

## **Avaliação da contribuição Energética, Econômica e Ambiental do hidrogênio renovável associado ao gás natural na combustão com e sem enriquecimento de oxigênio**

**Paulo Roberto Freitas Neves, Paulo Roberto Santana dos Reis<sup>2</sup>, Danielle Silva Santos<sup>3</sup>, Luzia Aparecida Tofaneli<sup>4</sup>, Amanda Mayer<sup>5</sup>, Turan Dias Oliveira<sup>6</sup>, Alex Álisson Bandeira Santos<sup>7</sup>**

<sup>1</sup>Grupo de Energias Renováveis & Eficiência Energética, Departamento de Energia, Centro Universitário SENAI CIMATEC, BRASIL. Email: paulo.neves@fieb.org.br

<sup>2</sup>Grupo de Energias Renováveis & Eficiência Energética, Departamento de Energia, Centro Universitário SENAI CIMATEC, BRASIL. Email: paulo.roberto@fieb.org.br

<sup>3</sup>Grupo de Energias Renováveis & Eficiência Energética, Departamento de Energia, Centro Universitário SENAI CIMATEC, BRASIL. Email: danielle@aln.senaicimatec.edu.br

<sup>4</sup>Grupo de Energias Renováveis & Eficiência Energética, Departamento de Energia, Centro Universitário SENAI CIMATEC, BRASIL. Email: luzia.tofaneli@fieb.org.br

<sup>5</sup>Grupo de Energias Renováveis & Eficiência Energética, Departamento de Energia, Centro Universitário SENAI CIMATEC, BRASIL. Email: amandaprestesmayer@gmail.com

<sup>6</sup>Grupo de Energias Renováveis & Eficiência Energética, Departamento de Energia, Centro Universitário SENAI CIMATEC, BRASIL. Email: turan.oliveira@fieb.org.br

<sup>7</sup>Grupo de Energias Renováveis & Eficiência Energética, Departamento de Energia, Centro Universitário SENAI CIMATEC, BRASIL. Email: alex.santos@fieb.org.br

### **Resumo**

Ante el desafío global de mitigar los cambios climáticos y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, la búsqueda de alternativas energéticas que promuevan la sostenibilidad y la eficiencia ambiental se vuelve cada vez más crítica. En este escenario, el presente estudio propone una investigación detallada sobre la contribución energética, económica y ambiental del hidrógeno renovable cuando se mezcla con gas natural en procesos de combustión, evaluando la potencialidad de esta combinación tanto en sistemas convencionales como en aquellos con enriquecimiento de oxígeno. Para alcanzar el objetivo propuesto, se adoptó una metodología robusta, basada en ensayos experimentales, utilizando un dispositivo experimental, que consiste en una cámara de combustión adaptada para el uso de mezclas de hidrógeno renovable y gas natural, donde se realizarán pruebas con diferentes proporciones de hidrógeno y gas natural (20, 30 y 50% de hidrógeno, en volumen). Los resultados del estudio incluyen la demostración de la contribución energética y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero mediante la sustitución parcial de gas natural por hidrógeno renovable. Además, se anticipa la identificación de desafíos económicos relacionados con el costo de esta sustitución, destacando la importancia de políticas de incentivo, como la tasación del carbono, para hacer viable y competitiva esta alternativa. Estos hallazgos agregan conocimiento en esta temática, ofreciendo datos concretos que pueden orientar la toma de decisiones en el ámbito de la sostenibilidad corporativa y las políticas públicas de energía.

