

ESTUDO COMPARATIVO DA DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA DO GLP E DO ETANOL EM UMA CÂMARA DE COMBUSTÃO CILÍNDRICA

Paulo Lenço

Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) – R. Gleide Knauer Penedo s/n° Apto E-132, Campinas, SP
lenco@actualis.com.br

Waldir A. Bizzo

Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) – R. Mendeliev s/n° Cidade Universitária, Campinas, SP
bizzo@fem.unicamp.br

Resumo. A formação de gases poluentes tais como o CO, CO₂, e os NO_x, tem causado grande preocupação e contribuído para fenômenos como o aquecimento global ou formação de ozônio atmosférico. Com a crescente emissão desses gases e de compostos nocivos, as alternativas viáveis são as escolhas de combustíveis renováveis e a adoção de mecanismos minimizantes da formação. A formação de óxidos de nitrogênio, através do mecanismo de Zeldovich, é fornecida por altas temperaturas locais e disponibilidade de oxigênio. Estes fatores, por sua vez, sofrem influência da fluidodinâmica da combustão e a distribuição do tempo de residência. Neste trabalho foi estudada a distribuição de temperatura em uma câmara de combustão cilíndrica isolada termicamente, queimando GLP (gás liquefeito de petróleo) e etanol vaporizado. Foram utilizados o mesmo tempo de residência, a mesma potência específica e temperaturas de saída dos gases de 1000°C e 1175°C. Os dados indicam a distribuição de temperatura e permitiram que se fizesse um comparativo entre os dois combustíveis. Observou-se que nas mesmas condições existem variações nos perfis de temperatura entre os dois combustíveis.

Palavras-Chave: álcool, GLP, Swirl Number, combustão, temperatura.

1. Introdução

O consumo de combustível fóssil trouxe para a discussão, nas últimas duas décadas do século XX, os problemas ambientais decorrentes destes dois séculos de desenvolvimento industrial. Da máquina a vapor até o uso popular dos computadores, vem trazendo o aprimoramento dos meios de produção, a diversificação dos produtos de consumo e conseqüentemente, um consumo energético cada vez maior causando as agressões ambientais. As atividades industriais do homem moderno e seu volume de bens consumidos geram uma demanda energética cada vez maior, pois é necessário o acesso a produtos e serviços por um número cada vez maior da população, bem como a ampliação destes benefícios aos que já os conquistaram. Isto traz dificuldades crescentes para a demanda energética, e as buscas por alternativas imediatas trazem um aumento das emissões de gases causadores do aquecimento global. Sendo assim eleva-se o grau de importância do estudo e do entendimento dos mecanismos de formação de poluentes e de uma alternativa aos atuais combustíveis. Entre os diversos poluentes atmosféricos, os óxidos de nitrogênio têm despertado interesse e preocupação, devido a sua ação precursora da formação do ozônio troposférico.

2. Número de rotação

BEÉR e CHIGIER (1972) descrevem estudos de escoamento com rotação a fim de melhorar a estabilidade de chama e conseqüentemente a eficiência de queima. A instabilidade de chama é responsável pela perda de calor na região de combustão devido à dispersão da chama. Numa chama dispersa a temperatura cai favorecendo a formação de CO devido à queima incompleta do combustível.

A importância do estudo e o entendimento da distribuição de temperatura na queima de combustível se fazem presente para que se elimine ou ao menos se minimize várias emissões, principalmente os óxidos de nitrogênio.

Em um escoamento com rotação, ocorre a recirculação de gases próximos ao queimador, dando origem à região denominada Zona Central de Recirculação (ZCR) e BEÉR e CHIGIER (1972) propuseram o chamado número de rotação (Swirl Number), trata-se de um número adimensional, com a finalidade de avaliar a intensidade dos jatos com rotação como mostra a Eq. (1).

$$S = \frac{G\phi}{Gx.R} \quad \text{Eq.(1)}$$

sendo

$$G_{\phi} = \int_0^R (W.r). \rho.U.2\pi.r.dr \quad \text{Eq. (2)}$$

e

$$G_x = \int_0^R U.P.2\pi.r.dr + \int_0^R U.P.2\pi.dr \quad \text{Eq. (3)}$$

onde:

G_{ϕ} – quantidade de movimento tangencial;

G_x – quantidade de movimento axial;

R – raio da saída do gerador de rotação;

U – componente axial da velocidade dos gases;

W – componente tangencial da velocidade dos gases;

r – posição radial;

P – pressão estática;

ρ – densidade dos gases.

BELTAGUI E MACCALLUM (1976), estudando escoamentos com rotação em fornalhas experimentais, concluíram que as dimensões da Zona Central de Recirculação (ZCR) dependiam mais do diâmetro da fornalha do que do diâmetro do gerador de rotação. Propuseram a definição de um novo número de rotação, omitindo o termo da pressão estática e substituindo por R , o raio do gerador de rotação, por D , o diâmetro da fornalha. O novo número de rotação S' permite estabelecer similaridade de escoamentos com maior independência da relação de diâmetro da fornalha e do queimador, e da condição se o escoamento é isotérmico.

KENBAR (1995) estudou a aerodinâmica e a temperatura de combustão para uma câmara com injeção periférica de combustível, e construiu um perfil de velocidade axial experimental e também construiu perfis de temperaturas como na Fig. 1 usando como combustível o gás natural. Neste perfil observa-se uma região de intensa mistura promovida pelo refluxo próximo ao queimador e uma região de fluxo desenvolvido onde o perfil de velocidade é praticamente constante. Isso revela um comportamento semelhante a um reator bem misturado no início da câmara e de reator de fluxo pistonado na parte final.

