

Combustão sem chama visível do *jet fuel*

Flameless combustion of jet fuel

Jean A. Barbosa^{*1}, José Carlos de Andrade¹, Christian J. R. Coronado², Fernando de Souza Costa¹

^{*1} Laboratório de Combustão e Propulsão (LCP), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brasil. E-mail: jeanandrabarbosa@gmail.com, jose.andrade@inpe.br, fernando.costa@inpe.br

² Grupo de Estudos em Tecnologias de Conversão de Energia (GETEC) Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Brasil. E-mail: christian@unifei.edu.br

Resumo

Combustão sem chama é um regime de combustão no qual há diminuição da emissão de gases poluentes e aumento da eficiência energética. Existem diversos estudos sobre o regime de combustão sem chama para combustíveis gasosos por outro lado para combustíveis líquidos existe muito pouco sobre as características de tal regime. O objetivo desse trabalho é realizar o regime de combustão sem chama do *jet fuel*. Para tal foi utilizado uma câmara de combustão especialmente construída para trabalhar com combustíveis líquidos e um injetor do tipo blurry para a melhor atomização do combustível. A combustão sem chama foi caracterizada através da medida do perfil de temperatura da câmara.

Palabras clave: *Jet Fuel*, combustão, termodinâmica, *flameless*, injetor.

Abstract

Flameless combustion is a combustion regime in which there is a reduction in the emission of pollutants gaseous and an increase in energy efficiency. There are several studies on the flameless combustion regime for gaseous fuels on the other hand for liquid fuels there is very little about the characteristics of such a regime. The objective of this work is to realize the flameless combustion regime of jet fuel. For this purpose, a combustion chamber specially designed to work with liquid fuels and a blurry type injector was used for the best atomization of the fuel. Flameless combustion was characterized by measuring the temperature profile of the chamber.

Keywords: *Jet Fuel*, combustion, thermodynamics, *flameless*, injector.

1. Introdução

A definição precisa de combustão sem chama é algo de discussão entre os pesquisadores da área. Tal regime apresenta diferentes nomes entre eles tem-se: *Flox*®, *HiTAC*, *HiCOT*, *Mild Combustion* e *colorless Distributed Combustion (CDC)*, sendo observado pela primeira vez pelos pesquisadores J.A. Wüning e J. G. Wüning [1],[2].

Ao contrário da combustão convencional, o regime de combustão sem chama visível, a reação de combustão não é realizada somente no injetor, esta é realizada em

toda a câmara de combustão mediante a recirculação dos produtos da combustão, estes gases elevam a temperatura dos reagentes e conseqüentemente uma temperatura de combustão da câmara menor e mais uniforme no interior da mesma [3],[4].

Outra característica importante do regime de combustão sem chama visível é que o oxidante não se mistura diretamente com o combustível antes da reação. Eles são injetados de forma independente para que se crie uma zona de recirculação na câmara de combustão.

Os aspectos importantes para a combustão sem chama são: atomização, vaporização, mistura, transferência de

calor por radiação, a temperatura, os processos químicos de oxidação e o processo de autoignição [4].

As características principais do processo de combustão sem chama são: uma temperatura de combustão menor, diminuição das emissões de NO_x, chama não visível e sem ruído com alta recirculação dos gases de combustão e em alguns casos reutilização dos gases queimados para preaquecimento dos reagentes [5],[6].

O objetivo desse trabalho é realizar experimentalmente a combustão sem chama do *jet fuel* medindo as emissões de sua queima, em um combustor de pequeno porte. A atomização será feita com um injetor do tipo blurry. A entrada térmica é de 4,36 kW (com base na taxa mássica de combustível e poder calorífico inferior), pois a câmara é de pequeno porte. O excesso de ar (λ) é de 3,8 e a densidade de calor liberado de 0,52 MW/m³. A caracterização do regime de combustão sem chama é feita através da medição do perfil de temperatura ao longo da câmara.