**Palabras clave:** Combustión; Gas Natural; Hidrógeno; Descarbonización.

### **Abstract**

Given the global challenge of mitigating climate change and reducing greenhouse gas emissions, the search for energy alternatives that promote sustainability and environmental efficiency becomes increasingly critical. In this context, the present study proposes a detailed investigation into the energy, economic, and environmental contributions of renewable hydrogen when mixed with natural gas in combustion processes, evaluating the potential of this combination in both conventional systems and those with oxygen enrichment. To achieve the proposed objective, a robust methodology based on experimental tests was adopted, utilizing an experimental device consisting of a combustion chamber adapted for the use of renewable hydrogen and natural gas mixtures, where tests will be conducted with different proportions of hydrogen and natural gas (20%, 30%, and 50% hydrogen by volume). The study results include demonstrating the energy contribution and reduction of greenhouse gas emissions through the partial replacement of natural gas with renewable hydrogen. Additionally, economic challenges related to the cost of this replacement are anticipated, highlighting the importance of incentive policies, such as carbon taxation, to make this alternative viable and competitive. These findings add

valuable knowledge to the field, offering concrete data that can guide decision-making in corporate sustainability and public energy policies.

**Keywords:** Combustion; Natural Gas; Hydrogen; Decarbonization.

## 1. Introdução

Os queimadores industriais são uma importante fonte de emissão de poluentes na atmosfera, entre os quais, dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), monóxido de nitrogênio ( $\text{NO}$ ) e dióxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ) [1]. As emissões desses compostos podem contribuir para causar problemas graves de saúde humana, formação de ozônio troposférico, formação de chuva ácida entre outros. A regulamentação e o controle dos gases de exaustão são cruciais para reduzir o impacto ambiental e proteger a saúde pública. Uma forma de tentar diminuir a formação desses gases é a inserção do hidrogênio na mistura de combustível. O hidrogênio é atualmente considerado uma das fontes de energia mais promissoras, livres de carbono e abundantes, no caminho para emissões líquidas zero. No entanto, os altos custos de transporte, armazenamento e as emissões de carbono nas cadeias de abastecimento de hidrogênio são barreiras econômicas críticas que impedem o desenvolvimento da economia do hidrogênio [2]. Com sua capacidade de armazenar e transportar energia sem liberar gases de efeito estufa, o hidrogênio é considerado um importante impulsionador para a descarbonização dos sistemas de energia [3]. No entanto, estudos relatam que a mistura de hidrogênio com metano, o principal componente do gás natural, impacta a estabilidade da chama, a morfologia e as emissões de poluentes [4]. Diante do exposto e considerando a crescente demanda global por fontes energéticas limpas, surge a necessidade de desenvolver queimadores mais eficientes do ponto de vista ambiental.

O estudo da combustão do hidrogênio associado ao gás natural se sustenta em pesquisas anteriores que demonstram a importância desse tema. Swaminathan et al. (2024) aplicaram um estudo numérico da emissão de  $\text{NO}_x$  com o incremento do hidrogênio no combustível e verificaram que o comportamento qualitativo da chama com uma mistura de até 40%, em volume, de hidrogênio não se altera. Entretanto, avaliando quantitativamente a combustão para uma mistura de 50% observou-se uma diminuição em 76,8 na formação de  $\text{CO}$  e um aumento de 41,8 na emissão de  $\text{NO}$  [5]. Há estudos da mistura do hidrogênio ao metano, principal componente do gás natural. Xiao et al. (2024) investigou numericamente as características da combustão do metano/hidrogênio em uma chama não pré-misturada. O estudo foi aplicado para diferentes concentrações de hidrogênio, em base volumétrica, e razões de equivalência. Os resultados demonstram que quanto maior a razão de equivalência, ou seja, mistura mais rica em combustível, maior será a temperatura de chama. Além disso, há uma

diminuição da emissão de  $\text{CO}_2$  e um aumento da emissão de  $\text{NO}$  com o aumento da proporção de hidrogênio na mistura [6]. Por outro lado, Pereira et al. (2019) realizaram uma avaliação experimental das taxas de emissão de  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ , formaldeído e acetaldeído em chamas confinadas de gás natural por meio de uma câmara de combustão com OEC sob excitação acústica, observando reduções nas emissões de  $\text{CO}$  e  $\text{NO}_x$  [7].

