

LEVANTAMENTO DA EFICIÊNCIA DE COMBUSTÃO DE UM QUEIMADOR INDUSTRIAL UTILIZANDO ÓLEO DIESEL S-10 E SUA MISTURA COM HIDROGÊNIO

MATHEUS HENRIQUE CASTANHA CAVALCANTI^{1,2}, BRUNO AUGUSTO CABRAL ROQUE^{1,2}, JULIANO RODRIGUES PAPPALARDO², LUCIANO TAVARES BARBOSA², PEDRO PINTO FERREIRA BRASILEIRO², DIEGO DE MOURA REBOUCAS³, CELMY MARIA BEZERRA DE MENEZES BARBOSA¹, LEONIE ASFORA SARUBBO²

¹ Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Pernambuco, Av. dos Economistas s/n, Recife, CEP 50740-590, Brasil

² Instituto Avançado de Tecnologia e Inovação, Rua Potyra 31, Recife, CEP 50751-310, Brasil

³ Edp Termoeletricas, 40,5KM - Anacetaba, São Gonçalo do Amarante - Ceará, CEP 62670-000, Brasil

E-mail para contato: castanha6499@gmail.com

RESUMO - O uso extensivo de combustíveis fósseis é um dos principais responsáveis pelo agravamento significativo da poluição ambiental, mudanças climáticas e da crise energética. O hidrogênio é considerado um componente essencial na transição energética e para uma economia global de baixo carbono, visando alcançar as metas de emissão líquida zero (Net Zero Emissions) de gases de efeito estufa (GEEs). Sua combustão é livre de carbono, sua reação química altamente exotérmica tem como produto apenas água (H₂O). Em comparação com os combustíveis fósseis, o uso de hidrogênio em motores de combustão interna, como queimadores, pode melhorar a eficiência térmica, ao mesmo tempo que reduz as emissões de carbono. Diante da busca por uma transição energética eficiente, para reduzir o consumo de óleo diesel na geração de energia elétrica pelas indústrias, estão sendo estudadas fontes de energias alternativas que possam suprir a demanda de energia global de forma eficaz, rentável e

operacional. Portanto, o objetivo deste trabalho é realizar o levantamento da eficiência de combustão de um motor de combustão interna à diesel (queimador) e realizar a mistura deste óleo com hidrogênio para constatar a possível melhoria da eficiência térmica do processo e da redução de gases do efeito estufa gerados pela reação química. Para obtenção destes dados foi construído o laboratório de processos termoquímicos, localizado no IATI - Instituto Avançado de Tecnologia e Inovação, localizado no bairro do Prado, Recife, Pernambuco. O laboratório consta com um queimador industrial, uma fornalha cilíndrica horizontal e uma chaminé para a exaustão dos gases de combustão, os equipamentos estão interligados com a linha de ar comprimido, óleo diesel, hidrogênio e gás liquefeito de petróleo (GLP) e conectados eletricamente com um controlador lógico programável (CLP). A eficiência térmica da combustão foi obtida através do balanço energético do sistema. Uma eficiência média de combustão do óleo diesel de $86\% \pm 8,98$ e de $88,3\%$ para a mistura óleo diesel- H_2 foram calculadas. Os gases de exaustão da queima do óleo diesel foram analisados e valores médios de emissões foram obtidos através do analisador de gases, dentre os gases analisados foram registradas as concentrações médias de $13,86 \times 10^6$ ppm de CO_2 , 68,38 ppm de NO_x e 7,86 ppm de SO_x , principais causadores do efeito estufa e chuva ácida. Não houve concentrações significativas de C_xH_y detectadas pelo equipamento. De acordo com a literatura, o hidrogênio melhora o processo de combustão devido a facilidade de queima, alto limite de inflamabilidade, poder calorífico e tamanho de chama quando comparado a combustíveis derivados de petróleo. Também é capaz de aumentar a eficiência térmica da reação. A utilização em blends com gasolina e diesel têm sido reportados e resultados positivos de ganho de performance, aumento de tempo de vida útil dos equipamentos e redução de emissões de GEEs têm sido explicitados.

Palavras-chave: hidrogênio, combustão, eficiência térmica, queimador, transição energética.

