

Blendas de GLP-H₂-O₂ para redução da emissão de poluentes com elevado poder de queima.

Cynthia R. Zanata,¹ Julio César Duarte Leon,¹ Natália Menezes,^{2*} Marcos Antônio dos Santos,² Heberton Wender,¹ Cauê Alves Martins^{1**}

¹Sistema Nacional de Laboratórios de H₂ da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (SisH₂-UFMS). Av. Costa e Silva, s/nº, Cidade Universitária, 79070-900, Campo Grande – MS.

²Copa Energia Distribuidora de Gás S.A. Av. das Nações Unidas, nº 14171, Andar 29, Torre C, Vila Gertrudes, São Paulo – SP.

*natalia.menezes@copaenergia.com.br

**caue.martins@ufms.br

Categoria: Meio ambiente

Resumo: O presente estudo apresenta o desenvolvimento e a avaliação experimental de blendas de GLP-H₂-O₂ com o objetivo de reduzir as emissões de poluentes e otimizar o desempenho térmico em sistemas de combustão. O trabalho foi conduzido em parceria entre a Copa Energia e a Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), utilizando um aparato experimental dedicado ao controle de vazão, mistura e análise de gases. As blendas foram avaliadas quanto às emissões de CO₂, NO e NO_x, taxa de aquecimento e consumo da mistura combustível, correlacionados por meio de uma matriz multicritério de decisão. Os resultados indicaram que a adição de H₂ no GLP, com quantidades fixas e pré-misturadas de O₂, promove redução média de 65% nas emissões de CO₂, com diminuição de até 40% no consumo de GLP em condições otimizadas. O oxigênio desempenha um papel importante para estabilizar a chama e assegurar combustão completa, enquanto o hidrogênio aumenta a difusividade térmica e a homogeneidade da reação. Uma simulação de impacto das blendas de GLP-H₂-O₂ em uma aplicação hipotética de consumo 40 kg de GLP por hora sugere economia acumulada de ~234 toneladas de GLP em cinco anos de operação, com equivalente redução da emissão de

CO₂. Os resultados demonstram que blendas de GLP-H₂-O₂ representam uma rota tecnológica promissora para a transição energética, conciliando ganhos ambientais e econômicos sem necessidade de alterações estruturais no sistema de queima.

Introdução

O gás liquefeito de petróleo (GLP) desempenha papel essencial na matriz energética mundial por sua elevada densidade energética, facilidade de armazenamento e ampla aplicabilidade em processos industriais, comerciais e residenciais. Entretanto, o crescente desafio de mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) tem impulsionado o desenvolvimento de soluções que conciliem a manutenção da eficiência energética do GLP com a transição para sistemas de combustão mais limpos. Nesse contexto, a incorporação de hidrogênio (H_2) em misturas combustíveis desponta como alternativa promissora para a descarbonização gradual dos sistemas térmicos e industriais, sem a necessidade de substituição imediata das infraestruturas existentes.

Estudos recentes têm demonstrado que a adição controlada de H_2 ao GLP pode promover melhorias significativas no desempenho da combustão, incluindo maior velocidade de chama, melhor difusividade térmica e redução das emissões específicas de CO_2 , mantendo estabilidade operacional e elevado rendimento térmico (SICHONE et al., 2025; ZHAO et al., 2025). Além disso, a modificação da composição propano-butano do GLP, associada ao enriquecimento com H_2 , influencia de forma sinérgica a propagação de chama e a eficiência global do processo, resultando em ganhos tanto ambientais quanto energéticos.

A disponibilidade e a proporção adequada de oxigênio (O_2) são fatores determinantes para o desempenho e a eficiência da combustão do GLP. Em condições estequiométricas, o O_2 reage com os hidrocarbonetos do GLP - predominantemente propano (C_3H_8) e butano (C_4H_{10}) - promovendo a oxidação completa do combustível e a formação de dióxido de carbono (CO_2) e vapor d'água (H_2O), com máxima liberação de energia térmica (SICHONE et al., 2025). Quando o fornecimento de O_2 é insuficiente, ocorre combustão incompleta, resultando em emissões indesejáveis de monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos não queimados (C_xH_y) e fuligem, além de redução da eficiência global do processo (ZHAO et al., 2025). Assim, o controle preciso da razão O_2 -combustível e da homogeneização da mistura na zona de pré-combustão é fundamental para otimizar a eficiência térmica e minimizar as emissões, sendo um parâmetro-chave nos estudos de otimização de blends GLP- H_2 .

