



## V Congresso Internacional e XI Workshop: Design & Materiais: Breve Revisão sobre a Amônia Verde como Vetor de Hidrogênio Verde e sua Aplicação em Motores de Combustão Interna

*V International Congress and XI Workshop: Design & Materials: A Brief Review on the Role of Green Ammonia as a Green Hydrogen Carrier and Its Application in Internal Combustion Engines*

Rangel, Natasha Matta; Graduada em Engenharia Mecânica; Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - Cefet/RJ UnED Angra dos Reis

Loures, Carla Cristina Almeida; Doutora; Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - Cefet/RJ UnED Angra dos Reis  
carla.Loures@cefet-rj.br

Castro, Thais Santos; Doutora; Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências, Guaratinguetá, SP, Brasil  
thais.castro@unesp.br

### Resumo

A amônia e o hidrogênio são combustíveis promissores livres de carbono, com potencial de aplicação em sistemas energéticos sustentáveis. O hidrogênio tem gerado grandes expectativas para viabilizar uma economia livre de carbono, porém sua adoção enfrenta desafios relacionados ao armazenamento, à distribuição e ao desenvolvimento limitado da infraestrutura de suporte. Em contraste, a amônia oferece alta densidade energética, infraestrutura global consolidada e capacidade de superar muitas das limitações do hidrogênio. A amônia líquida apresenta densidade energética volumétrica superior à do hidrogênio comprimido e pode ser armazenada a pressões relativamente baixas.

As emissões de gases de efeito estufa provenientes de motores de combustão interna continuam sendo um grande desafio para a sustentabilidade. O uso de combustíveis alternativos verdes, como a amônia, representa um caminho viável para a descarbonização desses motores e para o atendimento às metas globais de redução de emissões. Contudo, a combustão de amônia pura ainda apresenta limitações significativas, motivando pesquisas sobre estratégias como operação em modo dual fuel e novos métodos de combustão. Este trabalho investiga os principais mecanismos para viabilizar a combustão eficiente de amônia pura em motores de combustão interna.

**Palavras-chave:** Amônia, Hidrogênio, MCI.

### Abstract

Ammonia and hydrogen are promising carbon-free fuels with potential applications in sustainable energy systems. Hydrogen has generated strong expectations for enabling a carbon-free economy, yet its adoption faces challenges related to storage, distribution, and the limited development of supporting infrastructure. In contrast, ammonia offers high energy density, a well-established global infrastructure, and the ability to address many of hydrogen's limitations. Liquid ammonia provides a higher volumetric energy



density than compressed hydrogen and can be stored at relatively low pressures. Greenhouse gas emissions from internal combustion engines remain a major sustainability challenge. The use of green alternative fuels, such as ammonia, represents a viable pathway for decarbonizing these engines and meeting global emission reduction targets. However, pure ammonia combustion still presents significant limitations, prompting research into strategies such as dual-fuel operation and novel combustion methods. This work investigates key mechanisms for enabling efficient pure ammonia combustion in internal combustion engines.

**Keywords:** *Ammonia, Hydrogen, MCI.*

## 1 Introdução

O aumento do consumo global de energia, as mudanças climáticas, a poluição atmosférica, são indicadores que incentivam a transição dos sistemas energéticos em todo o mundo, para uma geração de energia mais eficiente e livre de carbono (JOVAN, 2022).

A ambição crescente dos objetivos climáticos cria um papel significativo para o hidrogênio, especialmente na obtenção da neutralidade de carbono em setores atualmente difíceis de descarbonizar. O vetor energético do hidrogênio é suscetível de substituir os fósseis devido aos aspectos políticos, financeiros e ambientais (GONDAL ET AL., 2018).

O hidrogênio verde é aquele produzido sem emissões de gases de efeito estufa, onde é obtido usando eletricidade limpa de fontes de energia renováveis excedentes, como a energia solar ou eólica, para eletrolisar a água. O hidrogênio verde atualmente representa uma pequena porcentagem do hidrogênio total, porque a produção é cara, porém, o preço do hidrogênio verde diminuirá à medida que se tornar mais comum.

