo onde a dependência de combustíveis fosseis seja reduzida, e onde soluções sustentáveis possam coexistir com o crescimento econômico. A implementação de um modelo de desenvolvimento sustentável constitui uma estratégia fundamental para mitigar impactos ambientais e promover condições socioeconômicas favoráveis.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o entendimento do tema abordado, foi utilizada a revisão sistemática da literatura (RSL), com o objetivo de explorar alternativas promissoras para a redução do impacto ambiental das emissões geradas por motores movidos a diesel. Nesse contexto, foi analisada a viabilidade do uso da amônia como combustível auxiliar, destacando seu potencial para substituir parcialmente o diesel e reduzir significativamente as emissões de dióxido de carbono (CO_2), mantendo a eficiência energética. Para auxiliar na compreensão, também foi criada uma subseção dedicada à fundamentação teórica da combustão da amônia, destacando seus pontos negativos e os principais desafios técnicos associados.

2.1. Fundamentação teórica da combustão da amônia

A combustão da amônia ocorre pela reação com o oxigênio, formando nitrogênio molecular (N_2) e vapor d'água (H_2O), sem emissão direta de CO_2, o que a torna atrativa do ponto de vista ambiental. A reação é exotérmica, mas apresenta desafios técnicos, como a alta temperatura de ignição (~651 °C) e a baixa velocidade de propagação da chama. Conforme a Equação 1.

Equação 1: Reação estequiométrica da combustão da amônia.

$$4NH_3 + 3O_2 \rightarrow 2N_2 + 6H_2O$$

Fonte: ChemicalAid, (2025).

De acordo com Alnajideen *et al.*, (2024), baixa reatividade, queima lenta, alta temperatura de autoignição e altas emissões de NO_x estão entre as principais desvantagens da combustão da amônia, e, embora a reação estequiométrica não produza NO_x, as condições que são encontradas no mundo real são propícias para a formação de radicais que contêm nitrogênio.

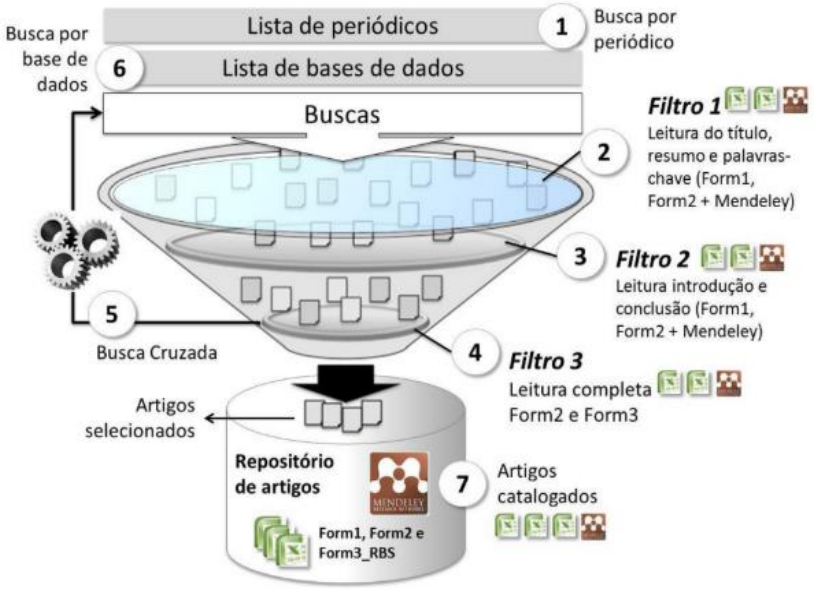
Em condições de excesso de oxigênio ou temperaturas elevadas, podem ocorrer reações alternativas que geram NO e NO_2, exigindo controle rigoroso para evitar poluição atmosférica. Assim, a eficiência da combustão depende do controle adequado das condições térmicas e estequiométricas.

RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218

2.2. Desenvolvimento da revisão sistemática da literatura

Ao abordar o desenvolvimento de uma revisão sistemática da literatura (RSL), é essencial considerar metodologias robustas que garantam rigor científico e relevância prática. O estudo de Conforto, Amaral e Silva (2011) oferece um roteiro sistematizado com uma sequência de passos bem estruturados para condução de revisões sistemáticas na gestão de operações, integrando etapas iterativas de busca, análise e documentação. Embora limitado ao foco em artigos acadêmicos, destaca-se pela contribuição prática e potencial para aprimoramento, como a definição de critérios de busca e uma metodologia rigorosa, a qual promove maior rigor científico na compreensão do estado da arte em áreas específicas (Figura 1).

Figura 1: Representação da etapa de processamento da RSL



Fonte: Conforto, Amaral e Silva (2011)

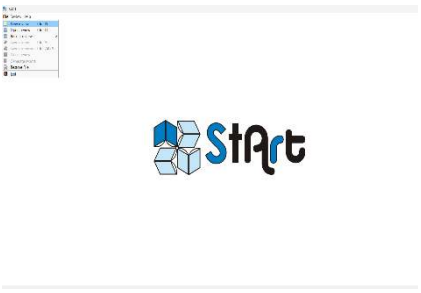
2.2.1. *Software* start - ferramenta computacional para auxílio da RSL

Foi utilizado o *software* StArt, versão 3.4 Beta, desenvolvido pelo Laboratório de Pesquisas em Engenharia de *Software* (LaPES) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Esse programa guia a revisão por meio de um processo composto por várias etapas bem estruturadas, proporcionando maior eficiência e precisão para os pesquisadores.

Ao abrir o *software*, cria-se um arquivo destinado ao desenvolvimento da RSL (Figura 2A). O sistema exibe uma janela inicial com informações para dar início ao processo (Figura 2B). Em seguida, são preenchidos o título da RSL, os nomes dos pesquisadores envolvidos (Figura 2C) e uma descrição dos fundamentos da pesquisa (Figura 2D). A navegação entre as telas é feita clicando em "*Next*" para avançar, "*Back*" para retornar e "*Finish*" para concluir (Figura 2E). Após finalizado, a árvore de projeto da RSL é exibida automaticamente.

RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218

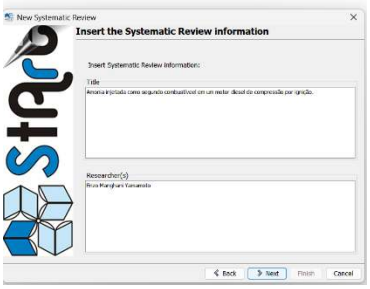
Figura 2: Criação do projeto da RSL no *software* StArt



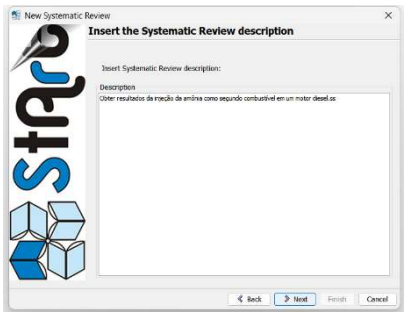
A) Criação do arquivo para RSL



B) Caixa de orientações



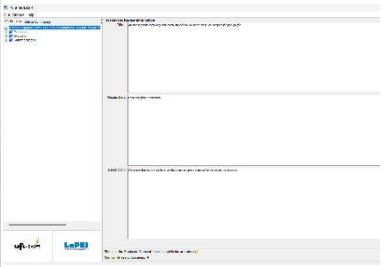
C) Título e pesquisadores



D) Descrição da pesquisa



E) Última tela da caixa de diálogo



F) Tela do início da árvore de projeto da RSL

Fonte: Autores.

2.2.2. PROTOCOLO DA RSL

No Quadro 1, estão descritas a questão da pesquisa e as Bases de Dados e a *string* de busca designada. A *string* de busca consiste em um conjunto de termos relevantes conectados por operadores booleanos (*And, Or e Not*), projetada para ser utilizada nos mecanismos de busca das bases de dados.

Quadro 1: Parâmetros iniciais para a RSL

Questão	Qual o resultado da amônia como segundo combustível, levando em consideração performance e emissão de poluentes?
Bases de dados	***String* de busca**
IEE	*("Ammonia") AND ("Dual Fuel") AND ("Diesel Engine" OR "Compression Ignition")*
Web of Science	*("Ammonia") AND ("Dual Fuel") AND ("Diesel Engine" OR "Compression Ignition")*
Scopus	*("Ammonia") AND ("Dual Fuel") AND ("Diesel Engine" OR "Compression Ignition")*
Science Direct	*("Ammonia") AND ("Dual Fuel") AND ("Diesel Engine" OR "Compression Ignition")*

Fonte: Autores.

RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218

Assim, foi definida uma lista de palavras-chave em inglês, elaborada a partir das principais questões da pesquisa, juntamente com uma *string* de busca específica para cada base de dados. A lista é: *Alternative fuels, Ammonia engine , Ammonia fuel, Ammonia fuels, Carbon, Carbon dioxide, Carbon monoxide, Combined injection, Combustion and emission characteristics, Combustion characteristics, Combustion stability, Compression ignition engine, Diesel engines, Diesel engines, Direct injection, Dual fuel, Dual fuel engine, Dual fuel engines, Dual-fuel, Dual-fuel engine, Dual-fuel engines, Dual-fuels, Engine cylinders, Engine performance, Exhaust gas recirculation, Exhaust gases, Fossil fuels, Fuel consumption, Fuel injection, Global warming, Greenhouse gas, Greenhouse gases, Heat transfer, Injection timing, Multiobjective optimization, Natural gas, Nitrogen oxides, No emissions, Particulate matter, Performance and emissions, Performance characteristics, Selective catalytic reduction, Soot, Soot emissions, Timing circuits, Alternative fuels, Ammonia, Ammonia combustion, Blending, Carbon monoxide, Catalysts, Combustion, Diesel, Direct injection diesel engines, Dual fuel combustion, Dual fuel injection, Dual fuell, Diesel engine, Compression ignition, Efficiency, Emission, Emissions, Energy, Engines, Fuels, Gas emissions, Ignition, Injection, Injection strategy, Mixtures, Optimization, Oxidation, Performance, Reduction, Smoke, Soot, Temperature* e *Thermal efficiency.*

Após a definição dos termos, foram estabelecidos os critérios de inclusão e exclusão, apresentados no Quadro 2. Esses critérios desempenham um papel fundamental na seleção dos artigos, garantindo que o processo seja realizado com rigor.

Quadro 2: Critérios de inclusão ou exclusão

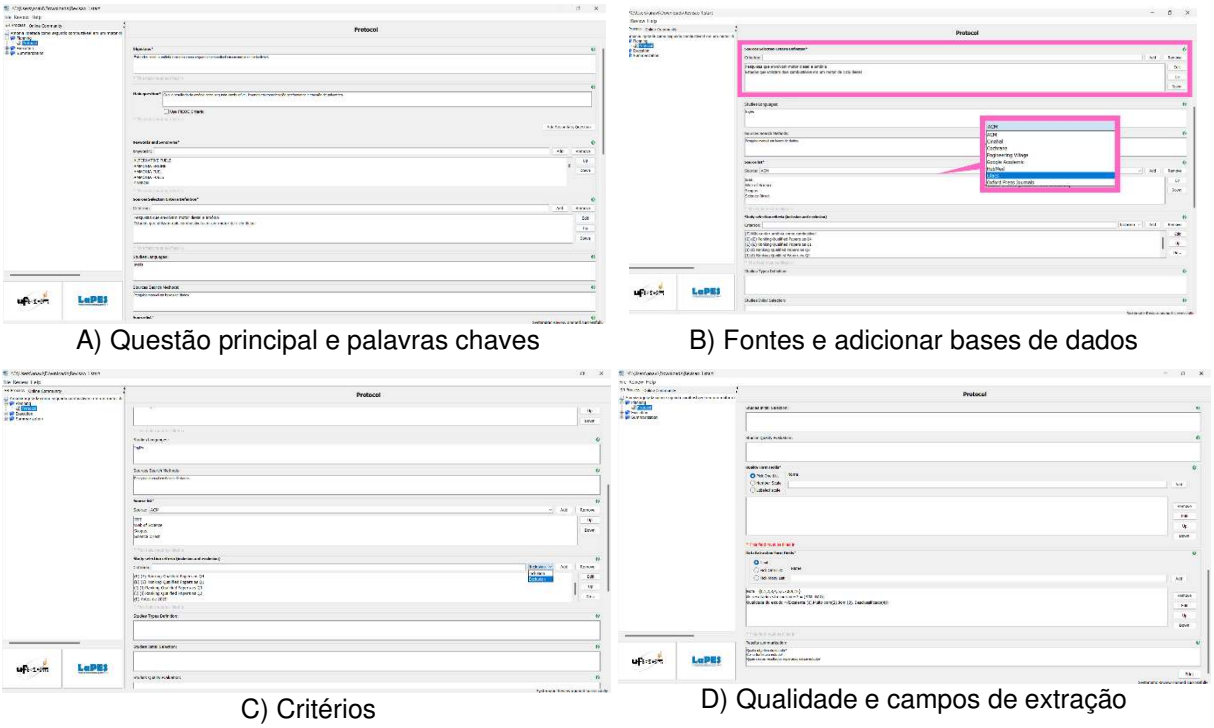
Critério	Descrição do critério de inclusão	Critério	Descrição do critério de exclusão
CI1	artigo classificado como Q2	CE1	Não conter amônia como combustível
CI2	artigo classificado como Q3	CE2	artigo classificado como Q4
		CE3	Antes de 2019

