

**CARACTERÍSTICAS DE CHAMAS PULSANTES DIFUSIVAS LIVRES****Vitória Oliveira Hirth Bastos**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Laboratório Associado de Combustão e Propulsão, Rod. Presidente Dutra, km 40, Cachoeira Paulista – SP, 12700-00  
vitoriahb@zipmail.com.br

**Pedro Teixeira Lacava**

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Divisão de Engenharia Aeronáutica, Pça. Mal. Eduardo Gomes, 50, Vila das Acácias, São José dos Campos, 12228-9000  
lacava@aer.ita.br

**Marco Aurélio Ferreira**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Laboratório Associado de Combustão e Propulsão, Rod. Presidente Dutra, km 40, Cachoeira Paulista – SP, 12700-00

**João Andrade de Carvalho Jr.**

Universidade Estadual Paulista, Campus de Guaratinguetá, Departamento de Energia, Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333, Guaratinguetá – SP, CEP: 12500-000  
joao@feg.unesp.br

**Resumo.** *No presente trabalho, foram estudadas as características de chamas pulsantes difusivas livres, utilizando como combustível o gás liquefeito de petróleo (GLP). Para conseguir o regime pulsado, um alto-falante foi estrategicamente adaptado na base do queimador. Vários estudos anteriores indicaram as vantagens dos sistemas de combustão pulsados, porém a implementação desses sistemas em larga escala depende do melhor entendimento do complexo acoplamento de vários parâmetros controladores e fenômenos envolvidos, especialmente na interação direta com uma chama. Assim, no presente trabalho foram realizadas as seguintes etapas: a) caracterização das faixas de amplitude e frequência onde ocorre a estabilização da chama; b) utilização sistema de tomografia de chama para estudar a geometria da chama e a região de presença de alguns radicais químicos de acordo com a variação da amplitude e da frequência; c) realização medidas das emissões de  $NO_x$  para diferentes condições de trabalho. Observou-se que a combustão pulsante altera substancialmente a estrutura da chama. Em alguns casos, a chama outrora amarela tornou-se azul, indicando uma melhor taxa de mistura entre combustível e oxidante, diminuindo as quantidades geradas de fuligem. Por outro lado, o aumento da temperatura na região de mistura e combustão aumentaram as concentrações formadas de  $NO_x$ , o que foi explicado pelos maiores picos de temperatura obtidos no processo pulsante.*

**Palavras chave:** *combustão pulsante,  $NO_x$ , emissão de poluentes, tomografia de chama.*

**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 e escória, aumento nas taxas de transferência de calor convectiva e investimento de capital reduzido com técnicas convencionais. 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.

Em 1777, Byron Higgins (citado por Wood, 1966; Tyndall, 1970; Zinn, 1986) relatou o primeiro exemplo de combustão pulsante, a chama musical ou cantante, que nada mais é do que uma chama ancorada em queimador de hidrogênio instalado dentro de um tubo, gerando um som de considerável amplitude devido à excitação do modo acústico fundamental ou de um dos harmônicos do tubo. Sua ocorrência depende das características do queimador, da chama e do tubo.

Apesar deste fenômeno já ser conhecido desde o século dezoito, as primeiras tentativas conhecidas para proveito do processo de combustão pulsante só ocorreram na virada do século XX, influenciadas pelo desenvolvimento prévio do motor de combustão interna. As primeiras aplicações foram na área de propulsão do motor aspirado e geração de potência por turbinas a gás (Foa, 1960). Com o avanço das pesquisas sobre o aperfeiçoamento da combustão pulsante surgiram evidências de suas vantagens através de alguns trabalhos, como o de Hanby (1969), 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 do aumento nas taxas de transferência de calor, outra característica típica desta tecnologia é a baixa emissão de poluentes. 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, resultando em uma maior eficiência do processo de combustão com pouca perda de combustível e baixas emissões de CO, fuligem, hidrocarbonetos não queimados e  $\text{NO}_x$  (Glarborg, 1993; Delabroy et al., 1996; Martins, 1998).

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, 1983). Já para projetos convencionais de câmaras de combustão é necessário atuadores externos para induzir as oscilações, como por exemplo o uso de alto-falantes estrategicamente posicionados (Dubey, 1998).

As pesquisas relacionadas com combustão pulsante ganharam destaque nas últimas décadas em função desse processo permitir maior aproveitamento de energia associado à possibilidade de menores taxas de emissão de poluentes. No Brasil, diversos trabalhos foram realizados em combustores pulsantes tipo tubo de Rijke, no Laboratório Associado de Combustão e Propulsão do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (LCP/INPE), de Cachoeira Paulista, através de pesquisas próprias (Carvalho et al., 1989; Ferreira and Carvalho, 1990; Torres et al., 1992), e através de colaboração internacional com o Instituto de Pesquisas Técnicas da Finlândia (Heiskanen et al., 1994) e com a Universidade de Brigham Young (Carvalho et al., 1997; Dubey et al., 1997; Lacava et al., 1997).

Os sistemas de combustão pulsados onde o próprio processo de combustão induz a oscilação acústica, em geral, são operacionalmente instáveis e permitem reduzidas variações de amplitude e frequência, o que os tornam pouco atrativos para aplicações industriais (Ferreira, 1997). 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 os resultados de experimentos conduzidos com intuito de associar as alterações em uma chama difusiva, induzidas pela presença do campo acústico, com a emissão de gases, sobretudo CO e  $\text{NO}_x$ . Os experimentos foram realizados em um queimador livre, ou seja, não confinado em uma câmara de combustão. O combustível utilizado foi o Gás Liquefeito de Petróleo (GLP). A atuação acústica foi feita por um alto falante estrategicamente posicionado no queimador, cujos detalhes são apresentados na próxima seção. Para entender como o campo acústico afeta a estrutura da chama e, conseqüentemente, as emissões gasosas, a técnica não intrusiva de tomografia de chama foi empregada. Desta forma, o objetivo fundamental do trabalho foi associar as imagens obtidas por esta técnica com a análise de gases em diferentes condições de oscilação.