Os desafios relacionados ao armazenamento e transporte de hidrogênio devido a sua baixa densidade podem ser superados pela utilização de portadores de energia de hidrogênio como amônia que têm alta eficiência energética em uso direto em comparação com hidrogênio líquido ou comprimido a alta pressão (ZHOU ET AL., 2019). O potencial da amônia verde para servir como energia para o futuro energético foi investigado em estudos recentes onde se descobriu que a emissão de gases de efeito estufa de motores movidos a amônia é inferior a um terço dos motores a gasolina ou diesel (ANGELES, 2018).

A amônia apresenta algumas vantagens em relação ao hidrogênio devido ao menor custo por unidade de energia armazenada, maior densidade volumétrica de energia, produção, manuseio e distribuição mais fáceis e difundidos e maior viabilidade comercial (VALERA-MEDINA ET AL., 2021).

A amônia é um gás incolor que se liquefaz a  $-33,3$  °C e congela a  $-77,7$  °C. É constituída por um dos átomos mais abundantes, ou seja, hidrogênio e nitrogênio formando uma estrutura química conhecida como  $NH_3$  (OLABI, 2023).

Como gás, a amônia é inflamável e pode reagir rapidamente com o oxigênio formando nitrogênio, nitrogênio (II) e água. No estado líquido, é encontrado na forma de hidróxido de amônio, solução cáustica e base fraca com percentual de  $NH_3$  que chega a 30% (OLABI, 2023). A forma de hidróxido de amônio revela as características de um  $NH_4Cl$  (sais de amônio) formador de ácido neutralizador de base fraca. Esses sais são solúveis em água, voláteis e a exposição a eles pode causar diversos efeitos, incluindo irritação, falta de ar, tosse, náusea e dor de cabeça (OLABI, 2023).

Os sais de amônio revelam características de ácidos fracos, que podem se transformar espontaneamente em amônia devido à capacidade de seus prótons de quebrar os átomos de nitrogênio que estão ligados ao seu ânion (ácidos fracos) (YASHNIK, 2021). Também pode aparecer como  $N_2H_4$  (hidrazina), um ingrediente corrosivo e volátil do combustível,



devido à oxidação da amônia em soluções (LIU, 2022). A reação de amônia com ácido nítrico produz uma pastilha porosa, um fertilizante altamente utilizado conhecido como nitrito de amônio ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ), também usado em explosivos na área de mineração (SUN, 2020). Dito isto, a amônia é um dos produtos químicos industriais mais comumente produzidos em todo o mundo. Mais de 75% da amônia produzida é utilizada no setor agrícola como fertilizante. A amônia também pode ser usada como fluido de trabalho em um ciclo de refrigeração. O outro uso comum de amônia é em soluções de limpeza doméstica (ERDEMIR E DINCER, 2020).

É importante enfatizar que a amônia é complementar à entrega da “Economia de Hidrogênio” e participará do alcance das metas de descarbonização total, especialmente para motores pesados, fora de estrada e marítimos para resolver os problemas de transporte e armazenamento (MOUNAÏM-ROUSSELLE, 2021).

A amônia pode ser classificada em três tipos com base em sua síntese de processo e pegada de carbono: amônia marrom, amônia azul e amônia verde (KURIEN, 2022). A amônia que é sintetizada usando carbono como o metano, nafta e carvão é chamado de amônia marrom, e amônia azul refere-se àquelas sintetizadas pelo uso de matéria prima similar, mas com menor pegada de carbono em comparação com a amônia marrom com a ajuda de tecnologias adequadas de captura e armazenamento de carbono. A amônia sintetizada por seguir uma rota livre de carbono é chamado de amônia verde que tem zero pegada de carbono ao usar fontes de energia renováveis para eletrólise da água, redução eletroquímica ou redução fotocatalítica (NAYAK-LUKE, 2020).

