Gestão:

Reunião de Acompanhamento e Avaliação - RAA 2026

ESTUDO EXPERIMENTAL DA EFICIÊNCIA DE COMBUSTÃO DE CHAMAS DE JATO DE GÁS NATURAL DILUÍDO EM CO_2 SOB ESCOAMENTOS CRUZADOS

Bergmann, P. G. A.[1]; Pereira, F. M.[2].[1]Bolsista do PRH 13/UFRGS, curso de Engenharia Mecânica, Porto Alegre – RS. E-mail: pedro.bergmann0806@gmail.com [2]Docente do curso de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS. E-mail: fernando.pereira@ufrgs.br

1. MOTIVAÇÃO

- *Flares* industriais utilizados em plataformas *offshore* frequentemente operam sob os efeitos de ventos marítimos cruzados, que desestabilizam a base da chama e provocam o escape de gás não queimado, fenômeno conhecido como *fuel stripping* (JOHNSON; WILSON; KOSTIUK, 2001);
- O metano (CH_4), tem potencial de aquecimento global cerca de 85 vezes superior ao CO_2 em 20 anos (IPCC, 2014);
- Diretrizes internacionais assumem uma eficiência de destruição de metano mínima de 98%, mas medições em campo reportam eficiências menores (PLANT et al., 2022).
- No pré-sal brasileiro, o gás associado ao petróleo pode conter altos teores de CO_2, superando 50% em 20% das amostras em um estudo realizado na Bacia de Santos (DE FREITAS et al., 2022);
- O CO_2 é um gás inerte que, quando misturado à corrente de combustível, diminui o poder calorífico da mistura e as taxas de reação, o que torna a chama mais suscetível aos efeitos de escoamentos cruzados



Figura 1 – Flare de uma unidade FPSO. Fonte: <https://youtu.be/XiO5rZWKiy4>

2. OBJETIVOS

- Quantificar experimentalmente a Eficiência de Combustão (CE) e de Destruição de Metano (DRE_{CH4}) de chamas turbulentas não pré-misturadas de gás natural, variando a diluição com CO_2 e a razão de velocidades escoamento cruzado/jato ($R = u_\infty/u_j$);
- Validar a metodologia da bancada com jato horizontal e vento vertical (BANDARU; TURNS, 2000).

3. APLICAÇÃO NO SETOR DE PETRÓLEO E ENERGIA

- O mapeamento de condições críticas de vento e diluição em CO_2 pode servir de base para a definição de limites operacionais em *flares offshore;*
- Este trabalho agrega à base de dados experimentais da literatura e permite validar modelos numéricos, calibrar correlações empíricas e desenvolver ferramentas baratas para o monitoramento remoto contínuo de *flares*.

4. METODOLOGIA

A bancada experimental é composta de:

- Dois controladores de vazão regulam a mistura de gás natural e CO_2;
- Um queimador tubular de aço inoxidável com comprimento de 370 mm e diâmetro interno de 13,15 mm;
- Um sistema gerador de vento vertical de até 6,7 m/s, com variação de ±6% dentro do núcleo potencial (região com perfil uniforme);
- Uma coifa de 2,40 x 2,40 m posicionada a 3,6 m de altura.
- Um analisador de gases por espectroscopia no infravermelho

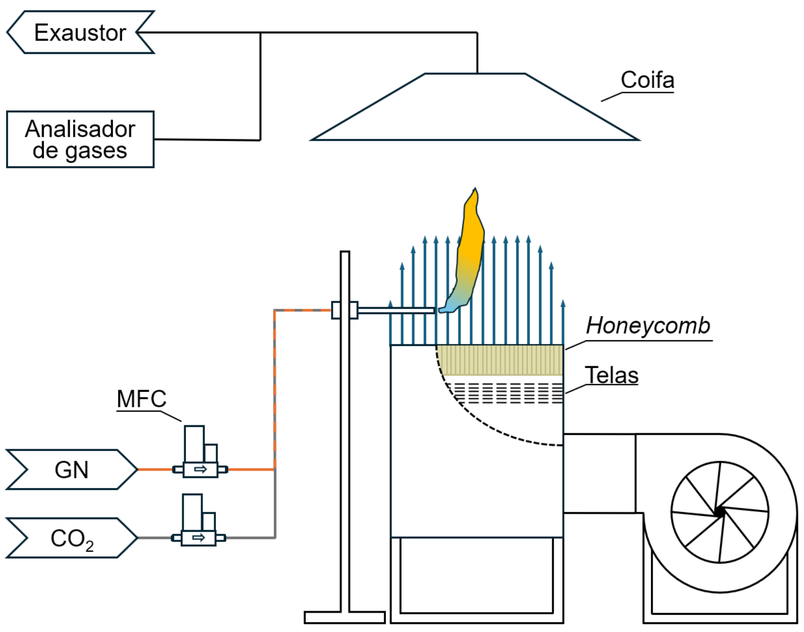


Figura 2 – Desenho esquemático da bancada experimental

5. RESULTADOS

- Com o aumento de R, o perfil da chama (Figura 3) se assemelha à estrutura de "três zonas" de chamas estabilizadas na esteira descrita na literatura (JOHNSON; WILSON; KOSTIUK, 2001);
- As leituras de composição da pluma mostram um aumento de emissões de CH_4 e CO (Figura 4) conforme se aumenta R e o nível de diluição, refletindo em queda de CE e DRE_{CH4} (Figura 5).

