

SIMULAÇÕES CFD PARA COMBUSTÃO DE HIDROGÊNIO VERDE EM MOTORES ALTERNATIVOS

Paloma M. de Meira¹ (IC), Fábio S. Nascimento (PQ)¹

¹Universidade Federal de Itajubá

Palavras-chave: CFD. Hidrogênio verde. Motores Alternativos.

Introdução

A crescente demanda por soluções energéticas sustentáveis diante dos impactos ambientais dos combustíveis fósseis tem impulsionado pesquisas sobre o hidrogênio verde. Produzido por eletrólise da água a partir de fontes renováveis, este vetor energético apresenta alta densidade energética e não emite gases de efeito estufa em seu ciclo de uso. Segundo Nóbrega *et al.* (2022), o hidrogênio verde representa um vetor fundamental para a descarbonização de setores estratégicos, como transporte e indústria. Apesar de seu potencial, ainda existem barreiras relacionadas ao custo de produção, infraestrutura de armazenamento e aplicação em motores (NÓBREGA *et al.*, 2022).

Diversos países estão apostando nessa transição. De acordo com Fernandes, G. *et al.* (2023), em 2022, cerca de US\$ 73 bilhões foram mobilizados por mais de 25 países para o desenvolvimento de projetos com hidrogênio de baixo carbono, com o objetivo de torná-lo uma alternativa viável e competitiva frente aos combustíveis tradicionais.

Por possuir uma matriz elétrica majoritariamente renovável, o Brasil tem vantagem competitiva na produção de hidrogênio verde, com potencial para redução de custos e para a exportação (NÓBREGA *et al.*, 2022), sendo crucial, no entanto, aprofundar o estudo de sua combustão em motores alternativos.

Este trabalho de Iniciação Científica tem como objetivo analisar a combustão do hidrogênio verde em motores alternativos por meio de simulações de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD). O método adotado consiste em levantamento bibliográfico, seleção de modelos de motores e cinética química, configuração dos parâmetros físico-químicos e execução das simulações. O procedimento inclui a validação dos resultados com dados experimentais disponíveis e a análise de desempenho e estabilidade da combustão.

Assim, busca-se contribuir para o avanço técnico-científico do tema e apoiar o desenvolvimento de soluções energéticas limpas e eficientes.

Metodologia

A pesquisa foi desenvolvida por meio de simulações computacionais no software *ANSYS Forte 2024 R2*, apoiadas em materiais do *Ansys Forte Tutorials - Release 2024 R2*. O trabalho foi estruturado em quatro etapas principais: (i) preparação do ambiente computacional e estudo dos tutoriais oficiais, traduzidos tecnicamente para facilitar a compreensão dos fluxos de trabalho; (ii) replicação da simulação de referência com Diesel, validando a configuração do software; (iii) substituição do combustível por hidrogênio verde, com ajustes específicos de cinética química e parâmetros de injeção; e (iv) execução das simulações comparativas em condições operacionais idênticas (2000 RPM e intervalo -130° a $+130^\circ$ Após o Ponto Morto Superior (APMS)).

Para garantir comparabilidade, a geometria do motor e condições de contorno foram mantidas constantes. Apenas a malha foi refinada no caso do hidrogênio para assegurar a estabilidade numérica. A Tabela 1 resume as alterações:

Tabela 1 - Alterações implementadas no modelo para substituição do Diesel por Hidrogênio Verde.

Aspecto	Simulação com Diesel	Simulação com Hidrogênio Verde
Combustível	Surrogado binário (66,8% de n-decano + 33,2% de 1-metilnaftaleno)	Hidrogênio puro (H_2)
Cinética química	Mecanismo para diesel com 189 espécies: Diesel_2comp_189sp_soot-particl e-tracking.cks	Mecanismo GRI-Mech 3.0: H2_UC.cks

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

Combustão/ Ignição	Injeção de spray líquido com autoignição por compressão.	Mistura prévia de H_2 -Ar com ignição por centelha.
Formação de fuligem	Modelo ativado	Modelo desativada (ausência de carbono)
Malha Computacional	Malha padrão do tutorial, considerada mais grosseira.	Malha refinada para garantir estabilidade numérica.
Condições Base	Geometria, rotação e temperaturas de parede padrão do motor.	Mantidas idênticas para permitir comparação direta.

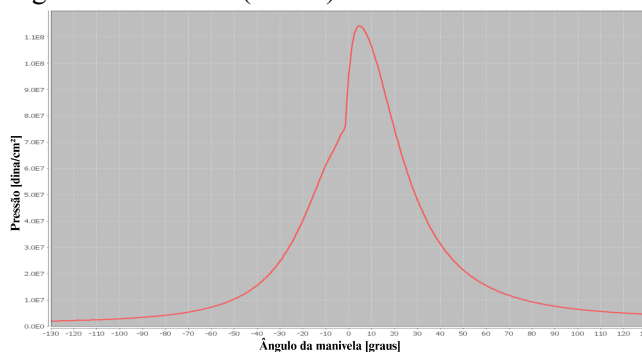
Fonte: Autoria própria, 2025.

