



## **EFEITO DA FREQUÊNCIA E DA AMPLITUDE DE OSCILAÇÃO NO FORMATO DE CHAMAS PRÉ-MISTURADAS PULSADAS**

### **Pedro Teixeira Lacava**

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Divisão de Engenharia Aeronáutica  
Depto de Propulsão, Pç. Mal. Eduardo Gomes, 50, 12228-900 - São José dos Campos, SP,  
Brasil, lacava@lcp.inpe.br

### **Daniel Silva Ferreira**

### **João Andrade de Carvalho Jr.**

Universidade Estadual Paulista, Campus de Guaratinguetá, Depto. de Energia  
Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333, 12500-000 – Guaratinguetá, SP, Brasil  
daniel@lcp.inpe.br, joao@feg.unesp.br

### **Armando Caldeira Pires**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
Laboratório Associado de Combustão e Propulsão, Rod. Presidente Dutra km 40, 12700-000  
Cachoeira Paulista, SP, Brasil, armando@dem.ist.utl.pt

**Resumo.** *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 e escória, aumentos da taxa de transferência de calor convectiva e investimento reduzido quando comparado com técnicas convencionais. No entanto, os sistemas de combustão pulsados onde o próprio processo de combustão induz a oscilação acústica, em geral, são operacionalmente instáveis e pouco atrativos para aplicações industriais. Desta forma, o futuro das chamas pulsadas parece estar em processos onde a oscilação é induzida por meios externos, como por exemplo por meio de um alto-falante. O presente trabalho apresenta o efeito da amplitude e frequência no formato de uma chama pré-misturada de GLP. A mistura é excitada acusticamente antes da saída do queimador, através de um alto-falante estrategicamente posicionado, e a visualização da chama é feita por uma câmera CCD. A imagem obtida passa por um processo de reconstrução tomográfica algébrical. Os resultados apontam que a amplitude tem influência no comprimento da chama para baixas frequências, já a frequência altera completamente a estrutura da zona de recirculação a jusante do queimador.*

**Palavras-chave:** *Combustão Pulsante, Tomografia de Chama.*

## **1. INTRODUÇÃO**

A presença de escoamentos pulsados em processos de combustão tem ganho especial interesse nas últimas décadas por proporcionar vantagens sobre os processos de combustão

convencionais. Entre elas pode-se destacar: economia de combustível, maior produtividade, redução na emissão de poluentes, aumento da taxas de transferência de calor convectiva e investimento de capital reduzido comparado-se 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 (pressão, temperatura, etc...), que descrevem as condições na zona de queima, ocorrerem sob condições oscilatórias, isto é, mudando periodicamente com tempo (Zinn, 1986). Já nos processos de combustão convencionais, não há correlações entre as flutuações existentes em um determinado ponto da câmara de combustão e as flutuações de outro ponto, com exceção da própria estrutura turbulenta presente (Libby e William, 1994). Entretanto, para chamas pulsadas as correlações temporais ou espaciais são organizadas de tal forma que elevadas amplitudes são estabelecidas.

Com o avanço das pesquisas sobre o aperfeiçoamento da combustão pulsante surgiram evidências de suas vantagens através de alguns trabalhos, como o de Hanby (1968), que, utilizando um modelo quase estacionário, demonstrou que a presença de oscilações aumenta os coeficientes convectivos de transferência de calor e promove elevadas eficiência térmicas. Pode-se concluir, então, que a combustão pulsante proporciona a construção de dispositivos de tamanho reduzido pois, para a transmissão de uma mesma quantidade de energia térmica os dispositivos pulsados necessitam de superfícies menores do que os não pulsados. Além disso, 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.

No controle da emissão de  $\text{NO}_x$ , a combustão pulsante destaca-se principalmente em operações com chamas pré-misturadas pobres em combustível, Glarborg (1993). Nesta condição, o caráter bem-misturado da chama proporciona uma distribuição de temperatura homogênea ao longo desta, não permitindo regiões de temperaturas elevadas, que levariam a uma maior formação de  $\text{NO}_x$ . Delabroy et al.(1996) observaram significativas reduções na emissão de  $\text{NO}_x$  na combustão pulsante de combustíveis líquidos em condições pobres. Tal resultado foi atribuído ao fato de que, além da distribuição de temperatura ser homogênea, a chama é encurtada devido a presença das oscilações, fazendo com que o tempo de permanência dos gases na chama diminua, o que favorece a redução da formação de  $\text{NO}_x$ .