A amônia é um portador efetivo de hidrogênio com 1,5 mol de hidrogênio por mol de amônia, que equivale a 107 kg de hidrogênio por metro cúbico de amônia líquida e tem baixo ponto de fusão ( $-77,73\text{ }^\circ\text{C}$ ), o que a torna um combustível adequado para condições de frio extremo (HAAR, 1978). A amônia é mais leve do que o ar e é altamente solúvel na água, pois a  $20^\circ\text{C}$  e 1 atm, um volume de água dissolve 702 volumes de amônia, resultando em uma solução alcalina, o que garante o controle de derramamento, evitando o risco de incêndio ou explosão (HALES, 1979).

No estado líquido, é um dos solventes que mais tem sido usado para o estudo de reações químicas, sendo encontrada comercialmente disponível em solução aquosa de 15 mol.L<sup>-1</sup> (28% m/v), com a denominação de amoníaco (CHONG, 2011).

A baixa viscosidade da amônia ajuda a formação de gotículas durante a injeção de combustível e seu engarrafamento pode ser semelhante à do GLP, uma vez que a pressão de vapor está na mesma faixa (FENGHOUR, 1995). A amônia tem alto índice de octanagem (>111), que a torna adequada para motores com alta taxa de compressão (FRIGO, 2013).

Algumas das desvantagens da amônia para aplicação em motores inclui sua baixa velocidade de chama (7 cm/s em condições atmosféricas), alta energia mínima de ignição, alta temperatura de autoignição e limites estreitos de inflamabilidade, o que dificulta para ser usado como um combustível único (LHUILIER, 2021).

O objetivo deste resumo expandido foi realizar uma revisão bibliográfica sobre a aplicação da amônia verde como combustível para MCI, trazendo contextualização em diversas literaturas publicadas recentemente com suas vantagens e desvantagens.

## 2 Metodologia

A metodologia abordada nesse trabalho foi um levantamento bibliográfico de natureza básica e abordagem qualitativa na base de dados Science Direct, Google Acadêmico, Portal Capes. Desta forma foi possível realizar uma revisão da literatura em nível exploratório, dos principais desafios e lacunas de conhecimento realizando um aprofundando dos mecanismos de sustentação para promover as necessidades para uma



implantação bem-sucedida do uso de amônia verde em MCI.

### 3 Fundamentação teórica ou discussões

Na década de 1960, vários trabalhos investigaram a combustão de amônia na forma pura em motores alternativos MIE de um e vários cilindros. Apesar do sucesso na queima do combustível de amônia, os sistemas de MCI não conseguiram apresentar desempenho idêntico ao alcançado com a operação de combustível fóssil e estratégias de melhoria, como maior energia e maior duração da ignição por faísca e taxas de compressão, maior carga do motor e dopagem de hidrogênio, tiveram que estar comprometidos.

Em 2009, a Toyota Motor Corporation registrou uma patente para MCI de queima de amônia em que ignitores de jato de plasma ou um conjunto de velas de ignição são empregados para facilitar a combustão de amônia, evitando a necessidade de usar hidrogênio como promotor de combustível (KOJIMA ET.AL, 2010). Outros estudos de pesquisa contemporâneos revisitaram o paradigma da combustão de amônia pura, mas os obstáculos prevaleceram e a operação de amônia pura em um motor MIF foi alcançável, mas com grandes instabilidades.

Novamente, estratégias de melhoria, como uma adição mínima de 5% em volume de hidrogênio, foram necessárias para uma operação mais suave do motor (MØRCH ET. AL, 2011) experimentou combustão de amônia pura com pouco sucesso, pois a combustão de amônia só era possível quando altas taxas de compressão eram aplicadas. Contrariamente, Koike et al. (2012) verificaram que o uso de amônia pura era viável com variação de ciclo suficientemente baixa, principalmente em plena carga.