Além disso, há estudos voltados para entender o melhor modelo para avaliar a contribuição do hidrogênio para alcançar um futuro neutro em carbono. Entre esses estudos temos: Kostelac, Pavić e Capuder (2023) apresentou um modelo matemático detalhado de uma instalação industrial multi energética, orientada por preços e responsiva à demanda. As descobertas do artigo concluem que a implementação da tecnologia de hidrogênio em processos industriais realistas resulta em produção local de emissões zero, alto nível de autonomia e resistência às perturbações do mercado. Quando comparados com layouts industriais clássicos, a pegada geral de  $\text{CO}_2$  é reduzida cerca de 30% a 85%, dependendo do cenário [8]. Outro cenário importante a ser analisado é o impacto dos preços, ainda incertos, de importação do hidrogênio pode impactar seus derivados. Pensado nisso, Schmitz, Brandes, Nolte, Kost, Lux, Haendel e Held (2024) investigaram o impacto de três cenários diferentes de preço de importação para hidrogênio e seus derivados no sistema energético alemão em um cenário climático neutro para a Europa em 2045. O estudo identifica que os custos mais altos de importação levam a uma maior demanda por eletrólise doméstica e geração de eletricidade renovável [9].

O objetivo deste trabalho é investigar detalhadamente as contribuições energéticas, econômicas e ambientais do hidrogênio renovável quando misturado ao gás natural em processos de combustão, avaliando o potencial dessa combinação tanto em sistemas convencionais quanto naqueles com enriquecimento de oxigênio. A relevância e o interesse nessa temática decorrem da necessidade de avaliar alternativas aos combustíveis fósseis, que, apesar de sua eficácia energética, contribuem significativamente para a poluição e o agravamento do efeito estufa.

## 2. Metodologia

### 2.1. Experimental

A bancada de combustão, desenvolvida por Santos (2010), foi utilizada para realização de ensaios experimentais de combustão para avaliação de chama difusa confinada de combustíveis gasosos, conforme

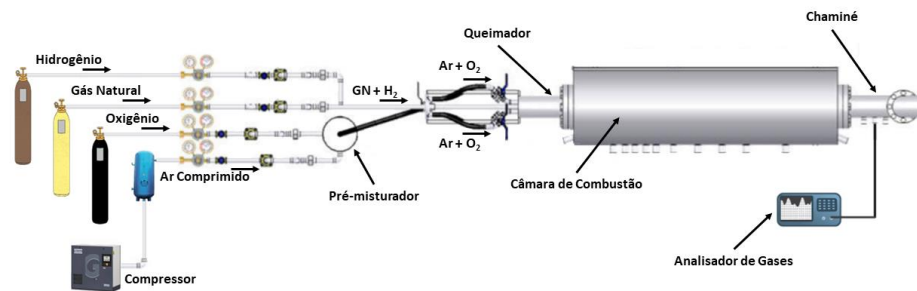


Figura 1. Desenho esquemático do queimador horizontal. Fonte: elaboração própria.

apresentado na Figura 1[10]. Essa bancada é composta por um queimador com *swirl* [11], uma câmara de combustão e um duto de chaminé. Além disso, possui um pré-misturador de Ar e Oxigênio, reguladores de pressão medidores de vazão (rotâmetros), válvulas, tubulações e acessórios que conduzem e permitem ajuste das vazões dos gases industriais armazenados em cilindros e o ar comprimido que é fornecido pela central de compressão de ar do SENAI CIMATEC, conforme esquemático apresentado na Figura 1. Os gases utilizados na realização dos ensaios experimentais para esse estudo foram, Gás Natural (GN), Hidrogênio ( $H_2$ ) como sendo os combustíveis e Ar Comprimido e Oxigênio ( $O_2$ ) como sendo os comburentes. O GN e o  $H_2$  são injetados diretamente na lança do queimador. Já o ar comprimido e o  $O_2$ , passam por um pré-misturador, para homogeneizar a mistura quando experimentadas as condições com enriquecimento de oxigênio, e depois é conduzido para as entradas do comburente no queimador onde ocorre o efeito *swirl*. A Figura 2 apresenta o queimador horizontal utilizado para realização dos experimentos.



Figura 2. Queimador utilizado para realização dos experimentos. Fonte: Elaboração própria.