Alguns combustores podem ser especialmente construídos de tal forma que o próprio processo de combustão é o responsável pelo surgimento das oscilações acústicas, como é o caso dos combustores tipo tubo de Rijke (Carvalho et al., 1989) e Helmholtz (Keller e Barr, 1996). Já para projetos convencionais de câmaras de combustão são necessários atuadores externos para induzir as oscilações, como por exemplo o uso de alto-falantes estrategicamente posicionados. Os atuadores externos também podem ser acoplados em câmaras onde a própria chama induz as oscilações, com intuito de amplificar ou atenuar o sinal (Botura, 1998), visto que esse tipo de câmara não permite grandes variações de amplitude e frequência.

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 utilizar as técnicas de visualização e tomografia de chama para caracterizar a influência da frequência e amplitude de oscilação na geometria de uma chama pré-misturada de GLP (gás liquefeito de petróleo) não confinada. A técnica de visualização tem a vantagem de ser um método que permite obter informações sem perturbar o fenômeno em estudo, pois não é intrusivo. Nas seções seguintes

são descritas a instalação experimental e a técnica de tratamento de imagem utilizada. Posteriormente são apresentados os resultados e as conclusões e comentários pertinentes ao trabalho.

## 2. MONTAGEM EXPERIMENTAL

O ensaios foram realizados nas dependências do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais de Cachoeira Paulista, SP. A Fig. 1 apresenta o esquema da montagem experimental utilizada para obtenção dos dados apresentados no presente trabalho. Tal montagem é composta pelo queimador e linha de gases (válvulas e instrumentos de medida de vazão), sistema de atuação acústica (gerador de função, amplificador, alto falante e transdutor de pressão) e sistema de aquisição de imagens (câmera CCD, lentes, filtros e placa de aquisição).

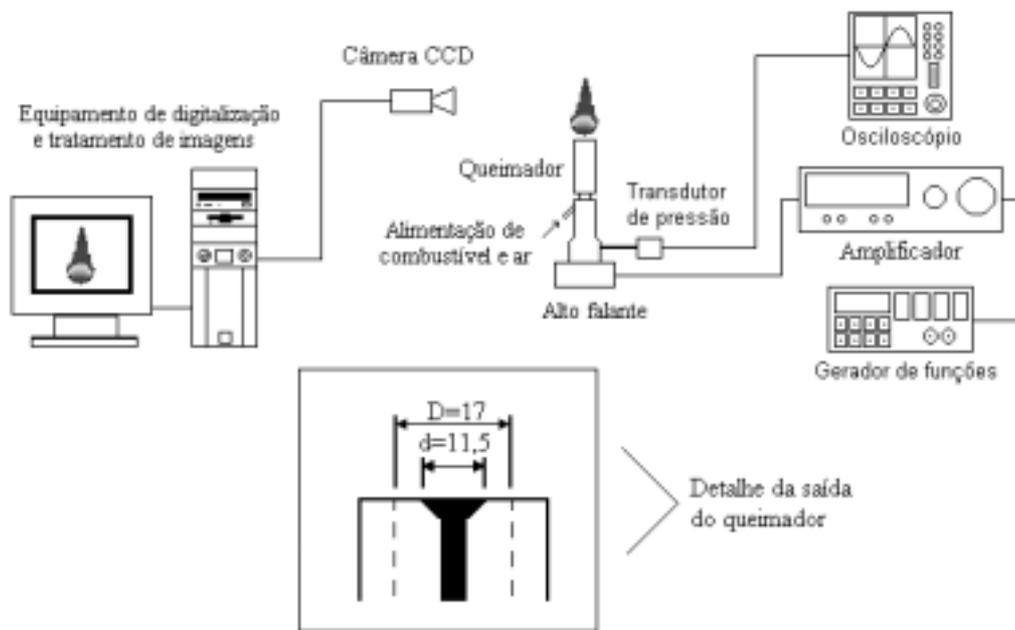


Figura 1 - Esquema do sistema utilizado

O combustível utilizado foi GLP (gás liquefeito de petróleo comercial), cuja composição é uma mistura de hidrocarbonetos leves, basicamente  $C_3$  e  $C_4$ , sendo que a composição média pode ser aproximada como  $C_{3,425}H_{7,824}$  (Ferreira, 1997). Para todos os resultados apresentados nesse trabalho, a vazão mássica de combustível foi de  $0,04\text{g/s}$  e a de ar  $0,9\text{g/s}$ , o que representa um excesso de oxidante de 44% em volume. A vazão de combustível foi medida por um sistema de placa de orifício e a de ar por um rotâmetro.