Este trabalho estudou a distribuição de temperatura dos gases no interior de uma câmara de combustão cilíndrica horizontal, em dois números de rotação, com a finalidade de comparar o comportamento da distribuição de temperatura na combustão do GLP e do etanol vaporizado.

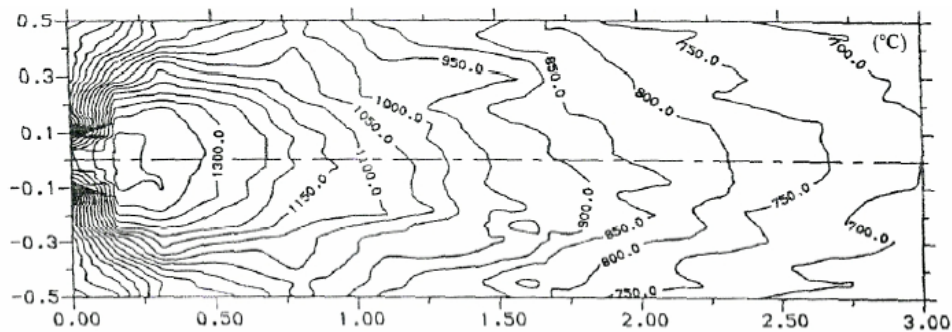


Figura 1. Perfil de temperatura de uma câmara de combustão cilíndrica para um número de rotação de 0,90 (KENBAR, 1995.).

3. Fluxograma do Processo

A bancada experimental é composta por uma câmara de combustão cilíndrica horizontal com um queimador equipado com dispositivo de regulação do número de rotação. O queimador pode ser alimentado com gás liquefeito de petróleo (GLP) ou com vapor de combustível líquido, neste caso, etanol vaporizado, produzido num vaporizador. Os produtos de combustão saem da fornalha por um duto de exaustão, onde são resfriados rapidamente por um lavador e então succionados por um exaustor para a

chaminé de descarga de gases que os lança para fora do laboratório. O fluxograma da câmara com a linha de combustível (GLP) está apresentado na Fig. 2.

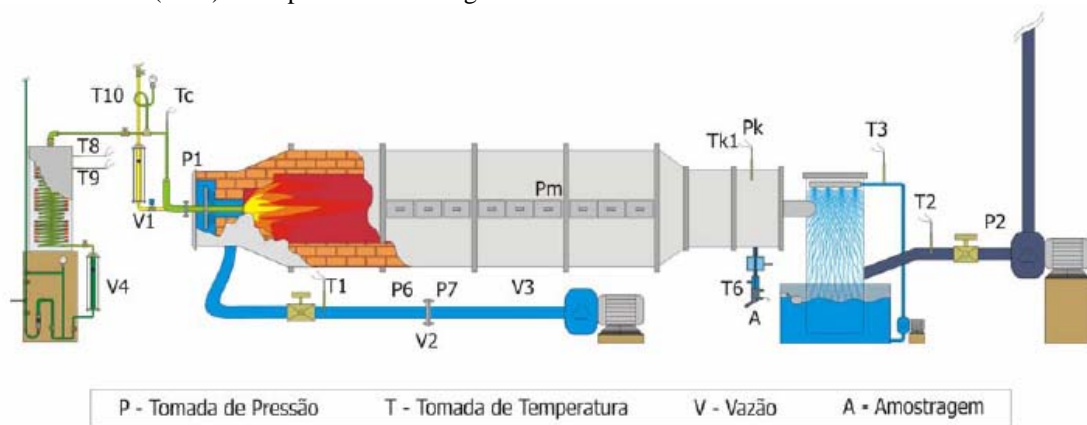


Figura 2. Fluxograma do processo e instrumentação da bancada experimental.

A câmara de combustão tem formato cilíndrico com diâmetro interno de 470 mm e é construída em módulos de 600 mm, num total de 3 módulos, totalizando um comprimento de 1800 mm. As dimensões da câmara foram adotadas de maneira que as sondas de medição de temperatura e concentração de gases produzissem pouca interferência no escoamento e que fosse possível reproduzir condições típicas encontradas em câmaras de combustão.

O corpo da fornalha é construído em chapa de aço carbono com revestimento interno de manta refratária com espessura de 150 mm. Na lateral da fornalha, em cada módulo, foi construída uma abertura retangular com dimensões 50 x 50 mm que permite a inserção de sondas para medição de temperatura e composição dos gases de combustão em 90% do comprimento da fornalha. O fechamento destas aberturas é feito com tijolo isolante de modo a permitir a introdução das sondas com a retirada de apenas um tijolo e fechada completamente por isolante térmico.

A câmara de combustão cilíndrica, utilizada neste trabalho apresenta um mecanismo de roscas paralelas que promove o movimento do bloco móvel do queimador alterando o número de rotação. As rotações escolhidas foram 0,684 e 1,315.

Na fig. 3 é mostrado o esquema do queimador. O número de rotação variável é possível pois o queimador é construído com blocos direcionais, em aço inoxidável, conforme BEÉR E CHIGIER (1972). O número de rotação da fornalha é regulado através da variação da posição angular do bloco móvel, dosando a parcela de ar de combustão na direção radial e outra parcela de ar na direção angular, que possui uma componente de velocidade tangencial.