## 2. Arranjo Experimental

As chamas estudadas no presente trabalho foram obtidas utilizando um queimador com 17 mm de diâmetro interno operando com 0,16 g/s de GLP. Na saída do canal de injeção de combustível foi posicionado um disco de 11,5 mm de diâmetro para ancorar a chama nas proximidades do queimador, conforme mostra a Fig. (1). A vazão mássica do GLP foi obtida através de um sistema de placa de orifício.

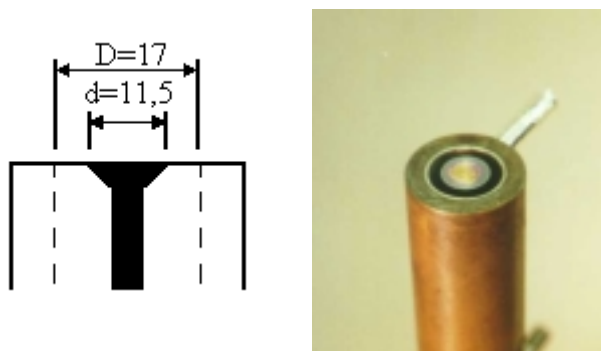


Figura 1. Esquema do queimador utilizado.

A chama difusiva resultante no queimador era excitada na corrente de GLP através de um alto-falante posicionado na base do queimador. A Fig. (2) mostra um esquema do sistema de atuação e leitura da pressão acústica. O sinal elétrico senoidal foi obtido a partir do gerador de funções Hewlett-Packard, modelo HP8116A, onde foi atribuída a frequência desejada no alto-falante. Em seguida, a amplitude do sinal foi ajustada no amplificador Proximity, modelo 750AT (480W), antes de chegar no alto-falante Keypass, com potência de 100W e impedância de 8 Ohms. No queimador foi posicionado um transdutor de pressão piezoelétrico Kistler modelo 7261, faixa de 0-10 bar, que é responsável pela 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 por 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 Fujinon CF50B, f/1.4. Em alguns ensaios foram utilizados filtros Melles-Griot de comprimento de onda 431 e 516 nm, que identificam os compostos CH e C2, 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.

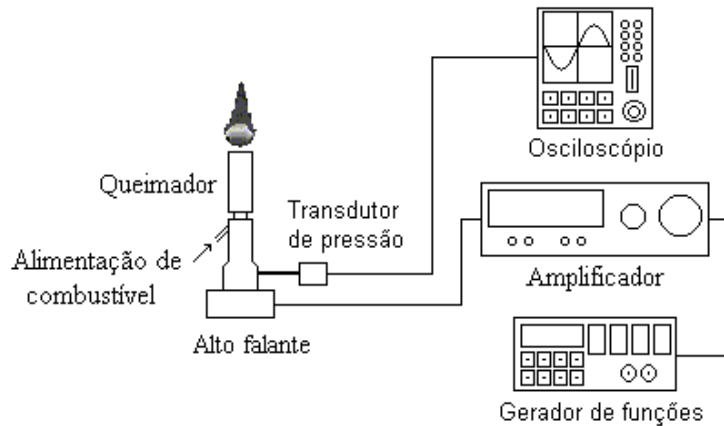


Figura 2. Esquema do sistema de atuação e leitura da pressão acústica.

O queimador foi instalado em um sistema do tipo “capela”, o que permitiu manter a condição de chama livre (sem efeito de parede), já que as dimensões da capela são bem maiores que as do queimador, e realizar a análise dos produtos de combustão em sua saída. A capela foi construída com chapas de aço galvanizada com espessura de 0,5 mm. Uma janela de vidro com espessura de 10 mm foi colocada para que a chama pudesse ser visualizada e desse acesso ao sistema ótico utilizado na tomografia. O interior da capela foi pintado de preto fosco para que não houvesse reflexos da chama no momento da coleta das imagens. Além de permitir a análise dos gases, esta montagem não permitiu que correntes de ar ambiente incidissem sobre a chama. A Fig. (3) apresenta um esquema desse dispositivo e as suas dimensões.

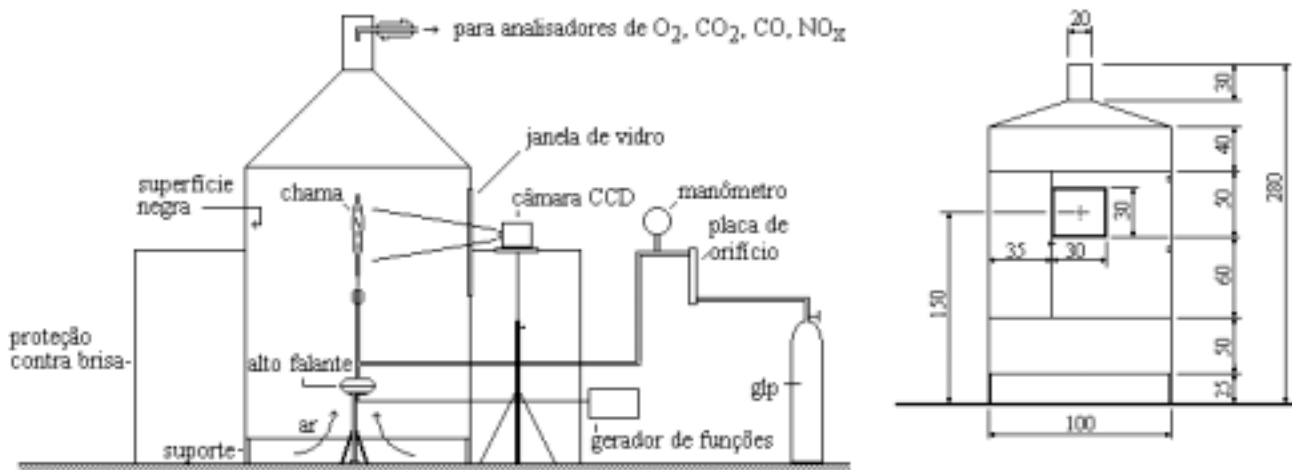


Figura 3. Dispositivo do tipo capela e suas dimensões em cm.