No contexto brasileiro, o GLP representa cerca de 5% da matriz energética nacional e é responsável por atender a mais de 90% dos domicílios para cocção, além de possuir papel crescente em setores industriais e comerciais de médio porte, especialmente na geração de calor e vapor. De acordo com o Balanço Energético Nacional (EPE, 2024), o consumo de GLP permanece estável e tende a se consolidar como vetor estratégico na transição energética, dado seu potencial de integração com gases renováveis, como o

biogás, o biometano e o H₂ verde. Apesar de possuir uma queima limpa e representar uma forma promissora para evitar a pobreza energética, o GLP ainda possui elevado consumo e emissão de carbono em seu ciclo de vida. Nesse processo, o O₂ exerce papel essencial na eficiência e na completude da combustão, determinando o equilíbrio entre queima rica e pobre e influenciando diretamente a formação de CO₂ e NO_x. Nesse contexto, a hibridização de GLP, O₂ e H₂ de origem renovável apresenta-se como alternativa promissora para reduzir as emissões de CO₂, ao mesmo tempo em que preserva as características operacionais e de infraestrutura já consolidadas.

Assim, a Copa Energia, em parceria com a Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), propôs o desenvolvimento de uma investigação aplicada, com foco na avaliação de blendas renováveis que possam contribuir para a redução das emissões de GEE, preservando a eficiência energética em processos de combustão e sem exigir modificações significativas no sistema de queima. A abordagem aqui apresentada potencializa o desempenho ambiental e energético do GLP, reforçando sua relevância como combustível de transição no caminho para uma economia de baixo carbono.

Objetivo

Avaliar o comportamento da combustão de blendas GLP-H₂-O₂ visando identificar os potenciais ganhos ambientais e energéticos decorrentes da substituição parcial do GLP por H₂ e O₂. Para isso, investigamos o desempenho em termos de emissão de poluentes, poder de queima e consumo de GLP em blendas contendo quantidades fixas do comburente O₂ na presença de diferentes quantidades de H₂ em substituição parcial ao GLP.

Metodologia

A investigação experimental foi conduzida em um sistema especialmente desenvolvido para o estudo da combustão de blendas GLP-H₂-O₂. Esta estação de queima é composta por três módulos principais: sistema de alimentação dos gases, sistema de medidas e sistema de análise e decisão, conforme apresentado na **Figura 1**.

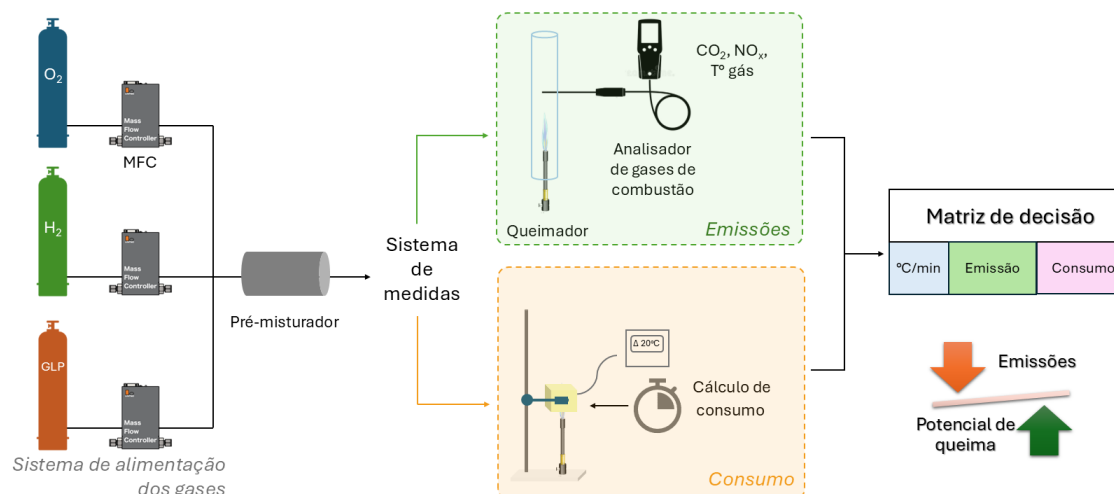


Figura 1. Aparato experimental para avaliação de blends GLP-H₂-O₂. O sistema integra a alimentação controlada de GLP, H₂ e O₂, o pré-misturador e o queimador, com medições de emissões (CO₂, NO_x e ΔT°/tempo do gás) e consumo, cujos resultados são analisados por meio de uma matriz de decisão que correlaciona eficiência térmica e redução de emissões.

