

DESENVOLVIMENTO DE UM QUEIMADOR DE GÁS NATURAL COM EXCITAÇÃO ACÚSTICA (1)

Ana Maura Araujo Rocha (2)

Pedro Teixeira Lacava (3)

João Andrade de Carvalho Junior (4)

Resumo

A combustão pulsante tem recebido especial atenção nas pesquisas atuais devido às indicações que sua aplicação para geração de energia pode oferecer diversas vantagens, tais como: economia de combustível, baixa emissão de poluentes e aumento na taxa de transferência de calor convectiva. A combustão também é uma técnica interessante para controlar as condições de combustão de diversas aplicações industriais. Assim, o presente trabalho mostra resultados experimentais para um queimador tipo jato circular de gás natural operando nos modos pulsante e não pulsante. A presença do campo acústico muda drasticamente a estrutura da chama e algumas observações puderam ser feitas: 1) consideráveis amplitudes de oscilação podem ser atingidas nas frequências naturais do queimador, mas uma chama piloto de hidrogênio é necessária para manter a chama principal ancorado nas proximidades do queimador; 2) a condição de pré-mistura é estabelecida em algumas regiões da chama onde o campo acústico é mais intenso; 3) o regime pulsante muda as evoluções axial e radial dos mecanismos de combustão do hidrocarboneto e de formação de NO; 4) o aumento na amplitude de oscilação reduz o comprimento da chama.

Palavras-chave: Combustão pulsante; Combustão pulsado; Combustão de gás natural.

¹ XXVI Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades, agosto de 2005, Salvador – BA

² Aluna de Doutorado - UNESP – Guaratinguetá

³ Prof. Adjunto - ITA – São José dos Campos

⁴ Prof. Titular - UNESP – Guaratinguetá / Pesquisador – INPE – Cachoeira Paulista

1 INTRODUÇÃO

A combustão pulsante ganhou interesse nas pesquisas atuais devido às indicações de que sua aplicação na geração de energia pode oferecer diversas vantagens, tais como: economia de combustível, formação reduzida de poluentes, aumento na taxa de transferência de calor convectiva e investimento de capital reduzido em comparação com técnicas convencionais (Zinn, 1996). Entende-se como combustão pulsante o processo de queima que apresenta como característica principal o fato das variáveis de estado que descrevem as condições na zona de queima ocorrerem sob condições oscilatórias, isto é, mudando periodicamente com tempo (Zinn, 1986).

A presença de oscilações acústicas no processo de combustão acaba sendo responsável por melhorar a taxa de mistura entre o combustível e o oxidante, devido a criar intensas zonas de turbulência na região de chama. As emissões de CO, hidrocarbonetos não queimados e fuligem está extremamente relacionada com a taxa de mistura local entre o combustível e o oxidante (Lefebvre, 1983). Desta forma, a expectativa é de uma menor emissão para ambos poluentes.

Apesar de vários estudos já realizados indicarem as vantagens dos sistemas de combustão pulsados, a implementação desses sistemas em larga escala depende do melhor entendimento do complexo acoplamento de vários parâmetros controladores e fenômenos envolvidos. Desta forma, o objetivo do presente trabalho foi estudar como a atuação acústica altera o processo de combustão em um queimador do tipo jato de combustível, sendo que o regime de combustão pulsante é atingido através da excitação acústica do ar de combustão com um alto-falante.

2 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

O queimador utilizado consiste de dois tubos concêntricos, o central para o combustível e o anular para o ar primário conhecido queimador de Delft. Chamas pilotos ancoram a chama principal nas proximidades da saída do queimador, sendo esta protegida de grandes estruturas de circulação do ar atmosférico por uma corrente de ar secundário de baixa velocidade. A corrente de ar primário também apresenta características de jato e desta forma a mistura turbulenta entre o combustível e o ar é intensificada. A escolha desse tipo de montagem para o estudo de chamas excitadas acusticamente surge em razão das chamas não excitadas do queimador de Delft terem sido amplamente estudadas e diversos resultados estão disponíveis na literatura, além de procedimentos experimentais. Assim, tornou-se bastante conveniente adotar tal configuração, apenas alterando o queimador inicial para inclusão do alto-falante e a câmara de desacoplamento. A Figura 1 apresenta um detalhe do queimador, da chama piloto e o esquema da montagem experimental.

O queimador possui 196 cm de comprimento e diâmetro do canal interno de 4,5 cm, por onde passa o escoamento de ar que sofre a atuação acústica. O centro do alto-falante foi posicionado a 23 cm da base do queimador e o transdutor de pressão a 49 cm, posição conveniente para a leitura dos cinco primeiros harmônicos. Na base do queimador foi montada uma câmara de desacoplamento, para que o ar de combustão seja alimentado e permita que o queimador mantenha uma configuração de tubo aberto-aberto, que segundo Flügel et al (2004) é a configuração que melhor aproveita a energia fornecida ao autofalante para excitar acusticamente o escoamento do ar de combustão (ar primário). A Figura 1 (c) apresenta todo aparato utilizado para realizar a excitação acústica.