No presente estudo foram realizados ensaios experimentais de combustão de misturas de gás natural e hidrogênio em razões de equivalência (RE) estequiométricas e com excesso de ar, com e sem enriquecimento de oxigênio. Na Tabela 1 são apresentadas as siglas utilizadas para identificação das condições experimentadas e suas respectivas descrições.

Tabela 1. Descrição das condições de razão de equivalência e enriquecimento de oxigênio experimentadas.

Código	Condição	Descrição
1	RE0.7_21O2	Razão de equivalência 0.7 (30% de excesso de ar) e 21% de Oxigênio.
2	RE0.7_30O2	Razão de equivalência 0.7 (30% de excesso de ar) e 30% de Oxigênio.
3	RE1.0_21O2	Razão de equivalência 0.7 (estequiometria) e 21% de Oxigênio.
4	RE1.0_30O2	Razão de equivalência 0.7 (estequiometria) e 30% de Oxigênio.

Nas condições em que há 30% de oxigênio, o oxigênio adicional é proveniente do enriquecimento realizado com a injeção de oxigênio puro que é pré-misturado ao ar comprimido antes de entrar no queimador. Essas condições foram experimentadas na combustão, puramente, de gás natural e em misturas de gás natural com 20%, 30% e 50% de hidrogênio em volume. Na Tabela 2 são apresentadas as vazões volumétricas dos gases calculadas para cada uma das 16 condições experimentadas.

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Energia do SENAI CIMATEC onde está localizada a bancada de combustão. Os ensaios foram realizados com base nas informações supracitadas, sendo as vazões dos gases ajustadas com auxílio das válvulas

agulhas e rotômetros instalados nas linhas de cada um dos gases utilizados nos experimentos (Figura 2).



Figura 3. Conjunto válvula e rotômetro.

Tabela 2. Vazões calculadas para as condições experimentadas.

H <sub>2</sub> [%vol]	RE	O <sub>2</sub> [%vol]	GN [L/min]	H <sub>2</sub> [L/min]	Ar [L/min]	O <sub>2</sub> [L/min]
0	0,7	21	35,0	0,0	471,9	0,0
		30			398,4	51,2
	1,0	21			363,0	0,0
		30			317,9	40,9
20	0,7	21	28,0	7,0	400,3	0,0
		30			337,9	43,4
	1,0	21			307,9	0,0
		30			269,6	34,7
30	0,7	21	24,5	10,5	364,5	0,0
		30			307,7	39,6
	1,0	21			280,4	0,0
		30			245,5	31,6
50	0,7	21	17,5	17,5	292,8	0,0
		30			247,2	31,8
	1,0	21			225,2	0,0
		30			197,2	25,4

Tabela 3 - Temperaturas e concentrações dos compostos presentes nos gases de exaustão.

Condição	Concentração [% vol]			Concentração [ppm]			[°C]
	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	NO	NO <sub>x</sub>	Temp
RE0.7_21O2	0	11,37	5,47	56,00	28,33	28,67	409,67
RE0.7_30O2		16,07	2,80	8,33	178,33	181,00	479,00
RE1.0_21O2		7,13	7,97	101,67	41,67	42,67	520,33
RE1.0_30O2		14,83	3,50	14,67	233,33	236,33	556,33
RE0.7_21O2	20	9,03	6,87	1,33	51,67	52,67	609,00
RE0.7_30O2		16,47	2,53	0,00	347,00	359,00	537,33
RE1.0_21O2		8,00	7,43	2,00	62,00	63,33	588,67
RE1.0_30O2		13,70	4,10	0,00	640,67	672,67	521,33
RE0.7_21O2	30	6,40	8,30	8,00	65,00	65,00	509,30
RE0.7_30O2		13,80	4,10	17,00	776,00	776,00	541,30
RE1.0_21O2		5,00	9,20	4,70	110,70	110,70	547,00
RE1.0_30O2		8,73	7,07	0,00	68,67	68,67	398,00
RE0.7_21O2	50	6,90	8,00	0,30	159,70	161,70	559,70
RE0.7_30O2		13,33	4,37	0,67	87,00	87,67	489,00
RE1.0_21O2		8,40	7,20	1,00	217,30	219,70	559,30
RE1.0_30O2		11,50	5,40	1,00	148,00	149,33	538,67