O sistema de alimentação dos gases é constituído por cilindros de GLP, H₂ e O₂, cada um acoplado a controladores de vazão mássica (Mass Flow Controllers - MFCs), que permitem o ajuste preciso das proporções de cada componente na mistura. As vazões são definidas de modo a manter constante o fluxo total de matéria de combustível, possibilitando a substituição parcial e controlada do GLP por H₂ e O₂ em diferentes proporções. A quantidade de O₂ na mistura foi ajustada conforme o fator gama (γ), que representa a razão entre o O₂ fornecido e o necessário para a combustão estequiométrica de cada blenda ($\gamma = 0,1; 0,2; \text{ e } 0,3$). Por exemplo, $\gamma = 0,1$ corresponde à adição de 10% de equivalente estequiométrico a mais na mistura combustível. Os gases alimentam um pré-misturador, no qual ocorre a homogeneização antes da entrada no queimador, assegurando estabilidade e reprodutibilidade das condições de combustão.

O sistema de medidas é dividido em duas etapas complementares: emissões e consumo. No estudo de emissões, o gás resultante da combustão é direcionado a um analisador de gases de combustão (ECIL CHEMIST 500), utilizado para quantificar as concentrações de CO₂, NO e NO_x, além da temperatura dos gases. Essas variáveis permitem avaliar a eficiência de oxidação do combustível e a formação de poluentes gasosos. No estudo de consumo, o desempenho térmico é avaliado por meio do tempo necessário para o aquecimento de um corpo por uma variação de temperatura $\Delta T = 20$ °C, permitindo o cálculo do consumo de combustível em função do fluxo e do tempo.

Essa medida fornece a base para a determinação da taxa aparente de queima ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$) e da eficiência térmica relativa de cada blenda, o que nos mostra o potencial de queima de cada blenda. A taxa de aquecimento, representada como potencial de queima, foi calculada conforme a **Equação (1)**.

$$\text{Potencial de queima} = \frac{\Delta T}{t} \quad (1)$$

onde:

ΔT = variação de temperatura do corpo de prova ($^{\circ}\text{C}$);

t = tempo correspondente à elevação de temperatura (min).

O consumo de combustível foi determinado a partir da densidade e do fluxo volumétrico de GLP (em mL/min). Inicialmente, o valor de fluxo foi convertido de mililitros para litros e, em seguida, multiplicado pela densidade do GLP líquido ($\rho_{\text{GLP}} = 0,56 \text{ kg/L}$ a 20°C , considerando a composição sendo 40% propano e 60% butano), obtendo-se a vazão mássica em kg/min, conforme a **Equação (2)**, enquanto o consumo horário foi obtido pela multiplicação da vazão mássica pelo tempo de operação, seguindo a **Equação (3)**.

$$\dot{m} = \rho_{\text{GLP}} \times \frac{F_{\text{mL}/\text{min}}}{1000} \quad (2)$$

$$m_{\text{total}} = \dot{m} \times \Delta t \quad (3)$$

onde:

ρ_{GLP} = densidade do GLP;

$F_{\text{mL}/\text{min}}$ = Fluxo do GLP em mL/min;

m = massa em kg.

Para integrar os resultados de emissão, consumo e potencial de queima em um único índice comparativo, foi elaborada uma matriz de decisão multicritério, com base na normalização e ponderação dos dados experimentais. Os valores obtidos foram convertidos para uma escala adimensional entre 0 e 1, utilizando a normalização linear, representada na **Equação (4)**.

$$N_i = \frac{X_i - X_{\text{min}}}{X_{\text{max}} - X_{\text{min}}} \quad (4)$$

onde:

N_i = valor normalizado do parâmetro;

X_i = valor experimental do parâmetro;

X_{\max} , X_{\min} = valores máximo e mínimo observados na série de testes.

