

Modelagem da co-combustão de biocombustíveis avançados em motores de combustão: o caso do HVO

Túlio Zucareli de Souza¹, Gustavo Vieira Frez², Roberto Berlini da Costa³, Luís Filipe Roque⁴, Christian Coronado⁵, Luís Pedro Vidigal⁶, Nelly Pérez-Rangel⁷, Gabriel Pinto⁸

¹GETEC, Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Brasil. Email: tulio_zucareli@unifei.edu.br

²GETEC, Departamento de Engenharia Mecânica, CEFET-RJ, Brasil. Email: Gustavo.frez@cefet-rj.br

³GETEC, Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Brasil. Email: robertoberlini@unifei.edu.br

⁴GETEC, Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Brasil. Email: filipe_roque@unifei.edu.br

⁵GETEC, Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Brasil. Email: christian@unifei.edu.br

⁶GETEC, Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Brasil. Email: luis.vidigal@engenharia.ufjf.br

⁷GETEC, Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Brasil. Email: nellyvanessaperez@gmail.com

⁸GETEC, Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Brasil. Email: gabrielmarquespinto@unifei.edu.br

Resumo

A constante busca por novas e eficientes fontes de energia levou ao surgimento de diferentes biocombustíveis avançados, dentre os quais se destaca o HVO. O HVO é um combustível eficiente, porém ainda não disponível comercialmente em muitos países, de modo que a co-combustão com outros combustíveis pode oferecer uma transição energética mais suave e realista. Neste sentido, é importante compreender em detalhes as características de queima destes combustíveis, o que pode ser feito experimental e computacionalmente. Se tratando de modelagem computacional, todavia, o uso de biocombustíveis avançados apresenta uma dificuldade adicional, visto que os mecanismos químicos que regem sua combustão não são sempre conhecidos. Desta forma, o presente estudo apresenta o procedimento de desenvolvimento e validação de um modelo CFD voltado para a combustão de HVO e outros biocombustíveis, resultando em análises de temperatura, pressão, performance e emissões, que ajudam a compreender e prever o funcionamento operacional destes vetores energéticos.

Palavras-chave: HVO; dual-fuel; motor Diesel; CFD.

Abstract

The continuous search for new and efficient sources of energy led to the rise of various advanced biofuels, among which HVO can be highlighted. HVO is an efficient fuel, but is still not commercially available in several countries, in such a way that its co-combustion with other fuels may offer a subtler and realistic transition. In this sense, its pivotal to understand in details how these fuels burn, which can be done either experimental or computationally. Regarding computational simulation, however, the use of advanced biofuels represents an addition challenge, given that the chemical mechanisms that govern their combustion are not always known. Therefore, this study presents the procedures for development and validation of a CFD model focused on the combustion of HVO and other biofuels, resulting in analyses of temperature, pressure, performance, and emissions, which help to understand and predict the operational behaviour of these energy vectors.

Keywords: HVO; dual-fuel; Diesel engine; CFD.

1. Introdução

No contexto de um estilo de vida moderno que demanda não apenas uma quantidade crescente de energia, como também uma transição para fontes com menor impacto ambiental, o setor de transportes vem

indicando cada vez mais um forte aumento no consumo de biocombustíveis [1]. Neste sentido, diversos países da América do Sul têm, historicamente, se aproveitado de seu potencial agrícola para produção de biocombustíveis como o bioetanol e o biodiesel, comumente utilizados como substitutos da gasolina e

do diesel fósseis [2]. De fato, o Brasil já possui um programa de incentivo à produção de bioetanol que data dos anos 1970, ao mesmo tempo em que biodiesel vem sendo produzido industrialmente em Brasil, Argentina e Uruguai desde o início dos anos 2000 [3].

Todavia, apesar do alto nível de maturidade atingido na produção de biodiesel, este biocombustível apresenta alguns problemas, como alta viscosidade, risco de oxidação e formação de borras [4]. Visando contornar estas ineficiências, novos biocombustíveis foram desenvolvidos ao longo dos anos, tais como o farnesano [5] e o HVO [6]. Este último, já produzido comercialmente em alguns países e com plantas em andamento na América do Sul, parece ser o grande candidato a substituir o biodiesel – e, talvez, até mesmo o diesel fóssil [3].

