

Investigação da combustão de misturas de CH₄ e CO₂ através da dinâmica dos fluidos computacional

RESUMO

Everton de Souza Ribeiro
ribeiroseverton@gmail.com
Universidade Tecnológica Federal
do Paraná, Londrina, Paraná, Brasil

Prof. Dr-Ing. Rodrigo Corrêa da Silva
rodrigossilva@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal
do Paraná, Londrina, Paraná, Brasil

Prof. Dr. Ismael de Marchi Neto
ismaelneto@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal
do Paraná, Londrina, Paraná, Brasil

Prof. Dr. Rafael Sene de Lima
rafaellima@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal
do Paraná, Londrina, Paraná, Brasil

Prof. Dr. Ricardo de Vasconcelos Salvo
ricardosalvo@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal
do Paraná, Londrina, Paraná, Brasil

OBJETIVO: O objetivo do presente estudo é avaliar o impacto de misturas de CH₄ e CO₂ no processo de combustão do biogás e biometano a partir de queimadores operando a pressão atmosférica. **MÉTODOS:** A pesquisa concentra-se na modelagem do processo de combustão a partir de queimadores de chamas do tipo não pré-misturado utilizando técnicas de Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC). Um caso disponível recentemente na literatura é utilizado para definir as condições operacionais do queimador, servindo também para comparação dos resultados. **RESULTADOS:** Perfis de temperatura foram comparados e os resultados apontam para uma concordância satisfatória entre os dados numéricos e experimentais. Desvios inferiores a 15% foram obtidos nas simulações. Os resultados indicam que um aumento da concentração de CO₂ causou uma redução da zona de reação e também no comprimento da chama. **CONCLUSÕES:** O estudo indica que o CO₂ afeta negativamente o processo de combustão. Níveis ainda maiores de CO₂ podem levar à instabilidade de chamas, principalmente em condições de baixa pressão como aquelas encontradas em fornalhas, caldeiras e secadores. As divergências entre os resultados são explicadas pela simplicidade dos modelos utilizados para reproduzir os fenômenos envolvidos.

PALAVRAS-CHAVE: Biogás. Chama não pré-misturada. DFC

INTRODUÇÃO

O biogás é apontado como fonte estratégica para o Brasil com vistas à diversificação da matriz energética segundo Corrêa da Silva et al. (2016). Também, a ampliação do uso de recursos renováveis faz parte da estratégia para redução das emissões dos gases de efeito estufa (GEE) conforme acordo de Paris em 2015 e regulamentada recentemente, no qual o país compromete-se a reduzir as emissões de GEE em 43% dos níveis de 2005 até 2030. Uma fonte alternativa frente aos combustíveis fósseis é o biometano. Além de caracterizar-se como uma energia renovável, o biometano é uma fonte de energia firme do ponto de vista operacional, diferentemente da energia eólica e solar a qual estão sujeitas a variações das condições meteorológicas. É importante ressaltar que o Brasil possui um potencial de geração de energia de 14 GW a partir do biogás segundo Corrêa (2017).

Estudos de combustão a partir de queimadores vêm sendo realizados experimentalmente e também através de técnicas de simulação. Entre as opções disponíveis, a Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC) é apontada como uma poderosa ferramenta para avaliação do comportamento de chamas. Inúmeros estudos demonstram que simulações DFC são capazes realizar estimativas bastantes satisfatórias do processo de combustão de combustíveis gasosos, como Qian et al. (2017), Ziani; Chaker (2016) e Hamed et al. (2014). Entretanto, pouca atenção tem sido dada para a queima de biogás e biometano a partir de queimadores operando a pressão atmosférica, como presente em fornalhas, secadores e caldeiras.

O objetivo do presente trabalho é analisar através de simulações computacionais a combustão de biogás e biometano a partir de um queimador de pequena escala operando com chama não pré-misturada. Além de avaliar a acurácia dos modelos aplicados através da comparação dos resultados teóricos com dados experimentais, o estudo também busca avaliar o impacto da concentração de CO₂ no processo de combustão.

METODOLOGIA

Simulações DFC foram realizadas para reproduzir a combustão de biogás e biometano a partir de um queimador *flare* com chama vertical ascendente conforme experimentos reportados por Aboje et al. (2016) e Erete et al. (2017). A chama não pré-misturada se desenvolve abertamente com ar atmosférico. O queimador é composto por dois cilindros (3,25 mm e 102 mm de diâmetro interno) dispostos de forma anular. No cilindro interno escoam o combustível enquanto na região anular parte do ar reagente. Um domínio computacional 2D axissimétrico com 2300 mm de comprimento axial e 400 mm de comprimento radial foi aplicado. As condições operacionais são apresentadas na Tabela 1.