Fonte: Autores.

Com os dados de entrada definidos, estes são inseridos no *software* na aba de planejamento, na seção de protocolo (Figura 3A). Em seguida, adicionam-se as bases de dados utilizadas para a coleta dos artigos (Figura 3B) e os critérios de inclusão e exclusão (Quadro 2), que também devem ser registrados (Figura 3C). Há ainda a possibilidade de incluir um fator de qualidade e são configurados campos para os elementos de extração (Figura 3D), os quais servem para determinar a relevância dos artigos para a pesquisa.

RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218

Figura 3: Campos do protocolo da RSL



A) Questão principal e palavras chaves

B) Fontes e adicionar bases de dados

C) Critérios

D) Qualidade e campos de extração

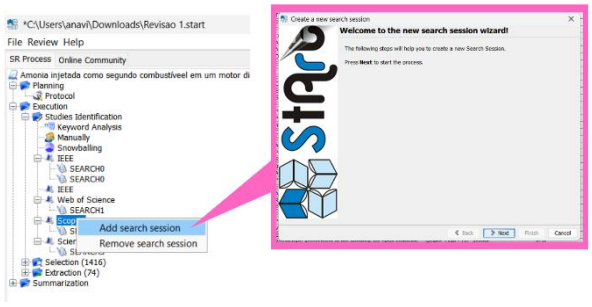
Fonte: Autores.

2.2.3. Processamento dos artigos

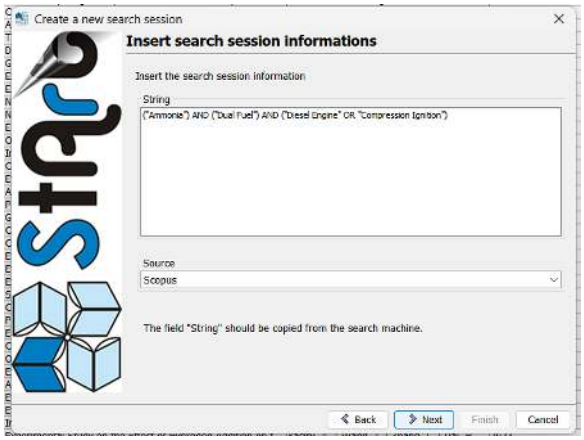
Após definir a *string* de busca, a pesquisa foi realizada nas bases de dados, seguido do *download* dos arquivos nos formatos ".bib" ou ".ris". Depois de salvos no computador, os arquivos foram importados para o *software* StArt. Na Figura 4A, é possível observar as bases de dados previamente configuradas. Ao clicar em *Add search session*, são exibidas janelas para inserir as informações da string de busca (Figura 4B), observações sobre a busca (Figura 4C), e, por fim, uma nova caixa de diálogo (Figura 4D) que permite acessar a janela de carregamento dos arquivos (Figura 4E). Nessa etapa, seleciona-se o formato do arquivo salvo, escolhe-se o arquivo desejado e ativa-se a opção para remoção de duplicatas.

RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218

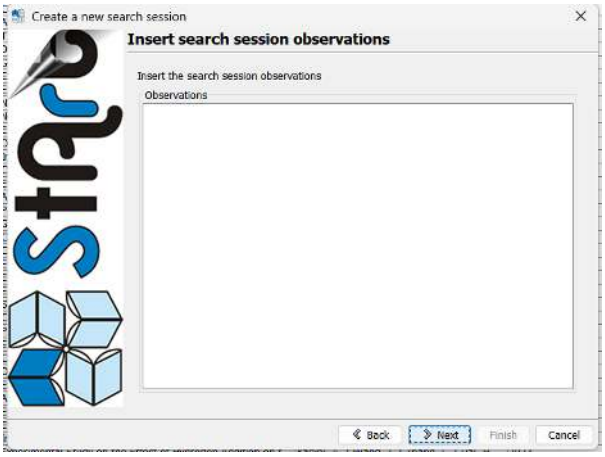
Figura 4: Inserção de arquivo contendo referências bibliográficas no StArt



A) Adição de novo arquivo



B) Inserção da *String* de busca



C) Observações complementares do arquivo de referências



D) Finalização da caixa de diálogo dos arquivos de referências



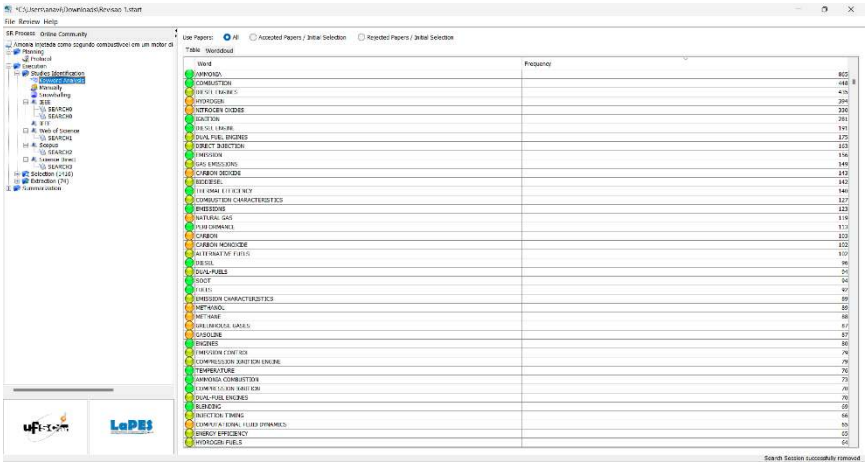
E) Localização da seleção do formato do arquivo “bib” ou “ris”

Fonte: Autores.