Os parâmetros normalizados (score) foram ponderados de acordo com sua importância relativa para o desempenho global da blenda, com base nos seguintes critérios de pesos aproximados:

w_{PQ} (peso do potencial de queima) = 0,33

w_E (peso das emissões) = 0,33

w_C (peso do consumo) = 0,33

O índice ponderado de desempenho (IP) de cada blenda foi obtido pela soma dos produtos dos pesos pelos parâmetros normalizados, conforme a **Equação (5)**:

$$IP = (w_{PQ} \times N_{PQ}) + (w_E \times N_E) + (w_C \times N_C) \quad (5)$$

Os valores de IP variam entre 0 e 1, sendo que quanto mais próximo de 1, melhor o desempenho da blenda. Os resultados foram organizados em uma matriz de decisão, permitindo identificar a composição de GLP-H₂-O₂ com melhor equilíbrio entre eficiência térmica, emissões e consumo, estabelecendo uma base quantitativa para o processo de otimização das blendas renováveis.

Resultados e discussão

A **Figura 2** apresenta os resultados experimentais de emissões de CO₂, NO e NO_x, temperatura do gás e consumo de GLP obtidos para diferentes proporções de H₂ e diferentes fatores gama fixos. Os resultados mostram uma redução significativa das emissões de CO₂ (%) à medida que aumenta a fração de H₂ no combustível. Essa tendência ocorre em todos os valores de γ e confirma que o hidrogênio atua como vetor de descarbonização, uma vez que substitui parcialmente o carbono presente no GLP, diminuindo a produção de CO₂.

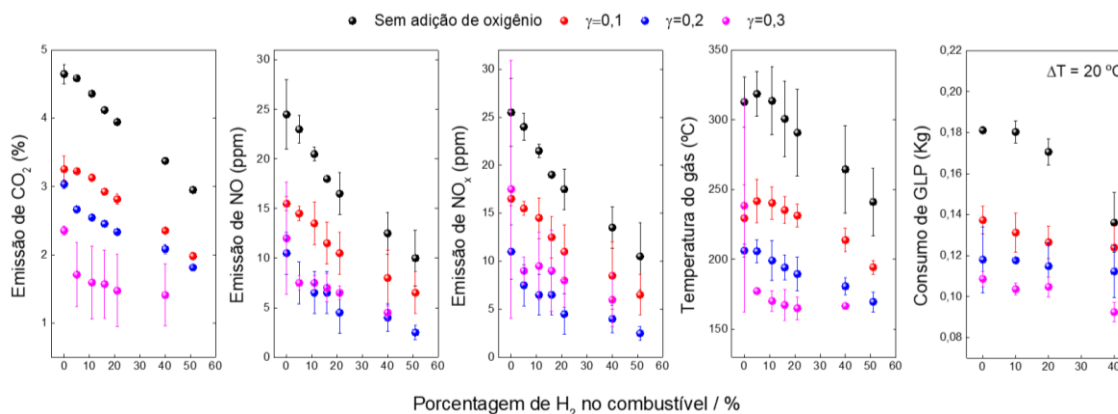


Figura 2. Emissões de CO₂, NO e NO_x em função do fator gama (γ) para diferentes proporções de H₂ na mistura GLP-H₂-O₂.

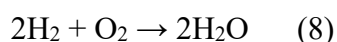
A influência do oxigênio adicional também é evidente. Para um mesmo teor de H₂, as emissões de CO₂ são menores quando γ é maior, indicando que a melhora na oxidação do combustível reduz a quantidade de carbono incompletamente queimado (pontos em magenta na **Fig. 2**). Em comparação à condição sem adição de oxigênio (pontos pretos na **Fig. 2**), as blends com $\gamma=0,2$ e $0,3$ apresentaram reduções de até 40% nas emissões de CO₂.