Para análise da combustão se faz necessário a coleta dos gases exaustos, produtos da combustão, que passam pela chaminé da bancada. Para coleta desses gases de exaustão, foi utilizado o analisador de gases



Figura 4. Analisador de Gases da TEMPEST 100.

modelo *TEMPEST 100*, fabricante *TELEGAN Gas Monitoring* (Figura 4) [12]. Conforme ilustrado na Figura 1, a lança do analisador de gases é conectada à chaminé da bancada de combustão e os gases de exaustão são succionados pelo analisador, onde é feita a quantificação dos compostos presentes nesses gases.

Nesse estudo, foram analisadas as concentrações de O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, NO e NO<sub>x</sub>, além das medições de temperatura dos gases de exaustão e ambiente.

### 3. Resultados

Após realização dos ensaios experimentais e medições dos gases de exaustão com o analisador de gases, os dados foram sumarizados e agrupados por variável de interesse, sendo elas, temperatura e concentrações de O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, NO e NO<sub>x</sub>. A Tabela 3 apresenta os resultados das 16 condições experimentais de combustão com misturas de gás natural e hidrogênio em diferentes razões de equivalência, com e sem enriquecimento de oxigênio.

Para uma melhor análise comparativa e visualização dos resultados, foram gerados os gráficos a seguir por variável contemplando todas as 16 condições experimentadas.

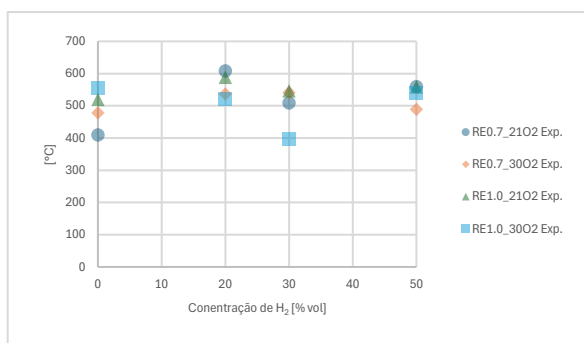


Figura 5. Temperaturas dos gases exaustos. Fonte: elaboração própria.

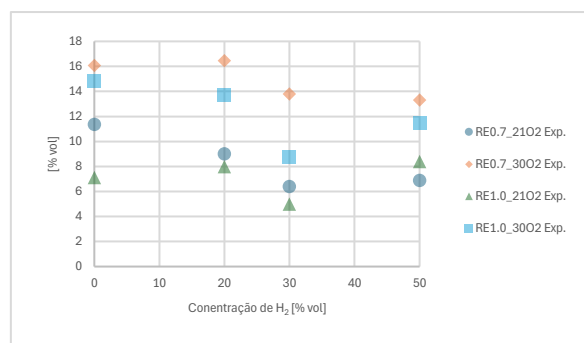


Figura 6. Concentrações de O<sub>2</sub> presente nos gases exaustos. Fonte: elaboração própria.

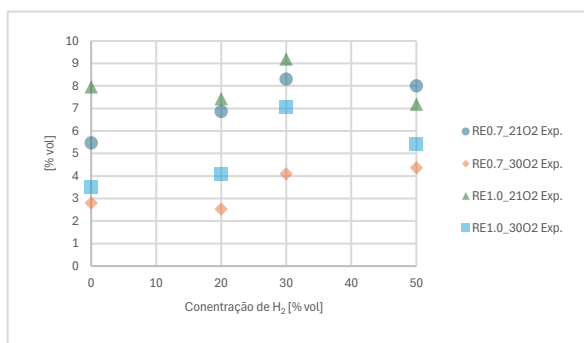


Figura 7. Concentrações de CO<sub>2</sub> presente nos gases exaustos. Fonte: elaboração própria.