Os gases de combustão foram coletados por sucção contínua, através de uma sonda posicionada 30 cm abaixo da saída da chaminé da capela. A sonda foi construída em aço inoxidável, sendo o tubo para passagem dos gases com diâmetro de  $\frac{1}{4}$  de polegada. Ela foi posicionada horizontalmente na capela e sua extremidade interna foi dobrada em forma de “L” de modo que a abertura do tubo de passagem dos gases ficasse posicionada verticalmente, no eixo de centro da capela e na direção do fluxo de gasoso. Na mesma altura da sonda foi instalado um termopar tipo “K”, para se ter referência da temperatura onde estava sendo realizada a amostragem.

Os gases eram refrigerados ainda na sonda, trocando calor em contra corrente com água fria que escoava por uma jaqueta externa, também construída em aço inox. A refrigeração da sonda não é somente importante para a resistência térmica do material, como também para estancar as reações químicas no seu interior. Caso contrário, dependendo da temperatura, reações químicas podem ainda desenvolver no interior da linha de amostragem de gases tornando assim

os valores da análise não mais representativos. Por este motivo as reações devem ser interrompidas o mais próximo possível do ponto de amostragem.

A sucção era feita por uma bomba de vácuo e a amostra contínua passava por uma linha de tratamento antes de atingir os analisadores, onde particulados e água condensada eram retirados do fluxo gasoso. Desta forma, a análise dos gases era feita a 25°C e sem a presença de água, ou seja, em base seca.. Para a análise de CO e CO<sub>2</sub> foram utilizados analisadores tipo infravermelho, para O<sub>2</sub> o tipo termomagnético e para o NO<sub>x</sub> o tipo quimiluminescente.

O sistema de aquisição de dados utilizado é composto por uma placa de aquisição modelo AT-MIO 16E1, com velocidade de aquisição de 1,25 MS e com 16 canais de entrada analógicos e 2 canais de saída também analógicos. O sistema conta ainda com um sistema de condicionamento de sinais SCXI1000 para aquisição dos sinais de termopares, permitindo a multiplexação de um de entrada analógica para 32 canais para leitura de termopar. O programa de aquisição permite a leitura de 6 termopares e 4 analisadores de gases. No presente caso utilizou-se a leitura de 1 termopar e 4 analisadores (CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e O<sub>2</sub>), as condições de atuação acústica (amplitude e frequência) foram estabelecidas baseadas na leitura direta do osciloscópio. O sistema de aquisição de dados faz 30 leituras por minuto, sendo que cada leitura de temperatura é uma média de 20 pontos e as leituras dos analisadores são uma média de 50 pontos. Os dados adquiridos são salvos em formato de planilha eletrônica, permitindo desta forma fácil acesso.

### 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 as funções de projeção P(p) das imagens obtidas pela câmara CCD não são conhecidas, 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. (4) representa o problema de reconstituição axissimétrica da chama.

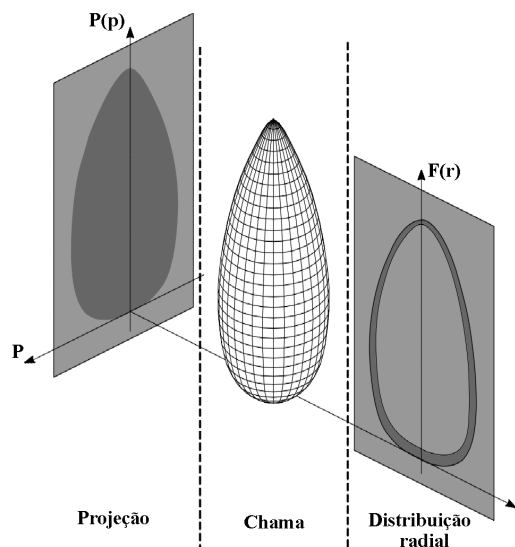


Figura 4. Reconstituição axissimétrica da chama

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. 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).

### 3. Resultados e discussões

Nesta seção são apresentados os resultados dos ensaios realizados na montagem experimental descrita anteriormente. A apresentação dos resultados é dividida em duas subseções; a primeira contém a análise visual das chamas estudadas e a segunda a análise dos gases de combustão na saída do dispositivo tipo “capela” onde o queimador é posicionado internamente.

Tanto para análise visual como para análise dos gases de combustão o procedimento experimental adotado foi o mesmo, ou seja, fixou-se a vazão de gás combustível em 0,16 g/s e atuou-se acusticamente de acordo com a condição desejada. Estabelecida esta condição realizou-se a coleta de dados. Para o caso da análise de gases, após as modificações na condição de ensaio, foi necessário um tempo de espera de 5 minutos para amostragem ser considerada satisfatória. Isso ocorre em virtude da distância entre o ponto de coleta dos gases e dos analisadores. O tempo de 5 minutos foi estabelecido através de verificações antes da realização dos ensaios.