Os gases são misturados instantes antes de entrarem no queimador e, através de um alto-falante estrategicamente posicionado na base do mesmo, a mistura é excitada acusticamente. Tal queimador possui um diâmetro interno de 17mm e em sua saída há um disco ancorador de chama com 11,5mm de diâmetro, conforme apresentado em detalhe na Fig. 1.

O sinal elétrico senoidal é obtido a partir do gerador de funções Hewlett-Packard, modelo HP8116A, onde é atribuída a frequência desejada no alto-falante. Em sequência, a amplitude do sinal é ajustada no amplificador Proximity, modelo 750AP (480W), antes de chegar no alto-falante Unipower S50, com potência de 50W e Impedância de 16 Ohms. Na

câmara do queimador está posicionado um transdutor de pressão piezoelétrico Kistler 7261, faixa de 0-10 mbar, que é responsável conversão do sinal de pressão acústica em sinal elétrico. O sinal de tensão do transdutor passa por um amplificador de carga Kistler 5006 e é lido em um osciloscópio Tektronix 7633.

A visualização da chama foi feita por meio de uma câmera CCD Marshall V-1070-EIA, com resolução espectral de 400 a 1100nm, acoplada a uma lente Marshall V-4906R, f/1.2, para visualização de toda chama, ou uma lente Fujinon CF50B, f/1.4, para detalhar a região de recirculação da chama. Em alguns ensaios foram utilizados filtros Melles-Griot de comprimento de onda 431 e 516 nm, que identificam os compostos CH e C<sub>2</sub>, respectivamente. As imagens adquiridas pela câmara foram digitalizadas numa placa de aquisição "frame grabber" com capacidade de taxa de aquisição de até 42Mb/s, instalada em um computador PC-Pentium 133MHz, 32Mb de memória RAM, com placa aceleradora Matrox Millenium com Mb. O programa de aquisição foi desenvolvido em ambiente de programação específico para a frame grabber, que permite obter a imagem resultante da média de um determinado número de imagens adquiridas. Todos resultados apresentados no presente trabalho são a imagem média de 100 imagens adquiridas para a situação em estudo.

### 3. TOMOGRAFIA DE CHAMA

A equação clássica para reconstituição de objetos é uma simplificação da transformada inversa de Randon para simetria axial, conhecida como transformada inversa de Abel, dada pela Eq. 1.

$$F(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^{\infty} \frac{\partial P(p)}{\partial p} (p^2 - r^2)^{-1/2} dp \quad (1)$$

Visto que a função de projeção  $P(p)$  das imagens obtidas pela câmara CCD não é conhecida, a determinação da transformada de Abel impõe o cálculo numérico de uma integral e de uma derivada. Para o caso de imagens de chamas, a função de reconstrução  $F(r)$  representa a emissão local da radiação térmica, correspondendo proporcionalmente às concentrações de radicais na chama. A Fig. 2 representa o problema de reconstituição axissimétrica da chama.

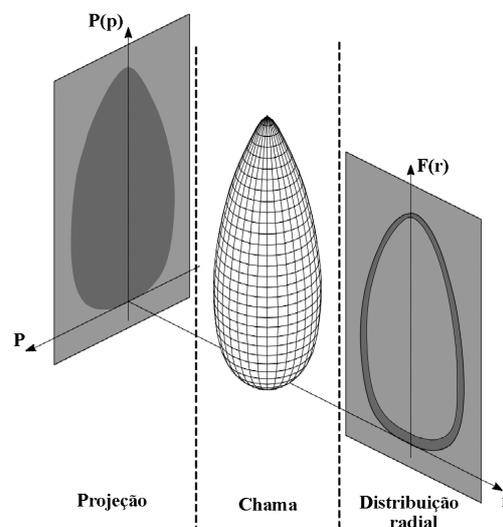


Figura 2 - Reconstituição axissimétrica da chama

A aplicação direta da transformada de Abel produz erros devido ao cálculo numérico da integral e da derivada. Mesmo com aplicação de soluções como a de Nestor-Olsen e de Barr, para melhorar o resultado da solução numérica, a qualidade do resultado final ainda fica muito distante do desejado (Correia et al.,1998). Para ultrapassar essas restrições, a aplicação da técnicas de reconstrução algébrica apresenta melhor resultado. Desta forma, para o presente trabalho, utilizou-se o algoritmo desenvolvido por Souza (1998) que aplica a técnica de reconstrução algébrica para sistemas axissimétricos. Tal algoritmo foi desenvolvido em ambiente MATLAB e considera que cada pixel da câmara CCD integra a radiação emitida pela chama a partir de um caminho ótico conhecido, sendo que, de uma forma simplificada, considera que o CCD tem suas dimensões na mesma ordem de grandeza do objeto observado. Maiores detalhes sobre o algoritmo podem ser encontrado no próprio trabalho de Souza (1998) e no trabalho de Costa et al.(1998).