Survey of Combustion Efficiency of an Industrial Burner Using S-10 Diesel and Its Mixture with Hydrogen

Abstract - The extensive use of fossil fuels is one of the main contributors to significant environmental pollution, climate change, and the energy crisis. Hydrogen is considered an essential component in the energy transition towards a low-carbon global economy, aiming to achieve net zero greenhouse gas (GHG) emissions goals. Its combustion is carbon-free, and its highly exothermic chemical reaction produces only water (H_2O). Compared to fossil fuels, the use of hydrogen in internal combustion engines, such as burners, can improve thermal efficiency while reducing carbon emissions. In the search for an efficient energy transition to reduce diesel oil consumption in the electricity generation by industries, alternative energy sources that can effectively, economically, and operationally meet the global energy demand are being studied. Therefore, the aim of this work is to survey the combustion efficiency of a diesel internal combustion engine (burner) and to mix this oil with hydrogen to ascertain the possible improvement in thermal efficiency of the process and the reduction of greenhouse gases produced by the chemical reaction. To obtain these data, the thermochemical processes laboratory was built, located at the IATI - Advanced Institute of Technology and Innovation, Recife, Pernambuco. The laboratory features an industrial burner, a horizontal cylindrical furnace, and a chimney for the exhaust gases, with equipment interconnected with compressed air, diesel oil, hydrogen, and liquefied petroleum gas (LPG) lines and electrically connected to a programmable logic controller (PLC). The thermal efficiency of combustion was obtained through the energy balance of the system. An average combustion efficiency of $86\% \pm 8.98$ for diesel oil and 88.3% for the diesel- H_2 mixture were calculated. The exhaust gases from diesel combustion were analyzed, and average emission values were obtained through the gas analyzer, among the analyzed gases were registered average concentrations of 13.86×10^6 ppm of CO_2 , 68.38 ppm of NO_X , and 7.86 ppm of SO_X , the main causes of the greenhouse effect and acid rain. No significant concentrations of C_xH_y were detected by the equipment. According to the literature, hydrogen improves the combustion process due to its ease of burning, high flammability limit, calorific value, and flame size compared to petroleum-derived fuels. It is also capable of increasing the thermal efficiency of the reaction. The use in blends with gasoline and diesel has been

reported, and positive results in performance gain, increased equipment lifespan, and reduction of GHG emissions have been elucidated.

Keywords: hydrogen, combustion, thermal efficiency, burner, energy transition.

1 Introdução

As emissões globais de gases do efeito estufa atingiram o nível mais elevado da história, apresentando uma ameaça existencial para a humanidade à medida que o aquecimento global continua a agravar-se. Essas alterações climáticas preocupam líderes e decisores políticos em todo o mundo. Esses temas têm sido intensamente discutidos em eventos globais visando acordos para redução de emissões de gases de efeito estufa, como a Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas (COP) 21, com o Acordo de Paris, e a COP 26, em que os líderes concordaram com o desenvolvimento de suas economias com base no tecnologias neutras em carbono. Para atingir este ambicioso objetivo, é necessário mudar significativamente o atual sistema energético, dependente de combustíveis fósseis, em direção a fontes de energia renováveis. Neste contexto, o desenvolvimento de uma economia do hidrogênio é visto como um requisito importante nos sistemas energéticos e um contributo necessário para alcançar as metas climáticas (Zainal et al., 2024; Garlet et al., 2024).

O hidrogênio (H_2) é o elemento mais leve da tabela periódica com número atômico 1. Embora o H_2 seja o elemento mais abundante no universo, não está prontamente disponível na forma pura na Terra, estando predominantemente presente em hidrocarbonetos e água, e na forma pura, existe como um gás inodoro e incolor em temperatura e pressão padrão. É altamente inflamável e tem um poder calorífico superior de 142 MJ/kg. A queima de hidrogênio no ar produz apenas água, fornecendo assim energia limpa e livre de poluentes nocivos como NO_x , CO_2 , fuligem e CO, que são obtidos quando hidrocarbonetos como o metano são queimados com o ar. O hidrogênio foi classificado em várias cores com base em sua fonte (como combustíveis fósseis, água e biomassa) e processo de produção, que pode ser usando vários métodos, os mais comuns incluem reforma a vapor de metano (SMR), gaseificação

de carvão, rotas de conversão de biomassa e eletrólise de água (Mokheimer et al., 2024; Agrawal et al., 2024; Chelvam et al., 2024; Alamiery, 2024).

O hidrogênio é cada vez mais reconhecido como um elemento crucial na formação do futuro panorama energético e na promoção do desenvolvimento sustentável para o planeta, e também, é um dos pilares da transição energética, uma vez que pode ser usado tanto como transportador de energia quanto como matéria-prima. O *Hydrogen Council*, um grupo industrial global, acredita que até 2050, o H₂ fornecerá 18% da energia do usuário final, eliminará cerca de 6 Gt de emissões de carbono, permitirá 2,5 trilhões de dólares em vendas e criará 30 milhões de empregos em todo o mundo. Uma economia baseada no hidrogênio é vital para descarbonizar indústrias difíceis de reduzir e promover uma sociedade sustentável (Hassan et al., 2024; Harichandan; Kar; Rai, 2023).