Após a importação dos arquivos de referência no *software*, pode-se acessar a funcionalidade *keyword analysis*, que permite observar a frequência de determinadas palavras. Essas palavras são destacadas por cores, conforme sua correspondência: verde para palavras idênticas, amarelo para semelhantes e vermelho para distintas (Figura 5).

RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218

Figura 5: Análise da frequência das palavras das referências bibliográficas

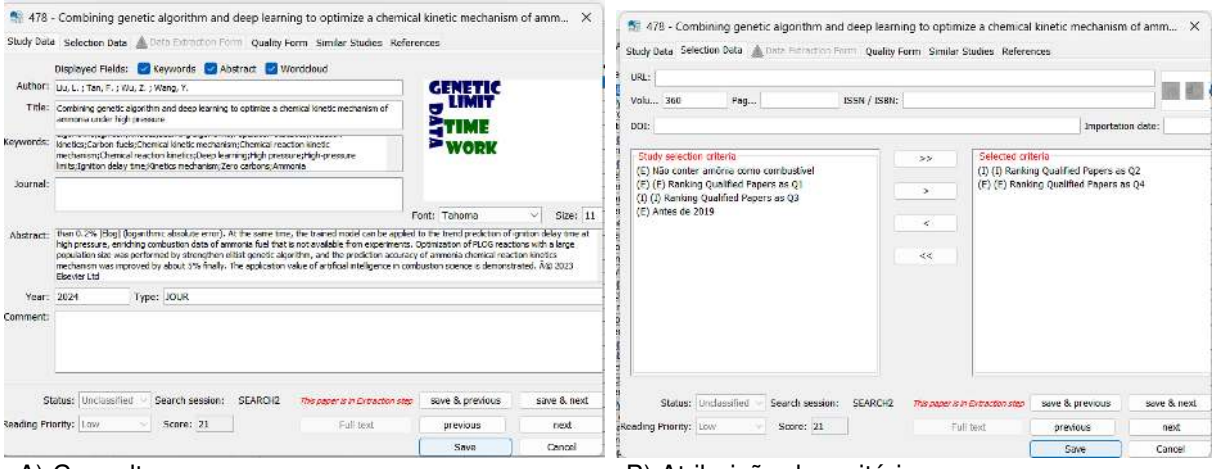


Fonte: Autores.

Destaca-se que o terceiro critério de inclusão utiliza uma ferramenta do s*oftware* StArt para selecionar e segmentar os artigos, organizando-os em quartis de pontuação. Essa etapa deve ser realizada somente após a inserção de todos os arquivos de referência bibliográfica no *software*, permitindo a exclusão dos artigos que estejam nos quartis inferiores, devido à sua menor aderência à pesquisa.

Em seguida, é realizada a classificação dos artigos com base na pontuação (*Score*) para a etapa de leitura dinâmica, na qual se verifica se o resumo atende a algum dos critérios de inclusão ou exclusão. Os resumos podem ser acessados com um clique duplo no botão direito (Figura 6A), classificados (Figura 6B) e encaminhados para a etapa de extração. Nessa etapa, ocorre a leitura completa dos artigos selecionados, com o preenchimento dos campos de interesse para a pesquisa e a definição de sua inclusão no relatório final.

Figura 6: Avaliação individual e extração



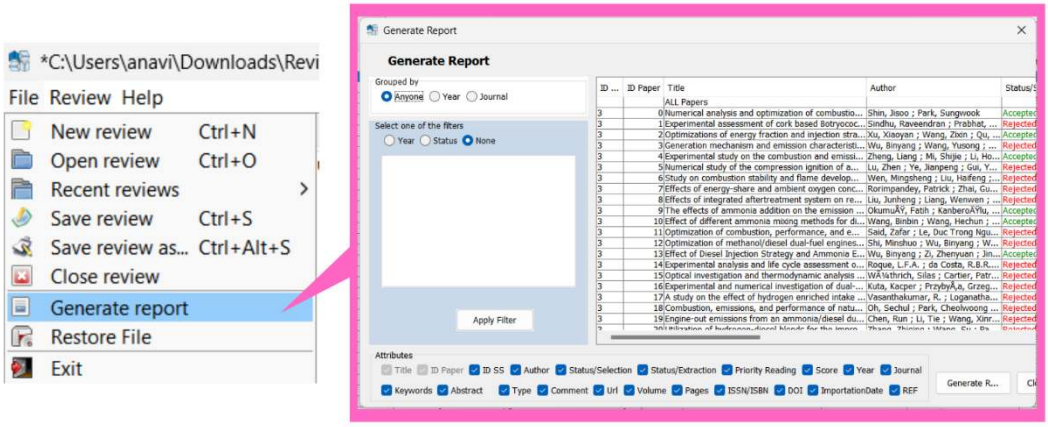
A) Consulta ao resumo B) Atribuição dos critérios

Fonte: Autores.

RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218

O s*oftware* StArt possibilita a criação de arquivos com extensão ".xlsx", contendo todos os dados extraídos dos arquivos. Além disso, oferece a opção de visualizar determinados dados na seção "*Summarization*" presente na árvore de projeto da RSL (Figura 7).

Figura 7: Geração de relatório ".xlsx"



Fonte: Autores.

A Figura 8 é um organograma que ilustra a organização dos blocos de funções no *software*. Esses blocos podem ser seguidos de forma sequencial ou conforme o protocolo previamente definido. Essa organização detalhada é essencial para alcançar os melhores resultados. Além disso, a Figura 8 apresenta informações quantitativas sobre os artigos classificados em cada etapa do processo.

Figura 8: Organograma



Fonte: Autores.