O HVO já foi utilizado em diversas condições operacionais em motores diesel, usualmente apresentando performance satisfatória em termos de eficiência e emissão de poluentes. Avaliando um veículo de passageiros, por exemplo, Bortel et al. [7] reportaram que a adição de HVO ao diesel reduziu o consumo de combustível e emitiu menos CO, CO₂, hidrocarbonetos, particulado e NO_x. De forma semelhante, Pechout et al. [8] indicaram que o uso de HVO em um veículo Euro 6 reduziu o atraso de ignição, o consumo de combustível e emissões de CO₂ e N₂O. Conclusões similares foram relatadas por Pinto et al. [9], que observaram maior eficiência e menores emissões associadas ao uso de HVO em um motor diesel operando em modos single e dual-fuel.

Embora dados experimentais relacionados à performance do HVO estejam disponíveis na literatura, modelos computacionais que tratem deste biocombustível são, no momento, escassos. À exceção de alguns poucos estudos, como o trabalho de Garcia-Oliver et al. [10] sobre a co-combustão de HVO e propilenoglicol em motores Diesel, e o estudo de de Souza [11] acerca do uso de HVO em modo dual-fuel com outros biocombustíveis, a literatura carece de modelos fluidodinâmicos que discutam em detalhe a combustão do HVO.

Neste sentido, o presente artigo visa discutir a combustão simultânea de HVO e hidrogênio, outro combustível promissor que pode ser obtido por meio de fontes renováveis, em um motor Diesel monocilíndrico. As análises, baseadas em dados obtidos experimentalmente, incluem também estudos CFD no software FORTE®, em modelo desenvolvido para a correta representação da operação do motor utilizado. Com os resultados obtidos, os comportamentos de pressão, temperatura e emissão de poluentes são discutidos, a fim de debater acerca dos benefícios do HVO e sua possível combustão conjunta

com hidrogênio em motores de ignição por compressão.

2. Materiais e métodos

2.1. Análises experimentais

Os testes experimentais foram realizados em um motor diesel monocilíndrico modelo Buffalo BFDE 10, de 7,4 kW. Como condições operacionais, foram fixadas uma rotação de 1800 rpm e um torque de 10 Nm, em uma representação típica de um gerador Diesel ou máquina agrícola em carga parcial. A bancada foi equipada com sensores de pressão, temperatura e vazão de ar e combustível, além de um analisador de gases para controle de emissões. Além disso, o sistema de admissão foi modificado por meio da adição de um injetor secundário, responsável pela mistura do hidrogênio ao ar de entrada. Esta bancada é apresentada em detalhes por Pinto et al. [9].

As características do motor utilizado são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Características do motor Buffalo BFDE 10.

Motor Buffalo BFDE 10	
Nº de tempos	4
Nº de cilindros	1
Volume deslocado	418 cm ³
Diâmetro do pistão	86 mm
Curso	72 mm
Razão de compressão	19:1
Avanço de injeção	-22°

Fonte: elaboração própria.

Para os testes, o motor foi alimentado com diesel, com HVO, e com uma combinação dual-fuel de HVO e hidrogênio, em diferentes taxas de substituição de energia (TSE), que é calculada pela Equação (1).

$$TSE = \frac{\dot{m}_{H_2} \cdot PCI_{H_2}}{(\dot{m}_{HVO} \cdot PCI_{HVO}) + (\dot{m}_{H_2} \cdot PCI_{H_2})} \quad (1)$$

Onde:

TSE – taxa de substituição de hidrogênio [-]

\dot{m}_{H_2} – vazão mássica de hidrogênio [kg/h]

PCI_{H_2} – poder calorífico inferior do hidrogênio [kJ/kg]

\dot{m}_{HVO} – vazão mássica de HVO [kg/h]

PCI_{HVO} – poder calorífico inferior do HVO [kJ/kg]

2.2. Modelagem CFD

A modelagem CFD foi realizada no software ANSYS FORTE®. Após a elaboração do desenho da câmara de combustão com base na geometria do pistão, foi selecionado um setor de 90° para representação do volume de controle, visto que o injetor direto possui 4

furos e pode ser dividido no mesmo número de partes. Em seguida, uma malha contendo um número adequado de elementos [12] foi gerada, conforme apresentado pela Figura 1.

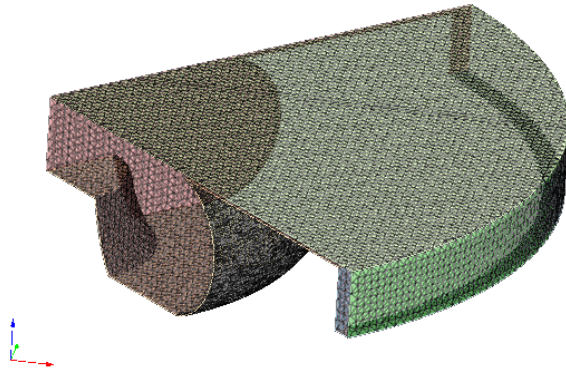


Figura 1. Malha da câmara de combustão do motor Buffalo BFDE 10. Fonte: elaboração própria.