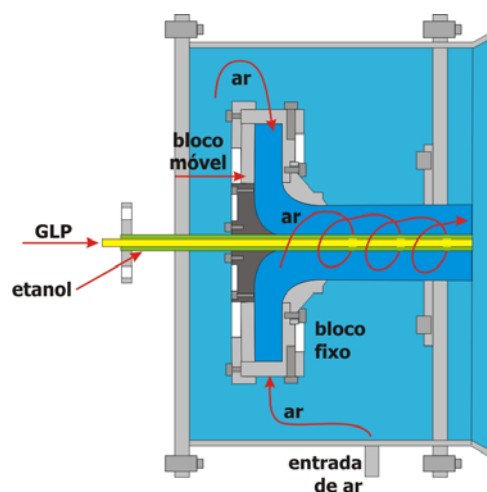


Figura 3. Queimador com gerador de rotação do ar de combustão.

O vaporizador de combustíveis líquidos é composto de uma serpentina de aço inoxidável com nove metros (9 m) de comprimento e diâmetro interno de nove milímetros (9 mm), aquecido externamente por cinco resistências elétricas.

A medida de temperatura dos gases de combustão no interior da fornalha foi feita com uma sonda de sucção de gases, onde um sensor de temperatura é parcialmente protegido da radiação no interior da fornalha por uma dupla couraça de tubo refratário. O pirômetro de sucção foi projetado e construído seguindo recomendações de projeto e operação de CHEDAILLE e BRAUD (1972). A fim de interferir o mínimo no escoamento dos gases de combustão, foi selecionado o menor diâmetro comercial possível, considerando as dimensões dos tubos de alumina e dos tubos capilares para suporte do termopar disponíveis comercialmente. O diâmetro externo da sonda na ponta de cerâmica é 15 mm. A Fig. 4 apresenta um desenho esquemático do pirômetro.

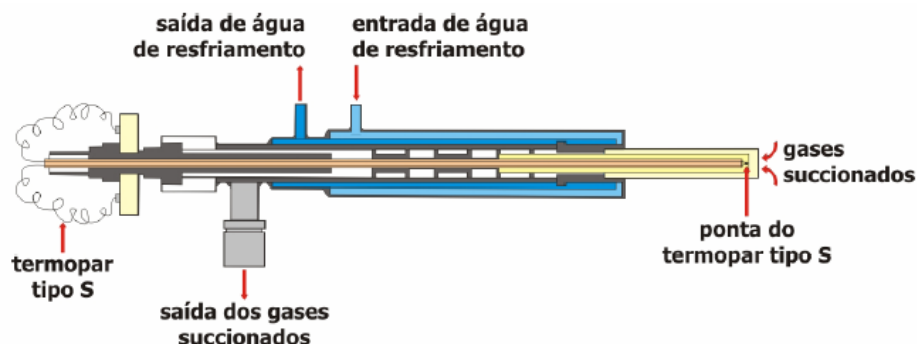


Figura 4. Pirômetro de sucção.

A aquisição de dados foi feita através de um termopar tipo “S” conectado, por um cabo de extensão blindada eletromagneticamente, a uma placa de aquisição de dados da marca Linx, devidamente aterrada, com taxa de aquisição de 2500 pontos por segundo, e uma taxa de registro de 8,8 pontos por segundo, que foi estabelecida através de um programa desenvolvido para este fim, em linguagem C.

A potência nominal da câmara de combustão, temperatura dos gases de saída e o grau de mistura entre ar e os combustíveis (rotação) foram os três principais parâmetros da combustão, que foram considerados para o planejamento dos experimentos. Os efeitos da temperatura foram estudados realizando-se os testes em duas condições de temperatura dos gases de saída da câmara: 1000 e 1175 °C. As temperaturas foram escolhidas usando-se de critérios tais como: garantia de combustão completa; variação suficiente que permitisse notar a influência da temperatura; preservação da bancada experimental e da instrumentação e segurança no processo de operação e amostragem. A Tab. 1 apresenta os principais parâmetros da operação dos testes.

Tabela 1. Principais parâmetros e variáveis de operação.

Parâmetro	Valor Assumido
Temperatura dos gases de exaustão	1000 e 1175 °C
Pressão da câmara	Pressão manométrica Nula
Pressão no sistema de amostragem	~ 100 mmCA
Número de rotação (S')	0,684 e 1,315

O combustível utilizado foi o etanol comercial, por se tratar de um combustível renovável de fácil obtenção e por não conter nitrogênio na sua composição diminui a formação do óxido de nitrogênio. O etanol hidratado tem sua composição C_2H_5OH , que é um derivado dos hidrocarbonetos, diferindo deles por possuir na sua estrutura molecular o grupo OH altamente polar. Suas moléculas encontram-se ligadas entre si pelos mesmos tipos de forças intermoleculares que agregam as moléculas de água. O GLP comercial é composto basicamente por propano (C_3H_8) e butano (C_4H_{10}), com pequenas frações de etano, propeno e buteno. Desta forma considerou-se que sua composição em massa é 50% propano e 50% butano conforme especificação do fornecedor do combustível (Petrobras). O poder calorífico superior (PCS) e o poder calorífico inferior (PCI) dos combustíveis são encontrados na Tab. 2 .

Tabela 2. Propriedades do GLP e do Etanol.

Propriedade	GLP	Etanol 96°GL
PCS	45.932 kJ /kg	35.197 kJ/kg
PCI	42.782 kJ/kg	24.919 kJ/kg

Na Tab.3 é mostrado as condições de operação da câmara de combustão tanto para o GLP quanto para o etanol.