Mais recentemente, Pochet et al. (2017) tentou executar amônia pura em um motor MIE; para isso, no entanto, as elevadas taxas de compressão investigadas prejudicariam significativamente a eficiência geral do sistema e o zumbido do motor (detonação do diesel) seria inevitável. Em um estudo recente, Lee e Song (2018) propuseram uma nova estratégia de combustão para MCI alimentados com amônia pura. Apesar da abordagem promissora, os autores comentam que ainda há muito a ser feito e que o objetivo final de alcançar a combustão completa da amônia sem a necessidade de promotores de combustão adicionais à base de carbono ainda não foi alcançado. A operação de MCI com amônia pura não apenas permitiria realizar a operação do sistema totalmente descarbonizado, mas também obter uma clara vantagem de uma infraestrutura de armazenamento e distribuição já estabelecida e confiável com uma conversão de veículos de frota relativamente fácil. A lacuna em pesquisa e desenvolvimento sobre combustão de amônia pura em MCI foi motivada pelas dificuldades técnicas em realizar tal tarefa, portanto, a literatura sobre o tema é notavelmente escassa. Essa premissa, associada à crescente conscientização ambiental e à competição na produção das primeiras soluções comercialmente viáveis, coloca a combustão de amônia pura em MCI como um dos tópicos de pesquisa mais quentes em futuras soluções de combustível para transporte (CARDOSO, 2021).

### 4 Considerações finais

Motores de combustão interna movidos a amônia verde são uma maneira imediata e viável de se converter em um motor livre de emissões de carbono. A amônia pode fornecer uma opção econômica e ambientalmente eficaz para a economia de hidrogênio. Muitas tentativas foram realizadas para usar amônia como combustível em motores de combustão, uma vez que não contém carbono com as preocupações ambientais.

A amônia verde foi identificada recentemente como um candidato potencial para servir como portador de energia de hidrogênio. A amônia líquida tem maior densidade de energia em comparação com o hidrogênio e também tem algumas vantagens sobre o



hidrogênio em termos de custo, pois pode ser armazenada a uma pressão relativamente baixa e temperatura ambiente sem exigir processos caros como armazenamento criogênico e liquefação de hidrogênio. Estudos sobre o impacto ambiental do ciclo de vida da amônia mostraram que veículos movidos a amônia terão menor potencial de aquecimento global (em comparação com veículos movidos a combustíveis fósseis). Com modificações mínimas na linha de combustível (para combater a corrosão) e na taxa de compressão, a amônia pode ser usada para abastecer motores de combustão interna convencionais.