O H₂ pode ser utilizado como combustível alternativo para motores de combustão interna tradicionais devido às suas características de carbono zero e renovável. Motores de combustão interna neutros em carbono são considerados a direção de desenvolvimento futuro do campo de motores. A regeneração limpa e contínua e o bom desempenho da combustão do hidrogênio, apresenta um grande potencial para substituir os combustíveis fósseis tradicionais para a sua utilização em motores de combustão interna. Adicionar gás hidrogênio à combustão de um motor diesel pode melhorar o processo de combustão e aumentar o desempenho do motor, além disso, certos hidrocarbonetos nocivos emitidos pelos motores diesel com a adição de hidrogênio podem ser reduzidos consideravelmente (Huang et al., 2024; Jayaprabakar et al., 2024; Winangun et al., 2023).

A combustão é o processo mais crítico na avaliação do desempenho do motor, e, portanto, melhorar o processo de combustão levaria à eficiência do combustível, juntamente com menores custos de manutenção, operação e instalação. A combustão do hidrogênio tem uma velocidade de propagação de chama muito rápida. Devido à sua rápida velocidade de combustão, a combustão isovolumétrica pode ser melhorada, o que é benéfico para melhorar a eficiência da combustão. O maior poder calorífico é uma vantagem do hidrogênio e o seu menor poder calorífico é 2,5 vezes superior ao do diesel. O H₂ pode liberar mais calor durante a combustão, comparado ao diesel, possui também alto coeficiente de difusão e pode promover a formação de

uma mistura combustível mais uniforme no cilindro após entrar nele, além disso, o produto da combustão é apenas água (Malik et al., 2024; Li et al., 2023).

Diante da busca por uma transição energética eficiente, para reduzir o consumo de óleo diesel na geração de energia elétrica pelas indústrias, estão sendo estudadas fontes de energias alternativas que possam suprir a demanda de energia global de forma eficaz, rentável e operacional. Portanto, o objetivo deste trabalho é realizar o levantamento da eficiência de combustão de um motor de combustão interna à diesel (queimador) e realizar a mistura deste óleo com hidrogênio para constatar a possível melhoria da eficiência térmica do processo e da redução de gases do efeito estufa gerados pela reação química. Todos os experimentos com óleo diesel foram realizados fisicamente no laboratório de processos termoquímicos, localizado no IATI - Instituto Avançado de Tecnologia e Inovação, no bairro do Prado, Recife, Pernambuco.

Além disso, é crucial considerar o contexto operacional ao avaliar os benefícios da melhoria da eficiência de combustão. Em cenários onde a demanda de energia é restrita, a otimização do uso de combustíveis, como o óleo diesel, através da mistura com hidrogênio, pode significar uma redução substancial no consumo de combustíveis fósseis. No entanto, é importante estar ciente do *efeito rebote*, que pode ocorrer quando a eficiência energética leva a um aumento no consumo de energia devido a demandas operacionais ou de mercado. O projeto atual leva em consideração essas dinâmicas, focando em um sistema de demanda restrita onde a eficiência aprimorada não leva a um aumento no consumo de energia, mas sim a uma operação mais limpa e eficiente.

2 Desenvolvimento

2.1 Metodologia

2.1.1 Balanço energético para obtenção do calor real gerado pela queima de óleo diesel

A equação do balanço de energia (Equação 1) é determinada pela igualdade entre toda corrente energética que entra e toda a corrente energética que sai deste sistema. Foram consideradas algumas hipóteses para este cálculo, que são: um

sistema fechado e isotérmico, sem perdas de carga. Foi estabelecido como volume de controle a entrada da fornalha (a partir do bico pulverizador do queimador) até a saída da chaminé, como mostra a Figura 1 abaixo:

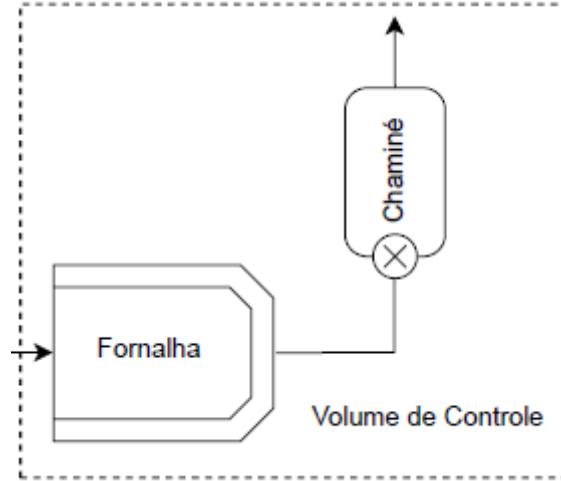


Figura 1 - Volume de controle para o cálculo do balanço de energia.