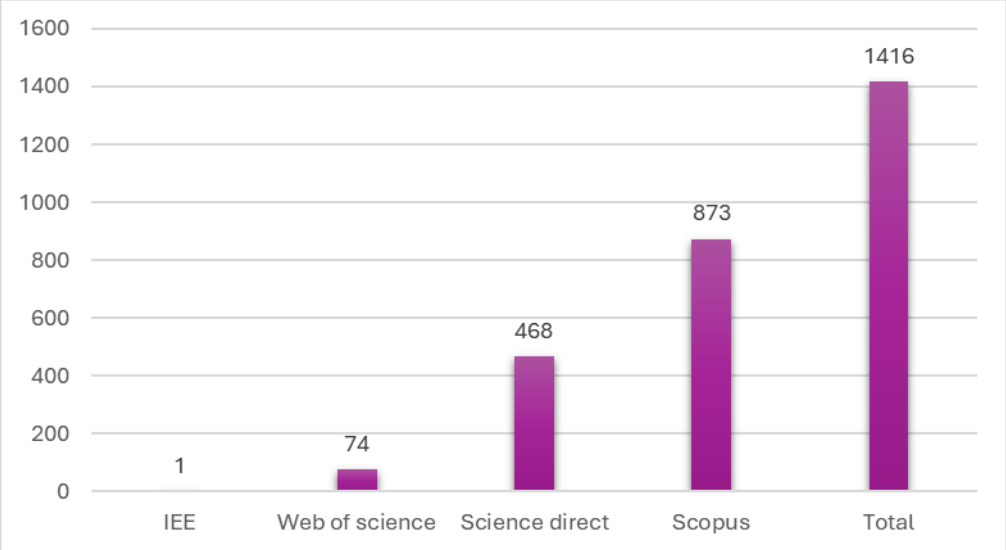
RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Utilizando como referência fontes de artigos científicos, os documentos foram pesquisados e baixados nos formatos ".ris" ou ".bib". A relevância do tema fica evidente ao analisar o aumento contínuo das pesquisas publicadas, o que ressalta a importância da Revisão Sistemática da Literatura. Esse método não apenas compila e sintetiza os achados, mas também direciona investigações futuras.

Durante a realização da RSL, algumas restrições foram identificadas, afetando tanto a abrangência quanto a qualidade da análise. Um dos principais desafios encontrados foi a diversidade metodológica entre os estudos selecionados, o que dificultou a comparação direta dos resultados e a elaboração dos resumos. Além disso, a interpretação e seleção dos artigos pelos pesquisadores impactaram os achados, tornando essencial a definição de critérios rigorosos para minimizar possíveis conflitos. A distribuição dos artigos entre as bases de dados pode ser observada na Figura 9, onde nota-se que a Scopus concentrou o maior número de publicações, enquanto a IEEE apresentou a menor quantidade. Essa diferença ocorre devido às áreas de especialização de cada base de dados; no total, foram selecionados 1.416 artigos.

Figura 9: Distribuição dos artigos segundo as bases de dados

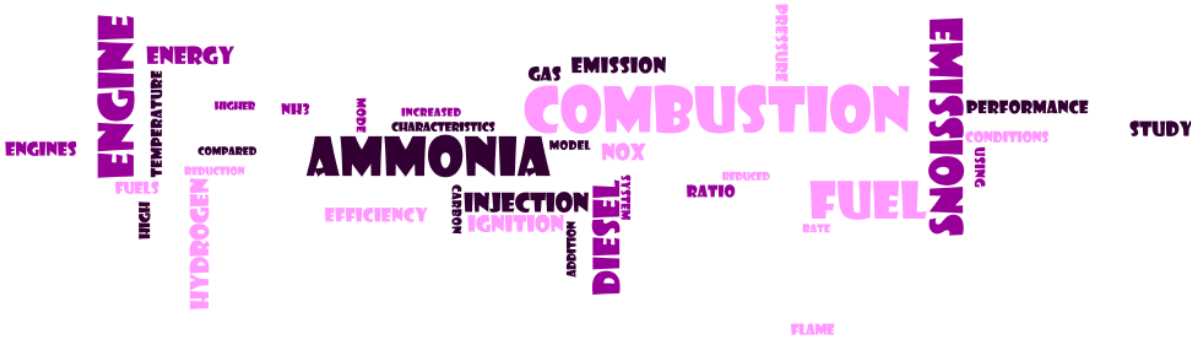


Fonte: Autores.

Após a inserção de todos os artigos no *software*, foi gerada uma nuvem de palavras, como ilustrado na Figura 10. A análise dessa nuvem permite identificar termos como *Combustion, Ammonia, Emissions, Fuel,* entre outros, que possuem uma relação direta com o tema abordado na RSL.

RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218

Figura 10: Nuvem de palavras



Fonte: Autores.

Com base nas etapas de leitura e extração, foram elaborados resumos para cada artigo selecionado, considerando suas pontuações e conformidade com os critérios de inclusão e exclusão. Esses resumos destacam os objetivos, a metodologia e os resultados obtidos em cada estudo.

O estudo discute o potencial do amoníaco e do hidrogênio como combustíveis sem carbono, focando principalmente no uso do amoníaco para motores de combustão interna com foco no uso puro e misturas com outros combustíveis. Foi feita uma revisão sobre as limitações atuais do uso do amoníaco puro como combustível, como sua dificuldade de combustão e a necessidade de novas estratégias, como combustão dual e melhor controle de emissões de NOx. Os resultados mostram que, embora avanços significativos tenham sido feitos na otimização de sistemas alimentados com amoníaco, ainda há barreiras, especialmente devido à combustão difícil e falta de modelos numéricos precisos (Cardoso *et al.*, 2021).

O artigo apresenta o desenvolvimento de um motor de combustão de amônia com ignição a diesel piloto, voltado para aumentar a eficiência térmica e reduzir emissões de gases de efeito estufa, especialmente N_2O e NH_3. Para isso, os autores propõem um conceito inovador chamada “recirculação de gás reformado no cilindro" (IRGR), onde um dos cilindros opera com excesso de amônia, que é parcialmente decomposto em hidrogênio. O escape desse cilindro é recirculado em outros cilindros, aproveitando os benefícios da combustão enriquecida com hidrogênio e recirculação de gases de combustão. Os resultados mostram que, com uma taxa de energia de 3% proveniente do diesel e 1000rpm, o motor melhorou a eficiência térmica em 15,8 %, prejudicando as emissões de NH_3 em 89,3 % e N_2O em 91,2 %, comparado aos motores tradicionais de amônia. Além disso, houve uma redução de 94 % nas emissões de gases de efeito estufa em relação ao modo tradicional o diesel (Zhou *et al.*, 2024).