A quantidade de O₂ disponível em relação ao combustível determina o regime de queima e influencia diretamente o desempenho térmico e o perfil de emissões. Quando a razão O₂/combustível é inferior à estequiométrica ($\gamma < 1$), o sistema opera em queima rica, caracterizada pelo excesso de combustível e pela deficiência de oxigênio. Nessa condição, ambos combustíveis GLP e H₂ disputam pelo O₂ presente na mistura e parte do carbono e/ou do hidrogênio não são completamente oxidados, favorecendo a formação de CO, hidrocarbonetos não queimados (C_xH_y) e, em casos extremos, de fuligem. Embora a queima rica possa resultar em menores emissões de NO_x devido à redução da temperatura da chama, ela compromete a eficiência energética e aumenta a emissão de compostos tóxicos e parcialmente oxidados (GAO et al., 2013).

Por outro lado, quando a razão O₂/combustível é superior à estequiométrica ($\gamma > 1$), o sistema opera em queima pobre, isto é, há excesso de oxigênio no processo. A queima pobre tende a promover a oxidação completa dos produtos intermediários, reduzindo as emissões de CO e C_xH_y, mas também pode diminuir a temperatura da chama e, em alguns casos, causar instabilidade de combustão (ALABAŞ, B. et al., 2021). Além disso, a presença de O₂ em excesso pode favorecer, em faixas específicas de temperatura (1.500 -

1.800 °C), a formação de NO térmico, pela maior disponibilidade de radicais O e N na zona de alta temperatura (ZHAO et al., 2025).

A condição ideal de operação é aquela próxima à estequiométrica, na qual a combustão é mais eficiente, com máxima liberação de energia e emissões balanceadas. Nessas condições, o O₂ reage completamente com os componentes do GLP (predominantemente propano (C₃H₈) e butano (C₄H₁₀)) e com o H₂ adicionado na blenda, conforme as equações químicas balanceadas (**Equações 6-8**):



As emissões de NO (ppm) e NO_x (ppm), apresentadas na **Figura 2**, também apresentam tendência decrescente com o aumento do teor de H₂. Essa redução pode ser atribuída à melhor difusividade térmica do H₂, que distribui mais uniformemente a energia liberada na chama, diminuindo os gradientes de temperatura e, conseqüentemente, a formação térmica de NO_x. Os dados de temperatura média dos gases (**Fig. 2**) reforçam essa interpretação: também diminui gradualmente com o aumento do teor de H₂ e com o incremento de γ . Além disso, a adição de oxigênio em quantidades controladas promove melhor oxidação sem elevar significativamente a temperatura de chama, comportamento desejável para evitar o aumento de NO_x.

Por fim, o consumo de GLP (em kg), calculado durante o aquecimento do corpo de prova em $\Delta T=20$ °C, apresentou queda expressiva com o aumento da fração de H₂ (**Fig. 2**). A substituição parcial do combustível fóssil por hidrogênio libera energia de forma mais rápida e homogênea, favorecendo a eficiência da reação. Além disso, o oxigênio adicional melhora a oxidação do GLP (**Eq. 6 e 7**), reduzindo perdas energéticas e tornando o processo global mais eficiente. A substituição combinada de GLP por H₂ e O₂ contribui não apenas para a redução das emissões, mas também para o uso mais racional do combustível, otimizando o aproveitamento energético do sistema.

A **Figura 3** apresenta a relação entre a emissão de CO₂ (%) e o tempo necessário para aquecer o corpo de prova em $\Delta T=20$ °C, tanto em valores absolutos (painel esquerdo) quanto normalizados (painel direito), para diferentes níveis de oxigênio adicional, permitindo compreender como a adição de H₂ e O₂ altera simultaneamente o desempenho ambiental e o comportamento térmico do sistema. A normalização tem por objetivo identificar os pontos de intersecção a partir de variações percentuais 0-1 (0-100 %) de emissões de CO₂ com aquelas de tempo (100% à valores superiores), estes representados por 1 ou valores superiores.