$$\dot{Q}_{\text{real_diesel}} + \dot{m}_{\text{arp}} c_{p_{\text{arp}}} (T_{\text{arp}} - 298) + \dot{m}_{\text{diesel}} c_{p_{\text{diesel}}} (T_{\text{diesel}} - 298) + \dot{m}_{\text{arc}} c_{p_{\text{arc}}} (T_{\text{arc}} - 298) = \dot{m}_{\text{ex}} c_{p_{\text{ex}}} (T_{\text{ex}} - 298) \quad (1)$$

Onde:

$$\dot{Q}_{\text{real_diesel}} = \text{Vazão do calor real, } \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

$$\dot{m}_i = \text{vazão mássica do componente, } \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$c_{p_i} = \text{calor específico do componente, } \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

$$T_i = \text{temperatura do componente, K}$$

Nos índices das variáveis, entende-se: arp (ar primário), diesel (óleo diesel), arc (ar comprimido), ex (gases de exaustão). Algumas das variáveis acima foram determinadas de forma indireta através de equações, como é o caso da vazão dos gases da exaustão, que é definida como a soma das vazões de entrada do sistema, estando representada pela Equação 2 ou pela Equação 3.

2.1.1.1 Equação para obtenção da vazão mássica dos gases de exaustão:

$$\dot{m}_{ex} = \dot{m}_{ar} + \dot{m}_{diesel} + \dot{m}_{arc} \quad (2)$$

Também é possível obter a vazão mássica dos gases de exaustão através da equação da continuidade:

$$\dot{m}_{ex} = \bar{\rho} V \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \quad (3)$$

Onde:

$\bar{\rho}$ = densidade média dos gases de exaustão, $\frac{kg}{m^3}$

D = diâmetro da seção transversal da chaminé, m

V = velocidade, $\frac{m}{s}$

A velocidade, V, termo presente na equação 3, será obtida através da Equação de Bernoulli (Equação 4):

$$\frac{\bar{\rho} V^2}{2} = P_t - P_s = \Delta P \quad (4)$$

Onde:

P_t = pressão total

P_s = pressão estática

As tomadas de pressão serão obtidas pelo medidor de pressão diferencial, mostrado na Figura 4, que está conectado ao tubo de Pitot que foi instalado dentro da chaminé.



Figura 2 - Equipamento medidor de diferença de pressão.

O termo da velocidade é calculado para que possamos determinar a vazão mássica dos gases de exaustão na Equação 3. Além disso, se faz necessário também realizar o cálculo da densidade média dos gases de exaustão, uma vez que a fumaça gerada pela combustão contém uma mistura de gases, como CO, NO_x, SO_x, além dos produtos da reação de oxidação CO₂ e H₂O. A composição e a temperatura dos gases de exaustão são obtidas utilizando o analisador de gases mostrado na Figura 3 (A) e foram determinantes para realização das próximas etapas de cálculo.

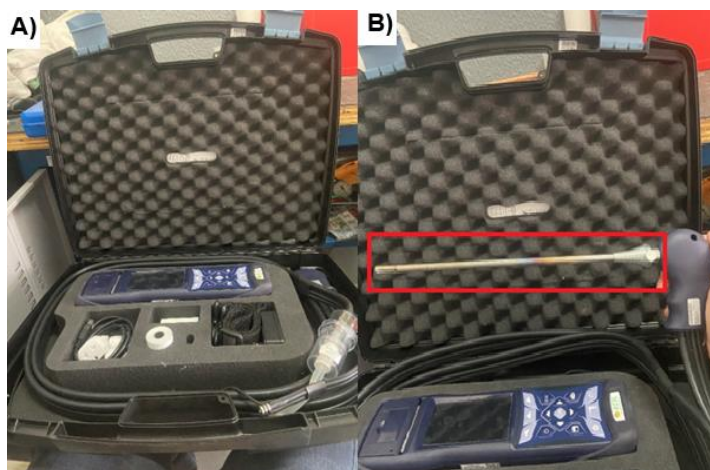


Figura 3 - (A) Analisador de gases, (B) Haste (em vermelho) com a sonda na ponta

O analisador de gases utilizado foi o *Combustion Analyzer Chemist 600* da SEITRON S.p.A, calibrado para realizar a medição dos teores de O₂, CO, NO/NO_x, SO₂, C_xH_y e CO₂IR. Após 10 minutos de queima contínua, a haste Figura 4 (B), foi introduzida no final da seção horizontal da chaminé, próxima ao cotovelo, pouco antes

dos gases seguirem para a seção vertical e serem liberados na atmosfera do ambiente, como mostra a Figura 4.