As simulações foram realizadas utilizando o pacote *ANSYS Fluent*[®] para solução do conjunto de equações governantes. As equações de continuidade, quantidade de movimento e energia são representadas pela Equação (1) onde ϕ é a variável transportada. O processo de combustão do tipo não pré-misturada foi modelado utilizando o conceito *flamelet* acoplado a uma abordagem PDF (*Probability Density Function*).

$$\frac{\partial}{\partial x} \rho \phi = -\nabla(D \nabla \phi) + S_{\phi} \quad (1)$$

O escoamento turbulento foi aproximado através da abordagem RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) auxiliado pelo modelo RSM (*Reynolds Stress Model*). Utilizou-se o modelo de radiação DO (*Discrete Ordinates*) acoplado ao submodelo WSGG (*Weighted-Sum of Gray Gases*). O acoplamento pressão-velocidade foi realizado através do método SIMPLE, enquanto a discretização dos termos advectivos foi realizada através de um esquema *upwind* de segunda ordem. As simulações foram realizadas com uma malha 206 mil elementos e convergidas com resíduos inferiores a 1×10^{-5} .

Tabela 1 - Condições de contorno para as chamas A, B e C.

Parâmetro	A	B	C
Concentração de CH ₄ [%vol.]	100,00	90,00	80,00
Concentração de CO ₂ [%vol.]	0,00	10,00	20,00
Potência [kW]	8,00	6,50	5,14
Velocidade do combustível [m/s]		27,00	
Velocidade do ar [m/s]		0,30	

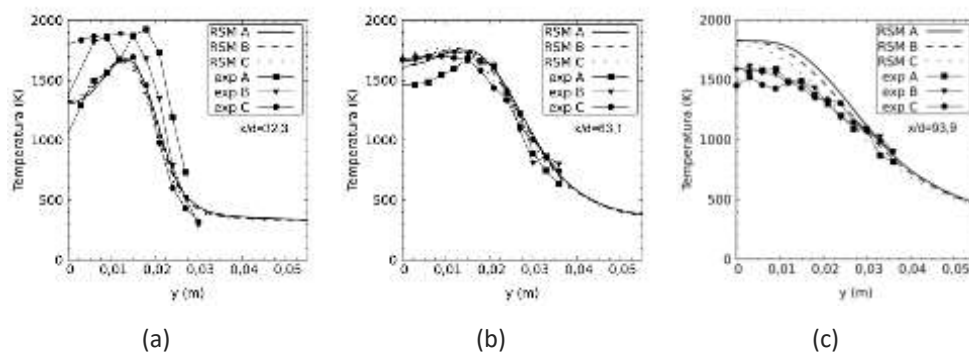
Fonte: Autoria própria (2017).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os perfis de temperatura das chamas A, B e C são apresentados na Figura 1 em três posições axiais normalizadas utilizando o diâmetro do orifício injetor de combustível ($d = 3,25\text{mm}$). Embora exista uma concordância entre os resultados experimentais e computacionais, uma minuciosa análise aponta para algumas diferenças. As três chamas estudadas apresentaram perfis de temperatura ligeiramente diferentes entre si devido à redução de potência causada pelo aumento do CO₂ na mistura. A temperatura experimental máxima foi de aproximadamente 1900 K, ocorrendo a 0,0185 m, 0,0125 m e 0,050 m nas chamas A, B e C, respectivamente, a partir da linha de centro. Utilizando DFC, obteve-se uma temperatura máxima de aproximadamente 1700 K a 0,0125 m da linha de centro em todos os casos.

Em $x/d = 63,1$, resultados experimentais apontam que a chama A apresenta uma temperatura superior ($\sim 100\text{ K}$) em relação à chama B e C. Esse efeito não foi capturado pelas simulações computacionais, embora exista uma concordância bastante satisfatória entre os resultados. Entretanto, uma diferença de 100 K corresponde a menos de 6% das temperaturas máximas obtidas nessa região. As chamas apresentaram um comportamento similar em $x/d = 93,9$, embora a chama C tenha apresentado temperaturas levemente inferiores na região próxima à linha de centro. Embora as temperaturas estimadas por DFC tenham sido em torno de 300 K superiores às experimentais, as diferenças entre os resultados são inferiores 15%. Valores superestimados de temperatura podem ser explicados por inacurácia dos modelos de transferência de calor e/ou condições de contorno.

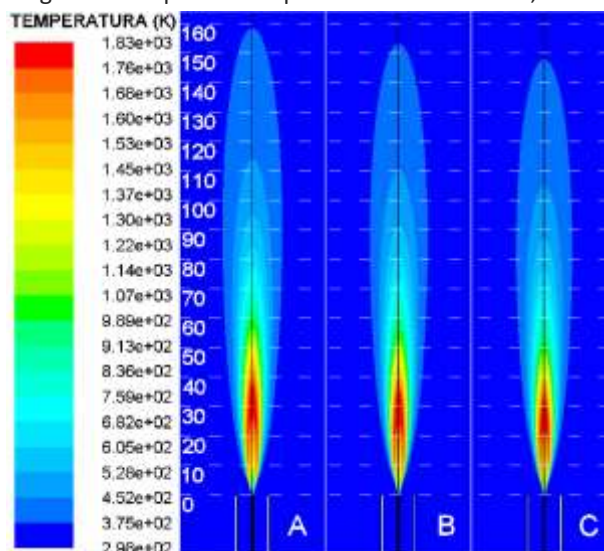
Figura 1 - Perfis de temperatura radiais ao longo da chama.