Após as adaptações, as simulações foram executadas e os resultados analisados a partir de variáveis como pressão no cilindro, taxa de liberação de calor aparente, campos de temperatura, eficiência térmica e emissões (NO_x) e fuligem). Essa metodologia assegurou que as diferenças observadas fossem atribuídas exclusivamente às características intrínsecas dos combustíveis.

Resultados e discussão

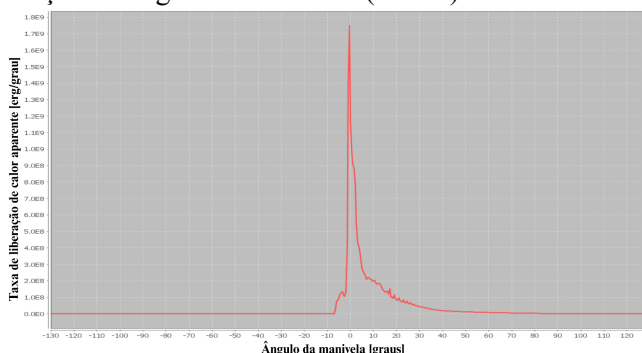
Nos resultados apresentados, os valores de pressão tanto para o Diesel quanto para o Hidrogênio foram convertidos de dina/cm² para MPa. Na validação com Diesel, o modelo apresentou boa concordância com o tutorial de referência. Conforme mostra o Gráfico 1, a pressão no cilindro atingiu cerca de 11,5 MPa em 5° APMS, enquanto o Gráfico 2 evidencia que a taxa de liberação de calor aparente ocorreu em múltiplos estágios, característicos da combustão do diesel. Já o Gráfico 3 demonstra que a formação de fuligem foi expressiva, alcançando aproximadamente 41,5 g/kg a cerca de 10° APMS, confirmando a correta implementação do modelo.

Gráfico 1 - Curva de pressão no cilindro em função do ângulo da manivela (Diesel).



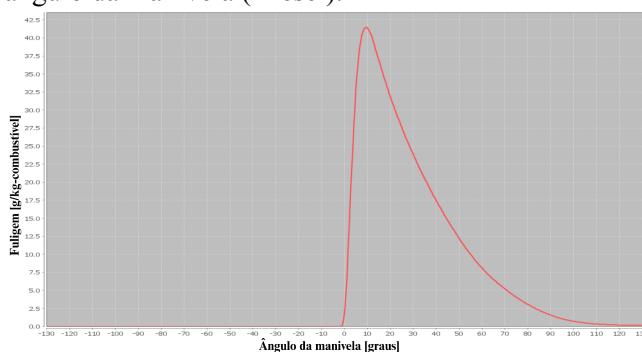
Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Gráfico 2 - Taxa de liberação de calor aparente em função do ângulo da manivela (Diesel).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Gráfico 3 - Concentração de fuligem em função do ângulo da manivela (Diesel).



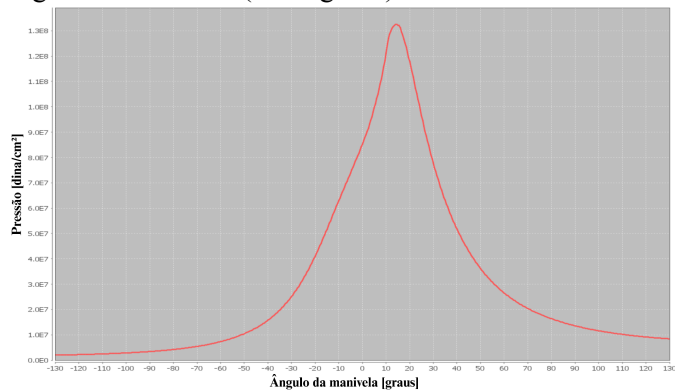
Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Na simulação com hidrogênio verde, a combustão foi extremamente rápida e intensa. Conforme mostra o Gráfico 4, a pressão no cilindro apresentou elevação acentuada, atingindo um pico de aproximadamente 13,2 MPa em cerca de 13° APMS. O Gráfico 5 evidencia que a taxa de liberação de calor aparente ocorreu em um único pico agudo e intenso por volta de 11° APMS,

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

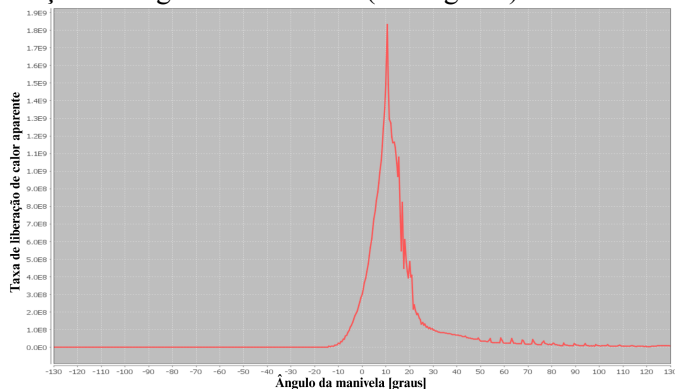
caracterizando uma combustão quase instantânea e próxima de um ciclo a volume constante.