Figura 4 – Local de inserção da haste do analisador

A análise de alguns gases dá-se após um determinado tempo de contato com os gases de combustão, como mostra a Tabela 1 abaixo:

Tabela 1 - Tempos de resposta das células de medição utilizadas no analisador.

Sensor	Nomenclatura do componente	Tempo de resposta (segundos) ¹
O ₂	Oxigênio	20
CO	Monóxido de Carbono	180
NO/NO _x	Óxidos de Nitrogênio	40
SO ₂	Dióxido de Enxofre	50
C _x H _y	Carbono não-queimado	90

O princípio de trabalho do equipamento é da seguinte forma: a amostra de gás é coletada, através da sonda de gás, por uma bomba de sucção de diafragma dentro do instrumento. A sonda de medição possui um cone de posicionamento deslizante que permite que a sonda seja inserida em furos com diâmetro de 11 mm (0,43") a 16 mm (0,65") e para ajustar a profundidade de imersão. A amostra de gás é limpa de umidade e impurezas por um coletor de condensado e filtro, posicionado ao longo da mangueira de borracha que conecta a sonda ao analisador. O gás é então analisado em seus componentes por sensores eletroquímicos e infravermelhos, medido,

calculado e mostrado no *display* do equipamento. Estes valores serão utilizados para o cálculo da eficiência de combustão.

2.1.1.2 Equação para obtenção da vazão de calor teórica gerada pela combustão do diesel

O calor teórico é medido utilizando a seguinte equação:

$$\dot{m}_{\text{diesel}} \times \text{PCI}_{\text{diesel}} = \dot{Q}_{\text{teórico_diesel}} \quad (5)$$

Onde:

$\text{PCI}_{\text{diesel}}$ = Poder Calorífico Inferior do diesel

O calor teórico é a quantidade de energia térmica teórica que pode ser gerada pelo diesel, de forma ideal, onde não há nenhum tipo de perda ou agente externo atuando.

2.1.1.3 Equação da eficiência térmica da combustão para o diesel

$$n_{\text{comb}}(\%) = \frac{\dot{Q}_{\text{real_diesel}}}{\dot{Q}_{\text{teórico_diesel}}} \times 100 \quad (6)$$

Esta equação determinará quão eficiente está sendo a queima deste combustível em um cenário não ideal, onde perdas e outros fatores como possíveis perda de carga estão envolvidos.

2.1.1.4 Cálculo da eficiência térmica da mistura diesel-H₂

Analogamente aos cálculos para obtenção da eficiência térmica do diesel, serão os cálculos para a mistura, porém até o presente momento os ensaios experimentais envolvendo a combustão desta combinação de combustíveis encontra-se em execução, neste trabalho será apresentado a eficiência térmica da mistura obtida através da simulação utilizando o *software* comercial de simulação de processos Aspen Plus®, versão 10.0.

O calor teórico da mistura será determinado pela Equação 7:

$$(\dot{m}_{diesel} \times PCI_{diesel}) + (\dot{m}_{H_2} \times PCI_{H_2}) = \dot{Q}_{teórico_mistura} \quad (7)$$

Onde:

$$\dot{m}_{H_2} = \text{Vazão de hidrogênio} \left(\frac{kg}{s} \right)$$

$$PCI_{H_2} = \text{Poder Calorífico do hidrogênio}$$

E a eficiência térmica da combustão será calculada através da Equação 8:

$$n_{comb_m}(\%) = \frac{Q_{teórico_mistura}}{Q_{real_mistura}} \times 100 \quad (8)$$

Foi escolhido o método PSKR (*Predictive Soave-Redlich-Kwong*) para as simulações, que é um método que pode ser utilizado em aplicações envolvendo misturas polares e apolares, prediz interações binárias a qualquer pressão, pode ser utilizado em operações envolvendo hidrocarbonetos e gás hidrogênio. O fluxograma foi montado conforme a Figura 5 abaixo:

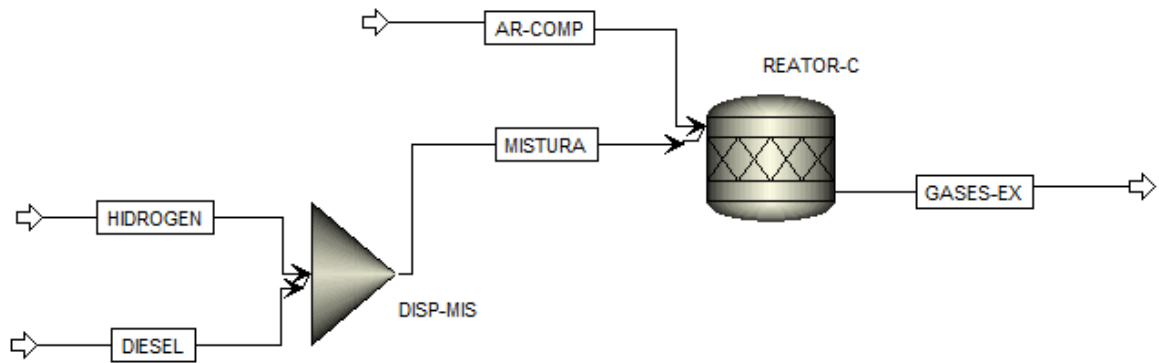


Figura 5 – Fluxograma para a simulação de combustão

O ícone denominado “DISP-MIS” funciona como um misturador para o hidrogênio e o diesel. Ele não exercerá nenhuma outra contribuição além da mistura dos componentes das duas correntes. As propriedades da corrente “MISTURA” serão calculadas pelo simulador, assim como a corrente “GASES-EX”, que é a corrente dos produtos obtidos através da reação de combustão inserida no “REATOR-C. Foi utilizado o RSTOIC, como reator de conversão, já que a cinética de reação é desconhecida e a estequiometria da reação é conhecida. As propriedades das

correntes “AR-COMP” e “DIESEL” serão determinadas utilizando a melhor condição obtida pelos testes do diesel. “HIDROGEN” será 5% da vazão de diesel.

2.2 Resultados e Discussão

2.2.1 Eficiência térmica da combustão do óleo diesel

Os ensaios de combustão reais foram realizados no laboratório de processos termoquímicos do IATI – Instituto Avançado de Tecnologia e Inovação. O compilado do valor de cada variável obtida e calculada através das equações acima está descrito abaixo, bem como o valor, já calculado, do calor real gerado por cada corrente do sistema para a combustão do óleo diesel, estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Quadro resumo das variáveis de cada corrente do sistema

Variável	Entrada			Saída
	Ar primário	Ar comprimido	Óleo diesel	Gás de exaustão
$\dot{m}_i \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right)$	0,4335	0,0025	0,0139	0,4499
$c_{p_i} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \right)$	1,0039	1,0051	2,200	1,3240
$\Delta T_i \text{ (K)}$	2,6500	11,1500	7,1500	866,7500
$\dot{Q}_i \left(\frac{\text{kJ}}{\text{s}} \right)$	1,1532	0,0280	0,2185	516,2515

Através da Equação 5, foi obtido a vazão de calor teórica do óleo diesel utilizando uma vazão de 0,0139 kg/s:

$$\dot{m}_{\text{diesel}} \times \text{PCI}_{\text{diesel}} = \dot{Q}_{\text{teórico}_{\text{diesel}}}$$

$$0,0139 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 43200 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cong 600 \text{ kW}$$

Utilizando a Equação 1, obtivemos o calor real gerado pela queima do óleo diesel, cujo valor é de aproximadamente 515 kJ/s. A eficiência de combustão do sistema, foi determinada utilizando a Equação 6:

$$n_{\text{comb}}(\%) = \frac{\dot{Q}_{\text{teórico_diesel}}}{\dot{Q}_{\text{real}}} \times 100$$

$$n_{\text{comb}}(\%) = \frac{515}{600} \cong 86\%$$

Portanto a eficiência de combustão do óleo diesel nas condições operacionais atuais é de aproximadamente 86%. É possível concluir que a carga térmica presente nos hidrocarbonetos do óleo diesel representa praticamente toda a energia produzida pela reação de combustão, sendo ele responsável, majoritariamente pela alta eficiência térmica obtida. Como toda reação de combustão envolvendo hidrocarbonetos, há geração de gases poluentes, a média da concentração de cada componente presente no gás de exaustão oriundo dos ensaios de combustão do óleo diesel foi medida e está apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Gases de exaustão oriundos da queima do óleo diesel.