Os modelos de Kelvin-Helmholtz/Rayleigh-Taylor (KH-RT) foram selecionados para predição do desenvolvimento do spray de combustível, considerando um raio de influência de 0,2 cm, enquanto um modelo discreto multicomponentes (DMC) foi aplicado para a representação da vaporização do combustível. O ângulo do spray foi adotado como $13,5^\circ$ conforme medições experimentais, e o início real da injeção – que apresenta atraso com relação à abertura do injetor – foi calculado como -10° para diesel e -9° para HVO, conforme metodologia apresentada por Heywood [13].

Conforme estudo semelhante desenvolvido por Ekin et al. [12], as temperaturas de superfície foram consideradas constantes, iguais a 400 K para as paredes laterais do cilindro, 425 K para o topo do cilindro, e 450 K para o topo do pistão, com um swirl inicial de 0.5. A pressão inicial, medida em laboratório, foi corrigida para que os valores experimentais e numéricos imediatamente antes da injeção fossem coerentes [14], e a temperatura foi calculada de modo que as massas iniciais do modelo CFD fossem coerentes com os dados de laboratório.

Por fim, o modelo cinético escolhido foi o de Ren et al. [15], contendo 178 espécies e 758 reações que envolvem, entre outros, os mecanismos do diesel e do hidrogênio. Em um dos poucos resultados relacionados à modelagem da combustão de HVO, Garcia-Oliver et al. [10] propuseram o uso de n-dodecano ($C_{12}H_{26}$) para sua representação, enquanto de Souza [11] sugeriu o uso do n-hexadecano ($C_{16}H_{34}$) após uma comparação de curvas de atraso de ignição. Neste estudo, o HVO é representado como n-hexadecano, dada a maior proximidade com sua composição real.

3. Resultados

3.1. Validação do modelo CFD

Inicialmente, os resultados CFD foram validados experimentalmente, comparando as curvas de pressão e taxa de liberação de calor. A curva de pressão determina a faixa de temperaturas e pressões da câmara de combustão, a taxa de liberação de calor permite diferenciar os principais estágios da combustão, como início da injeção, início da ignição, duração das fases pré-misturada e difusiva, e fim da queima [16].

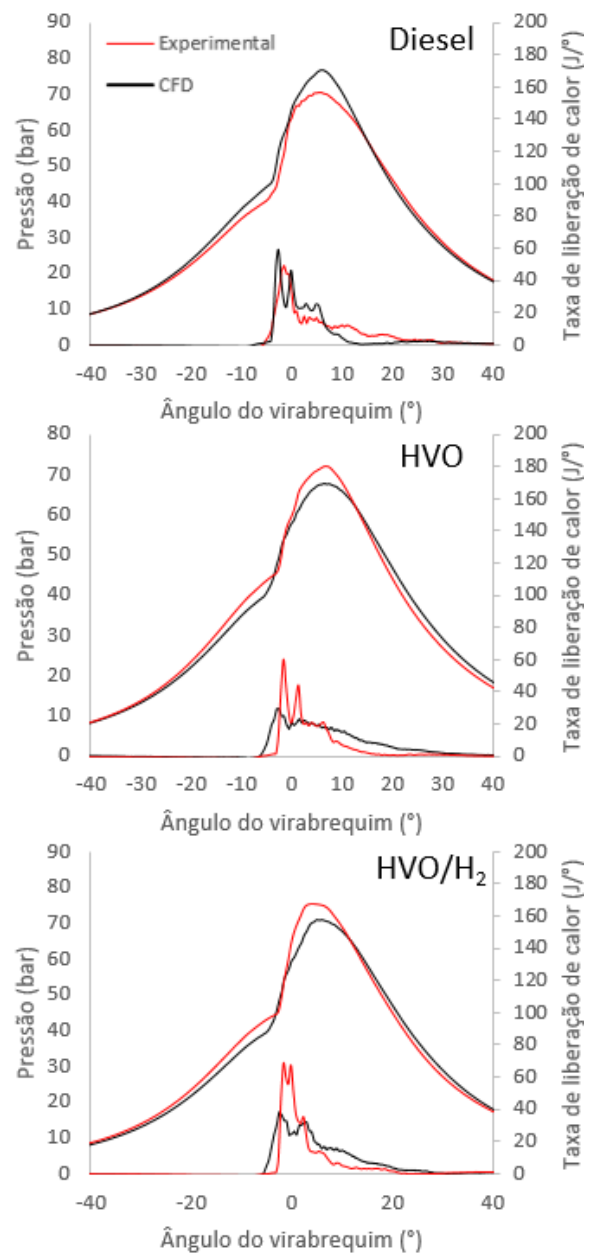


Figura 2. Validação do modelo CFD para pressão e liberação de calor. Fonte: elaboração própria.