Tabela 3. Condições médias de operação da câmara.

Temperatura	1000 °C	1175 °C
Relação (Ar/Comb.) _{massa} GLP	26,6	19,3
Relação (Ar/Comb.) _{massa} ETANOL	17,2	11,8
Tempo de residência	2 s	2 s
Massa média do GLP	7,416 Kg/h	8,24 Kg/h
Massa média do ETANOL	8,197 Kg/h	11,39 kg/h
Potência específica média do GLP	240 kWh/m ³	280 kWh/m ³
Potência específica média do ETANOL	210 kWh/m ³	290 kWh/m ³

A Fig. 5 traz todas as posições dos pontos que foram estudados neste trabalho, com destaque aos pontos identificando $-x/D$ 0,36, 2,72 e y/D 0,04, onde se fez um estudo mais detalhado da variação de temperatura.

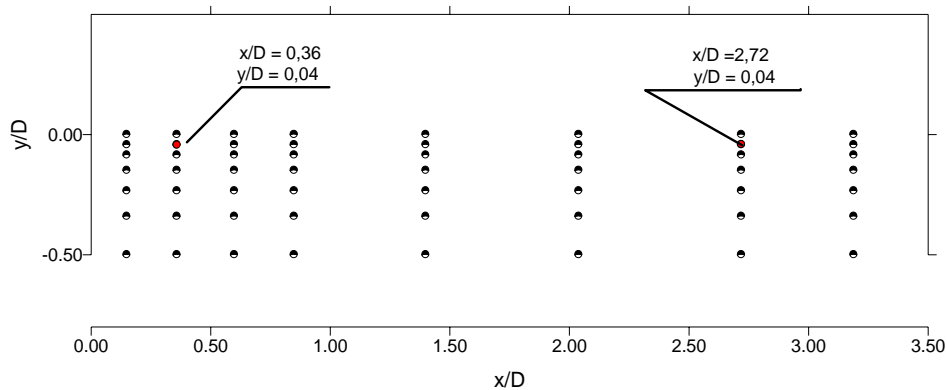


Figura 5. Disposição dos pontos estudados.

Para determinação dos perfis de temperatura foi considerada a simetria com relação ao eixo central da câmara de combustão. Desta forma foram realizadas as medidas somente em metade da câmara de combustão e foram considerados os mesmos valores para os pontos diametralmente opostos com a finalidade de uma melhor visualização da apresentação.

As medições na câmara de combustão cilíndrica foram realizadas em 56 pontos distintos para cada temperatura, em dois números de rotação. Esses pontos são os mostrados na Fig. 5.

4. Análise dos resultados dos perfis de temperatura

A recirculação de gases no interior da câmara, somada aos fenômenos de efeito de parede e distância do queimador, influenciam o perfil de temperatura no interior da câmara de combustão. As Fig. 6 a 9 apresentam a variação de temperatura com relação ao tempo, obtidas com a aquisição de dados do termopar do pirômetro de sucção. A Fig. 5 apresenta as posições do termopar para as temperaturas de operação 1175°C, medidas para os dois combustíveis (etanol e GLP) e com os dois números de rotação $S' = 0,684$ e $S' = 1,315$.

Nota-se que a amplitude da variação da temperatura é inversa ao número de rotação, ou seja, quando o número de rotação é menor ($S' = 0,684$) a variação é maior chegando até 130°C (para o etanol), mas nesta mesma posição, com uma rotação maior ($S' = 1,315$) a variação cai para uma ordem de 45°C (ainda para o etanol). Assim temos que quanto maior o número de rotação menor a variação de temperatura. Isto é observado em todas as condições, independente do combustível.

Observa-se também que a variação de temperatura na parte final da câmara de combustão ($x/D = 2,72$) é menor que na posição mais próxima ao queimador ($x/D = 0,36$). É possível que haja uma correlação entre as magnitudes da variação de temperatura e o número de rotação.

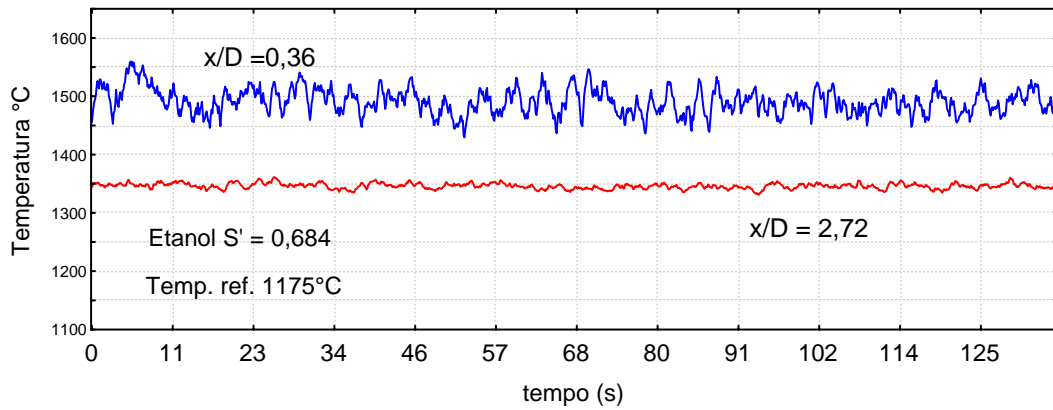


Figura 6. Variação de temperatura do etanol com número de rotação $S' = 0,684$ e temperatura de referência 1175°C