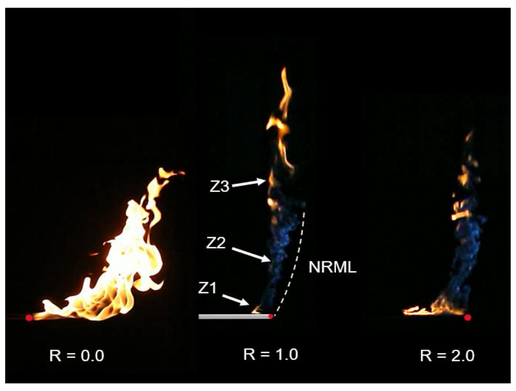


Figura 3 – Fotografias de chamas de gás natural em diferentes razões de velocidade

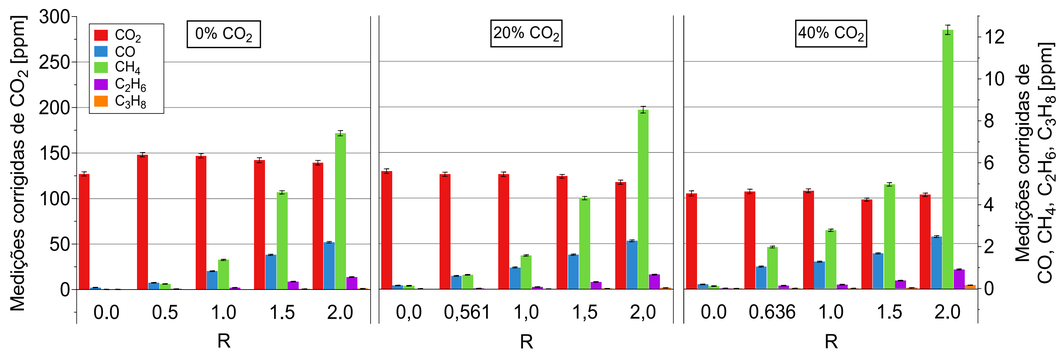


Figura 4 – Emissões de espécies carbonadas corrigidas pelas leituras de fundo

- Uma comparação com resultados da literatura (ensaios em túneis de vento e ventiladores horizontais) e com uma das correlações propostas por Burtt (2022) revela uma grande dispersão nos dados (Figura 6). Os resultados obtidos neste trabalho se encontram dentro desta dispersão.

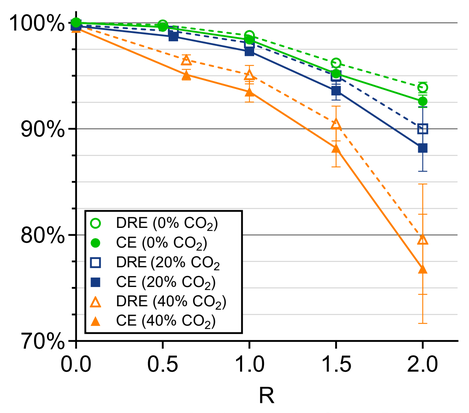


Figura 5 – Medições de CE e DRE_{CH4}

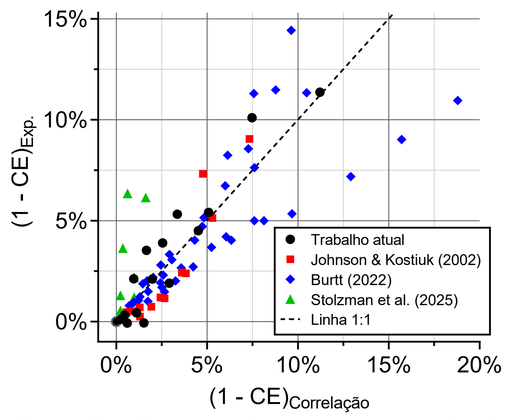


Figura 6 – Comparação com dados da literatura

6. CONCLUSÕES

- O aumento da velocidade do escoamento cruzado em relação à velocidade do jato aumenta as emissões de CO e CH_4, consequentemente reduzindo a eficiência de combustão
- A presença de CO_2 na mistura, por si só, não afeta consideravelmente a eficiência de combustão, mas agrava os efeitos negativos do escoamento cruzado
- A bancada experimental produz comportamentos e resultados semelhantes aos de trabalhos com configurações mais convencionais

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BANDARU, R. V.; TURNS, S. R. Turbulent jet flames in a crossflow: effects of some jet, crossflow, and pilot-flame parameters on emissions. Combustion and Flame, v. 121, n. 1-2, p. 137–151, 2000.

BURTT, D. Efficiency and emission rates of flares in a turbulent crosswind. 2022. Carleton University, Ottawa, 2022.

DE FREITAS, V. A. et al. Source rock potential, main depocenters, and CO2 occurrence in the pre-salt section of Santos Basin, southeast Brazil. Journal of South American Earth Sciences, v. 115, p. 103760, 2022.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. Anthropogenic and natural radiative forcing. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. p. 659–740.

JOHNSON, M. R.; WILSON, D. J.; KOSTIUK, L. W. A fuel stripping mechanism for wake-stabilized jet diffusion flames in crossflow. Combustion Science and Technology, v. 169, n. 1, p. 155–174, 2001.

PLANT, G. et al. Inefficient and unlit natural gas flares both emit large quantities of methane. Science, v. 377, n. 6614, p. 1566–1571, 2022.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem o apoio financeiro do Programa de Formação de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis- PRHANP, gerido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil. Processo n° 2025/02558-6 (PRH ANP 13/UFRGS) .