### Referências

- ANGELES, D. A. et al. Fuzzy optimization of the automotive ammonia fuel cycle. **Journal of Cleaner Production**, v. 186, p. 877–882, 10 jun. 2018.
- CARDOSO, J. 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**, v. 296, p. 126562, maio 2021.
- CHONG, C. T.; HOCHGREB, S. Measurements of laminar flame speeds of liquid fuels: Jet-A1, diesel, palm methyl esters and blends using particle imaging velocimetry (PIV). **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 33, n. 1, p. 979–986, 1 jan. 2011.
- ERDEMIR, D.; DINCER, I. A perspective on the use of ammonia as a clean fuel: Challenges and solutions. **International Journal of Energy Research**, v. 45, n.4, p. 4827–4834, 25 nov. 2020
- FENGHOUR, A. et al. The Viscosity of Ammonia. **Journal of Physical and Chemical Reference Data**, v. 24, n. 5, p. 1649–1667, set. 1995.
- FRIGO, S.; GENTILI, R. Analysis of the behaviour of a 4-stroke Si engine fuelled with ammonia and hydrogen. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 38, n. 3, p. 1607–1615, fev. 2013.
- GONDAL, I. A.; MASOOD, S. A.; KHAN, R. Green hydrogen production potential for developing a hydrogen economy in Pakistan. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 43, n. 12, p. 6011–6039, mar. 2018.
- HAAR, L.; GALLAGHER, J. S. Thermodynamic properties of ammonia. **Journal of Physical and Chemical Reference Data**, v. 7, n. 3, p. 635–792, jul. 1978.
- HALES, J. M.; DREWES, D. R. Solubility of ammonia in water at low concentrations. **Atmospheric Environment (1967)**, v. 13, n. 8, p. 1133–1147, jan. 1979.
- JOVAN, D. J.; DOLANC, G.; PREGELJ, B. Cogeneration of green hydrogen in a cascade hydropower plant. **Energy Conversion and Management: X**, v. 10, p. 100081, jun. 2021.
- KOIKE, M., MIYAGAWA, H. SUZUOKI, T., OGASAWARA, K. Ammonia as a hydrogen energy carrier and its application to internal combustion engines, **Sustainable Vehicle Technologies** (pp. 61-70), 2012.
- KOJIMA, S. et al. **Ammonia-burning internal combustion engine**. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/EP2378094A1/en>>. Acesso em: 28 nov. 2022.
- KURIEN, C.; MITTAL, M. Review on the production and utilization of green ammonia as an alternate fuel in dual-fuel compression ignition engines. **Energy Conversion and Management**, v. 251, p. 114990, jan. 2022.
- LEE, D.; SONG, H. H. Development of combustion strategy for the internal combustion engine fueled by ammonia and its operating characteristics. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 32, n. 4, p.1905–1925, abr. 2018.
- LHUIILLIER, C. et al. **Combustion Characteristics of Ammonia in a Modern Spark-Ignition Engine**. Conference on Sustainable Mobility. out. 2019.
- LHUIILLIER, C. et al. Experimental investigation on ammonia combustion behavior in a spark-ignition engine by means of laminar and turbulent expanding flames. **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 38, n. 4, p. 5859–5868, 2021.
- LIU, C. et al. Enhancing ammonia oxidation mediated using different crystalline Mn-oxides in an anoxic environment. **Journal of Environmental Management**, v. 315, p. 115109, 1 ago. 2022.



MØRCH, C. S. et al. Ammonia/hydrogen mixtures in an SI-engine: Engine performance and analysis of a proposed fuel system. **Fuel**, v. 90, n. 2, p. 854–864, fev. 2011.

MOUNAÏM-ROUSSELLE, C. et al. Ammonia as Fuel for Transportation to Mitigate Zero Carbon Impact. **Energy, Environment, and Sustainability**, p.257–279, 14 dez. 2021.

NAYAK-LUKE, R. M.; BAÑARES-ALCÁNTARA, R. Techno-economic viability of islanded green ammonia as a carbon-free energy vector and as a substitute for conventional production. **Energy & Environmental Science**, v. 13, n. 9, p. 2957–2966, 2020.

OLABI, A. G. et al. Recent progress in Green Ammonia: Production, applications, assessment; barriers, and its role in achieving the sustainable development goals. **Energy Conversion and Management**, v. 277, p. 116594, fev. 2023.

POCHET, M. et al. Ammonia-Hydrogen Blends in Homogeneous-Charge Compression-Ignition Engine. **SAE Technical Paper Series**, 4 set. 2017.

SUN, L. et al. Corrosion behavior of carbon steel in dilute ammonia solution. **Electrochimica Acta**, v. 364, p. 137295, 20 dez. 2020.

VALERA-MEDINA, A. et al. Review on Ammonia as a Potential Fuel: From Synthesis to Economics. **Energy & Fuels**, v. 35, n. 9, p. 6964–7029, 28 fev. 2021.

VALERA-MEDINA, A.; BANARES-ALCANTARA, R. **Techno-economic challenges of green ammonia as energy vector**. [s.l.] London Oxford San Diego Cambridge, Ma Elsevier, Academic Press, 2021.

YASHNIK, S. A.; ISMAGILOV, Z. R. The ammonia storage and ammonia species reactivity within Cu-ZSM-5 with different copper electronic states. **Applied Catalysis A: General**, v. 615, p. 118054, 5 abr. 2021.

ZHOU, M. et al. Ammonia as an environmentally benign energy carrier for the fast growth of China. **Energy Procedia**, v. 158, p. 4986–4991, 1 fev. 2019.