O ₂ (%)	CO ₂ (%)	H ₂ O (%)	N ₂ (%)	CO (ppm)	NO _x (ppm)	NO (ppm)	SO ₂ (ppm)
3,91%	13,86%	13,86%	68,38%	7,57	87,57	85,86	7,86

O analisador de gases conseguiu detectar a presença de gases do efeito estufa como o CO₂ e gases causadores da chuva ácida como o SO₂ e o NO_x, além do monóxido de carbono (CO) proveniente da combustão incompleta do diesel e de CO₂ e vapor d'água (H₂O), produtos esperados da reação de oxidação completa. Não foram encontradas concentrações significativas de C_xH_y.

Os níveis de CO gerados pela combustão incompleta são bem menores, em percentual, quando comparado aos níveis de CO₂, oferecendo uma contribuição pequena na totalidade dos gases emitidos juntamente com os demais óxidos (SO₂, NO e NO_x). Isso pode ser explicado devido a regulagem do queimador, que está operando em condições mínimas, oferecendo uma boa proporção de ar/combustível, acarretando em mais reações completas do que incompletas.

2.2.2 Simulação da combustão da mistura diesel-H₂

Na tabela 4, está apresentado os valores de cada corrente inseridos no software para realizar a simulação da combustão da mistura. Estes valores foram escolhidos baseados em uma combustão estequiométrica, com 10% de excesso de ar, a temperatura ambiente. Para cada quilograma de óleo diesel, são requeridos aproximadamente 14,5 quilogramas de ar comprimido.

Tabela 4 – Valores das correntes para a simulação

Variáveis	Ar comprimido	Hidrogênio	Óleo diesel
$\dot{m}_i \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)$	798,00	2,50	50,00
P (bar)	1,00	3,20	2,64
T_i (K)	298,15	303,15	305,15

Os resultados da simulação e carga térmica já calculada estão expressos na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados da simulação para mistura de óleo diesel e H_2

Temperatura do gás (°C)	Vazão (kg/s)	Cp mistura (kJ/kg°K)	Carga térmica (kW)
1927,868	0,236	1,471	661,600

Dessa forma, podemos calcular a eficiência de combustão para a mistura através da Equação 7.

$$(\dot{m}_{diesel} \times PCI_{diesel}) + (\dot{m}_{H_2} \times PCI_{H_2}) = \dot{Q}_{teórico_mistura}$$

$$\left(0,0139 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 43200 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) + \left(0,000695 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times 120131,008 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \cong 684 \text{ kW}$$

A eficiência de combustão do sistema, foi determinada utilizando a Equação 8:

$$n_{comb_m}(\%) = \frac{Q_{mistura} Q_{teórico_mistura}}{Q_{teórico_mistura}} \times 100$$

$$n_{comb_m}(\%) = \frac{604}{684} \cong 88,3 \text{ kW}$$

Podemos observar que comparada com a eficiência térmica da queima do óleo diesel, a sua mistura com apenas 5% de hidrogênio em relação a sua vazão proporciona um aumento de 2% na eficiência de combustão de acordo com a simulação. É necessário também observarmos a Tabela 6, que revela os níveis de concentração de gases poluentes na atmosfera oriundos da queima da mistura dos combustíveis.

Tabela 6 – Resultados da simulação para mistura de óleo diesel e H₂

O ₂ (%)	N ₂ (%)	ÁGUA (%)	CO (%)	CO ₂ (%)	CxHy
2,1457	73,3235	13,8414	0,2723	10,2885	0,1286

Nota-se que com a contribuição do hidrogênio na reação de combustão, os níveis de dióxido de carbono (CO₂), foram reduzidos em aproximadamente 26%. Isso significa que mais de ¼ das emissões de CO₂ poderiam ser evitadas de serem lançadas ao meio ambiente se apenas 5% da queima dos combustíveis de hidrocarbonetos fossem misturadas com gás hidrogênio.

3 Conclusão

Diante dos resultados experimentais obtidos através dos testes físicos de combustão e dos resultados da simulação da combustão da mistura do óleo diesel com o gás hidrogênio no Aspen Plus®, foi possível constatar que a queima do gás hidrogênio associada a um combustível derivado de petróleo, é capaz de melhorar a performance da combustão, aumentando a eficiência da queima. Além disso, foi observada a redução de cerca de ¼ das emissões de CO₂ na atmosfera caso o hidrogênio fosse misturado ao diesel. Estes resultados representam a possível redução da utilização de combustíveis fósseis para produção de energia, diminuindo

a dependência desses petroderivados nos processos químicos e também elucidam a redução dos danos causados pelo efeito estufa revelando ser uma forte contribuição para as novas estratégias de mitigação das emissões dos gases do efeito estufa (*Greenhouse gases* – GHG), cumprindo as diretrizes do Acordo de Paris e avançando com as metas para alcançar as emissões líquidas zero (*Net Zero Emissions* – NZE) até 2050.