#### 4. RESULTADOS

A Fig.3 apresenta as imagens referentes a condição de ensaio sem atuação acústica. Percebe-se, através da imagem a), que a região de intensidade luminosa máxima localiza-se logo a jusante do queimador, até aproximadamente  $2d$  (onde  $d$  representa o diâmetro do externo do queimador, 17mm). Através do acoplamento de filtros de diversos comprimentos de onda no sistema óptico, foi possível observar que esta região é caracterizada por elevada emissão nos comprimentos de onda 431 e 516nm, correspondentes aos radicais CH e  $C_2$ , respectivamente. Tais radicais são predominantes na região de frente de chama, onde ocorre a maioria das reações intermediárias de oxidação dos hidrocarbonetos.

Apesar das imagens das projeções integradas apontarem que a predominância das reações químicas ocorrem na região de recirculação, a imagem c) da Fig.3, que apresenta a reconstituição tomográfica da região próxima ao queimador, indica que, na verdade, a região de intensa reação química é um canal compreendido entre a região de recirculação e o jato da mistura gasosa que emerge do queimador e o ar atmosférico carregado.

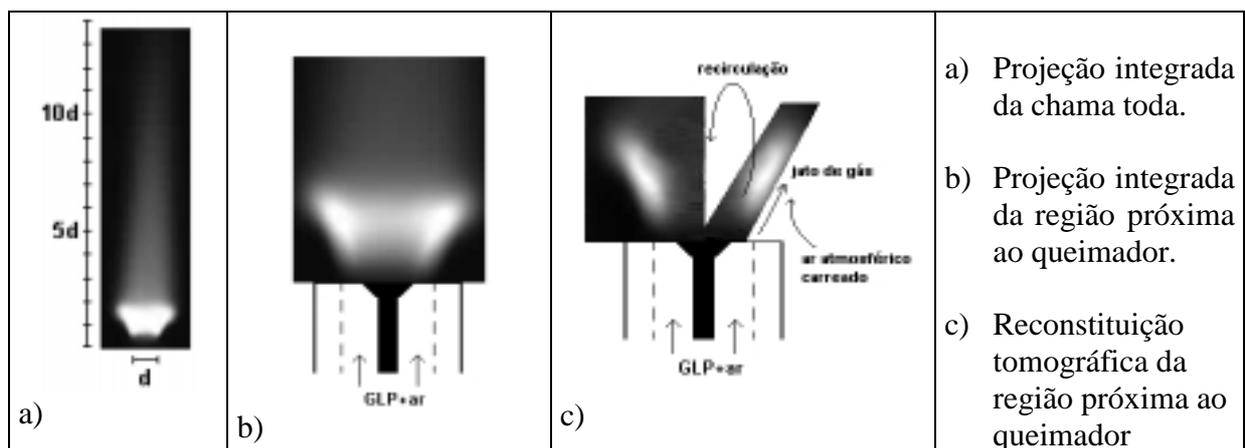


Figura 3: Imagens obtidas para chama sem atuação acústica. A imagem da projeção integrada da chama inteira foi obtida usando a lente marshal com metade de sua abertura, tempo de exposição de 1/1000 seg e distância lente/queimador = 550mm. Para as imagens da região próxima ao queimador utilizou-se a lente Fujinon, abertura f/22, tempo de exposição de 1/60 seg e distância lente/queimador = 1000mm.

A Fig.4 apresenta as projeções integradas entre 400 e 1100nm, abrangendo a região do visível e do infravermelho próximo, para chama pulsadas com frequências de 100 e 400Hz e amplitudes de 5, 10 e 15mbar (sendo este último valor típico de câmaras de combustão pulsantes tipo tubo de Rijke, Lacava et al.(1997) e Martins (1998)). Observa-se que para a frequência de 100Hz a chama sofre uma compactação com o aumento da amplitude, fazendo com que a região de reação química restrinja-se a uma “nuvem” a jusante da saída do queimador, para a amplitude de oscilação de 15mbar. A medida que aumenta-se a amplitude, a região de intensa reação deixa de ser uma estreita faixa, como no caso onde não há atuação acústica, e contrai-se para o interior da região de recirculação, como pode ser observado na Fig.5, que apresenta a reconstituição tomográfica da região de recirculação para as condições de oscilação das imagens da Fig.4.