#### 3.1. Análise visual das chamas

Além das imagens obtidas pela câmara CCD, conforme descrito anteriormnet, também foram obtidas imagens coloridas utilizando uma câmara digital comercial. Tal procedimento completa as informações das imagens obtidas pela câmara CCD, que passaram pelo tratamento tomográfico. A Fig. (5) mostra o exemplo de uma imagem resultante da média de 200 imagens capturadas pela câmara CCD e a sua respectiva e o resultado após o tratamento tomográfico.

Em muitas situações a apresentação da imagem monocromática não elucida adequadamente o gradiente de intensidade luminosa a que a CCD foi submetida. Isso ocorre pela falta de percepção da vista humana ou da falta de qualidade da impressão das imagens. Desta forma, para melhor apresentar esse gradiente, converteram-se as imagens monocromáticas em escala de cinza para uma escala de cores, conforme mostra a Figura (6), utilizando o software “Adobe Photoshop”.

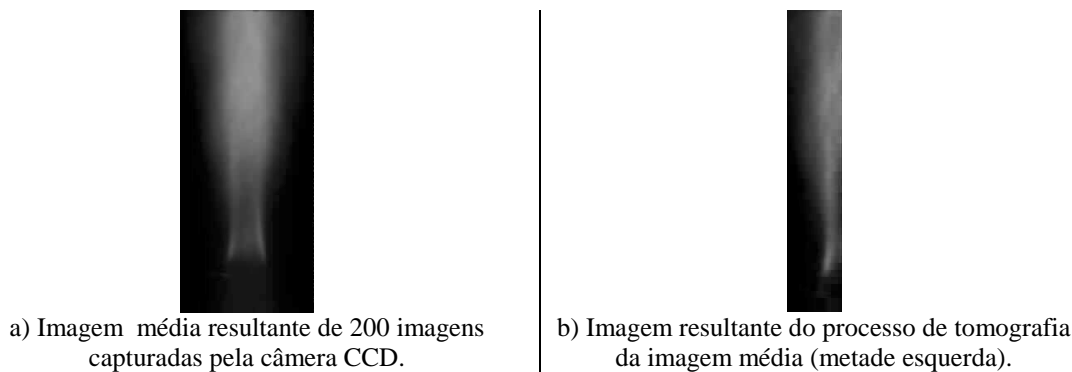


Figura 5. Exemplo do processo de tomografia de chama.

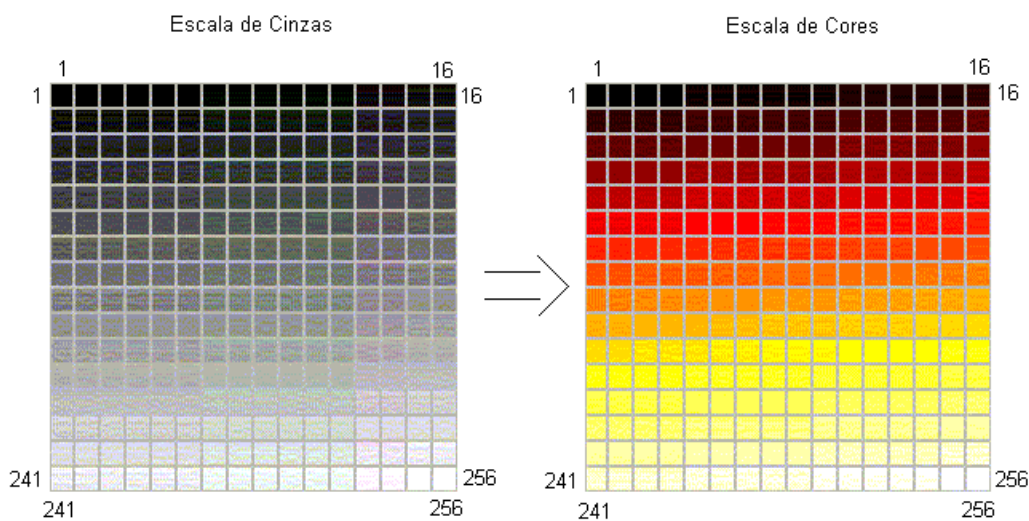


Figura 6. Conversão da escala de cinza para escala de cores.

Inicialmente foram realizados ensaios sem a colocação de filtros no sistema ótico (câmara CCD), ou seja as imagens foram obtidas para a resolução espectral entre 400nm e 1100nm. Fixou-se uma frequência no gerador de funções (para uma onda senoidal) e, através do amplificador, estabeleceu-se a amplitude de pressão acústica desejada, tomando como

referência a leitura do transdutor de pressão piezoelétrico posicionado na base do queimador. O aumento da amplitude foi feito até que se atingisse o limite de tensão suportado pelo alto-falante ou que a chama permanece ancorada. Para 200 e 300 Hz o limite de tensão do alto-falante foi de 30 mbar, para 400 Hz o limite foi de 40 mbar, em 500 Hz conseguiu-se 50 mbar de amplitude. A partir de 600 Hz o amplificador suportava uma tensão maior mas, em alguns casos a chama não permanecia ancorada o tempo necessário para se fazer tomografia ou coleta de gases. Com relação ao aumento de frequência, acima de 900 Hz não foi possível estabilizar a chama, mesmo para as amplitudes mais baixas como 10 mbar.

A Tab. (1) apresenta as imagens para condição sem atuação acústica e para as frequências de 200 Hz, 400Hz, 600Hz e 700 Hz. Os ensaios foram realizados para intervalos de 100 Hz, entre a condição sem atuação e 900 Hz; desta forma, a Tab. (1) resume apenas algumas das condições estudadas, sendo que para cada uma são apresentadas três imagens, a colorida, a reconstrução tomográfica monocromática e esta última convertida para escala de cores. Junto com as imagens são apresentados a abertura (A) e o tempo de exposição (T) utilizados na câmara CCD.