4 Agradecimentos

Este estudo foi financiado pelo Programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL-PD-07267-0022/2021) e EDP-Pecém, no âmbito do projeto “Desenvolvimento de Roadmap e Projeto Piloto de H₂ no Complexo do Pecém”. Este trabalho também contou com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Desenvolvimento Tecnológico (CNPq), Fundação de Apoio à Ciência e Tecnologia do Estado do Pernambuco (FACEPE) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Os autores agradecem ao Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), ao Programa de Recursos Humanos (PRH) da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), especialmente ao PRH30.1 pelo suporte financeiro e ao Instituto Avançado de Tecnologia e Inovação (IATI), Brasil.

5 Nota Explicativa

¹ Tempo fornecido pelo manual do fabricante. Estima-se esse tempo para 90% do valor medido.

6 Referências

AGRAWAL D.; MAHAJAN N.; SINGH S. A.; SREEDHAR I. Green hydrogen production pathways for sustainable future with net zero emissions. *Fuel*, v. 359, p. 130131, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130131>.

ALAMIERY, A. Advancements in materials for hydrogen production: A review of cutting-edge technologies. *ChemPhysMater*, v. 3 (1), p. 64-73, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chphma.2023.09.002>.

GARLET, T. B.; SAVIAN, F. S.; RIBEIRO, J. L. D.; SILUK, J. C. M. Unlocking Brazil's green hydrogen potential: Overcoming barriers and formulating strategies to this promising sector. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 49 (D), p. 553-570, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.227>.

HASSAN, N. S.; JALIL, A. A.; RAJENDRAN, S.; KHUSNUN, N. F.; BAHARI, M. B.; JOHARI, A.; KAMARUDDIN, M. J.; ISMAIL, M. Recent review and evaluation of green hydrogen production via water electrolysis for a sustainable and clean energy society. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 52 (B); p. 420-441, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.068>.

HARICHANDAN, S.; KAR, S. K.; RAI, P. K. A systematic and critical review of green hydrogen economy in India. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 48 (81), p. 31425-31442, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.04.316>.

HUANG, Z.; YUAN, S.; WEI, H.; ZHONG, L.; HU, Z.; LIU, Z.; LIU, C.; WEI, H.; ZHOU, L. Effects of hydrogen injection timing and injection pressure on mixture formation and combustion characteristics of a hydrogen direct injection engine. *Fuel*, v. 363, p. 130966, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.130966>.

JAYAPRABAKAR, J.; ARUNKUMAR, T.; RANGASAMY, G.; PARTHIPAN, J.; ANISH, M.; VARSHINI, G.; KUMAR, B. K. Prospectus of hydrogen enrichment in internal combustion engines: Methodological insights on its production, injection, properties, performance and emissions. *Fuel*, v. 363, p. 131034, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131034>.

CHELVAM, K.; HANAFIAH, M. M.; WOON, K. S.; ALI, K. A. A review on the environmental performance of various hydrogen production technologies: An approach towards hydrogen economy. *Energy Reports*, v. 11, p. 369-383, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.11.060>.

LI, Z.; LIU, J.; JI, Q.; SUN, P.; WANG, X.; XIANG, P. Influence of hydrogen fraction and injection timing on in-cylinder combustion and emission characteristics of hydrogen-diesel dual-fuel engine. *Fuel Processing Technology*, v. 252, p. 107990, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2023.107990>.

MALIK, M. A. I.; MUJTABA, M. A.; KALAM, M. A.; SILITONGA, A. S.; IKRAM, A. Recent advances in hydrogen supplementation to promote biomass fuels for reducing greenhouse gases. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 49 (D), p. 463-487, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.154>.

MOKHEIMER, E. M. A.; SHAKEEL, M. R.; HARALE, A.; PAGLIERI, S.; MANSOUR, R. B. Fuel reforming processes for hydrogen production. *Fuel*, v. 359, p. 130427, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130427>.

WINANGUN, K.; SETIYAWAN, A.; SUDARMANTA, B.; PUSPITASARI, I.; DEWI, E. L. Investigation on the properties of a biodiesel-hydrogen mixture on the combustion characteristics of a diesel engine. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, v. 8, p. 100445, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100445>.

ZAINAL, B. S.; KER, P. J.; MOHAMED, H.; ONG, H. C.; FATTAH, I. M. R.; RAHMAN, S. M. A.; NGHIEM, L. D.; MAHLIA, T. M. I. Recent advancement and assessment of green hydrogen production technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 189(A), p. 113941, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113941>