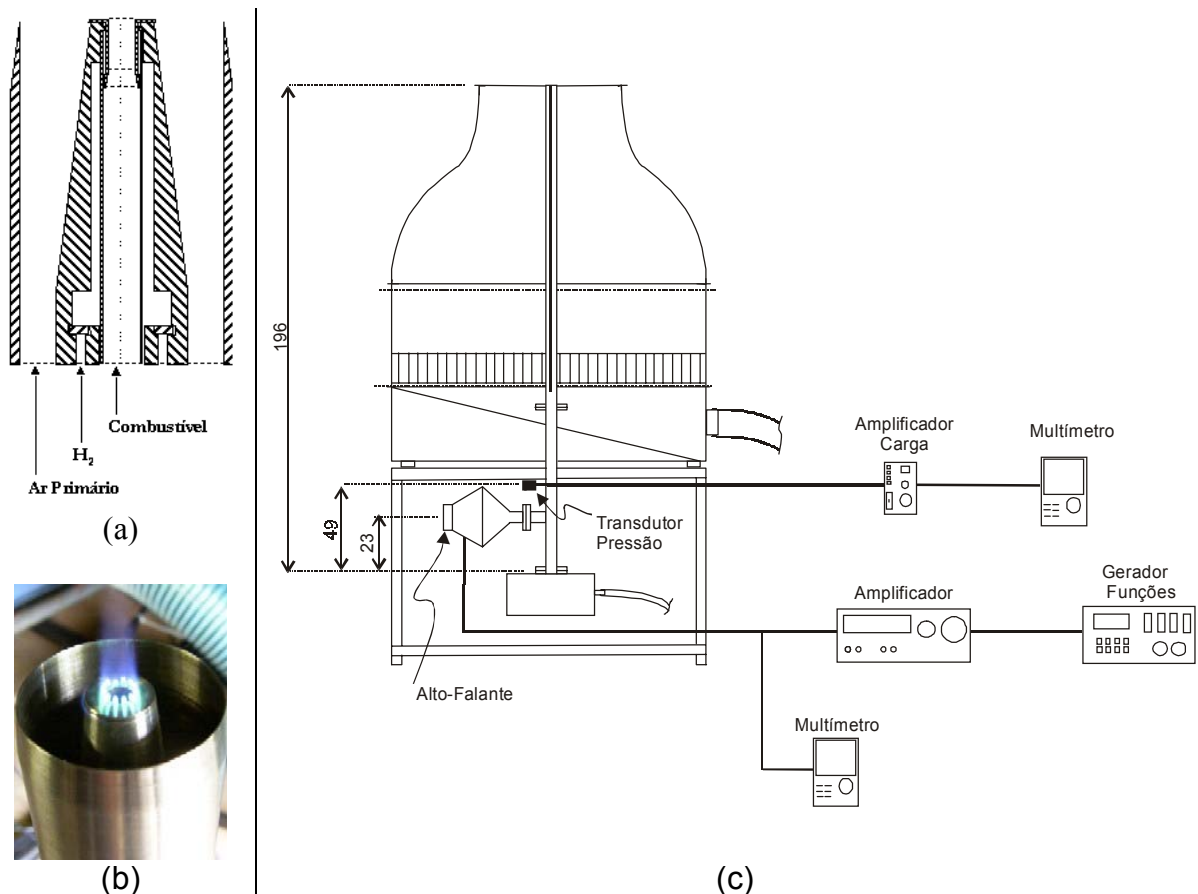


Figura 1. (a) Detalhe do queimador; (b) chama piloto do queimador; (c) esquema da montagem experimental (dimensões em cm).

O combustível utilizado na chama principal é o Gás Natural Veicular (GNV) e para as chamas pré-misturadas pilotos uma mistura de hidrogênio e acetileno de tal forma que se mantenha a mesma relação carbono hidrogênio do GNV. A Tabela 1 resume as duas condições de operação do queimador.

Tabela 1. Condições de ensaio.

Condição	GNV (g/h)	Ar Primário (kg/h)	Acetileno piloto (g/h)	Hidrogênio piloto (g/h)	Ar piloto (g/h)
I	756	15,3	1,63	4,49	73,85
II	1044	18,2	2,25	6,19	101,84

Para avaliar as modificações no processo de combustão pela presença da atuação acústica, analisou-se a distribuição radial de alguns compostos de interesse ao longo da chama. A captação dos gases foi feita por uma sonda refrigerada. Através de sucção por uma bomba de vácuo, os gases de combustão eram conduzidos por filtros e condensadores antes de chegarem aos analisadores contínuos de CO (infravermelho), CO₂ (infravermelho), O₂ (termomagnético) e NO (quimiluminescente), todos com leitura em base seca.