Gráfico 4 - Curva de pressão no cilindro em função do ângulo da manivela (Hidrogênio).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Gráfico 5 - Taxa de liberação de calor aparente em função do ângulo da manivela (Hidrogênio).

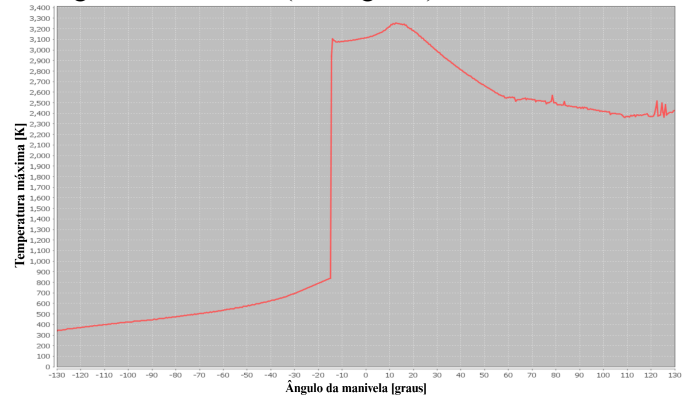


Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

O Gráfico 6 demonstra que a rápida conversão de energia elevou a temperatura máxima no cilindro, alcançando cerca de 3250 K em cerca de 13° APMS. Essa temperatura extrema favorece a formação de óxidos de nitrogênio, sendo que o Gráfico 7 mostra que o Óxido Nítrico (NO) atingiu uma fração mássica máxima de aproximadamente 0,00520 por volta de 18° APMS, enquanto o Gráfico 8 evidencia que o Dióxido de Nitrogênio (NO_2) se manteve em níveis muito inferiores, com pico de aproximadamente 0,000008 ocorrendo próximo a 14° APMS.

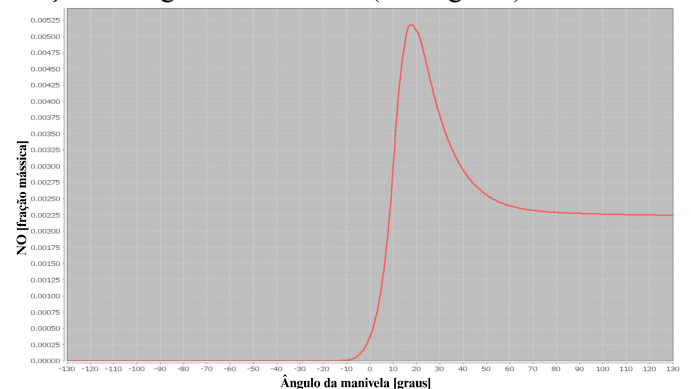
O Gráfico 9 confirma a principal vantagem ambiental do hidrogênio verde, mostrando a completa ausência de fuligem durante todo o ciclo.

Gráfico 6 - Temperatura máxima no cilindro em função do ângulo da manivela (Hidrogênio).



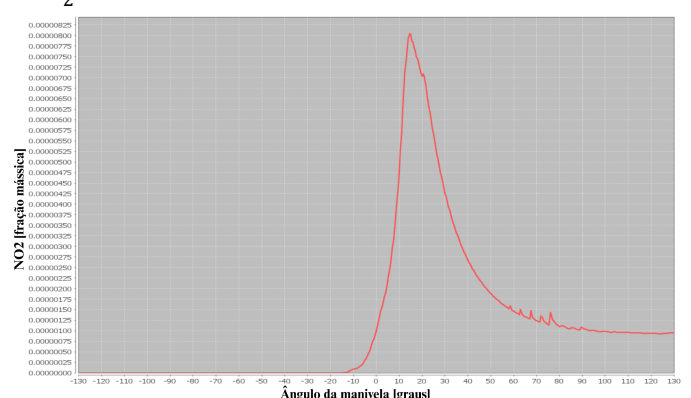
Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Gráfico 7 - Fração mássica de Óxido Nítrico (NO) em função do ângulo da manivela (Hidrogênio).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