2. Metodologia

O injetor *flow blurring* (FB) ou injetor *blurry* é uma técnica de atomização de dois fluidos que explora as vantagens da mistura interna e externa. Essa configuração foi apresentada por [7], e segundo ele, esse injetor apresenta várias vantagens sobre os outros tipos de injetores, tais como formação de um spray uniforme, melhor atomização, alta eficiência de atomização e excelente vaporização do combustível e mistura com o ar. Motivo no qual foi este escolhido para os testes.

Sua configuração é caracterizada por um tubo de alimentação de líquido cujo o diâmetro interno, d , é igual ao diâmetro do orifício de saída localizada na placa de orifício à jusante do tubo. O tubo de líquido contém uma distância, H , do orifício de saída, dando origem a uma passagem lateral cilíndrica para o fluido de atomização. A Figura 1 apresenta um esquema do injetor do tipo *blurry*.

Após a escolha do injetor é necessário a caracterização do tamanho médio de gota produzido pelo injetor *blurry*. Para isso foi utilizado o sistema a laser Malvern *Spraytec*®, apresentado na Figura 2. O sistema tem a capacidade de adquirir dados com uma frequência de 10 kHz, de modo que os dados obtidos da distribuição de tamanho de gotas em tempo real podem ser coletados com uma resolução de 100 μ s. Sendo assim, quaisquer mudanças no tamanho das gotas durante a medição da amostra podem ser detectadas em tempo real, permitindo que a avaliação da dinâmica de atomização. O sistema é capaz de medir gotas numa ampla faixa de tamanho, 0,1 - 2000 μ m com precisão e reprodutibilidade de $\pm 1\%$.

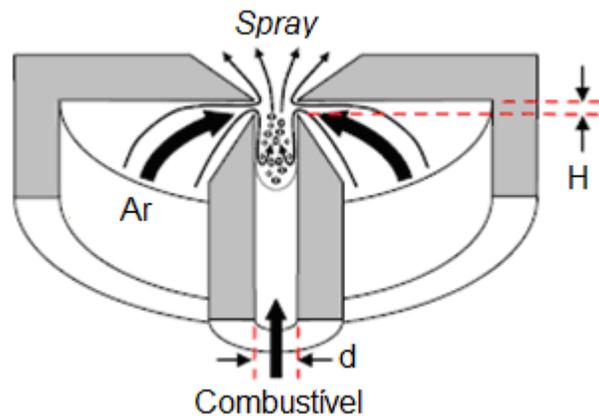


Figura 1. Esquema do injetor do tipo Blurry.[8]

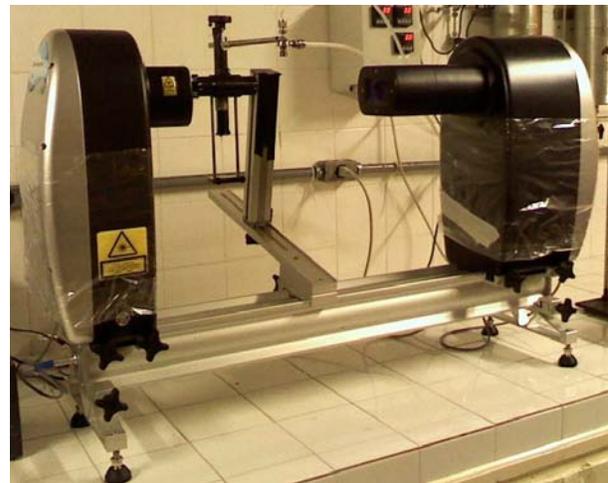


Figura 2. Sistema a laser Malvern *Spraytec*®. Fonte: [9].