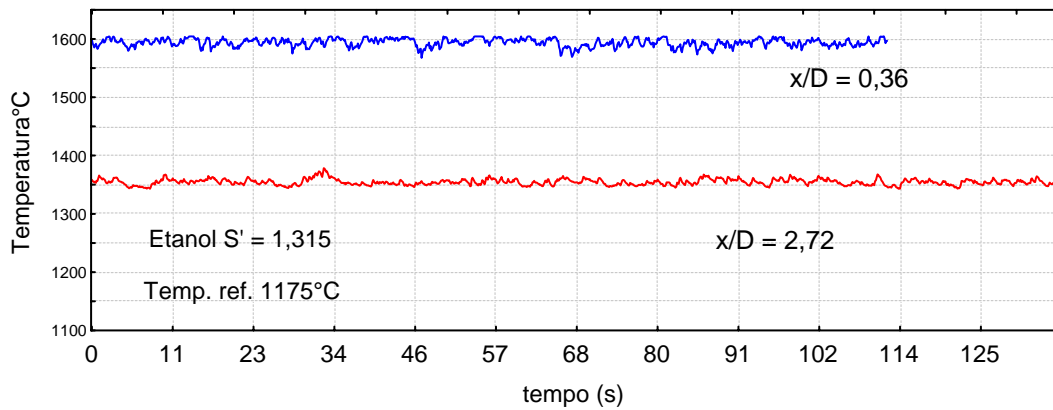


Figura 7. Variação de temperatura do etanol com número de rotação $S' = 1,315$ e temperatura de referência 1175°C

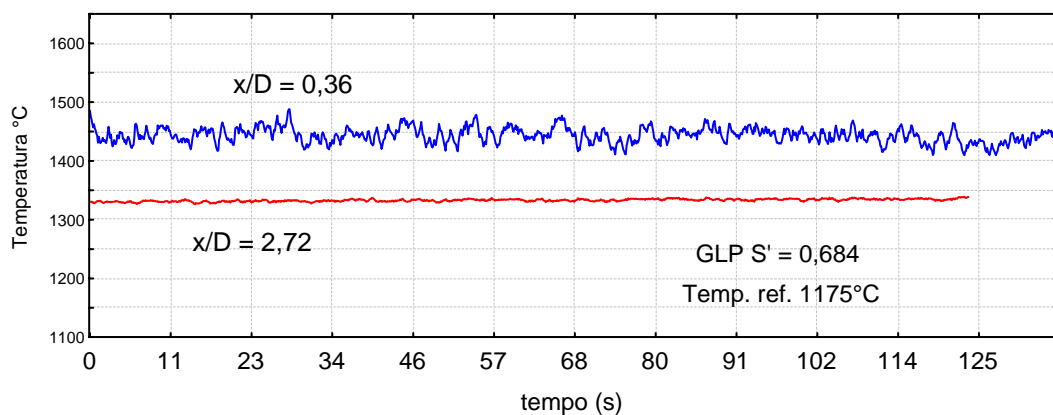


Figura 8. Variação de temperatura do GLP com número de rotação $S' = 0,684$ e temperatura de referência 1175°C

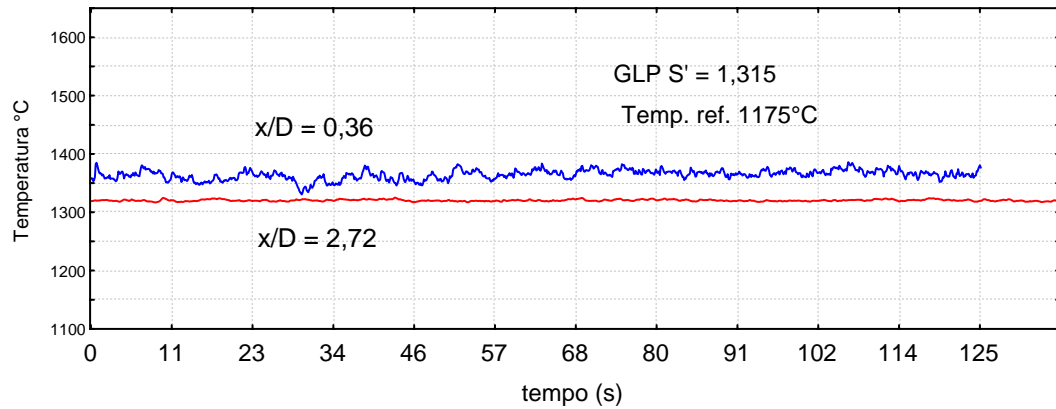


Figura 9. Variação de temperatura do GLP com numero de rotação $S' = 1,315$ e temperatura de referência 1175°C

As Fig. 10 a 13 apresentam os perfis de temperatura para o GLP e etanol na temperatura de referência 1000°C e número de rotação $0,684$ para as posições iniciais ($x/D = 0,15$) e final ($x/D = 3,19$) da câmara de combustão.

Observa-se que o etanol apresenta uma temperatura maior na região central da câmara de combustão em relação ao GLP. Já nas proximidades da parede da câmara de combustão o comportamento é inverso, o GLP apresenta temperatura maior que o obtido na combustão do etanol. Este comportamento é recorrente na operação da câmara à temperatura de referência 1175°C , como pode ser observado nos gráficos de temperatura.