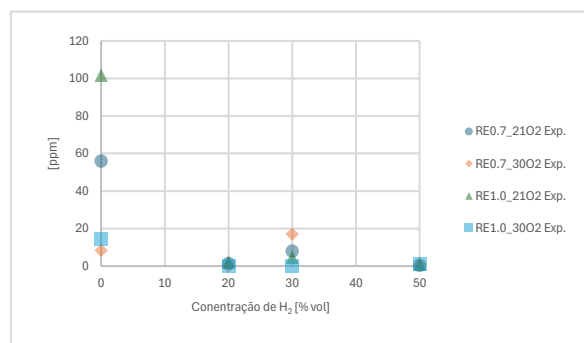


Figura 8. Concentrações de CO presente nos gases exaustos. Fonte: elaboração própria.

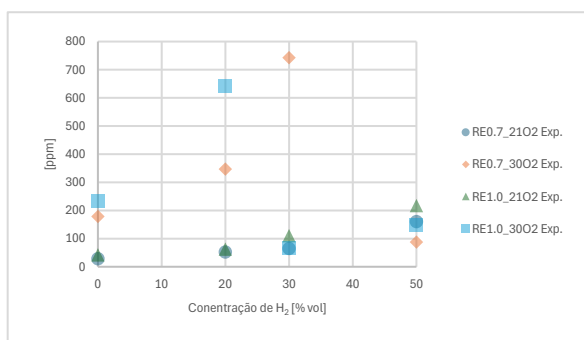


Figura 9. Concentrações de NO presente nos gases exaustos. Fonte: elaboração própria.

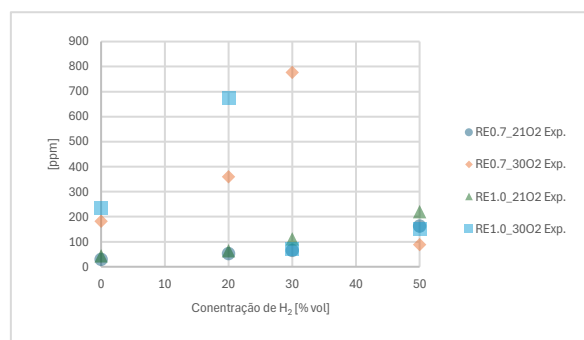


Figura 10. Concentrações de NO<sub>x</sub> presente nos gases exaustos. Fonte: elaboração própria.

A análise a seguir compara as diferentes condições para avaliar a contribuição energética, econômica e ambiental do hidrogênio renovável associado ao gás natural.

### 3.1. Comparação por enriquecimento de O<sub>2</sub>

#### Com enriquecimento de O<sub>2</sub>:

- A temperatura dos gases de exaustão geralmente aumenta com a adição de oxigênio, indicando uma combustão mais completa e eficiente. Entretanto, na Figura 4 não é possível observar esse comportamento, pois os ensaios experimentais são realizados um após o outro, mas não seguindo uma ordem de concentração de O<sub>2</sub> da menor para a maior, sendo possível de que a temperatura do exausto aumente com o tempo e por conta disso, mascare o resultado.

- Nas Figuras 8 e 9 é possível observar, principalmente para as condições misturas de GN com 20% e 30% de hidrogênio, que as concentrações de NO e NO<sub>x</sub> aumentam significativamente nas condições com enriquecimento de O<sub>2</sub>, indicando maior formação de óxidos de nitrogênio devido às altas temperaturas de combustão. Isso de fato explica o aumento da temperatura de combustão e consequentemente dos gases exaustos.

#### Sem enriquecimento de O<sub>2</sub>:

- A temperatura tende a ser menor em comparação com as condições com 30% de O<sub>2</sub>, apesar dos resultados da Figura 4 não apresentar isso, conforme já supracitado.

- Na figura 7 é possível observar que as concentrações de CO são geralmente mais altas, indicando combustão incompleta, principalmente na condição de combustão de gás natural apenas.

- E consequentemente, como mostrado nas Figuras 8 e 9, as concentrações de NO e NO<sub>x</sub> são menores, devido às temperaturas mais baixas de combustão.

### 3.2. Comparação por diferentes misturas de GN e H<sub>2</sub>

#### Condições com 100% de GN:

- É possível observar na Figura 6 que as concentrações de CO diminuem significativamente com o enriquecimento de oxigênio, indicando uma combustão mais completa.