3 RESULTADOS

3.1 Freqüências Naturais de Oscilação

Os testes se destinam à verificação das freqüências de operação do queimador, ou seja, as freqüências correspondentes às maiores amplitudes de pressão obtidas no queimador para uma dada tensão aplicada ao alto-falante. Assim, estabeleceu-se a tensão 15V no alto falante para qualquer freqüência de atuação e observou-se a resposta de amplitude de pressão obtida no transdutor de pressão posicionado ao longo do queimador. Esse procedimento experimental foi realizado para situação sem nenhum escoamento de ar passando pelo corpo do queimador e para as condições de vazão de ar I e II. Os resultados estão resumidos na Figura 2.

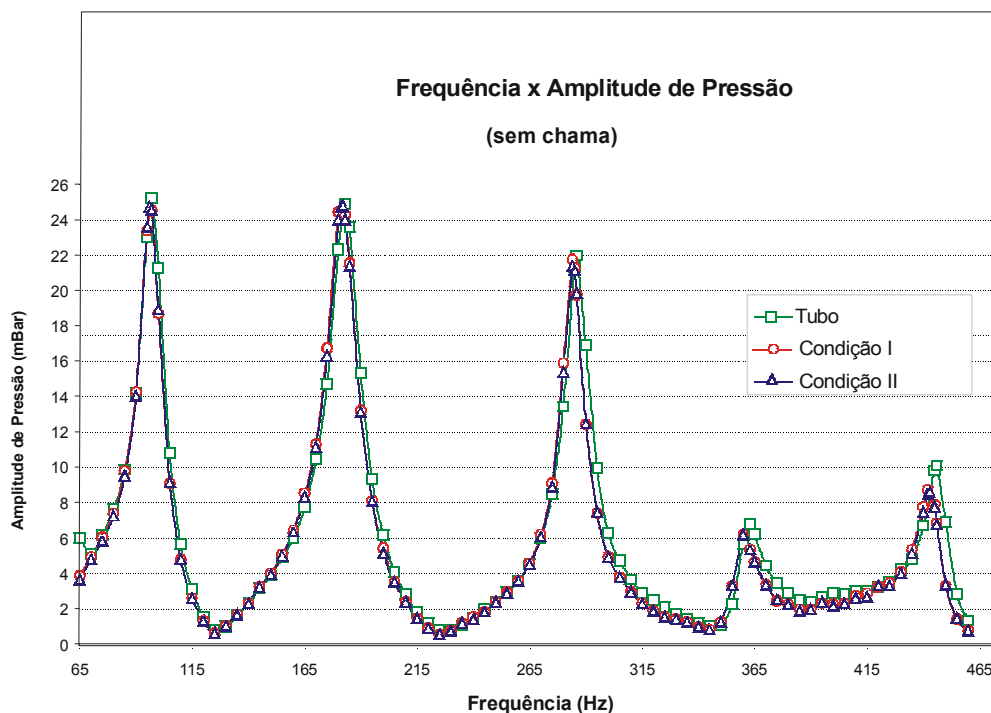


Figura 2. Comportamento acústico do queimador.

Nota-se claramente que na Figura 2 a existência de cinco picos de amplitude próximos às freqüências 97Hz, 183Hz, 286Hz, 363Hz e 446Hz. Para o comprimento e diâmetro do queimador, os valores teóricos encontrados para as freqüências naturais admitindo uma configuração de tubo aberto e ambas extremidades são: 88,1Hz, 176,2Hz, 264,2Hz, 352,3Hz e 440,4Hz; assim, pode-se dizer que o comportamento acústico do queimador é semelhante ao de um tubo aberto em ambas extremidades.

Os resultados da Figura 2 também mostram que a vazão de ar que passa pelo interior do queimador não altera as freqüências naturais. As freqüências correspondentes aos valores de pico de amplitude foram utilizadas nos demais experimentos.

3.2 Influência da Chama Piloto

Em queimadores tipo jato de gás combustível como o do presente trabalho, a chama permanecerá ancorada na saída do queimador até um determinado limite de velocidade de injeção do gás. À medida que a velocidade do jato aumenta, também

aumenta o efeito de carregamento do ar atmosférico por convecção para frente de chama na região próxima à saída do queimador; efeito conhecido como *air entrainment* na língua inglesa. A presença do campo acústico tende a incrementar esse efeito de *air entrainment*; sendo que, à medida que a amplitude de oscilação aumenta, a combustão nas proximidades do queimador começa a se comportar como uma chama pré-misturada com excesso de oxidante, e a velocidade de queima diminui em relação à velocidade do escoamento, causando um desprendimento da combustão (*lift*) podendo chegar à extinção (*blow-out*). A presença de uma chama piloto de hidrogênio na saída do queimador representa uma liberação adicional de energia nessa região, aumentando a velocidade de queima e estabilizando a chama em amplitudes de oscilação mais elevadas.