As imagens da Tab (1) mostram que atuação acústica afeta fundamentalmente a região da chama nas proximidades do queimador. O jato de gás emerge do queimador com uma velocidade média mais uma flutuação imposta pela presença do campo acústico. Esta aceleração e desaceleração do jato de gás na saída do queimador intensificam a mistura entre o combustível e o ar carregado. O comportamento de um jato de gás sem reação química submetido a pulsações e emergindo de um orifício foi estudado experimentalmente e através de um modelo numérico por Mallinson et al. (2001). Os resultados mostram que tanto a velocidade média como sua flutuação decaem à medida que o jato se distancia da saída do orifício; no entanto, o decaimento da flutuação de velocidade é muito mais intenso do que o da velocidade média para  $y/d_0 > 5$ , sendo  $y$  a distância axial a partir da saída do orifício e  $d_0$  o diâmetro do orifício. Transpondo as observações feitas Mallinson et al. para situação aqui estudada, pode-se dizer que as flutuações de velocidade ou de pressão são mais intensas na saída do queimador e afetam fortemente as condições de combustão; por outro lado, à medida que o jato de gás se distancia do queimador, ou seja, sofre uma desaceleração, as flutuações deixam de ser importantes e pouco afetam o desenrolar da combustão.

Para uma determinada frequência de oscilação o aumento da amplitude intensifica demasiadamente o comportamento descrito no parágrafo anterior, chegando inclusive a dar um caráter de chama pré-misturada nas proximidades da saída do queimador onde a coloração da chama começa a se tornar mais azulada. Para exemplificar este comentário, a Fig. (7) mostra o detalhe da região de saída do queimador em função amplitude de oscilação para a frequência de 500 Hz.

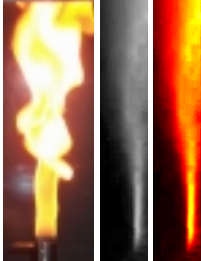
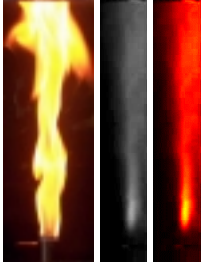
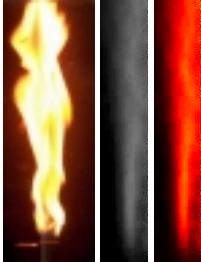
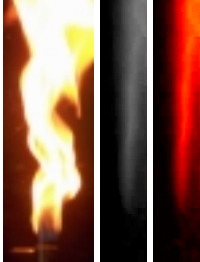
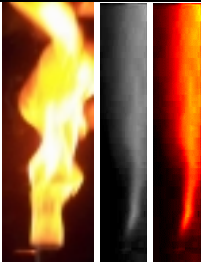
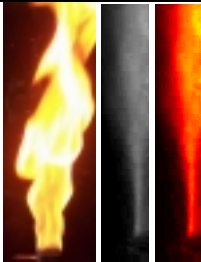
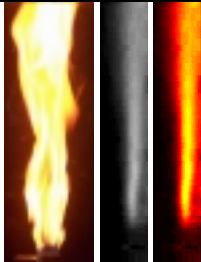
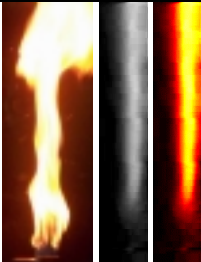
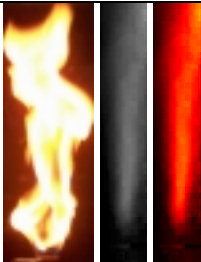
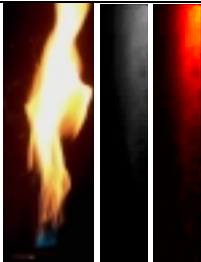
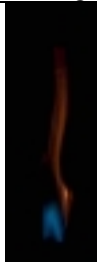
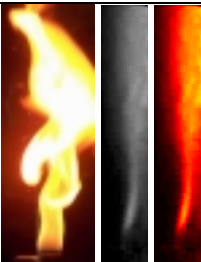
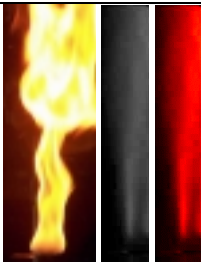
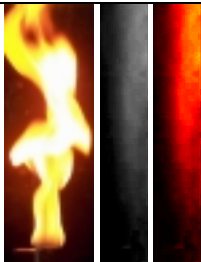
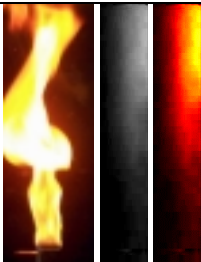
A maneira como a amplitude afeta a estrutura da chama também depende da frequência de oscilação imposta ao escoamento de gás. Para 600 Hz a estrutura da chama é bastante sensível à amplitude, em 30 mbar ela acaba quase que se resumindo a um cone azulado próximo a saída do queimador, semelhante a uma chama pré-misturada turbulenta, conforme apresenta as imagens da Tab. (1). Por outro lado, para acima de 700 Hz, o aumento da amplitude pouco afetou a estrutura.