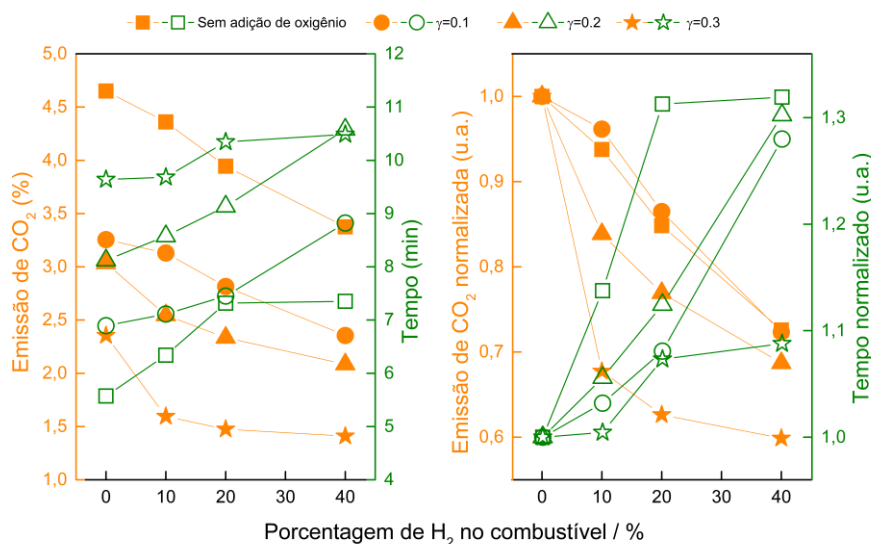


Figura 3. Correlação entre emissão de CO₂ e tempo de aquecimento ($\Delta T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$) para diferentes proporções de H₂ e fatores γ . O painel à esquerda apresenta os valores experimentais absolutos, enquanto o painel à direita mostra os mesmos parâmetros em escala normalizada.

Observa-se que para todas as condições de γ (**Fig. 3** – painel esquerdo), enquanto o aumento da fração de H₂ no combustível provoca uma redução consistente das emissões de CO₂, há também uma elevação gradual do tempo de aquecimento, indicando redução do poder de queima da mistura. Nos dados normalizados (**Fig. 3** – painel direito), é possível observar que há pontos ótimos de compromisso entre eficiência e emissões. Os pontos de interseção entre as curvas de diferentes valores de γ são regiões de equilíbrio, onde a redução de emissões e a eficiência térmica se compensam mutuamente. Por exemplo, entre 10% e 20% de H₂ (**Fig. 3** – painel direito), as curvas de $\gamma = 0,2$ e $\gamma = 0,3$ se cruzam, mostrando que acima desse ponto, o acréscimo de oxigênio ainda diminui o CO₂, mas aumenta o tempo de aquecimento de forma mais acentuada, sugerindo que o ganho ambiental começa a gerar custo energético. Esse comportamento marca a transição entre o regime eficiente e o regime diluído de combustão, onde o excesso de O₂ começa a resfriar a chama, reduzindo a taxa de transferência de calor. Esses resultados são coerentes com observações de Sichone et al. (2025) e Zhao et al. (2025), que relatam que pequenas adições de H₂ e O₂ tornam a chama mais difusa, homogênea e estável, porém menos concentrada energeticamente.

Com base nesses resultados, foi aplicada uma matriz de decisão multicritério (**Tabela 1**), considerando os parâmetros de emissão de CO₂, potencial de queima (taxa de aquecimento) e consumo de GLP. Essas variáveis permitem comparar objetivamente as blendas estudadas quanto à eficiência ambiental e térmica.

Tabela 1. Matriz de decisão e ranking de desempenho das blendas GLP-H₂-O₂. Os valores representam o índice ponderado de desempenho (IP) calculado a partir dos parâmetros normalizados de emissão de CO₂, potencial de queima e consumo de GLP. As cores indicam a variação do desempenho (verde = melhor; vermelho = pior).