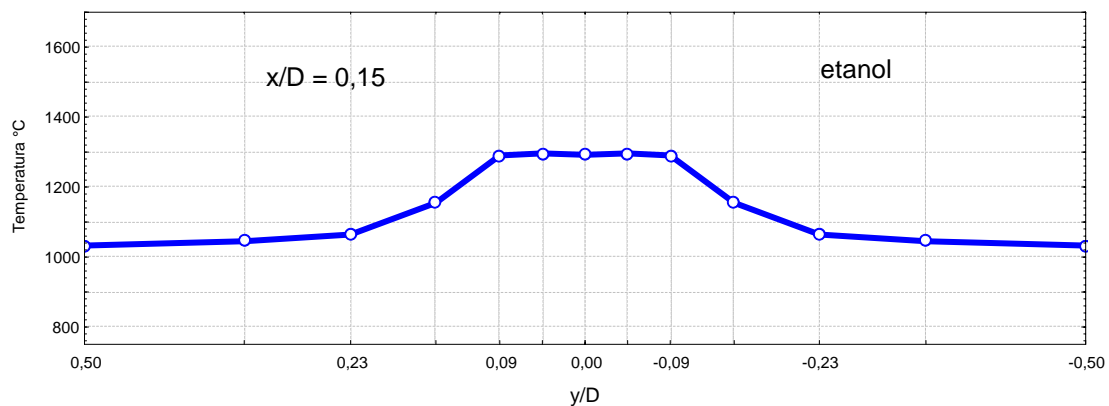


Figura 10. Variação de temperatura ao longo do perfil $x/D = 0,15$, $S' = 0,684$ para o etanol à temperatura de referência 1000°C .

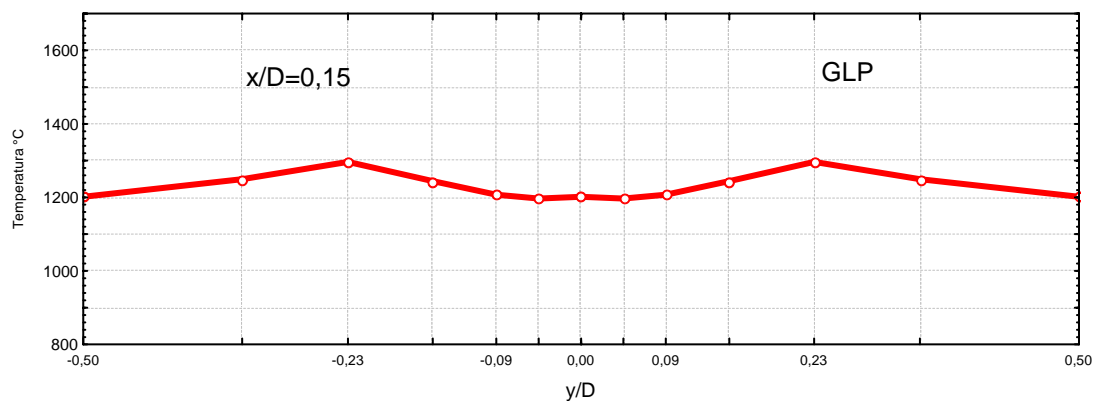


Figura 11. Variação de temperatura ao longo do perfil $x/D = 0,15$, $S' = 0,684$ para o GLP à temperatura de referência 1000°C .

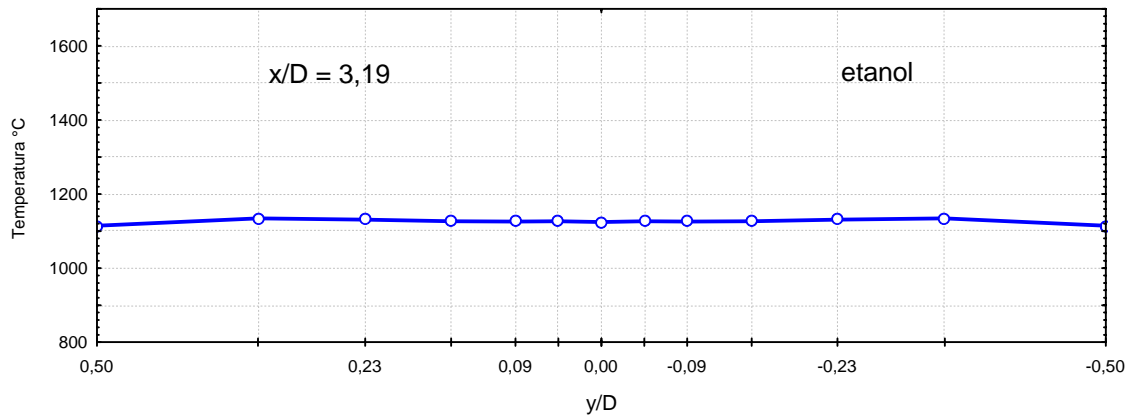


Figura 12. Variação de temperatura ao longo do perfil $x/D = 3,19$, $S' = 0,684$ para o etanol à temperatura de referência 1000°C .