A imagem resultante da tomografia de chama para condição sem atuação acústica apresentada na Tab. (1) mostra que a região de intensa reação química nas proximidades do queimador fica restrita à interface entre o jato de gás que emerge com o ar carregado. À medida que se distancia do queimador, ou seja, o jato de gás é desacelerado, a penetração de oxidante é facilitada e as reações químicas se distribuem ao longo da chama. Com exceção da combinação 600Hz e 30mbar, onde toda estrutura da chama é alterada pela presença do campo acústico, nas demais condições de oscilação investigadas no presente trabalho a região fortemente afetada pela presença do campo acústico corresponde às imediações do queimador, conforme já discutido anteriormente. Desta forma, a configuração da chama como uma estreita faixa de reação química para essa região acaba sendo modificada com a presença do campo acústico. Para exemplificar esta situação, a Fig. (8) apresenta uma análise sobre o comportamento da intensidade luminosa em um eixo horizontal deslocado cerca de 3 cm a jusante do queimador (Eixo x), para as reconstruções tomográficas das imagens das chamas sem atuação acústica e pulsações de 300Hz. A intensidade luminosa é apresentada em escala de cinza e a distância em relação ao eixo de simetria axial da imagem média através da numeração dos pixels da imagem, sendo que o eixo de simetria passa pelo eixo horizontal x no pixel 60.

A Fig. (8) mostra que mesmo com a atuação acústica continua existindo um pico localizado de intensidade luminosa ao longo do eixo horizontal, ou seja, ainda há um canal preferencial para as reações químicas que se desenvolvem nas imediações do queimador. Por outro lado, nota-se que as fronteiras dessa região preferencial vão se distanciando com o aumento da amplitude de oscilação, indicando que há uma intensificação da mistura entre os reagentes. Esse comportamento está de acordo com o que foi observado na Tab. (1), onde, através das imagens coloridas, observa-se o surgimento da coloração azulada na região da chama próxima à saída do queimador com o aumento da amplitude de oscilação, também indicando uma intensificação na taxa de mistura entre os reagentes.

Apesar das atuações acústicas afetarem principalmente a região próxima à saída do queimador, essa é uma região muito importante para uma série de fenômenos que se desenvolvem durante o processo de combustão. Um exemplo disso é a formação de fuligem, que na maioria das situações está associada às condições na zona primária da chama. A formação deste poluente está associada às reações de craqueamento dos hidrocarbonetos, ou seja, complexas reações em fase gasosa que geram núcleos condensados sólidos com diâmetros no intervalo entre 0,02 a 0,2 $\mu$ m, geralmente aglomerados em filamentos ou cadeias (Williams, 1976). As reações de craqueamento competem com o mecanismo de oxidação dos hidrocarbonetos, sendo mais pronunciadas em situações de combustão rica e elevada temperatura. Assim, a fuligem é formada principalmente na zona primária da chama, onde, em geral, a combustão ocorre com deficiência de oxigênio (Lefebvre, 1983).

Tabela 1. Imagens para situação sem oscilação e para as frequências de 200 Hz, 400 Hz, 600 Hz e 700 Hz.

sem atuação			
A = 22, T = 1/4000 s			
			
200 Hz			
10 mbar A = 22, T = 1/10000 s	20 mbar A = 22, T = 1/10000 s	30 mbar A = 22, T = 1/10000 s	
			
400 Hz			
10 mbar A = 22, T = 1/10000 s	20 mbar A = 22, T = 1/10000 s	30 mbar A = 22, T = 1/10000 s	40 mbar A = 22, T = 1/10000
			
600 HZ			
10 mbar A = 22, T = 1/10000 s	20 mbar A = 22, T = 1/2000 s	30 mbar Sem tomografia	
			
700 HZ			
10 mbar A = 22, T = 1/10000 s	20 mbar A = 16, T = 1/10000 s	30 mbar A = 16, T = 1/10000	40 mbar A = 11, T = 1/10000
			

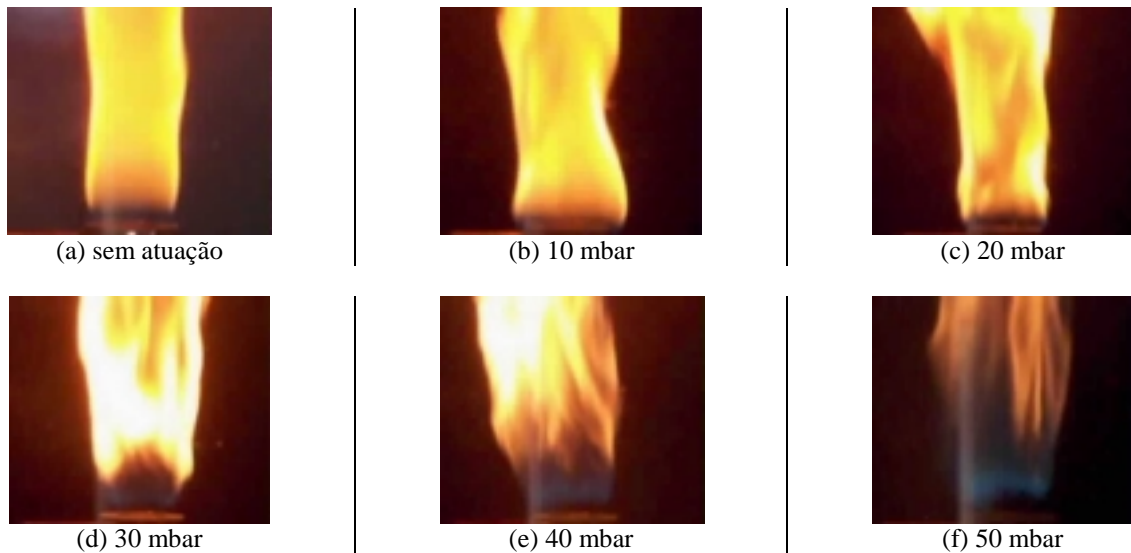


Figura 7. Detalhe da região próxima à saída do queimador para frequência de 500 Hz.