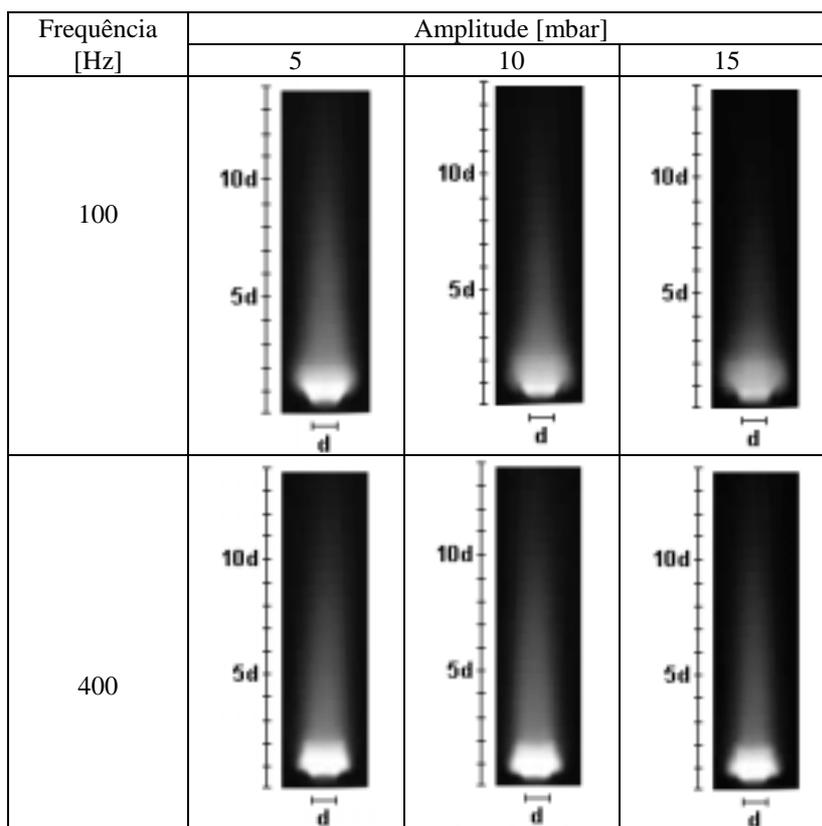


Figura .4 – Imagens das projeções integradas da chama inteira para as frequências de 100 e 400Hz e amplitudes de 5, 10 e 15mbar. Sistema ótico: câmera CCD, lente marshal com metade de sua abertura, imagens médias de 100 imagens adquiridas entre 400 e 1100nm, tempo de exposição de 1/1000 seg e distância lente/queimador = 550mm.

Um comportamento semelhante ao descrito foi observado para a frequência de 200Hz. No entanto, para as frequências acima de 300Hz (até 1600Hz) os resultados da presente técnica de diagnóstico mostraram que há apenas uma sensível redução no comprimento da chama com aumento da amplitude até 15mbar. As figuras 4 e 5 também apresentam as projeções integradas e as reconstituições tomográficas da região de recirculação das imagens obtidas para 400Hz. A geometria da região de intensa reação química para essa frequência parece não se alterar com o aumento da amplitude. No entanto, apresenta uma geometria completamente diferente das imagens apresentadas para o caso sem atuação acústica e para 100Hz. Desta forma, essa região parece ser muito mais afetada pela variação da frequência do que pela amplitude, para oscilações com frequência acima de 300Hz.

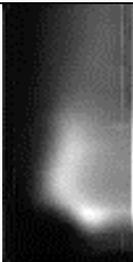
Frequência [Hz]	Amplitude [mbar]		
	5	10	15
100			
400			

Fig.5 – Imagens resultantes da reconstituição tomográfica da região de recirculação para as frequências de 100 e 400Hz e amplitudes de 5, 10 e 15mbar. Sistema óptico: câmera CCD, lente Fujinon, abertura f/22, imagens médias de 100 imagens adquiridas entre 400 e 1100nm, tempo de exposição de 1/1000 seg e distância lente/queimador = 1000mm.