γ (fração de O ₂)	H ₂ (%)	Potencial de queima (°C/min)	Consumo GLP (kg)	CO ₂ (%)	Score potencial de queima	Score consumo de GLP	Score emissão de CO ₂	Índice ponderado de desempenho	Ranking
0,3	40	1,907	0,092	1,41	0,010	1	1	0,662	1
0,3	10	2,065	0,104	1,595	0,103	0,865	0,943	0,631	2
0,3	20	1,933	0,105	1,475	0,025	0,860	0,980	0,616	3
0,1	20	2,685	0,126	2,815	0,468	0,621	0,566	0,546	4
0,2	20	2,190	0,115	2,335	0,176	0,750	0,715	0,541	5
0,3	0	2,075	0,109	2,355	0,109	0,818	0,708	0,540	6
0,2	10	2,332	0,118	2,545	0,260	0,719	0,650	0,537	7
0,1	10	2,812	0,131	3,13	0,542	0,569	0,469	0,522	8
0,1	40	2,267	0,124	2,355	0,222	0,650	0,708	0,521	9
0,2	40	1,890	0,112	2,085	0,000	0,777	0,792	0,518	10
0,2	0	2,462	0,118	3,035	0,337	0,714	0,498	0,511	11
0,1	0	2,901	0,137	3,255	0,595	0,503	0,431	0,504	12
0	40	2,720	0,138	3,375	0,488	0,494	0,394	0,454	13
0	0	3,589	0,176	4,65	1,000	0,082	0,000	0,357	14
0	10	3,155	0,179	4,36	0,744	0,044	0,090	0,290	15
0	20	2,733	0,183	3,945	0,496	0,003	0,218	0,237	16

De modo geral, observa-se que as blendas que combinaram baixa emissão de CO₂ com alto potencial de queima e baixo consumo de GLP alcançaram os maiores índices. A blenda 1 (1^a do ranking) apresentou o melhor desempenho global (IP = 0,662), evidenciando o equilíbrio ideal entre eficiência térmica e desempenho ambiental. A blenda 2 (IP = 0,631) mostrou comportamento semelhante, com leve redução no potencial de queima, mas mantendo emissões e consumo reduzidos, enquanto a blenda 3 (IP = 0,616) destacou-se por apresentar emissões mínimas de CO₂ e baixo consumo, ainda que com pequena penalização em potência térmica. As blendas 4 e 5, com índices em torno de 0,54, apresentaram desempenho intermediário, caracterizado por emissões moderadas e alto poder de queima, porém sem atingir o mesmo nível de equilíbrio observado nas três primeiras posições.

A leitura conjunta dos índices mostra que as melhores blendas (1º a 3º lugares) atingem o ponto ótimo: reduzem as emissões de CO₂ em cerca de 65%, não penalizam fortemente o potencial de queima e diminuem o consumo em aproximadamente 40% em comparação ao GLP puro (blenda 14 – **Tabela 1**). Esses resultados validam a eficácia do método da matriz de decisão em integrar múltiplos critérios de desempenho e demonstram que o ajuste simultâneo da fração de H₂ e do fator γ é fundamental para equilibrar eficiência térmica e sustentabilidade.

Como estimativa de impacto, foi calculada a economia de GLP considerando uma aplicação prática das blendas GLP-H₂-O₂ 1, 2 e 3 em um conjunto de equipamentos de cocção, com base em uma demanda real. O sistema simulado utiliza múltiplos queimadores industriais operando de forma contínua para cocção e aquecimento de grandes volumes de alimentos, conforme os consumos horários e quantidades indicadas na **Tabela 2**. A simulação considera um regime típico de 8 horas de operação diária, correspondente a 2.920 horas por ano de funcionamento contínuo. Assim, o consumo anual de referência foi estimado em 116.800 kg de GLP em um ano, conforme demonstrado na **Tabela 3**.

Tabela 2. Estimativa de consumo de GLP para os equipamentos de cocção simulados. Distribuição do consumo de combustível por equipamento, considerando a vazão mássica de GLP por unidade (kg/h), a quantidade instalada e o consumo total do grupo.

Equipamento	Consumo por unidade (kg/h)	Quantidade	Consumo total do grupo (kg/h)	SLM por unidade (L/min)	mL/min por unidade (gás)	SLM do grupo (L/min)	mL/min do grupo (gás)
Chapa quente Ø0,90 m	4,2	2	8,4	29,88	29879	59,76	59757
Fogão industrial	6,5	4	26	46,24	46241	184,96	184962
Caldeirão industrial	1,2	4	4,8	8,54	8537	34,15	34147
Forno combinado	1,25	1	1,25	8,89	8892	8,89	8892
TOTAL (simultâneo)			40,45			287,76	287758

Tabela 3. Projeção da economia acumulada de GLP no período de 2026 a 2030. Consumo de GLP (kg) se refere à quantidade de GLP na composição após a substituição parcial do gás por O₂ e H₂ segundo a composição descrita na Tabela para a respectiva blenda.