Fonte: Autoria própria (2017).

A Figura 2 apresenta a distribuição de temperatura para as chamas A, B e C. As máximas temperaturas situam-se entre 20 e 30 mm do queimador. Nota-se claramente que o comprimento das chamas A, B e C estendem-se até 158 mm, 153 mm e 148 mm, respectivamente.

Figura 2 - Mapas de temperatura das chamas A, B e C.



Fonte: Autoria própria (2017).

CONCLUSÃO

Os resultados de temperatura mostraram que maiores diluições de CO_2 impactam na distribuição de temperatura das chamas. Embora a temperatura máxima das chamas não foi alterada para as concentrações de CO_2 investigadas, observou-se apenas uma redução do comprimento das chamas devido à redução potência a medida que a concentração de CO_2 aumenta. Os resultados computacionais apresentaram um comportamento similar em relação àqueles experimentais. Maiores diferenças foram observadas especialmente nas regiões de elevados gradientes, próximos ao queimador. Divergências entre os resultados são explicadas pela simplicidade dos modelos de turbulência e de reação química aplicadas no presente estudo.

Combustion investigation of CH₄/CO₂ mixtures applying computational fluid dynamics

ABSTRACT

OBJECTIVE: The objective of the present study was to evaluate the impact of mixtures of CH₄ and CO₂ on biogas and biomethane combustion generated from burners operating at atmospheric pressure. **METHODS:** The research focused on combustion modeling of non-premixed flames using Computational Fluid Dynamics (CFD). A recent case available in the literature was used to define the burner operating settings and also to compare the computational results. **RESULTS:** Temperature profiles were compared and the results indicated a satisfactory agreement between the numerical and experimental data. In general, deviations were below 15%. The study also showed that an increase in CO₂ concentration caused a reduction of the reaction zone in parallel to the flame length. **CONCLUSIONS:** The study indicated that CO₂ had a negative impact on the combustion process. Possible consequence for even higher CO₂ fractions includes flame instability under low pressure conditions such as those found in furnaces, boilers, and dryers. The differences between the results were due to the simplicity of the models to simulate the involved phenomena.

KEYWORDS: Biogas. Non-premixed flame. CFD.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece à Fundação Araucária pela concessão da bolsa de iniciação científica. Os demais autores também agradecem à UTFPR-Londrina e a DIRPPG.

REFERÊNCIAS

ABOJE, A. A.; ERETE, J. I.; HUGHES, K. J.; et al. An investigation of methane and propane vertical flares. **Journal of the Energy Institute**, v. 89, n. 4, p. 793–806, 2016.

CORRÊA, M. **Biogás quer aumentar participação na matriz**. Brasília, 2017. Disponível em:
<<http://www.paranoaenergia.com.br/noticias/2017/04/25/3824/>>.

CORRÊA DA SILVA, R.; DE MARCHI NETO, I.; SILVA SEIFERT, S. Electricity supply security and the future role of renewable energy sources in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 59, p. 328–341, 2016.

ERETE, J. I.; HUGHES, K. J.; MA, L.; et al. Effect of CO₂ dilution on the structure and emissions from turbulent, non-premixed methane–air jet flames. **Journal of the Energy Institute**, v. 90, n. 2, p. 191–200, 2017.

HAMEDI, M. R.; TSOLAKIS, A.; LAU, C. S. Biogas upgrading for on-board hydrogen production: Reforming process CFD modelling. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 39, n. 24, p. 12532–12540, 2014.

QIAN, Y.; SUN, S.; JU, D.; SHAN, X.; LU, X. Review of the state-of-the-art of biogas combustion mechanisms and applications in internal combustion engines. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 69, p. 50–58, 2017.

ZIANI, L.; CHAKER, A. Ambient pressure effect on non-premixed turbulent combustion of CH₄–H₂ mixture. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 41, n. 27, p. 11842–11847, 2016.

Recebido: 31 ago. 2017.

Aprovado: 02 out. 2017.

Como citar:

RIBEIRO, E. S. et al. Investigação da combustão de misturas de CH₄ e CO₂ através da dinâmica dos fluidos computacional. In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA DA UTFPR, 22., 2017, Londrina. **Anais eletrônicos...** Londrina: UTFPR, 2017. Disponível em: <<https://eventos.utfpr.edu.br/sicite/sicite2017/index>>. Acesso em: XXX.

Correspondência:

Everton de Souza Ribeiro

Avenida dos Pioneiros, 3131 - Jd. Morumbi, Londrina, Paraná, Brasil.

Direito autoral:

Este resumo expandido está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição-Não Comercial 4.0 Internacional.