A Figura 2 também indicam que a pressão máxima para a operação single fuel com diesel foi de 76,9 bar,

enquanto que a operação com HVO puro reduziu este valor em 6,5%, para 71,9 bar. Esta diferença se deve ao atraso na injeção observado para o HVO, decorrente de diferenças de compressibilidade entre os dois combustíveis e evidenciado pelo fato de o motor ser alimentado por uma bomba mecânica [17]. Por outro lado, a adição de hidrogênio como substituto parcial do HVO causou o efeito oposto, com aumento no pico de pressão. No caso de maior substituição avaliado (28,0% H_2), a pressão máxima chegou a 75,2 bar, um aumento de 4,6% em relação ao cenário base. O aumento de pressão para operação com o hidrogênio se deve à sua maior temperatura de chama, o que causa um efeito direto de aumento de pressão e, conforme será abordado adiante, afeta a formação de alguns poluentes [9].

3.2. Atraso de ignição

Com base na literatura científica, sabe-se que em motores de injeção mecânica o HVO pode apresentar atraso da injeção quando comparado ao diesel, o que se deve a diferenças na compressibilidade destes combustíveis [17]. Este efeito pode se sobrepor ao menor tempo de ignição do HVO [9], fazendo com que este biocombustível apresente um início de combustão atrasado em relação ao diesel. De fato, como pode ser observado na Figura 3, a combustão do diesel é mais adiantada que a do HVO a -2° (antes do ponto morto superior), o que é observado pelo menor desenvolvimento de pontos de alta temperatura que indicam a ocorrência de reações exotérmicas de combustão.

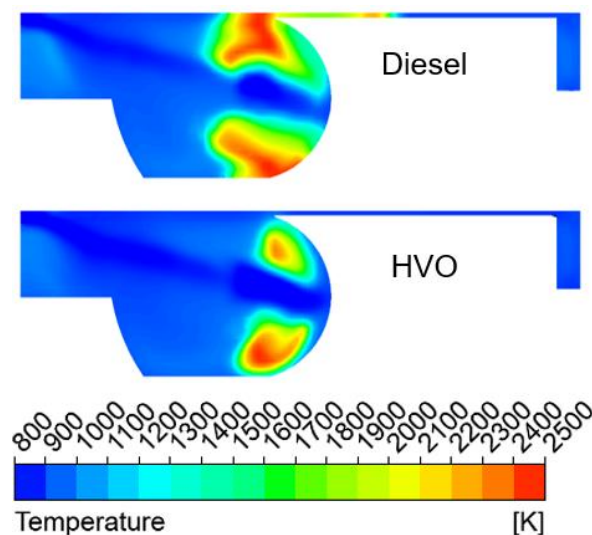


Figura 3. Distribuição de temperaturas na operação com diesel e HVO a -2° . Fonte: elaboração própria.

O atraso de ignição também pode ser observado para a combustão dual-fuel com hidrogênio. A literatura indica que o hidrogênio [9] e outros combustíveis injetados no pórtyco de admissão [16], [17] tendem a

adicionar um atraso no início da combustão, o que é verificado nos perfis de temperatura apresentados na Figura 4. Quando o HVO puro é utilizado, notam-se dois núcleos de combustão no volume, sendo que um deles se torna menos perceptível quando hidrogênio é adicionado a 17,5% de substituição de energia, e desaparece completamente quando esta fração é elevada a 28,0%.