Blenda	Consumo GLP (kg)	% de redução de consumo da blenda em relação ao GLP puro (Blenda 15)	Consumo anual de GLP de referência (kg/ano)	Consumo anual de GLP considerando a blenda (kg/ano)	Economia de GLP por ano (Kg)	Economia de GLP em 5 anos (Kg)
1	0,092	47%	116.800	61.490	55.310	276.552
2	0,104	41%	116.800	69.397	47.403	237.016
3	0,105	40%	116.800	69.657	47.143	235.717

O uso de blendas de GLP-H₂-O₂ em aplicações de consumo médio (40 kg/h) pode conduzir à redução anual do consumo de GLP em ~ 50.000 kg de GLP (média entre as três blendas da **Tabela 3**). Considerando uma conversão aproximada de ~3 kg CO₂ emitidos por kg de GLP queimado, esta aplicação evitaria a emissão de 150.000 kg de CO₂ por ano. Ao final de cinco anos de operação, a economia acumulada alcançaria aproximadamente ~230.000 kg de GLP. Além dos benefícios ambientais diretos, a redução de 40% implicaria menor frequência de reabastecimento, menor custo logístico e aumento da segurança operacional no armazenamento e manuseio do gás; fatores que contribuem para combater a pobreza energética.

Conclusão

Os resultados obtidos neste estudo demonstram que a substituição parcial do GLP por H₂, associada à adição controlada de oxigênio, é uma estratégia tecnicamente promissora para aprimorar o desempenho da combustão, reduzir o consumo de combustível e mitigar as emissões de poluentes. As análises experimentais comprovaram que a incorporação de hidrogênio em proporções de até 10-20% promove reduções de até 65% nas emissões de CO₂ em relação à combustão de GLP puro, enquanto o enriquecimento com oxigênio ($\gamma = 0,2-0,3$) favorece a oxidação completa do combustível e a estabilidade da chama, reduzindo simultaneamente as emissões de CO₂ e NO_x. Em termos de desempenho energético, observou-se uma diminuição média entre 15% e 40% no consumo mássico de GLP, sem comprometer a eficiência térmica do sistema.

Quando aplicada a uma simulação de uso de GLP para cocção industrial, a blenda GLP-H₂-O₂ apresentou projeções concretas de economia e sustentabilidade. Considerando um consumo médio de 40 kg/h de GLP e um regime de 8 horas diárias de operação, o consumo anual de referência foi estimado em 116.800 kg de GLP. Sob as condições ideais identificadas no estudo, a economia anual atingiu ~50.000 kg de GLP, resultando em uma economia acumulada de aproximadamente ~230 toneladas entre 2026 e 2030. Esses números evidenciam o elevado potencial das blendas renováveis na diminuição das emissões de gases de efeito estufa. Além de proporcionarem ganhos ambientais e econômicos, o uso das blendas preserva a infraestrutura existente, demonstrando compatibilidade com os sistemas convencionais de GLP.

Referências

- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. *Balanço Energético Nacional 2024: Ano Base 2023*. Rio de Janeiro: EPE, 2024.
- SICHONE, I.; MULARSKI, J.; LI, W.; LI, J. *Investigation of hydrogen-LPG mixtures in industrial boilers: impacts on flame characteristics, emissions, and heat transfers*. *International Journal of Green Energy*, v. 22, p. 1–14, 2025.
- ZHAO, Z.; LIANG, Y.; ZHONG, X.; SONG, S.; LIU, Z. *Synergistic effects of hydrogen enrichment and propane-butane composition on deflagration dynamics of LPG-H₂ premixed flame*. *Combustion and Flame*, v. 282, p. 1–10, 2025.
- IEA – International Energy Agency. *Global Energy Review: CO₂ Emissions in 2023*. Paris: IEA, 2024.
- MME – Ministério de Minas e Energia. *Plano Nacional de Energia 2050*. Brasília: MME, 2020.
- GAO, X. et al. *NO_x formation in hydrogen–methane turbulent diffusion flame under moderate or intense low-oxygen dilution conditions*. *Energy*, v. 59, p. 559–569, 2013.
- ALABAŞ, B. et al. *Experimental investigation of the emission behaviour and flame stability of the oxygen and hydrogen enriched methane under acoustic enforcement*. *Fuel*, v. 290, p. 120047, 2021.