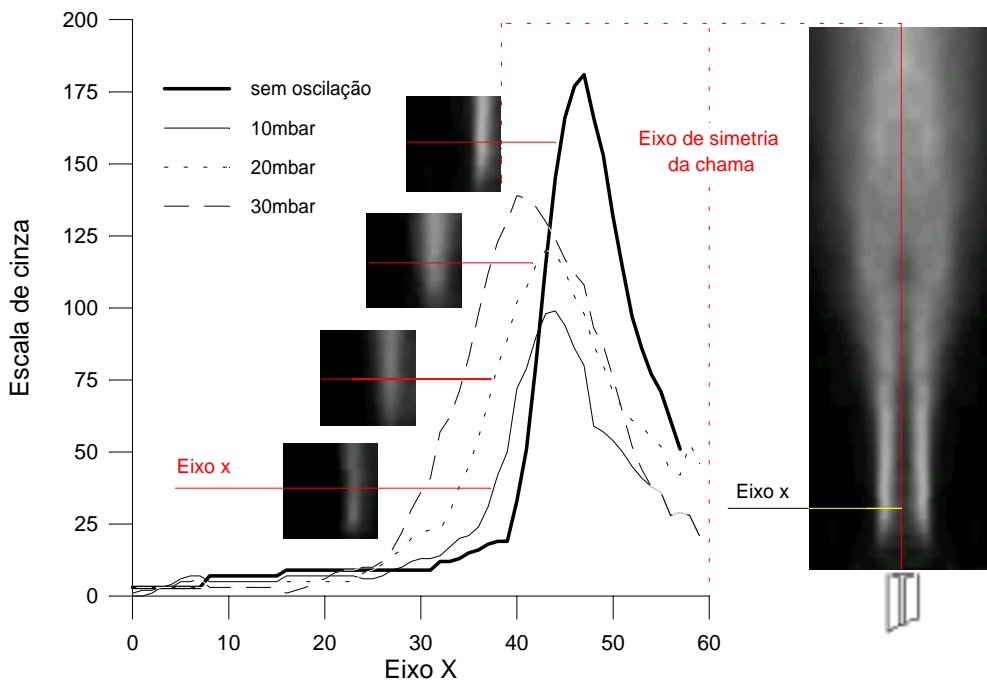


Figura 8. Análise da intensidade luminosa no eixo x para a chama sem atuação acústica e para chamas atuadas a 300Hz.

Em qualquer plano através de uma chama difusiva, há sempre uma extensa variação da razão de equivalência, desde muito rica até muito pobre. Desta forma, sempre há ocorrência de combustão rica com temperatura elevada, favorecendo o mecanismo reacional de formação de fuligem nesse tipo de chama (Glassman, 1987). Já para o caso das chamas pré-misturadas, em função da distribuição mais uniforme da razão de equivalência, a formação de fuligem só acontecerá se os reagentes estiverem em proporções com falta de oxigênio.

O presente trabalho não realizou medidas da concentração de fuligem nos gases de combustão, mas através de observações visuais na saída da chaminé notou-se uma intensa presença de fuligem quando a chama não sofria atuação e que essa presença visual era reduzida, em alguns casos erradicada, quando as atuações eram impostas. Para observar a influência da presença do campo acústico na concentração de fuligem ao longo da chama, acoplou-se ao sistema ótico um filtro para passagem de luz no comprimento de onda 802,06nm. Nessa região do infravermelho próximo à intensidade luminosa que atinge os sensores da câmara CCD está principalmente relacionada com a emissão contínua da fuligem nessa região do espectro. A Fig. (9) mostra esse resultado para algumas condições de atuação acústica.

A comparação entre imagens para se avaliar o aumento ou redução da concentração de fuligem na chama só pode ser feita se a configuração do sistema ótico for a mesma para todas as situações, o que não ocorre para as imagens apresentadas na Fig. (9). Isso deve-se a não ter sido possível ajustar uma configuração do sistema ótico que evitasse a



saturação e permitisse intensidade luminosa insuficiente para todas as condições de chama estudada da Fig. (9). No entanto, foi possível manter o mesmo tempo de exposição para todas imagens, modificando apenas a abertura da lente, o que permitiu a correção para os resultados obtidos. A maior abertura ocorre quando  $A = 1.4$  e cada vez que há uma redução seguindo a escala da lente (1.4, 2, 2.8, 4, 5.6, 8, 11, 16 e 22), para uma mesma fonte de luz a intensidade luminosa que incide os sensores do CCD é reduzida pela metade. Por exemplo, a intensidade luminosa que atinge os sensores quando a abertura da lente está configurada para 1.4 é oito vezes maior do que quando ela está configurada para 4. Desta forma, pode-se aplicar esta correção para os histogramas das imagens apresentadas na Fig. (9). O histograma nada mais é que a quantificação do número de pixels do sensor, ou da imagem, que foram atingidos pelas diferentes classes de intensidade luminosa que se apresentaram o sensor do sistema ótico. A Fig. (10) apresenta os histogramas das imagens da Fig. (9) corrigidos para um sistema ótico com abertura da lente na posição 4.