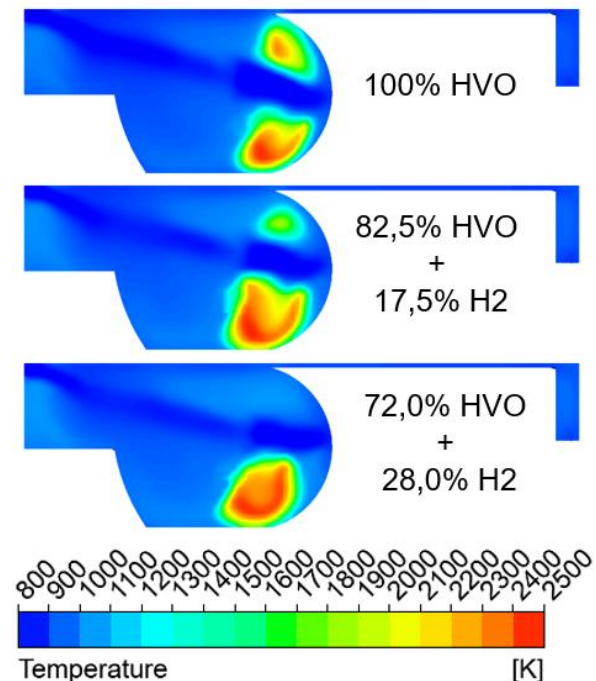


Figura 4. Distribuição de temperaturas na operação com HVO em modo single e dual-fuel com hidrogênio a -2° . Fonte: elaboração própria.

3.3. Perfis de temperatura

Perfis similares de temperatura podem ser analisados para estágios mais avançados da combustão, como ilustrado na Figura 5. Ao se avaliar as distribuições de temperatura para 10° após o ponto morto superior, quando a combustão já se encontra em estágio intermediário de desenvolvimento, é possível observar a similaridade entre os perfis de diesel e HVO. Apesar de o HVO, como já discutido, apresentar um atraso na injeção, a distribuição de pontos quentes e o nível de homogeneidade térmica é bastante similar ao observado para a operação convencional com diesel. Este efeito é explicado pela similaridade da combustão de ambos os combustíveis, dominadas pela queima difusa no entorno do spray de combustível, com a parcela pré-misturada performando um efeito mais discreto.

Para a combustão dual-fuel, por outro lado, o perfil térmico assume um padrão visivelmente distinto, com um perfil térmico mais homogêneo e com maior área de pontos quentes. Esta diferença, que ocorre apesar do

atraso de ignição associado à adição do hidrogênio, se deve a dois fatores principais: por um lado, a injeção do hidrogênio da forma pré-misturada com o ar faz com que a queima, uma vez iniciada, ocorra em distintos pontos da câmara de combustão, não se limitando à região vizinha ao spray; por outro, a já discutida maior temperatura de combustão do hidrogênio acelera a combustão e eleva a temperatura média de todo o volume.

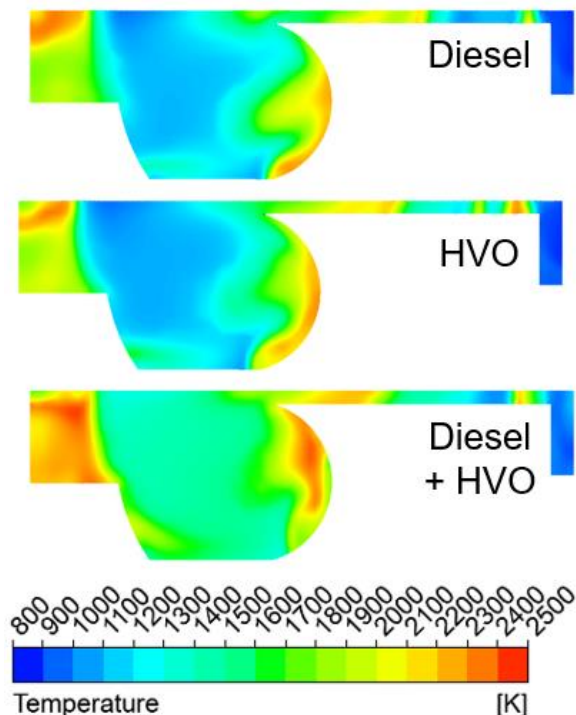


Figura 5. Perfis de temperatura na operação com diesel e HVO a -10° . Fonte: elaboração própria.

3.4. Emissões de poluentes

A análise das emissões de poluentes indica que o uso de HVO combinado a uma substituição parcial com hidrogênio verde podem trazer benefícios ambientais que vão além de seus aspectos renováveis. A Figura 6, que traz a concentração de alguns dos principais poluentes na exaustão do motor, indica que esta combinação de combustíveis alternativos pode reduzir significativamente as emissões de CO_2 . Em comparação com o caso-base com diesel, a operação com HVO reduziu as emissões de CO_2 em 4,3%, o que se deve majoritariamente a uma maior eficiência associada à combustão do HVO e a uma maior relação H/C observada neste combustível [17]. De forma similar, a adição de hidrogênio ao HVO reduziu ainda mais as emissões deste poluente, com emissões de CO_2 até 18,4% menores em relação ao caso-base. Este resultado é naturalmente esperado, uma vez que a combustão estequiométrica do hidrogênio produz apenas água como produto, não possuindo compostos de carbono.