- As concentrações de NO e NO<sub>x</sub> são mais altas com 30% de oxigênio, devido às temperaturas mais altas.

#### Condições com mistura de 20%, 30% e 50% de H<sub>2</sub>:

- De forma geral, as temperaturas tendem a aumentar com a adição de H<sub>2</sub> na combustão.

- Na figura 6 é notório que as concentrações de CO diminuem significativamente com o aumento da proporção de hidrogênio, devido à combustão mais limpa do hidrogênio.

- As concentrações de NO e NO<sub>x</sub> aumentam com a adição de hidrogênio e enriquecimento de oxigênio, devido às temperaturas mais altas de combustão, comportamento observado nas condições de misturas com 20% e 30% de H<sub>2</sub>.

### 4. Conclusões

Este estudo investigou a contribuição energética, econômica e ambiental do hidrogênio renovável associado ao gás natural em processos de combustão, com e sem enriquecimento de oxigênio. Utilizando uma metodologia robusta baseada em ensaios experimentais, foram realizadas avaliações em uma câmara de combustão com diferentes proporções de hidrogênio e gás natural (20%, 30% e 50% de hidrogênio em volume).

Os principais resultados indicam que a substituição parcial do gás natural pelo hidrogênio renovável melhora a eficiência da combustão, resultando em temperaturas mais altas dos gases de exaustão e uma significativa redução nas emissões de CO. No entanto, observou-se um aumento nas emissões de NO e NO<sub>x</sub>, especialmente nas condições com enriquecimento de oxigênio, devido às maiores temperaturas de combustão.

Do ponto de vista econômico, a viabilidade da substituição parcial do gás natural pelo hidrogênio depende de políticas de incentivo, como a taxa de carbono, que tornem esta alternativa competitiva. Além disso, a substituição parcial do gás natural por hidrogênio, especialmente com enriquecimento de oxigênio, apresentou um consumo menor de gás natural, o que pode compensar o custo elevado do hidrogênio.

Em suma, a adição de hidrogênio ao gás natural em processos de combustão, com o enriquecimento de oxigênio, mostra-se promissora para a descarbonização de sistemas energéticos. No entanto, é crucial abordar o aumento das emissões de NO<sub>x</sub> e implementar políticas econômicas que viabilizem o uso do hidrogênio renovável, garantindo uma solução ambientalmente sustentável.

A combustão de gás natural associado ao hidrogênio e ao enriquecimento de oxigênio, apresenta vantagens em termos de eficiência energética e redução de emissões de CO. No entanto, a viabilidade econômica



depende de uma taxação de carbono que torne o hidrogênio competitivo. Além disso, é necessário abordar o aumento das emissões de  $\text{NO}_x$  para garantir uma solução ambientalmente sustentável. Abaixo são apresentados alguns insights observados nesse trabalho.

- O enriquecimento de oxigênio melhora a eficiência da combustão, refletida no aumento das temperaturas dos gases de exaustão e na redução das concentrações de CO.
- A adição de hidrogênio ao gás natural aumenta a temperatura dos gases de exaustão e reduz as emissões de CO, mas aumenta as emissões de NO e  $\text{NO}_x$ .
- As condições ótimas de combustão parecem ser uma mistura de 20-30% de hidrogênio com enriquecimento de oxigênio, equilibrando a eficiência energética e as emissões de poluentes.
- A substituição parcial de gás natural por hidrogênio, especialmente com enriquecimento de oxigênio, melhora a eficiência da combustão.
- As emissões de CO diminuem significativamente com a adição de hidrogênio, indicando uma combustão mais limpa.
- No entanto, as emissões de NO e  $\text{NO}_x$  aumentam com a adição de hidrogênio e enriquecimento de oxigênio devido às temperaturas mais altas de combustão.
- Considerando as vazões de gases fornecidas, as misturas com maior percentual de hidrogênio e enriquecimento de oxigênio apresentam um consumo menor de gás natural, o que pode compensar o custo elevado do hidrogênio.
- Entretanto, faz-se necessária a implementação de uma taxação de carbono para viabilizar economicamente a substituição parcial do gás natural por hidrogênio.
- A taxação de carbono deve ser ajustada para refletir os custos ambientais das emissões de  $\text{CO}_2$ , incentivando a adoção de combustíveis mais limpos.
- O alto custo do hidrogênio verde pode ser compensado pela redução do consumo de gás natural e pela taxação de carbono.