Com a caracterização do injetor é possível definir a razão mássica ar-líquido (RAL) que é o parâmetro mais importante em processos de atomização, ao se aumentar a RAL observa-se uma melhora na qualidade de atomização. Lorenzetto e Lefebvre (1977) [10] analisaram e identificaram o comportamento característico do *spray* produzido por um injetor *airblast* plano com aumento da RAL. Os autores identificaram que quanto menor o RAL pior é a atomização pois a quantidade de ar não é suficiente para quebrar as forças agregadoras. Por outro lado, com aumento da RAL a atomização fica cada vez melhor, com gotas mais finas, até chega um ponto que se estagna não havendo mais mudanças significativas na atomização do fluido.

O procedimento de teste basicamente consiste em injetar combustível na câmara de combustão através do injetor do tipo *blurry*, fazendo com que ele forme um *spray* para a queima do combustível. Após a ignição do *spray* por faísca elétrica a câmara começa a esquentar,

nessa parte do experimento o regime de combustão é com chama visível. Quando o ar de combustão atinge uma temperatura maior do que a de autoignição do combustível o sistema entra em regime de combustão sem chama. O ar de combustão é aquecido com a parede da própria câmara de combustão reutilizando o próprio calor gerado na queima do combustível.

Para a medição da temperatura ao longo da câmara foram instalados 9 termopares do tipo K, o primeiro é colocado na base da câmara e o último e na saída dos gases de combustão. Vale salientar que a saída dos gases de combustão tem diâmetro menor do que a câmara isso é feito para que haja recirculação dos gases de combustão fazendo com que haja reações ao longo da câmara e não só onde a chama está ancorada. A câmara foi isolada termicamente com uma manta térmica. A bancada experimental utilizada para realização dos experimentos possui: painel de controle das condições de teste, câmara de combustão e injetor do tipo *blurry*. O esquema da bancada experimental é apresentado na Figura 3.

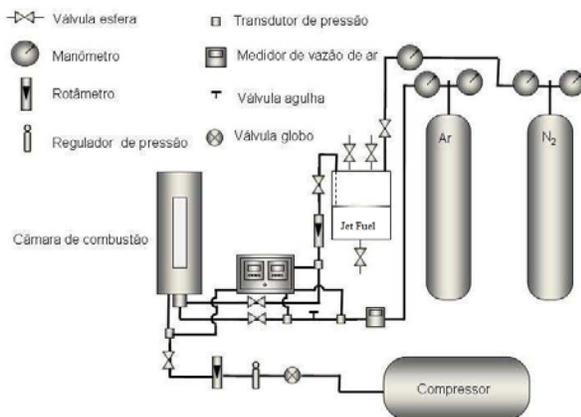


Figura 3. Esquema da bancada experimental. [9]

3. Resultados

A vazão mássica de combustível injetada na câmara de combustão foi de $0,10 \text{ g/s}$ liberando um calor de $0,52 \text{ MW/m}^3$ com um excesso de ar de 3,8. O excesso de ar em combustão sem chama é fundamental pois através desse excesso que ocorre a recirculação dentro da câmara conseguindo assim entrar em regime sem chama.

O teste precisou de 70 minutos para que entrasse em regime de combustão *flameless*, tempo necessário para que o ar de combustão ficasse com uma temperatura maior do que a de autoignição do *jet fuel*. As temperaturas dos termopares, exceto o primeiro e o nono, se aproximam em uma temperatura média de 720°C . O primeiro termopar e o nono são

desconsiderados por estarem na base e no topo da câmara de combustão não ficando na região de recirculação dos gases. A Figura 4 apresenta o resultado temporal da medição dos termopares de 10 em 10 minutos e a Figura 5 apresenta a câmara de combustão antes e depois de entrar em regime de combustão sem chama. A amplitude de temperatura dos termopares em regime de combustão *flameless* é de 20°C . Como apresenta a Figura 6.

Pela Figura 4 observa-se que o sistema entra regime de combustão *flameless*, quando a temperatura do ar de combustão (termopar 1) atinge 364°C , acima da temperatura de autoignição do *jet fuel* e a partir desse momento as temperaturas ao longo da câmara começam a ficar próximas caracterizando o regime *flameless*. Vale salientar que as temperaturas dos termopares 1 e 9 (entrada e saída da câmara respectivamente) se aproximam para o mesmo valor caracterizando boa isolamento térmica da câmara requisito necessário para realização de *flameless*.