Assim, foram realizados ensaios para se verificar a eficiência da chama piloto sobre a estabilidade da chama principal para as condições I e II, nas frequências dos harmônicos descritas no item anterior, a fim de se estabelecer a máxima amplitude de pressão aplicada ao escoamento que mantivesse a chama ancorada com e sem a presença da chama piloto. Outro valor crítico levado em consideração nestes ensaios foi a máxima tensão permitida pelo alto-falante que é de 30V; contudo, nunca conseguiu-se estabilizar a chama em tensões acima de 25V. A Figura 3 sumariza os resultados.

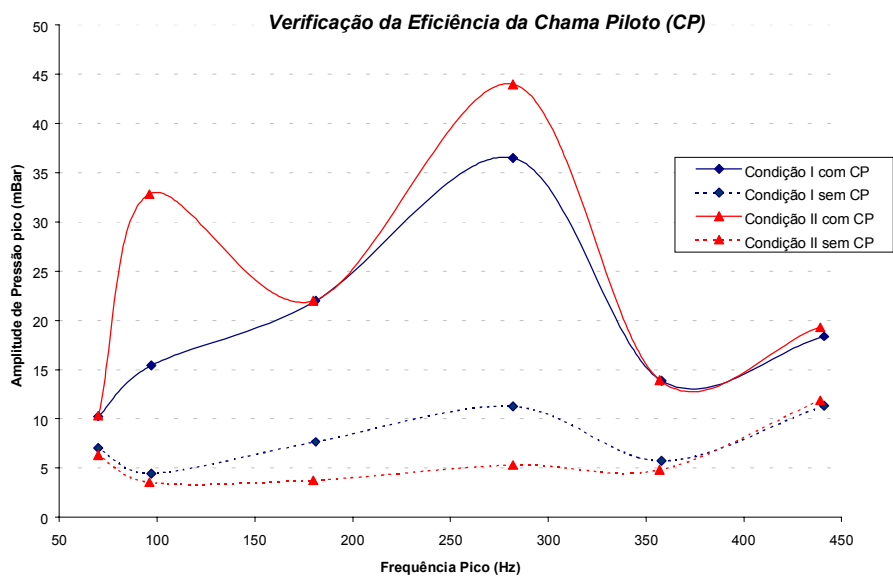


Figura 3. Influência da chama piloto para estabilizar a chama (CP = chama piloto na legenda).

Baseado nesses resultados pode-se dizer que para um amplo controle da combustão em queimadores tipo jato utilizando oscilação acústica, a chama piloto é indispensável. Por exemplo, em 286Hz, com a chama piloto foi possível atingir 36,5 mbar e 44 mbar de amplitude de pressão para as condições I e II, respectivamente; já sem a chama piloto atingiu-se 11,2 mbar e 5,3 mbar.

3.3 MUDANÇA DA ESTRUTURA DA CHAMA

Em um queimador convencional de gás natural do tipo jato circular de combustível operando em ambiente onde o oxidante está estagnado ou possui velocidade relativa muito baixa, o processo de combustão observado é tipicamente o de uma chama difusiva. A Figura 4(a) representa esta situação.