Para observar o efeito da frequência na região de intensa reação, realizou-se ensaios onde a amplitude foi mantida em 15mbar e variou-se a frequência de oscilação. A Fig.6 apresenta as imagens das projeções integradas para esses ensaios e a Fig.7 as imagens resultantes da reconstituição tomográfica da região próxima à saída do queimador. Observa-se que o aumento da frequência, a partir da condição sem atuação acústica, causa uma contração do canal de máxima intensidade luminosa, que corresponde a região das reações de oxidação, até aproximadamente a frequência de 900Hz. Além disso, há uma dispersão da região luminosa mostrando que parte das reações passam a ocorrer próximo a base do queimador. Tal fato possivelmente ocorre devido à contração da região de recirculação com o aumento da frequência.

Quando a frequência atinge 1000Hz, novamente estabelece-se um canal de intensidade luminosa bem definido. A partir desse ponto, com o aumento da frequência, a parte superior do canal luminoso começa a dobrar-se para fora, ao mesmo tempo que o canal continua contraindo-se. No entanto, quando atinge-se 1500Hz a contração do canal acaba por gerar uma região de reação circular a jusante do disco ancorador de chama. Em 1600Hz a contração da região de recirculação rompe a estrutura circular de reação e a chama permanece totalmente ancorada sobre o disco fuzilado.

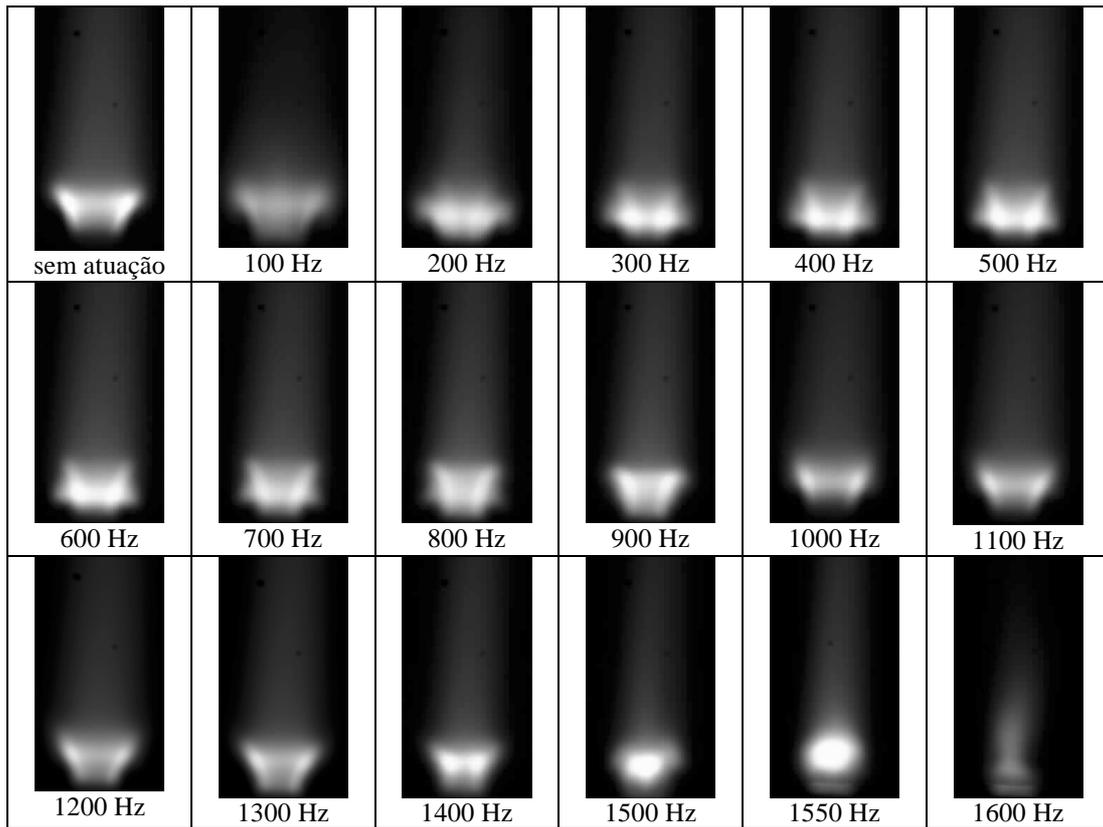


Figura 6 – Imagens das projeções integradas da região de saída do queimador para amplitude de 15mbar e diversas frequências. Sistema óptico: Sistema óptico: câmera CCD, lente Fujinon, abertura f/22, tempo de exposição de 1/1000 seg e distância lente/queimador = 1000mm..