A Figura 5 na parte (A) nota-se que na janela de visualização está com fuligem ao contrário da parte (B). Durante a realização dos experimentos foi possível observar que quando a câmara estava em regime de combustão convencional a formação de fuligem era grande chegando até a impedir a visualização pela janela. Conforme a taxa de recirculação foi aumentando dentro da câmara a formação de fuligem diminuiu e houve uma limpeza da janela de observação.

Na Figura 6 nota-se que a temperatura média em combustão sem chama visível ficou praticamente uniforme tendo uma variação normal devido aos erros de medida dos termopares.

4. Conclusão

O experimento de regime de combustão sem chama do *jet fuel* apresentaram resultados excelentes, pois o perfil de temperatura foi uniforme. Só acontece o regime de combustão sem chama quando o ar de combustão atinge temperatura maior do que a de autoignição do combustível testado. A diminuição da formação de fuligem na combustão sem chama é visivelmente detectada e ocorre por causa da recirculação dos gases que fazem a combustão ser mais completa.

5. Agradecimentos

Os fundos para essa pesquisa vieram de CAPES – Brazil and CNPq-Brazil (Proc. N° 305965/2016-6). Agradeço ao INPE por disponibilizar os equipamentos e espaço para a realização dos testes.

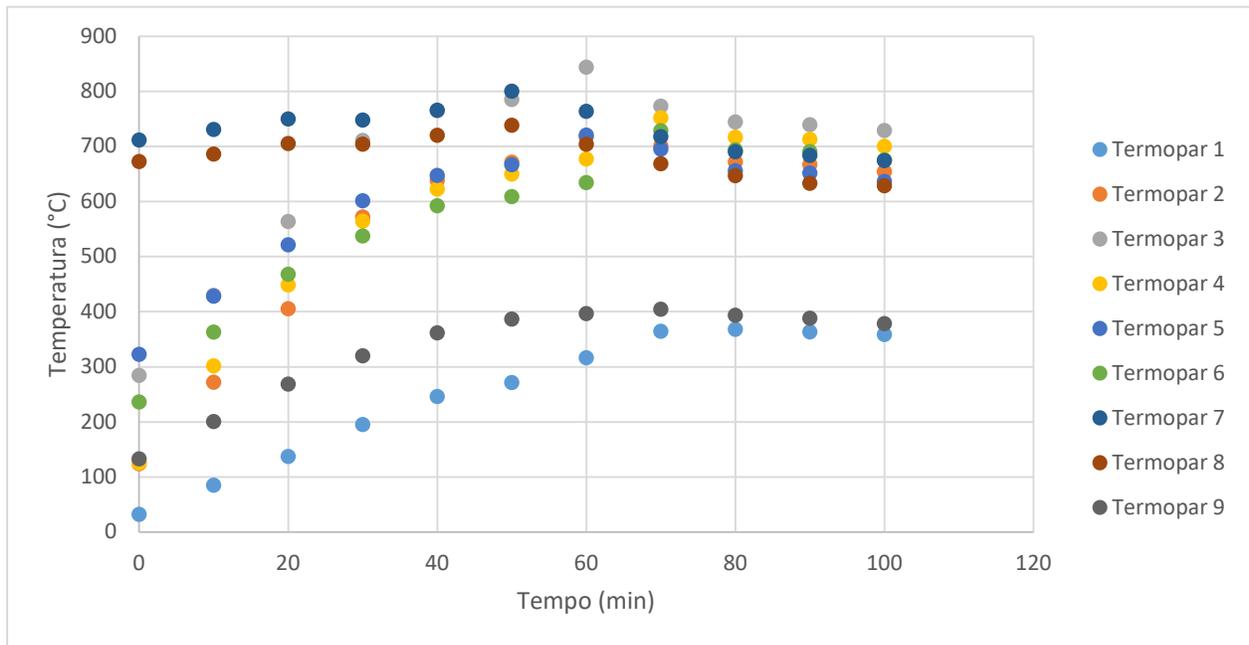


Figura 4. Perfil de temperatura na câmara de combustão

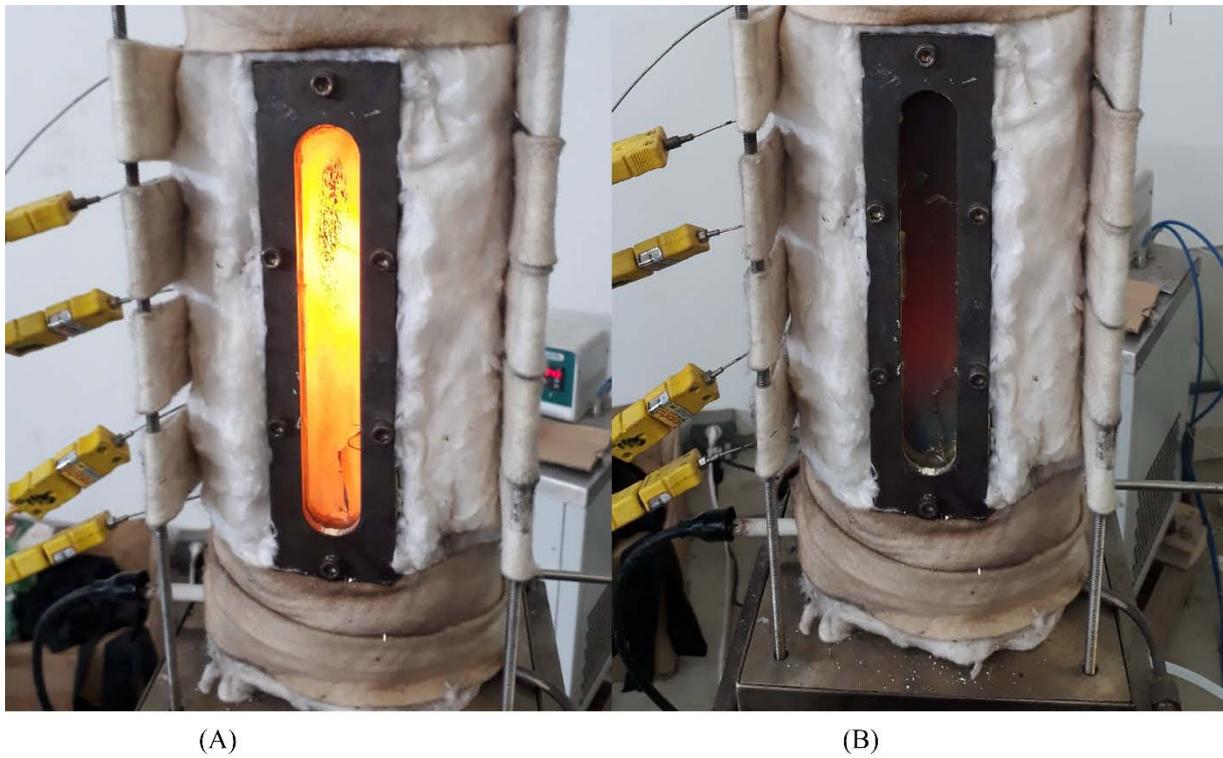


Figura 5. (A) Regime de combustão convencional. (B) Regime de combustão *flameless*