Ainda de acordo com a Figura 6, observa-se que as emissões de CO são levemente reduzidas para a operação com HVO (redução de 4,3%), o que se deve também a uma combustão mais completa e com menor relação C/H em relação ao diesel [16]. O uso de hidrogênio em modo dual-fuel reduz ainda mais as emissões deste poluente, com um decréscimo percentual de até 88,0%. Assim como observado para o CO_2 , a redução de CO durante a operação com hidrogênio se deve à ausência de carbono em sua composição, o que reduz a quantidade total deste elemento envolvida no processo de combustão.

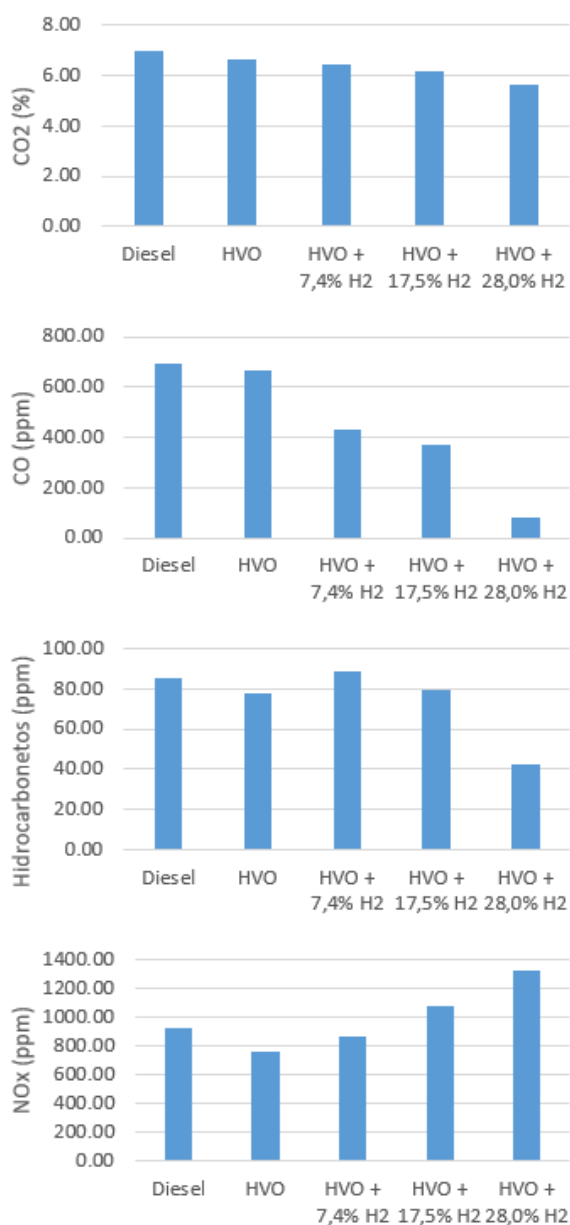


Figura 6. Emissões de CO_2 , CO, hidrocarbonetos e NO_x para diesel, HVO e HVO- H_2 . Fonte: elaboração própria.

Por outro lado, as emissões de hidrocarbonetos não queimados apresentou um comportamento menos previsível. A substituição de diesel por HVO resultou em emissões de hidrocarbonetos 8,8% menores, o que novamente é justificado pela maior eficiência de combustão atribuída ao biocombustível [9]. Por outro lado, a adição de hidrogênio ao HVO resultou em um comportamento mais insconstante. A baixas taxas de substituição de energia de hidrogênio (7,4%), foi observado um aumento de até 14,9% de hidrocarbonetos em relação ao HVO puro. Por outro lado, a máxima taxa de substituição estudada (28,0%) reduziu as emissões deste poluente em 44,7% em relação ao HVO puro e em 49,6% em relação ao caso-base com diesel. Este efeito indica que a eficiência de combustão não varia necessariamente de forma linear com a adição de um combustível secundário, uma vez que, em alguns pontos de operação, o hidrogênio pode apresentar efeitos conflitantes de piora na eficiência de combustão e redução da quantidade de hidrocarbonetos na composição média do combustível.

Finalmente, as emissões de NO_x indicam que o HVO foi capaz de reduzir também este poluente, sendo observada uma diminuição de 16,8% em comparação ao diesel. Uma vez que o NO_x está associado principalmente a altas temperaturas devido ao seu mecanismo térmico de formação, as menores temperaturas de queima do HVO, indicadas pelas curvas de pressão mais suaves (ver Figura 2), contribuem para que este biocombustível apresente menor formação de óxidos de nitrogênio. Por outro lado, o uso de hidrogênio resultou em um aumento gradativo de NO_x pelo motor, em um efeito decorrente da sua maior temperatura de queima. Para a máxima taxa de substituição de hidrogênio (28,0%), foi observado um acréscimo de 43,7% em comparação ao caso-base com diesel e de até 72,8% em comparação ao HVO.