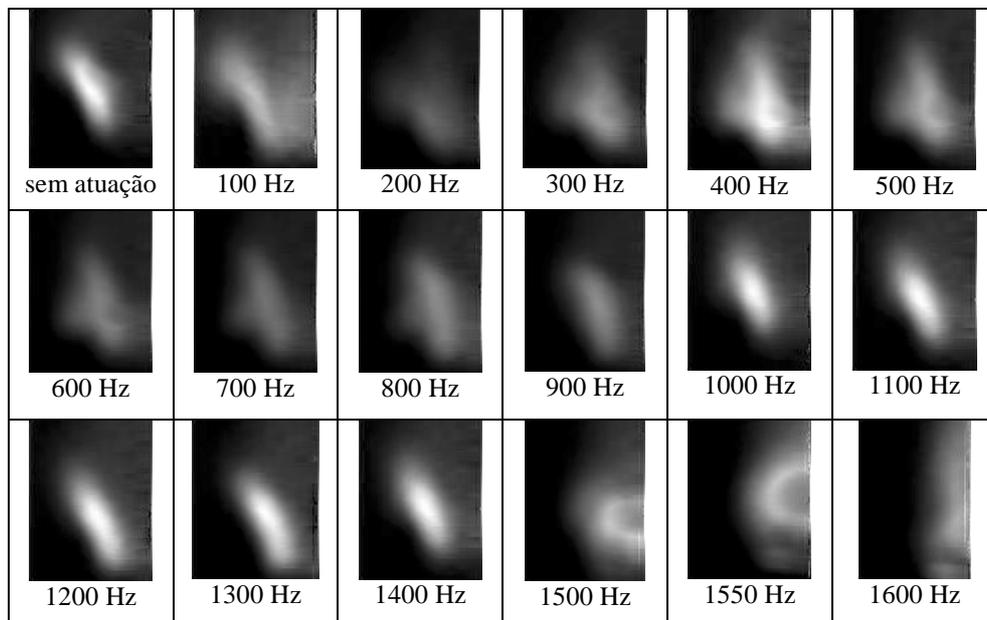


Figura 7 – Reconstrução tomográfica da região de recirculação das imagens da Fig. 7

## 5. CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS

O presente trabalho refere-se a análise da influência do processo de atuação acústica em uma chama pré-misturada não confinada de GLP com ar. Para tal análise foi utilizada a técnica de visualização da chama com câmeras CCD e posterior reconstituição tomográfica da chama. A técnica de visualização é bastante oportuna, em virtude de não ser intrusiva, ou seja, não interfere no fenômeno.

A montagem experimental utilizada permitiu a variação da frequência e da amplitude de oscilação de maneira independente. Desta forma, foi possível, para uma determinada frequência, trabalhar com diversas amplitudes, ou vice-versa. Assim, foi observado o efeito de ambos parâmetros na chama independentemente.

Os resultados apontam que para as frequências de até aproximadamente 200Hz a amplitude exerce grande influência no comprimento da chama e na região de recirculação da mesma. No entanto, para frequências acima desse valor, a amplitude tem uma influência mais discreta na estrutura da chama, possivelmente pela maior interação entre o escoamento pulsado, que emerge do queimador, e zona de recirculação a jusante do disco ancorador de chama.

A estrutura da chama é bastante sensível à frequência de oscilação, o que acaba por influenciar todo processo de combustão, visto que altera desde a região onde se desenvolve as reações químicas até, por exemplo, o tempo de permanência dos gases produtos de combustão na região de maior temperatura, o que afetará a emissão de poluentes como  $\text{NO}_x$ .

Como proposta de sequência desses ensaios, pretende-se trabalhar com chamas confinadas em uma câmara de combustão, onde será possível relacionar a distribuição de temperatura e emissão de gases ( $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  e UHC) com amplitude e frequência de oscilação. Desta forma, será possível determinar em que condições de atuação acústica ocorrem as melhores taxas de mistura e a minimização da emissão de poluentes.

A técnica de visualização de chama mostrou-se uma ferramenta útil para análise de processos de combustão pulsados, sendo possível explorá-la com maior intensidade, como por exemplo, utilizando filtros de comprimento de onda correspondentes a radicais químicos. Assim, informações quanto ao processo de cinética química e região de presença de um determinado radical na chama poderão ser obtidos.