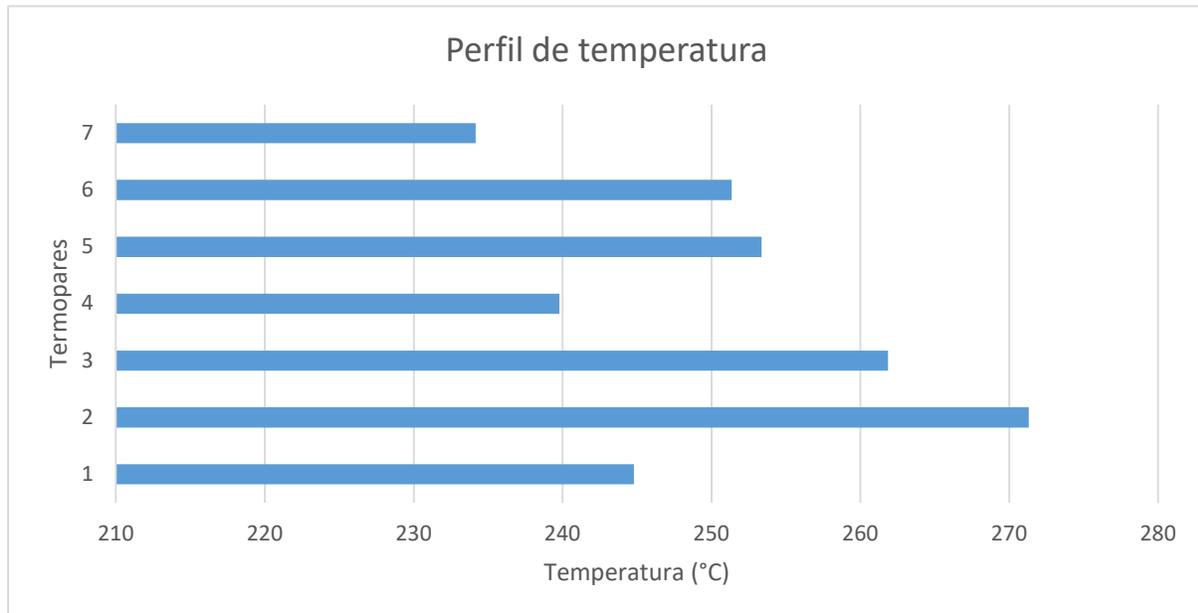


Figura 6. Média de temperatura dos termopares em regime de combustão *flameless*.

6. Referencias

- [1] DUNN-RANKIN, D. **Lean combustion**. [S.l.]: [s.n.], 2011.
- [2] SIQUEIRA, B. O. P. E S. Simulação numérica em cfd do regime de combustão sem chama aplicado a queima de etanol hidratado. [S.l.]: **Universidade Federal de Itajubá**, 2016.
- [3] AYOUB, M. *et al.* An experimental study of mild flameless combustion of methane/hydrogen mixtures. **International journal of hydrogen energy**, 2012. v. 37, n. 8, p. 6912–6921.
- [4] CAVALIERE, A.; JOANNON, M. D. Mild combustion. **Progress in energy and combustion science**, 2004. v. 30, n. 4, p. 329–366.
- [5] COELHO, P. J.; PETERS, N. Numerical simulation of a mild combustion burner. **Combustion and flame**, 2001. v. 124, n. 3, p. 503–518.
- [6] DERUDI, M.; ROTA, R. Experimental study of the mild combustion of liquid hydrocarbons. **Proceedings of the combustion institute**, 2011. v. 33, n. 2, p. 3325–3332.
- [7] GAÑÁN-CALVO, A. M. Enhanced liquid atomization: from flow-focusing to flowblurring. **Applied Physics Letters**, v. 86, 2005.
- [8] DENT JR, T. J. **Mesoscale power generation incorporating heat-recirculation, porous inert media, and thermoelectric modules**. 2012. Dissertation (Doctor of Philosophy) – School of the University of Alabama, Department of Mechanical Engineering, 2012.
- [9] AZEVEDO, C. G. Desenvolvimento de um sistema compacto de combustão sem chama visível utilizando um injetor blurry para queima de biocombustíveis. [S.l.]: **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**, 2013.
- [10] LORENZETTO, G. E.; LEFEBVRE, A. H. Measurements of drop size on a plain-jet airblast atomizer. **AIAA Journal**, v. 15, p. 1006-1010, 1977.