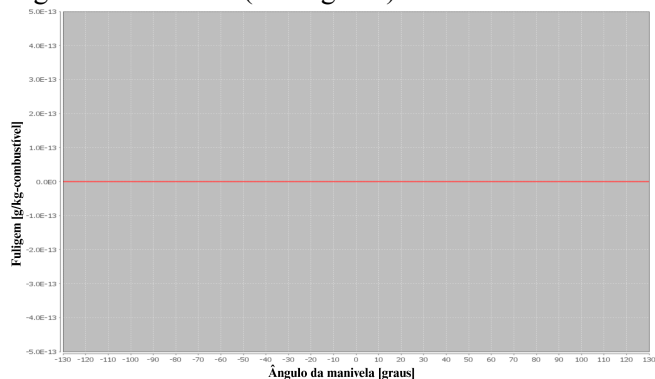
Gráfico 8 - Fração mássica de Dióxido de Nitrogênio (NO_2) em função do ângulo da manivela (Hidrogênio).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

Gráfico 9 - Concentração de fuligem em função do ângulo da manivela (Hidrogênio).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

A combustão do diesel foi mais lenta, com múltiplos picos de calor, menor temperatura máxima e alta emissão de fuligem, enquanto o hidrogênio verde apresentou maior eficiência energética e baixas emissões de carbono, mas maior formação de NO_x , indicando a necessidade de estratégias como recirculação de gases de exaustão (EGR) e operação em mistura pobre para seu uso em motores alternativos.

Conclusões

Este trabalho de iniciação científica cumpriu seu objetivo geral de analisar o processo de combustão do hidrogênio verde em um motor alternativo, utilizando simulações de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD). A análise comparativa, realizada a partir da validação de um modelo-base a diesel e sua posterior adaptação para o hidrogênio, revelou diferenças fundamentais no processo de combustão. Enquanto o diesel apresentou uma liberação de calor aparente mais lenta e difusiva, característica de uma queima em múltiplos estágios, o hidrogênio demonstrou uma combustão consideravelmente mais rápida e intensa. Este comportamento, caracterizado por uma liberação de energia quase instantânea, resultou em picos de pressão de aproximadamente de 13,2 MPa e temperatura de aproximadamente de 3250 K significativamente mais elevados, indicando um potencial para maior eficiência térmica do ciclo.

A principal vantagem ambiental do hidrogênio foi comprovada pela eliminação total das emissões de fuligem, o que contrasta diretamente com a notável formação de fuligem na combustão do diesel. Este resultado alinha-se à busca por soluções energéticas mais limpas e representa uma oportunidade fundamental

para a descarbonização.

Contudo, o principal desafio identificado para a aplicação prática do hidrogênio em motores é a acentuada formação de Óxidos de Nitrogênio (NO_x).

Esta é uma consequência direta das temperaturas de combustão extremamente elevadas que, embora favoreçam a eficiência, também criam um ambiente ideal para a produção de NO_x térmico. Os resultados da simulação confirmam que o óxido nítrico (NO) é o componente predominante, com concentrações máximas (fração mássica de aproximadamente 0,00520) cerca de 650 vezes maiores que as de dióxido de nitrogênio (NO_2) (fração mássica de aproximadamente 0,000008), tornando-o o principal poluente a ser controlado.

Para a formação acadêmica e profissional, este projeto foi importante, pois permitiu aplicar conhecimentos teóricos em termodinâmica e combustão e proporcionar uma experiência valiosa com a ferramenta *ANSYS Forte*. O estudo do hidrogênio verde também contribuiu para uma visão crítica sobre a transição energética.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente ao Programa PIBIC/UNIFEI pelo apoio financeiro, fundamental para a realização deste projeto e para meu desenvolvimento acadêmico. Ao Professor Doutor Fábio Santos Nascimento, meu orientador, expresse minha gratidão pela orientação paciente, pelo compartilhamento de conhecimento e pelo incentivo constante ao pensamento crítico, cuja experiência em simulação computacional, CFD e combustão foi essencial para o progresso desta pesquisa. Agradeço à Universidade Federal de Itajubá - Campus Itabira, pela infraestrutura e ambiente acadêmico enriquecedor, e aos colegas e professores do Departamento de Engenharia Mecânica pelo apoio e valiosas discussões. Por fim, agradeço à minha família e ao meu namorado pelo apoio e incentivo constantes.

Referências

Fernandes, G.; AZEVEDO, J. H.; AYELLO, M.; GONÇALVES, F. Panorama dos desafios do hidrogênio verde no Brasil. **Coluna Opinião**, Rio de Janeiro: FGV Energia, ano 2023, p. 1-13, jan. 2023.

NÓBREGA, M. F. R. *et al.* Hidrogênio Verde: uma revisão de processos de produção do hidrogênio oriundos de fontes renováveis de energia. **Natural Resources**, v.12, n.2, p.75-85, 2022.