## REFERÊNCIAS

- Botura, C.A., 1998, Estudo e projeto de um controlador usando lógica difusa aplicada ao controle ativo de um combustor tipo tubo de Rijke, (Dissertação de Mestrado), Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá - UNESP,, Guaratinguetá.
- Carvalho, J.A. Jr., Ferreira, M.A., Bressan C., Ferreira, J.L.G., 1989, Definition of heater location to drive maximum amplitude acoustic oscillations in a Rijke tube, *Combustion and Flame*, 76:17-27.
- Correia, D.P., Caldeira-Pires, A., Ferrão, P., 1998, 3D Flame Temperature measurements using a combined Tomography/radiation-extinction-model technique, submetido a *Combustion Flame*.
- Costa, F.A., Caldeira-Pires, A., Anacleto, P., Carvalho Jr, J.A., 1998, Análise de chamas por tomografia: caracterização de turbinas a gás LPP, VII Encontro Nacional de Ciências Térmicas, Rio de Janeiro, Brasil.
- Delabroy, O., Lacas, F., Poinot, T., Candel, S., Hoffmann, T., Hermann, J., Gleis, S. and Vortmeyer, D., 1996, A study of  $\text{NO}_x$  reduction by acoustic excitation in a liquid fueled burner, *Combustion Science and Technology*, 119:397-408.

- Ferreira, M.A., 1997, Abordagem teórica e experimental de combustores do tipo Rijke, (Tese de Doutorado), Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá - UNESP,, Guaratinguetá.
- Glarborg, P., 1993, NO<sub>x</sub> Chemistry in Pulse Combustion, Workshop in Pulsating Combustion and its Applications, Keynote Lecture C, Lund Institute of Technology, Sweden, August 2-5.
- Hanby, V.I.,1968, Convective heat transfer in a gas-fired pulsating combustor, J. of Eng. For Prop. And Power, Paper No. 68-WA/FU-T, Transactions of ASME, pp.1-5.
- Kekker, J. O. and Barr, P.K., 1996, Premixed Combustion in a Periodic Flow field, in: Unsteady Combustion, Edited by F. Culick et al, Klumer Academic Publishers.
- Lacava, P.T., Carvalho, J.A. and Mcquay, M.Q., 1997, Pulsating combustion characteristics of a spray flame in a Rijke tube with two different atomizers, Fuel, 76(9): 845-851.
- Lefebvre, A. H., 1983, Gas Turbine Combustion, Taylor & Francis.
- Libby, P.A. and Williams, F.A., 1994, Turbulent Reacting Flows, Academic Press, New York.
- Martins, C.A., 1998, Taxas de NO<sub>x</sub> em Combustor Pulsante Tipo de Rijke Operando com Combustível Gasoso, (Dissertação de Mestrado) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE - LCP, Cachoeira Paulista.
- Souza, N., 1998, Processamento de imagem tomográfico, (Dissertação de Mestrado) - Instituto Superior Técnico, IST, Lisboa, Portugal.
- Zinn, B.T.,1986, Pulsating combustion. In: Advanced Combustion Methods, ed. F.J.Weinberg, Academic Press, pp. 113-181.
- Zinn, B. T., 1996, Pulse combustion applications: past, present and future, in Unsteady Applied Sciences-Vol. 306., Klumer Academic Publishers, pp.113 - 137.

## **Agradecimentos**

Este trabalho teve apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, através do projeto Sistema de Análise Não-Intrusiva de Chama”/FAPESP 96/10310-0<sup>A</sup>, além do apoio do Laboratório Associado de Combustão e Propulsão do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, de Cachoeira Paulista.

***Summary.** The pulsating combustion has won interest in the current researches due to the indications that its application in the energy generation can offers several advantages, such as: fuel economy, reduced pollutants formation, increases the rate of convective heat transfer and reduced investment when compared with conventional techniques. However, the pulsating combustion systems where the own combustion process induces the acoustic oscillation, in general, they are operationally unstable and are not very attractive for industrial applications. This way, the future of pulsating flames can be in processes where the oscillation is induced by external means, for example by a speaker. The present work presents the effect of the amplitude and frequency in the format of a pre-mixed flame of LGP. The mixture is excited acoustically before the burner exit, through a speaker positioned strategically, and the flame visualization was made by a camera CCD. Then, a tomographic reconstruction process is applied in the obtained images, where the integral of the investment of Abel is applied. The results show that the amplitude has influence in the length of the flame, for low frequencies. By the way, the frequency alters completely the structure of the recirculation zone at the gas exit of the burner.*