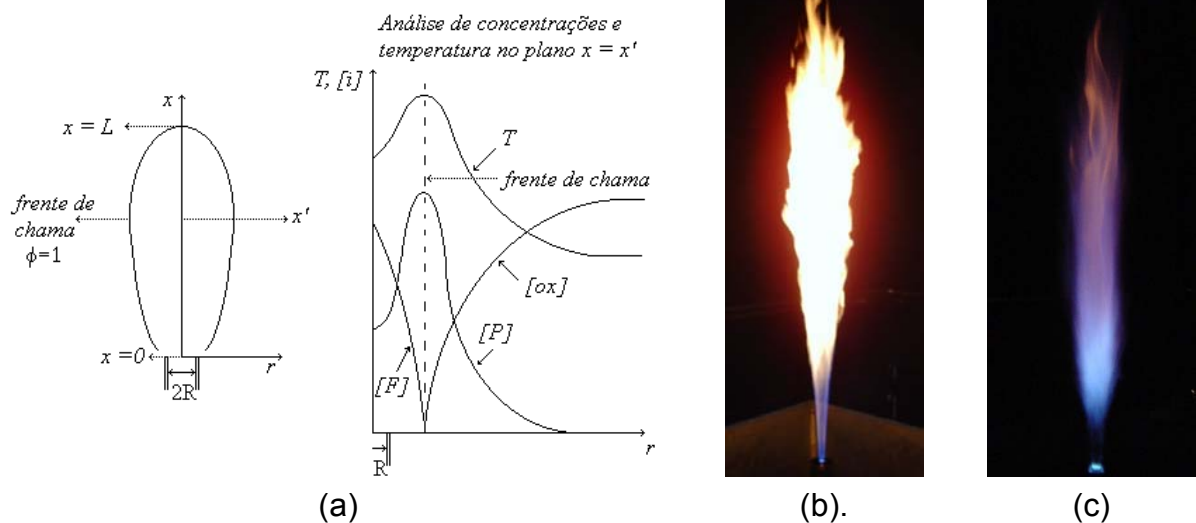


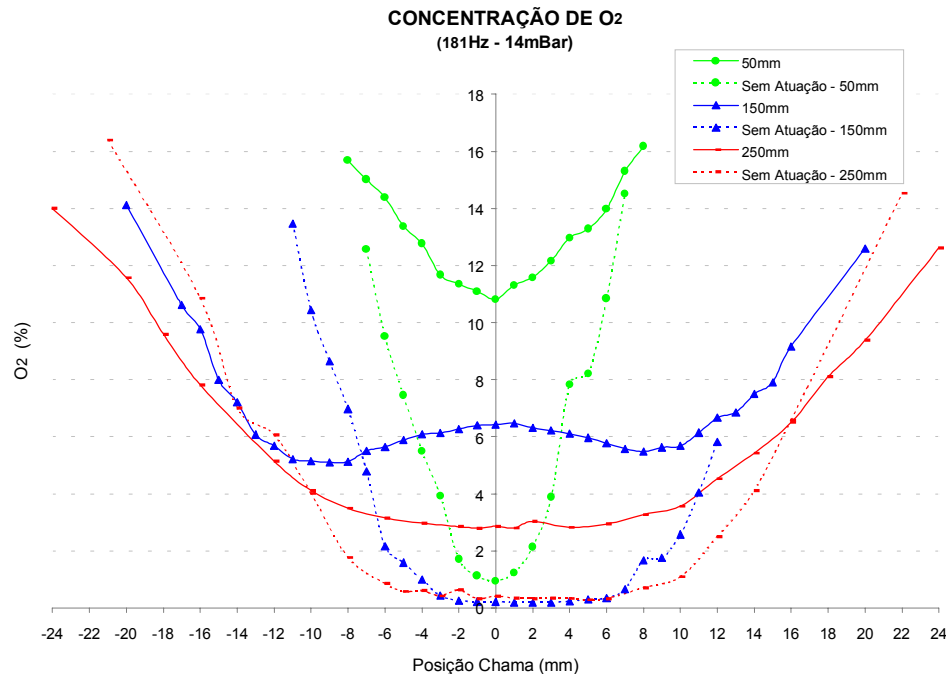
Figura 4. (a) Esquema de uma chama difusiva, onde $[F]$, $[ox]$ e $[P]$ são as concentrações do combustível, do oxidante e dos produtos, respectivamente, e T a temperatura. Chama sem atuação acústica (b) e com atuação acústica (c) para condição II.

A luminosidade de uma chama difusiva é outra característica interessante de ser analisada. Normalmente, a luminosidade da base da chama é bastante fraca e de coloração azulada, situação característica da não presença de fuligem. Nesta região, em razão da velocidade do jato ainda ser relativamente alta, existe a possibilidade que o ar carregado para frente de chama misture-se adequadamente com o combustível, evitando zonas de combustão com temperatura elevada e deficiência local de oxidante, desfavorecendo a formação de fuligem. Nos comprimentos mais elevados da chama, considerável quantidade de fuligem pode existir e a chama apresenta uma coloração amarelada. A Figura 4(b) apresenta uma fotografia da chama para o queimador operando na condição I e sem atuação acústica, nota-se um aspecto típico de chama difusiva. Contudo, a presença do campo acústico afeta consideravelmente a estrutura chama; à medida que a amplitude de oscilação aumenta, a coloração da chama passa a ser azulada, indicando que existe a transformação de uma chama predominantemente difusiva para pré-misturada, como mostra a Figura 4(c) para condição II com frequência de atuação de 286 Hz e amplitude de 42 mbar.

Além das observações visuais, as alterações na estrutura da chama em razão da presença do campo acústico podem ser observadas através das distribuições radiais e axiais de alguns compostos, O_2 , CO_2 , CO e NO . Como exemplo, apresenta-se uma comparação da porcentagem volumétrica desses compostos para a condição de operação I sem atuação acústica e com a atuação de 181 Hz e 14 mbar. Para outras situações de atuação, o comportamento qualitativo foi o mesmo.