A avaliação das emissões apresentadas pela Figura 6 indicam que o uso de HVO como substituto do diesel pode trazer benefícios em termos de redução de CO_2 , CO, hidrocarbonetos e NO_x , resultando em uma combustão mais eficiente também do ponto de vista ambiental. Por outro lado, a adição de hidrogênio tende a reduzir também as emissões de CO_2 , CO e hidrocarbonetos não queimados, porém apresentam uma maior temperatura de queima que tende a ocasionar um aumento significativo nas emissões de óxido de nitrogênio. Neste sentido, o uso de hidrogênio como substituto parcial do HVO em motores de combustão interna pode oferecer uma transição energética mais flexível e até mesmo a redução de importantes poluentes, porém deve ser avaliado com cuidado do ponto de vista do aumento de emissões de NO_x .

4. Conclusões

Atualmente, a forte tendência de transição energética em direção a fontes renováveis tem levado a um maior uso de biocombustíveis no setor de transportes. No caso de motores diesel, utilizados majoritariamente para fins de geração distribuída, em máquinas agrícolas e em veículos pesados em geral, o HVO – óleo vegetal hidrotratado – aparece como o potencial substituto do biodiesel produzido por transesterificação, que atualmente domina o mercado renovável de combustíveis similares ao diesel. Ao mesmo tempo, outros vetores energéticos do futuro, como o hidrogênio verde, podem ser utilizados para suprir parte deste mercado, flexibilizando a iminente transição para fontes mais sustentáveis.

Neste sentido, o presente estudo propôs o desenvolvimento de um modelo computacional capaz de prever o funcionamento de um motor monocilíndrico operado, simultaneamente, com diferentes proporções de HVO e hidrogênio. O modelo foi adequadamente validado por meio de dados experimentais obtidos em uma bancada de testes, e resultou em perfis compatíveis para pressão do cilindro e taxa de liberação de calor. Foi verificado que, assim como observado experimentalmente, o HVO apresentou um atraso na combustão em relação ao diesel, levando a menores picos de pressão (redução de 6,5%) e liberação de calor. De forma similar, a adição de hidrogênio retardou o início da queima, possivelmente por efeitos combinados de menor reatividade e menor eficiência volumétrica, porém elevou a pressão máxima em comparação à operação com HVO puro (aumento de 4,6%).

A substituição direta de diesel por HVO resultou em diminuição nas emissões de CO_2 (4,3%), CO (4,3%), hidrocarbonetos (8,8%) e NO_x (16,8%), em decorrência de uma combustão mais eficiente, menores temperaturas de queima e uma menor relação carbono/hidrogênio. De forma similar, a operação dual-fuel de HVO e hidrogênio também reduziu as emissões de CO_2 (até 18,4%), CO (até 88,0%) e hidrocarbonetos (até 49,6%) em comparação ao caso-base com diesel, porém sua maior temperatura de combustão elevou as emissões de NO_x em até 43,7% em relação à operação com diesel.

Neste contexto, conclui-se que a análise da combustão do HVO puro e de sua combinação de hidrogênio pode apresentar benefícios ambientais decorrentes de uma menor emissão de poluentes. O atraso de combustão observado tanto para o HVO quanto para suas combinações dual-fuel indica que a queima destes biocombustíveis pode ser associada a uma compensação nos tempos de injeção, visando adaptar cada motor às diferentes propriedades físico-químicas destes vetores energéticos. As reduções de poluentes

observadas durante a substituição direta de diesel por HVO foram ainda mais potencializadas pela adição de hidrogênio, à exceção das emissões de NO_x, que aumentaram significativamente para o modo dual-fuel. Desta forma, a utilização de HVO e hidrogênio em motores tipo diesel se mostra viável e promissora, embora a dosagem da taxa de substituição deva ser controlada com cuidado a fim de evitar que a redução de alguns poluentes seja alcançada às custas de um aumento excessivo da formação dos óxidos de nitrogênio.