Este estudo focou na análise da potência indicada do motor e da pressão no cilindro usando um sistema de medição que incluía um transdutor de pressão piezocerâmico, amplificador de carga e outros componentes. A metodologia envolveu o exame do processo de combustão, desempenho do motor, emissões e estabilidade de um motor de combustível duplo com foco na fração de energia da solução de amônia (WAS) no combustível. Os resultados mostraram que a co-combustão de óleo diesel com WAS afetou ligeiramente a estabilidade do motor, mas permaneceu dentro dos limites aceitáveis.

RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218

O estudo também avaliou o impacto da WAS em componentes de gases de escape com NOx, HC, CO e CO_2, mostrando uma redução nas emissões de NOx com a adição de WAS. No geral, a pesquisa destacou os benefícios potenciais da utilização de solução de amônia em motores de ignição por compressão (Pyrc *et al.*, 2021)

O estudo investigou uma nova mistura de diesel e amônia, chamada EDAS10, para reduzir emissões em motores diesel de automóveis leves. Essa mistura foi preparada com 10 % de solução de amônia e diesel usando o surfactante SPAN80 para criar uma emulsão estável. Testes em um motor de dois cilindros com injeção direta mostraram que o EDAS10 aumentou a eficiência térmica em 4,7 % em comparação com o diesel puro, além de reduzir emissões de poluentes como hidrocarbonetos e fumaça em até 67 %. Apesar disso, observou-se um aumento nas emissões de NOx e CO_2, indicando a necessidade de controle adicional para viabilizar o uso prático da EDAS10 (Subramani *et al.*, 2024).

O estudo investigou a viabilidade do uso de amônia como combustível alternativo em motores de ignição por compressão, em combinação com diesel. O motor foi operado em um regime fixo de 800rpm e 0,556 MPa IMEP (Pressão Média Eficaz Indicativa), usando amônia na injeção de porta (PFI) e diesel na injeção direta (DI). A adição de amônia resultou em combustão retardada e prolongada, mas estratégias de ajuste da injeção piloto melhoraram a eficiência de combustão de 74 % para 89 %. No entanto, essas estratégias também aumentaram as emissões de poluentes, como NOx e HCN, com o pico de emissão de HCN alcançando 9,2 ppm. Para mitigar essas emissões, o estudo sugere ajustes na quantidade de combustível e na temperatura de admissão, além de estratégias de avanço da combustão (Cai *et al.*, 2023).

O estudo realizado investigou, por meio de simulações computacionais, a influência das características da câmara de combustão em um motor pesado dual fuel operando com amônia e diesel. O objetivo foi otimizar a forma da tigela do pistão e a taxa de turbilhonamento para melhorar a eficiência da combustão e reduzir as emissões. Foi utilizado um método de refinamento do espaço experimental combinado com simulações de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) para garantir a precisão dos resultados. Além disso, avaliou-se o impacto da adição de hidrogênio à mistura ar-amônia na combustão. Os resultados mostraram que o modelo otimizado apresentou robustez, e que a adição de hidrogênio melhorou a eficiência e reduziu as emissões de NO_x. O estudo contribui para o aprimoramento de motores dual fuel amônia/diesel e para o desenvolvimento de combustíveis alternativos mais sustentáveis (Sehili *et al.*, 2024).

O estudo investigou a combustão e emissões de um motor de combustão interna usando uma mistura de amônia e diesel no modo de compressão com carga pré-misturada (PCCI). Foi testada uma variedade de frações de energia de amônia (AEF) e pressões de injeção de diesel (DIP) em um motor de um cilindro, com simulações tridimensionais para analisar a mistura e distribuição de reatividade no cilindro. Observou-se que aumentar a AEF e otimizar o momento de injeção de diesel melhora a eficiência térmica e reduz as emissões de gases de efeito estufa em até 51% em comparação com o modo a diesel. A estratégia PCCI mostrou-se promissora para reduzir emissões de NOx, embora

RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218

desafios ainda existam com a estabilidade da combustão em altas proporções de amônia (Wu *et al.*, 2024).

O artigo avaliou diferentes métodos de mistura de amônia e diesel para otimizar a ignição e minimizar as emissões em um motor com injeção direta de alta pressão. Foram testadas misturas por injeção no coletor de admissão e injeção direta no cilindro, analisando o desempenho de combustão e as emissões produzidas. A injeção direta no cilindro com alta proporção de amônia apresentou melhor desempenho, com emissões de CO_2 reduzidas em 69,05 % e NOx em 29,22 %, enquanto a taxa de escapamento de amônia foi mínima. A mistura no coletor de admissão resultou em menor eficiência e maior escapamento de amônia. Os dados indicam que a injeção direta é mais eficaz para balancear desempenho e emissões (Wang *et al.*, 2023).

O estudo investigou os efeitos de diferentes estratégias de pré-injeção de diesel no modo de combustão dupla de amônia/diesel em motores de ignição por compressão. Utilizando modelagem tridimensional por Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) e o *software* Converge, os pesquisadores simularam o comportamento do motor sob condições de carga total a 1200 rpm. Foi analisada a influência da proporção de energia da amônia e do tempo de injeção do diesel sobre as características de combustão e emissões. Os resultados mostraram que, à medida que a proporção de energia de amônia aumenta, a pressão máxima do cilindro primeiro cresce e depois diminui, enquanto o tempo de atraso de ignição aumenta. Houve redução de 40,9 % nas emissões de gases de efeito estufa com a estratégia de pré-injeção, em comparação com 36,5 % com injeção única. Além disso, as emissões de fuligem caíram 98,13 % e 99,6 %, respectivamente, com as estratégias de injeção única e pré-injeção (Guo *et al.*, 2023).