A Figura 5 apresenta a distribuição radial da porcentagem volumétrica de O_2 para três distâncias axiais a jusante do queimador, 50 mm, 150 mm e 250 mm. Nota-se que para condição sem excitação os perfis obtidos são típicos de uma chama difusiva. A 50 mm o jato de gás sofre uma forte influência do efeito de *air entrainment* e uma mínima quantidade de O_2 se apresenta no eixo de centro do jato. Já para as distâncias 150 mm e 200 mm a quantidade de O_2 é praticamente nula, como esperado para uma chama difusiva. Contudo, quando o campo acústico é imposto a presença de O_2 na região central do jato é significativa, indicando que o campo acústico induz uma pré-mistura entre o combustível e o oxidante. Também se

nota que a quantidade de O_2 na região central do jato é mais pronunciada nas proximidades do queimador, isto ocorre em razão de que, quanto mais próximo do queimador mais intenso é o campo acústico; além disso, à medida que o escoamento desenvolve-se na direção axial, a maior presença dos produtos de combustão dilui o O_2 e parte desse é consumido pelas reações de combustão.



A Figura 6 apresenta a distribuição radial da porcentagem volumétrica de CO_2 . A 50 mm a concentração de CO_2 diminui muito quando o campo acústico está presente. Conforme a Figura 5, com a oscilação uma grande quantidade de oxidante se apresenta na região interna do jato, diluindo os produtos de combustão, como o CO_2 . Tomando o ponto onde o CO_2 é máximo como a fronteira da chama, em 150 mm e 250 mm percebe-se que esta se desloca radialmente com a presença do campo acústico. Também para nessas distâncias axiais, os resultados mostram que em alguns pontos ao longo do raio a concentração de CO_2 aumenta em relação à situação não pulsada. Este comportamento está associado ao fato de que a presença do campo acústico diminui o comprimento da chama, como será discutido na subseção seguinte; portanto, as reações de combustão se finalizam mais próximas ao queimador e, conseqüentemente, a concentração dos produtos de combustão aumenta nessa região.

Na Figura 7, que apresenta a distribuição radial da porcentagem volumétrica de CO , pode-se observar para esse composto o mesmo comportamento do CO_2 . Sabe-se que à medida que o escoamento reativo se desenvolve na direção axial, o CO tende a se converter a CO_2 . Até 250 mm não foi possível constatar essa evolução, nem mesmo para a situação sem oscilação. Contudo, medidas feitas ao longo do eixo centro do queimador mostraram essa tendência, conforme comentado na subseção seguinte.

A distribuição de NO também é afetada pela presença do campo acústico, como se observa na Figura 8. Quando a atuação não está presente, a região próxima ao queimador (50 mm) caracteriza-se pela ausência de formação de NO ;

contudo, quando as oscilações estão presentes a quantidade desse poluente é bastante considerável nessa região.

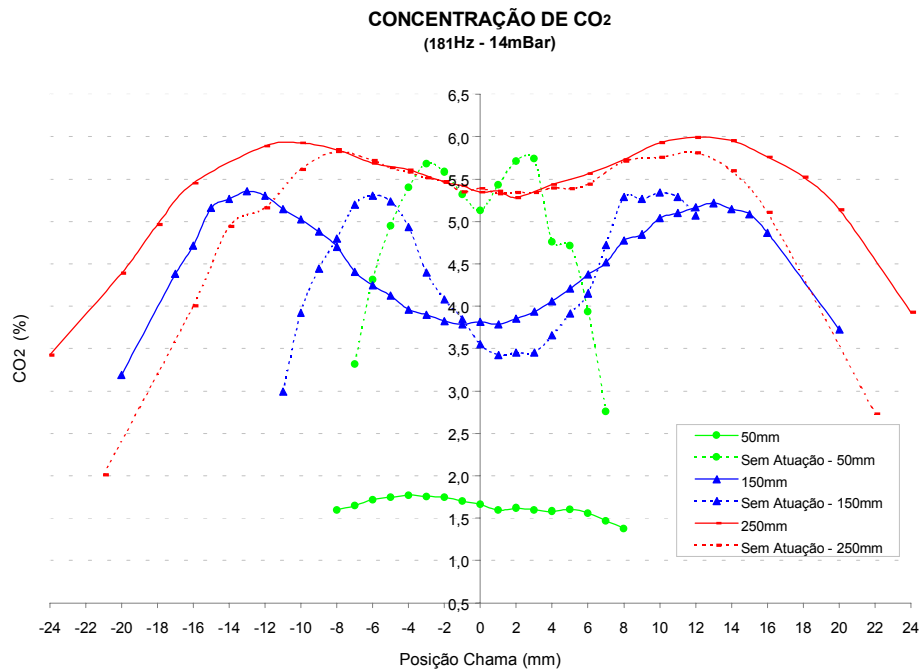


Figura 6. Distribuição radial da porcentagem volumétrica de CO₂.