5. Referências

- [1] G. M. Pinto, T. A. Z. De Souza, C. J. R. Coronado, L. F. V. Flôres, G. R. A. Chumpitaz, e M. H. Da Silva, “Experimental investigation of the performance and emissions of a diesel engine fuelled by blends containing diesel s10, pyrolysis oil from used tires and biodiesel from waste cooking oil”, *Env Prog and Sustain Energy*, vol. 38, n° 5, p. 13199, set. 2019, doi: 10.1002/ep.13199.
- [2] P. A. Cremonese *et al.*, “Current scenario and prospects of use of liquid biofuels in South America”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 43, p. 352–362, mar. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.11.064.
- [3] T. A. Z. De Souza *et al.*, “Biodiesel in South American countries: A review on policies, stages of development and imminent competition with hydrotreated vegetable oil”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 153, p. 111755, jan. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2021.111755.
- [4] S. H. Pourhoseini, A. Karimian, e A. Ficarella, “A new environmental friend and commercial biodiesel from *Salicornia persica* Akhani: Studies of synthesis, physico chemical analysis and flame analysis”, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 54, p. 101716, jun. 2024, doi: 10.1016/j.jestch.2024.101716.
- [5] R. B. R. Da Costa, C. J. R. Coronado, J. J. Hernández, A. C. T. Malaquias, L. F. V. Flores, e J. A. De Carvalho, “Experimental assessment of power generation using a compression ignition engine fueled by farnesane – A renewable diesel from sugarcane”, *Energy*, vol. 233, p. 121187, out. 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.121187.
- [6] A. Dimitriadis *et al.*, “Improving PM-NO_x trade-off with paraffinic fuels: A study towards diesel engine optimization with HVO”, *Fuel*, vol. 265, p. 116921, abr. 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2019.116921.
- [7] I. Bortel, J. Vávra, e M. Takáts, “Effect of HVO fuel mixtures on emissions and performance of a passenger car size diesel engine”, *Renewable Energy*, vol. 140, p. 680–691, set. 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.03.067.
- [8] M. Pechout, M. Kotek, P. Jindra, D. Macoun, J. Hart, e M. Vojtisek-Lom, “Comparison of hydrogenated vegetable oil and biodiesel effects on combustion, unregulated and regulated gaseous pollutants and DPF regeneration procedure in a Euro6 car”, *Science of The Total Environment*, vol. 696, p. 133748, dez. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133748.
- [9] G. M. Pinto, T. A. Z. De Souza, R. B. R. Da Costa, L. F. A. Roque, G. V. Frez, e C. J. R. Coronado, “Combustion, performance and emission analyses of a CI engine operating with renewable diesel fuels (HVO/FARNESANE) under dual-fuel mode through hydrogen port injection”, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 48, n° 51, p. 19713–19732, jun. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.02.020.
- [10] J. M. Garcia-Oliver, R. Novella, D. Lopez Pintor, C. Micó, e U. Bin-Khalid, “A Numerical Approach for the Analysis of Hydrotreated Vegetable Oil and Dimethoxy Methane Blends as Low-Carbon Alternative Fuel in Compression Ignition Engines”, apresentado em WCX SAE World Congress Experience, Detroit, Michigan, United States, abr. 2023, p. 2023-01-0338. doi: 10.4271/2023-01-0338.
- [11] T. A. Z. De Souza, “Análise experimental e em CFD de motor diesel alimentado com biocombustíveis adaptáveis à matriz energética brasileira em modo dual fuel”, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2024.
- [12] F. Ekin, O. A. Ozsoysal, e H. Arslan, “The effect of using hydrogen at partial load in a diesel-natural gas dual fuel engine”, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, n° 42, p. 18532–18550, maio 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.03.287.
- [13] J. B. Heywood, *Internal combustion engine fundamentals*, Second edition. New York: McGraw-Hill Education, 2018.
- [14] ANSYS INC, “Forte best practices”, Canonsburg, 2022.
- [15] S. Ren, S. L. Kokjohn, Z. Wang, H. Liu, B. Wang, e J. Wang, “A multi-component wide distillation fuel (covering gasoline, jet fuel and diesel fuel) mechanism for combustion and PAH prediction”,

Fuel, vol. 208, p. 447–468, nov. 2017, doi: 10.1016/j.fuel.2017.07.009.

- [16] G. M. Pinto *et al.*, “Experimental investigation of performance and emissions of a CI engine operating with HVO and farnesane in dual-fuel mode with natural gas and biogas”, *Energy*, vol. 277, p. 127648, ago. 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.127648.
- [17] R. B. R. Da Costa *et al.*, “Experimental assessment of renewable diesel fuels (HVO/Farnesane) and bioethanol on dual-fuel mode”, *Energy Conversion and Management*, vol. 258, p. 115554, abr. 2022, doi: 10.1016/j.enconman.2022.115554.