O estudo investigou as características de combustão e emissões de um motor de combustão interna em modo dual utilizando diesel e amônia (NH_3) em altas proporções de NH_3, buscando reduzir emissões de carbono. A pesquisa foi realizada em um motor diesel monocilíndrico, com injeção de NH_3 no coletor de admissão e injeção direta de diesel para ignição. O aumento da proporção de NH_3 resultou em atraso na ignição e maior liberação de calor, especialmente em baixas cargas, devido à baixa reatividade da amônia. A eficiência térmica indicada alcançou 44,5 % com uma

proporção energética de NH_3 de 0,6 em altas cargas. As emissões de NOx variaram conforme a carga e a proporção de NH_3, enquanto as emissões de N_2O aumentaram sob altas proporções de NH_3 e baixas temperaturas. O aumento da pressão de admissão melhorou o ambiente térmico do cilindro, mas reduziu a eficiência ao diluir o NH_3. Esses resultados sugerem que o uso de NH_3 como combustível é promissor, mas envolve desafios na otimização da eficiência e controle de emissões (Zheng *et al.*, 2024).

O estudo faz uma análise numérica e otimização da combustão e emissões em um motor dual de diesel e amônia, utilizando uma estratégia de injeção direta de amônia. O estudo foi conduzido por meio de simulações computacionais com o *software* CONVERGE v3.0, comparando-se a combustão dual pré-misturada com a injeção direta. A metodologia incluiu testes de diferentes momentos de injeção de amônia e diesel para otimizar o desempenho e as emissões. Os resultados mostraram que

RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218

a injeção direta de amônia permite uma melhoria de 8% na eficiência do motor, uma redução de até 13,5 % nas emissões de NOx e 91 % nos gases de efeito estufa em comparação ao uso de diesel puro. Além disso, a quantidade de amônia não queimada foi significativamente reduzida, mostrando que a injeção direta supera a pré-mistura na eficiência e na mitigação de poluentes (Shin; Park, 2024).

O estudo em questão explorou a combustão de amônia e diesel em um motor de combustão interna, utilizando uma abordagem de combustível duplo para melhorar a reatividade da amônia. Foram testadas diferentes estratégias de injeção de diesel, como injeções únicas e divididas, em um motor óptico operando a 1000 rpm. Imagens de alta velocidade da luminosidade da chama foram registradas para analisar a ignição e o desenvolvimento da chama. Os resultados mostraram que a injeção única deve evitar tempos excessivamente avançados ou atrasados, pois isso prejudica a combustão. A estratégia de injeção dividida melhorou a distribuição da mistura e a propagação da chama, favorecendo a combustão da amônia. O avanço do tempo de injeção previu um melhor desempenho, mas a proporção de injeção prévia não deve exceder 50 % para evitar a diminuição da luminosidade da chama e o apagamento da chama de amônia. Esse trabalho contribui para o conhecimento básico sobre o processo de combustão e oferece *insights* para otimizar estratégias de combustão em motores de combustível duplo (Zeng *et al.*, 2024).

O estudo explora a otimização de um motor dual de amônia e diesel, focando em estratégias de injeção e fração de energia. O objetivo foi melhorar o desempenho de combustão e reduzir as emissões de gases poluentes. Simulações numéricas foram realizadas em um motor de baixa velocidade e dois tempos com câmara de pré-combustão, variando fração de energia do diesel, momento de injeção da amônia e pressão de injeção do diesel. Os resultados mostraram que a injeção de diesel em 2 % da fração de energia promoveu melhor eficiência de combustão, e um momento otimizado de injeção da amônia melhorou a homogeneidade da mistura, diminuindo as emissões de amônia não queimada. A pressão de injeção mais alta (100 MPa) também aumentou a eficiência térmica e reduziu a emissão de gases de efeito estufa, embora emissões de NOx tenham aumentado (Xu *et al., 2024)*.

Outro analisou o uso de uma mistura de amônia e diesel em um motor diesel com variação de taxa de compressão e tempo de injeção, buscando otimizar desempenho e reduzir emissões. A pesquisa incluiu testes experimentais e simulações para avaliar o impacto das variáveis na eficiência e nas emissões. Os resultados mostraram que, ao aumentar o teor de amônia, a potência do motor diminuiu, mas houve uma redução significativa nas emissões de CO_2, especialmente com 60 % de amônia. A eficiência térmica aumentou até 40 % de amônia, caindo depois. Já as emissões de NOx aumentaram com altos teores de amônia e compressão, indicando a necessidade de ajustes para otimização ambiental e energética (Okumuş *et al.*, 2024).

Este estudo utilizou a recuperação termoquímica para otimizar a combustão de combustível duplo (amônia e diesel) em um motor de ignição por compressão. Um reator termoquímico catalítico (TCR) em escala real foi desenvolvido e testado, com o motor operando em modo de combustível duplo, utilizando misturas de amônia e hidrogênio injetadas como combustível adicional. Os resultados

RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218

mostraram que o reator aumentou a fração de amônia utilizada e melhorou a eficiência térmica em baixas velocidades e altas cargas, enquanto reduziu emissões de CO_2 devido à ausência de carbono no combustível. No entanto, emissões de NOx e N_2O aumentaram, com parte da amônia não queimada sendo eliminada pelo TCR. A implementação prática sugere ajustar dinamicamente a taxa de substituição de amônia para maximizar eficiência e controlar emissões em diferentes modos de operação (Kane; Northrop, 2021).

4. CONSIDERAÇÕES

Diante da grande quantidade de trabalhos sobre este tema, surgiu a necessidade de utilizar ferramentas computacionais para o tratamento e classificação dos artigos, com o objetivo de organizar uma base de referências bibliográficas mais precisa e alinhada aos objetivos da pesquisa. A presente revisão sistemática destacou o potencial promissor da amônia como combustível alternativo em motores de combustão interna, particularmente em combinações com diesel, visando a redução das emissões de gases de efeito estufa e a melhoria da eficiência térmica. Ao longo dos estudos analisados, foi possível observar avanços significativos na otimização dos motores alimentados por amônia, incluindo a implementação de tecnologias como a injeção dual e a recirculação de gases reformados, que contribuíram para a redução de emissões poluentes, como NOx e N_2O, além de melhorar a eficiência do sistema.

No entanto, ainda existem desafios técnicos a serem superados, como a dificuldade de combustão da amônia e a necessidade de tecnologias mais precisas que possam prever o comportamento do combustível em diferentes condições de operação. Durante a análise dos artigos selecionados, foi possível observar que algumas metodologias fizeram o uso de *softwares,* simulações computacionais e modelos numéricos. A injeção direta da amônia trouxe os melhores resultados, já que evitou atrasos ou adiantamentos excessivos no processo de combustão. Isso ajudou a melhorar a eficiência térmica e reduzir as emissões. Comparado à pré-mistura com diesel, esse método se mostrou mais eficiente. No entanto, quando a quantidade de amônia foi muito alta, o desempenho do motor piorou e as emissões aumentaram.