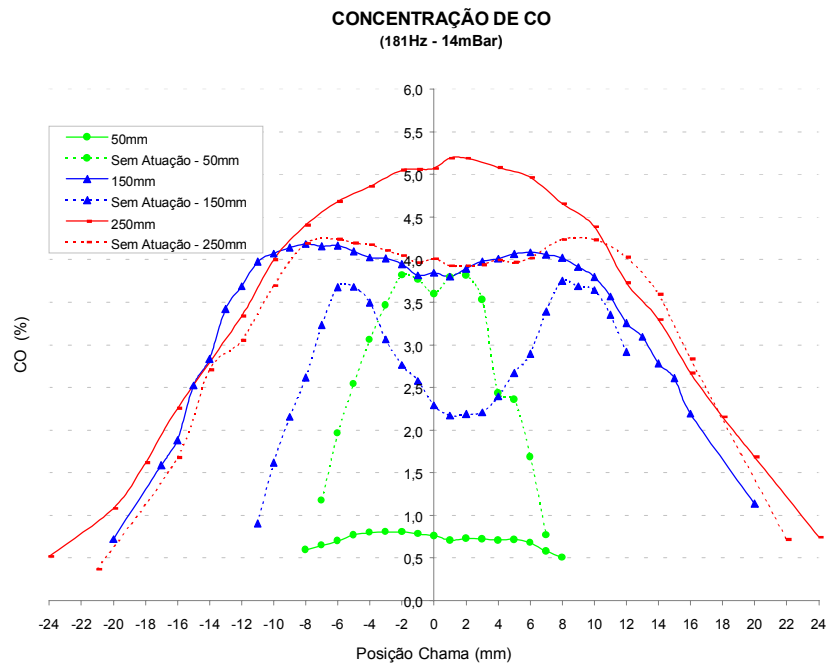


Figura 7. Distribuição radial da porcentagem volumétrica de CO.

O efeito de pré-mistura que o campo acústico propicia para a região mais próxima à saída do queimador acaba sugerindo um ambiente mais favorável à formação do NO, ou seja, temperatura elevada e disponibilidade de oxigênio.

Para 150 mm e 250 mm, nota-se que o campo acústico também altera a presença do NO na chama. Quando não há atuação a máxima concentração de NO ocorre na fronteira de chama, decaindo tanto para o lado interno como para o externo desta. Quando a atuação é imposta, os pontos de máximo são suavizados e a concentração de NO fica mais bem distribuída radialmente.

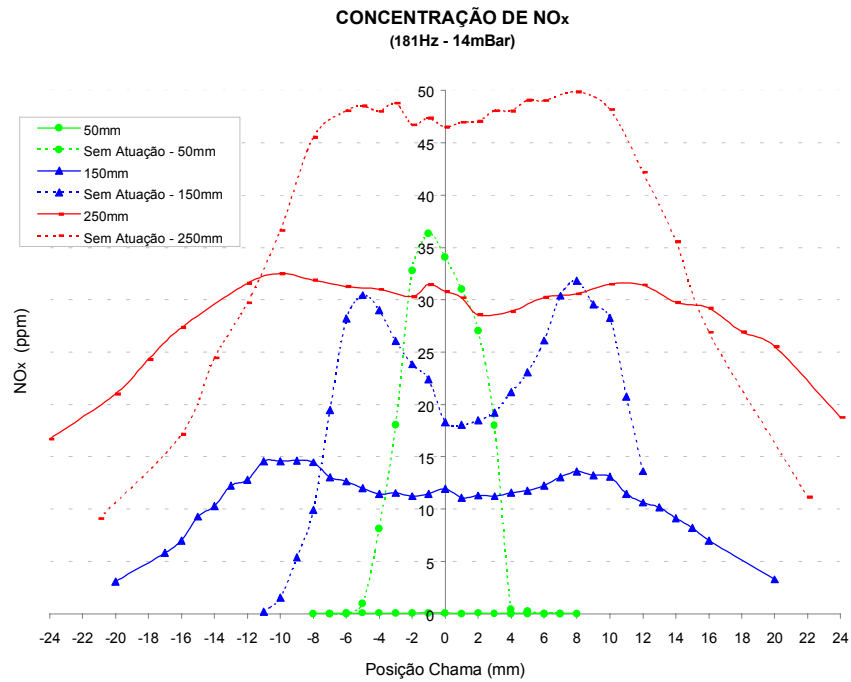


Figura 8. Distribuição radial da porcentagem volumétrica de NO.

Apesar das observações sobre a Figura 8, não é possível com esses resultados prever se a atuação acústica aumenta ou diminui o total de NO emitido, pois, como a combustão não é confinada em uma câmara, não foi possível avaliar a emissão global.