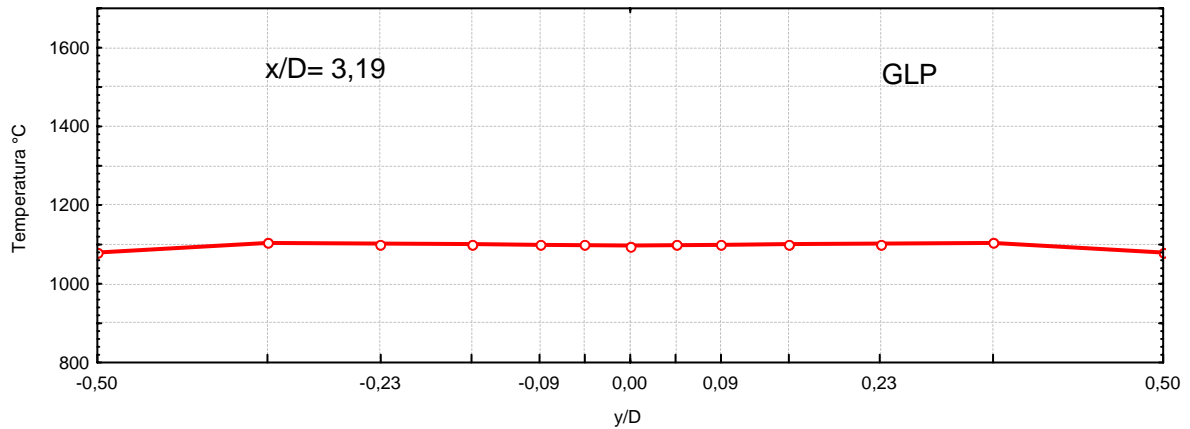


Figura 13. Variação de temperatura ao longo do perfil $x/D = 3,19$, $S' = 0,684$ para o GLP à temperatura de referência 1000°C .

Verifica-se nas figuras 10 a 13, existe a exata simetria das curvas em relação ao ponto y/D 0,00. Isso se dá pois o estudo foi realizado na metade da câmara e rebatido para a câmara toda, da mesma forma que KENBAR (1995).

O gráfico de isotermas ao longo de toda a câmara que é mostrado nas Fig. 14 e 15, com temperatura de referência 1175°C e número de rotação $S' = 1,315$, para os dois combustíveis.

Observando os contornos de isotérmicas do início da câmara (próximo ao queimador) até próximo à saída dos gases nota-se que existe uma homogeneidade maior na distribuição de temperatura do GLP quando comparada com o etanol. Por exemplo, para o GLP à temperatura de referência de 1175°C , com número de rotação $S' = 1,315$, a temperatura próxima ao queimador (no centro da câmara) fica em torno de 1380°C e próxima a saída atinge uma temperatura aproximada de 1300°C , com uma diferença em torno de 80°C .

Nota-se que a temperatura sempre estará maior que a temperatura de referência, pois esta temperatura é medida no duto de saída da câmara.

Já para o etanol nas mesmas condições, ou seja, temperatura de referência 1175°C e $S' = 1,315$, a temperatura fica próxima dos 1500°C no centro da câmara e na saída dos gases fica próxima de 1350°C , uma diferença em torno de 150°C .

Quando se observa somente o número de rotação, para o mesmo combustível, nota-se que não existe uma grande variação na distribuição de temperatura para os números de rotação maiores em relação aos menores, como por exemplo, para o GLP com número de rotação $S' = 1,315$ e temperatura de referência 1175°C , a temperatura varia de 1380°C , próximo ao queimador, para 1300°C no final da câmara, próximo a saída dos gases, apresentando uma diferença de 80°C .

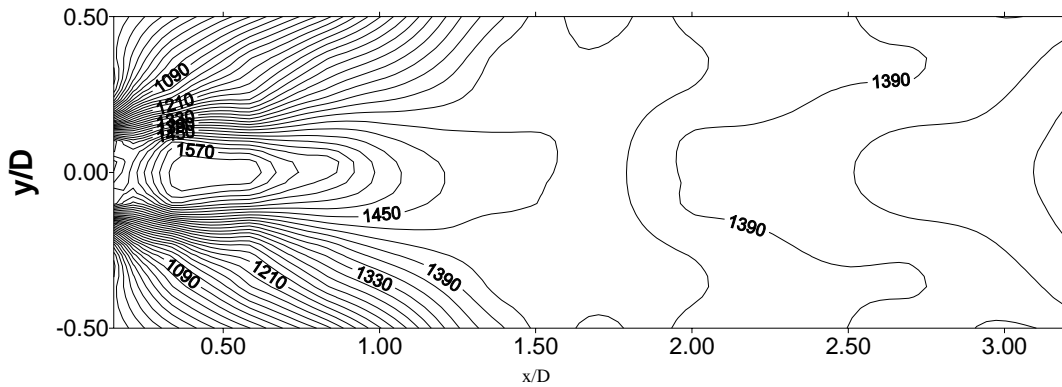


Figura 14. Perfil de temperatura do etanol $S' = 1,351$, com temperatura de referência de 1175°C e intervalo de 20°C .

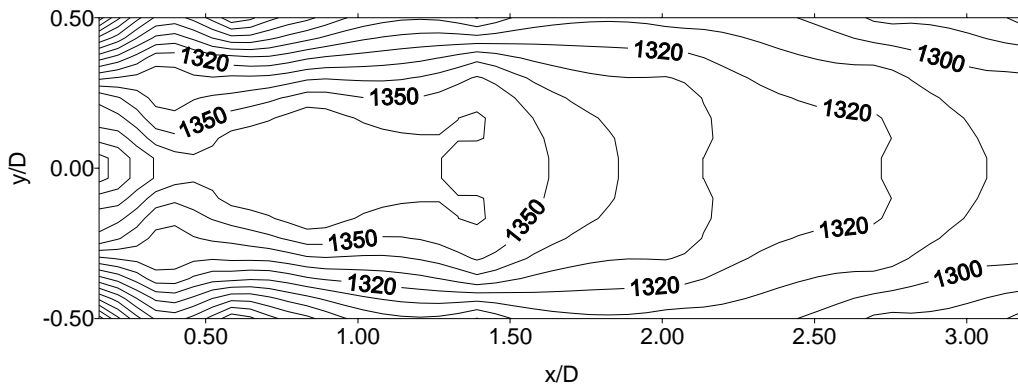


Figura 15. Perfil de temperatura do GLP $S' = 1,351$, com temperatura de referência de 1175°C e intervalo de 10°C .