O uso da amônia como combustível tem um grande potencial, mas até o presente, enfrenta desafios como a otimização da eficiência e o controle das emissões. Algumas soluções complementares, como o uso de reatores termoquímicos, já foram sugeridas, além da consideração de aspectos como a viabilidade econômica da amônia como combustível, os impactos ambientais do seu uso – incluindo as emissões de N_2O e o escapamento de NH_3 - além de avaliações de desempenho em motores de diferentes escalas, como os automotivos, marítimos e geradores. O aperfeiçoamento das técnicas de injeção e combustão deve continuar sendo uma prioridade para futuros estudos, é necessário expandir as análises sobre o comportamento da amônia em conjunto com outros combustíveis alternativos, e até mesmo para outros setores de transporte e indústria. Deste modo abrindo oportunidades de estudos mais aprofundados sobre sua eficiência energética e seu potencial na redução de emissões de poluentes.

RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218

REFERÊNCIAS

ALNAJIDEEN, M.; SHI, H.; NORTHROP, W. *et al.* Combustão e emissões de amônia em aplicações práticas: uma revisão. **Carb Neutrality,** v. 3, n. 13, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s43979-024-00088-6. Acesso em: 22 abr. 2025.

CAI, Kai et al. Combustion behaviors and unregular emission characteristics in an ammonia–diesel engine. **Energies**, v. 16, n. 19, 2023. Disponível em: https://www.mdpi.com/1996-1073/16/19/7004. Acesso em: 29 jan. 2025.

CARDOSO, José S. *et al.* Ammonia as an energy vector: current and future prospects for low-carbon fuel applications in internal combustion engines. **Journal of Cleaner Production**, 10 maio 2021. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652621007824. Acesso em: 29 jan. 2025.

CHEMICALAID. **Balanceador de equações químicas**. [S. l.]: Chemicalaid, 2025. Disponível em: https://www.chemicalaid.com/tools/equationbalancer.php. Acesso em: 22 abr. 2025.

CONFORTO, Edivandro Carlos; AMARAL, Daniel Capaldo; SILVA, Sérgio Luis da. Roteiro para revisão bibliográfica sistemática: aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos. *In:* **CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO – CBGDP**, 8., 2011, Porto Alegre. Anais [...]. Porto Alegre: [s.n.], 2011.

GUO, Lei et al. Effects of pre-injection strategy on combustion characteristics of ammonia/diesel dual-fuel compression ignition mode**. Energies**, v. 16, n. 23, 2023. Disponível em: https://www.mdpi.com/1996-1073/16/23/7687. Acesso em: 29 jan. 2025.

KANE, Stephen P.; NORTHROP, William F. Thermochemical recuperation to enable efficient ammonia-diesel dual-fuel combustion in a compression ignition engine. **Energies**, v. 14, n. 22, 2021. Disponível em: https://www.mdpi.com/1996-1073/14/22/7540. Acesso em: 29 jan. 2025.

OKUMUŞ, Fatih et al. The effects of ammonia addition on the emission and performance characteristics of a diesel engine with variable compression ratio and injection timing. ***International* Journal of Hydrogen Energy**, v. 64, p. 186–195, 25 abr. 2024. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319924010450. Acesso em: 29 jan. 2025.

PYRC, Mateusz et al. An experimental investigation of the performance, emission and combustion stability of compression ignition engine powered by diesel and ammonia solution (NH_4OH). **International Journal of Engine Research**, v. 22, n. 8, p. 2639–2653, 1 ago. 2021. Disponível em: https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1468087420940942. Acesso em: 29 jan. 2025.

SEHILI, Younes et al. Computational investigation of the influence of combustion chamber characteristics on a heavy-duty ammonia diesel dual fuel engine. **Energies**, v. 17, n. 5, 2024. Disponível em: https://www.mdpi.com/1996-1073/17/5/1231. Acesso em: 29 jan. 2025.

SHIN, Junwoo; PARK, Sungwook. Numerical analysis and optimization of combustion and emissions in an ammonia-diesel dual-fuel engine using an ammonia direct injection strategy. **Energy**, v. 289, 15 fev. 2024. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544223034084. Acesso em: 29 jan. 2025.

SUBRAMANI, Arun K. et al. An innovative method of ammonia use in a light-duty automotive diesel engine to enhance diesel combustion, performance, and emissions. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 49, p. 38–58, 2 jan. 2024. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319923030872. Acesso em: 29 jan. 2025.

WANG, Bo et al. Effect of different ammonia mixing methods for diesel ignition on combustion and emission performance of high pressure common rail engine. **Journal of the Energy Institute**, v. 111,

RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218

1 dez. 2023. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1743967123002313. Acesso em: 29 jan. 2025.

WU, Bin et al. Effect of diesel injection strategy and ammonia energy fraction on ammonia-diesel premixed-charge compression ignition combustion and emissions. **Fuel**, v. 357, 1 fev. 2024. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236123023992. Acesso em: 29 jan. 2025.

XU, Xiaoyu et al. Optimizations of energy fraction and injection strategy in the ammonia-diesel dual-fuel engine. **Journal of the Energy Institute**, v. 112, 1 fev. 2024. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1743967123002842. Acesso em: 29 jan. 2025.

ZENG, Wenjun et al. Optical investigation on effects of diesel injection strategy on ammonia/diesel dual fuel combustion characteristics and flame development. **Fuel**, v. 363, 1 maio 2024. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S001623612400173X. Acesso em: 29 jan. 2025.

ZHENG, Lin et al. Experimental study on the combustion and emission characteristics of ammonia-diesel dual fuel engine under high ammonia energy ratio conditions. **Journal of the Energy Institute**, v. 114, 1 jun. 2024. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1743967124000357. Acesso em: 29 jan. 2025.

ZHOU, Xiaotong et al. Ammonia marine engine design for enhanced efficiency and reduced greenhouse gas emissions. **Nature Communications**, v. 15, n. 1, 1 dez. 2024. Disponível em: https://www.nature.com/articles/s41467-024-46452-z. Acesso em: 29 jan. 2025.