3.4 Comprimento da Chama

Adotou-se como o final da chama o ponto onde a concentração de CO atingiu o valor da sensibilidade do analisador de gás (0,01%) no eixo de centro do queimador, admitindo que esse é o ponto final da combustão. A Figura 12 apresenta o comprimento de chama para atuação acústica de 181Hz e diferentes amplitudes. Observa-se que o aumento da amplitude diminui o comprimento da chama.

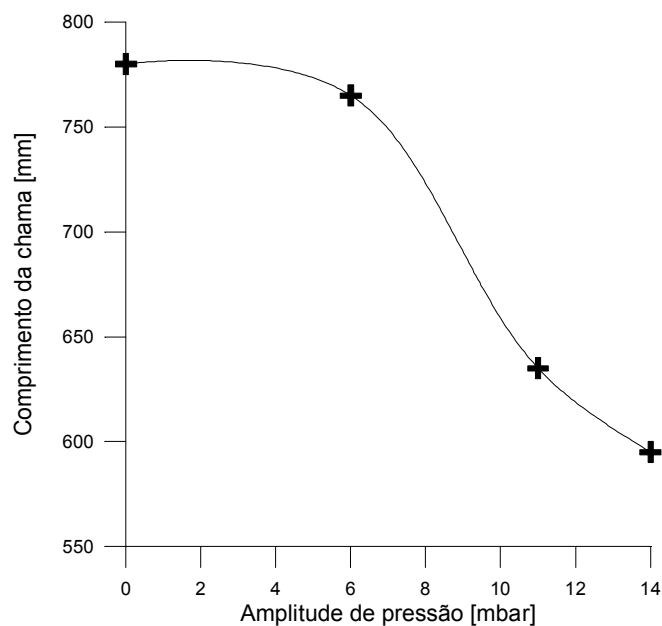


Figura 12. Comprimento da chama com a atuação acústica.

4 CONCLUSÃO

No presente trabalho realizou-se uma investigação experimental sobre a influência do campo acústico na combustão de um queimador de gás natural do tipo jato circular de combustível. Os resultados apontaram mudanças significativas na chama, destaca-se: regiões de pré-mistura, coloração azulada, menor comprimento e alteração nas regiões de formação de NO, que é um poluente altamente combatido. De uma forma geral, observou-se que a atuação acústica e, como consequência, a combustão pulsante pode ser um forte aliado para o controle das condições de combustão se que se precise alterar as vazões de ar ou combustível.

Agradecimentos

Para Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, através do projeto 02/12802-0, e ao Laboratório de Combustão e Propulsão do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, pelo suporte aos experimentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 FLÜGEL, A.D., FERREIRA, D.S., ARAUJO, A.M.R., LACAVA, P.T., CARVALHO JR., J.A., FERREIRA, M.A. Avaliação experimental de diferentes configurações para queimadores pulsantes, 10th BRAZILIAN CONGRESS OF THERMAL ENGINEERING AND SCIENCE, 2004, Rio de Janeiro. Anais...Rio de Janeiro: ABCM, 2004. 1-CD.
- 2 LEFEBVRE, A. H. **Gas Turbine Combustion**, Taylor & Francis, New York, 1983.
- 3 ZINN, B.T. Pulsating combustion, In: **Advanced Combustion Methods**, ed. F.J.Weinberg, Academic Press, pp. 113-181, 1986.
- 4 ZINN, B.T. Pulse combustion applications: past, present and future, in **Unsteady Applied Sciences** -Vol. 306., Klumer Academic Publishers, pp.113 – 137, 1996.

DEVELOPMENT OF NATURAL GAS BURNER WITH ACOUSTIC ACTUATION

*Ana Maura Araujo Rocha
Pedro Teixeira Lacava
João Andrade de Carvalho Junior*

Abstract

Pulsating combustion has won interest in current researches due the indications its application in energy generation can offer several advantages, such as: fuel economy, low pollutants emissions, and increase on the convective heat transfer rate. Pulsating combustion is also an interesting technique to control the combustion conditions for several industrial applications. Therefore, the present paper shows experimental results for a natural gas circular jet burner operating at pulsating and non-pulsating modes. The presence of an acoustic actuation changes drastically the flame structure, and some observations could be done: 1) considerable amplitudes of oscillation could be reached at burner natural frequencies, but a hydrogen pilot flame is necessary to held the flame close to burner; 2) the premixed condition is established in some flame regions where the acoustic field is more intense; 3) the pulsating changed the axial and radial evolutions of hydrocarbon combustion and NO formation mechanism; 4) the increase on oscillation amplitude reduces the flame length.

Key-words: Pulsating combustion; Pulsed burner; Natural gas combustion.