5. Conclusão

Este trabalho estudou a variação da temperatura, na combustão de GLP e etanol vaporizado em uma câmara de combustão cilíndrica horizontal isolada termicamente. Nos testes realizados foram mantidos constantes o tempo de residência dos gases e a potência específica da câmara de combustão, foram utilizados duas temperaturas de saída dos gases (1000°C e 1175°C) e foram variados os números de rotação relativos à injeção de ar no queimador.

Os resultados obtidos mostraram influência da fluidodinâmica no perfil de temperatura, representada pelo número de rotação do queimador. Assim, as temperaturas locais foram aumentadas significativamente com o aumento do número de rotação.

Verificou-se que a flutuação de temperatura local é maior quando a rotação é menor, conforme mostra as Fig. 6 a 9. Isso é um indicativo de que a mistura em uma rotação maior é mais homogênea, mas esta informação terá que ser confirmada com detalhamento e um estudo maior de pontos.

A evolução da temperatura na combustão do etanol mostrou-se diferente da evolução da temperatura na combustão do GLP, como pode ser verificado através dos gráficos distribuição das temperaturas no interior da câmara de combustão, determinadas para os números de rotação $S' = 0,684$ e $S' = 1,315$. No entanto, a velocidade de saída do jato de etanol e GLP foram diferentes, sendo da ordem de 55 m/s para o etanol e 27 m/s no caso do GLP.

Verificou-se ainda que com número de rotação menor $S' = 0,684$ existe uma variação maior comparada com o número de rotação maior $S' = 1,315$. Isto indica que com um número de rotação maior existe uma homogeneidade maior na mistura dos gases.

A distribuição de temperatura no interior da câmara de combustão no caso do etanol mostrou-se muito mais heterogênea que no caso do GLP.

6. Referências bibliográficas

- Beér, M. J., Chigier, N. A. "Combustion Aerodynamics". London, Applied Science Publishers LTD, 1972. 264p.
- Beltagui, S. A., Maccallum, N. R. L. "The Modelling of Vene-Swirled Flame in Furnaces", J. Inst. Fuel 1976. vol.69, p. 193-200.
- Bizzo, W. A. "Emissão de monóxido de carbono e hidrocarbonetos totais em câmara de incineração: Efeito do número de rotação e composição do combustível". Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp, 1997. 116p. (Tese, Doutorado em Engenharia Mecânica)
- Chedaille, J., Braud, Y., "Measurements in Flame" Edward Arnold (Publ.), London, 1972. 228p.
- Fenimore, C. P. "Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames". 13TH Symposium (International) on Combustion, 1970, Salt Lake City, Utah. Combustion Institute. Pittsburgh, Pa, 1971. p. 373-380.
- Fenimore, C. P., Jones, G.W. "Nitric oxide decomposition at 2200 degrees K - 2400 degrees K". Journal of Physical Chemistry, v. 61, n.5, p.654-657, 1957
- Hayhurst, A. N., Vince, I. M. "Nitric oxide formation from N₂ in flames: the importance of 'Prompt' NO". Progress in Energy and Combustion Science, v.6, p.35-51, 1980.
- Kenbar, A. M. A., Beltagui, S. A., Maccallum, N. R. L. "Combustion aerodynamics of a gas-fired furnace with peripheral injection". Experimental Thermal and Fluid Science, v.10, p.335-346, 1995.
- Levenspiel, O. "Engenharia das Reações Químicas". Ed. Edgard Blucher, São Paulo, 1972. 481p.
- Zeldovich, Ya. B. et al. "The mathematical theory of combustion and explosions". p.30-36, Consultants Bureau, 1946.

COMPARATIVE STUDY OF THE DISTRIBUTION OF TEMPERATURE OF THE LPG AND THE ETHANOL IN A CYLINDRICAL COMBUSTION CAMERA

Paulo Lenço

Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) - R. Mario Sproesser 181 apto. 32-O, Monte Mor, SP
lenco@actualis.com.br

Waldir A. Bizzo

Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) - R. Mendeliev s/n° Cid. Universitária, Campinas, SP
bizzo@fem.unicamp.br

Abstract

The formation of gas pollutants such as CO, CO₂ e NO_x has caused great concern and this has contributed to phenomena as global warning or formation of atmospheric ozone. Due to the growth of emissions of these gases and harmful compounds, the viable alternatives are both the choice of renewable combustibles and the adoption of mechanisms to reduce the formation of the gases and the compounds. A formation of nitrogen oxides, by Zeldovich mechanism, takes place due to local high temperatures and available oxygen. These factors are influenced by combustion fluidynamic and variation in the residence time. It was studied the variation in temperature in a cylindrical combustion camera, with thermal insulation, where was burned LPG (liquefied petroleum gas) and vaporized ethanol. In this study were used the same residence time, the same specific power and exit temperature of 1000° C and 1175° C. The data showed the variation in temperature, therefore the combustibles were compared. It was noted that in the same conditions there are variations in the behavior of temperature between the combustibles.

Keywords: ethanol, LPG, swirl number, combustion, temperature.