## 5. Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro proporcionado pelo Departamento Nacional do SENAI– Brasil, pelo SENAI CIMATEC e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

## 6. Referências

- [1] S. Maspanov, I. Bogov, V. Suhanov, V. Shashikhin, A. Denisov, Y. Smirnov, Y. Lyapar, B. Sidel'nikov, B. Korotkov, T. Akhmetov. "The fuel burning intensification in the swirl burner using air ionization on the power-generating heat-and-power plant". *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (2019).
- [2] J. Yang, X. Lai, F. Wen, Z. Y. Dong. "Green hydrogen credit subsidized renewable energy-hydrogen business models for achieving the carbon neutral future". *International Journal Of Hydrogen Energy*, vol. 60, pp. 189-193, 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.02.152>.
- [3] S. Richard, B. Julian, N. Hannah, K. Christoph, L. Benjamin, H. Michael, H. Anne. "Implications of hydrogen import prices for the German energy system in a model-comparison experiment". *International Journal Of Hydrogen Energy*, vol. 63, pp. 566-579, 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.03.210>.
- [4] X. Juan, L. Qiaomai, H. Song, W. Simin, Z. Zaoxiao. "Numerical simulation on combustion characteristics of methane/hydrogen blended fuel for non-premixed conical bluff body burner". *International Journal Of Hydrogen Energy*, vol 65, pp. 50-60, 2024. [em linha]. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.03.377>.
- [5] S. Swaminathan, C. Spijker, Z. Raonic, M. Koller, I. Kofler, H. Raupenstrauch. "Numerical study of an industrial burner to optimise  $\text{NO}_x$  emissions and to evaluate the feasibility of hydrogen-enriched fuel". *International Journal Of Hydrogen Energy*, vol. 49, pp. 1210-1220, 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.07.328>.
- [6] J. Xiao, Q. Liu, S. He, S. Wang, Z. Zhang. "Numerical simulation on combustion characteristics of methane/hydrogen blended fuel for non-premixed conical bluff body burner". *International Journal Of Hydrogen Energy*, vol. 65, pp. 50-60, 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.03.377>.
- [7] A. R. B. Pereira, A. A. B. Santos, L. L. N. Guarieiro, J. B. H. Cavalcante, J. P. dos Anjos. "Experimental evaluation of CO,  $\text{NO}_x$ , formaldehyde and acetaldehyde emission rates in a combustion chamber with OEC under acoustic excitation". *Energy Reports*, vol. 5, pp.1163–1171, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.08.010>
- [8] M. Kostelac, I. Pavić, T. Capuder. "Economic and environmental valuation of green hydrogen decarbonisation process for price responsive multi-



energy industry prosumer”. *Applied Energy*, vol. 347, pp. 121484, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121484>.

[9] R. Schmitz, J. Brandes, H. Nolte, C. Kost, B. Lux, M. Haendel, A. Held. “Implications of hydrogen import prices for the German energy system in a model-comparison experiment”. *International Journal Of Hydrogen Energy*, vol. 63, pp. 566-579, 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.03.210>.

[10] A. A. B. Santos. “Investigação do uso da combustão enriquecida com O<sub>2</sub> em chamas confinadas de gás natural” [thesis], Salvador (BA): Federal University of Bahia, Portuguese, 2010.

[11] T. D. Oliveira, C. S. Alves, A. A. B. Santos, L. A. Tofaneli. “Simulação Computacional da Influência do Swirl em Projetos de Queimadores para Aplicações Industriais”. In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, vol. 8, pp. 1-12, 2014.

[12] Confor Telegas Gas Monitoring. *Manual de Instruções Tempestade 100*. 1. ed. Abingdon: Halma Group Company, pp.36, 2005.