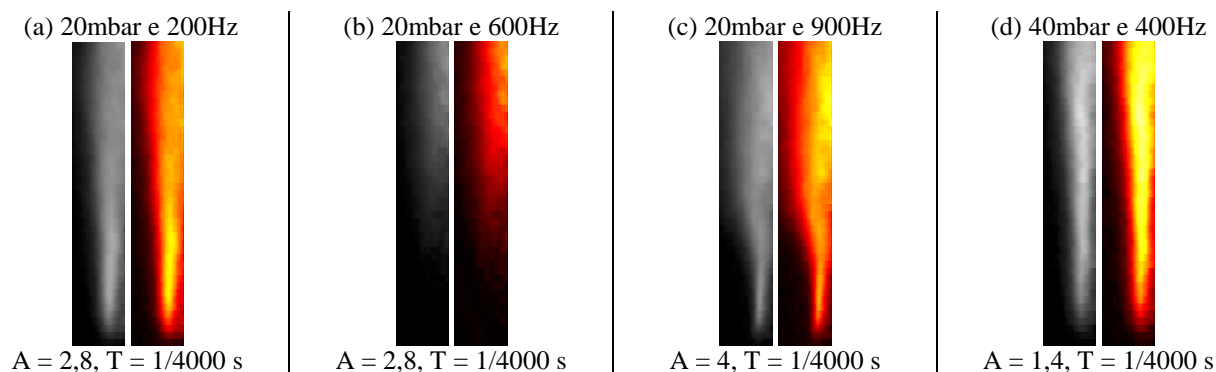


Figura 9. Emissão luminosa na região do infravermelho próximo (802,06nm) (fuligem), para diferentes condições de oscilação.

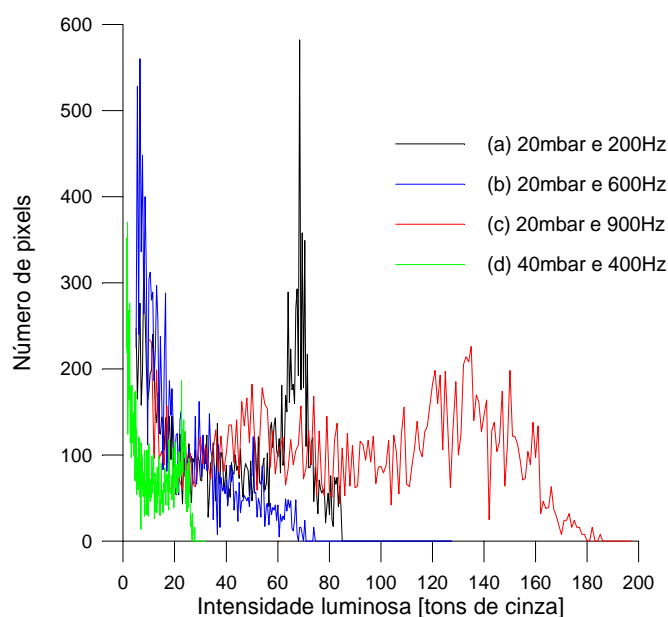


Figura 10. Histogramas das imagens da Fig. (9) corrigidos para um sistema ótico com abertura da lente na posição 4.

Observando os histogramas apresentados, nota-se que para as combinações (a) 20 mbar e 200 Hz, (b) 20 mbar e 600 Hz e (d) 40 mbar e 400 Hz a distribuição de intensidade luminosa concentra-se em valores mais baixos, principalmente para as chamas com as combinações (b) e (d). Por outro lado para a chama (c) 20 mbar e 900 Hz a distribuição da intensidade luminosa abrange uma maior parte do espectro de tons de cinza. Se admitirmos que a intensidade luminosa para o comprimento de onda estudado está intimamente relacionada com a concentração de fuligem ao longo da região de chama, pode-se dizer que a condição (d) se apresenta mais favorável à formação desse poluente.

Ao confrontar os histogramas apresentados com a estrutura das chamas nas proximidades da saída do queimador, Fig. (11), nota-se que para a condição (c) a chama pouco difere do que foi apresentado para condição sem oscilação (Fig. (7a)), ou seja, uma estrutura semelhante de uma chama laminar. Por outro lado, as chamas (a), (b) e (d) da Fig. (9) são intensamente modificadas pela presença do campo acústico, surgindo a coloração azulada na região de saída do queimador, típica de uma melhor mistura entre os reagentes, o que é desfavorável à formação de fuligem.

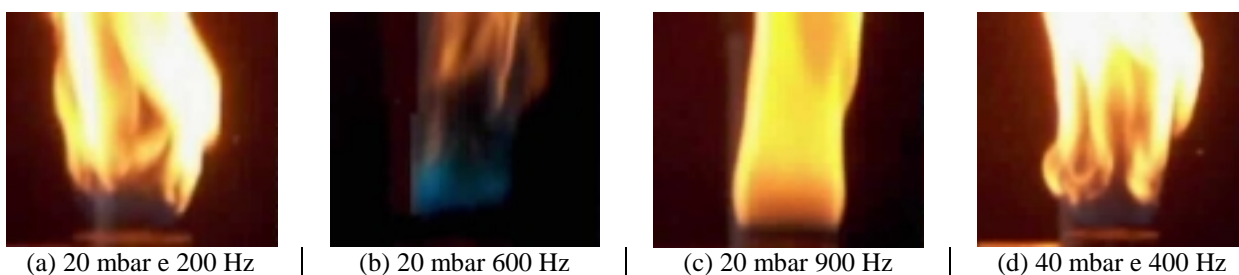


Figura 11. Detalhe da saída do queimador para as chamas da Fig. (9).

Aparentemente não há um padrão definido para intensificação das mistura entre os reagentes em função da frequência, como mostra os histogramas das chamas (a), (b) e (c) da Fig. (9). Retornando às imagens coloridas apresentadas na Tab. (1) para amplitude de atuação de 20 mbar, nota-se que aparentemente até 600 Hz há uma tendência de modificação da estrutura da chama com o aumento da amplitude, tendo apresentado nos mesmos 600 Hz a aparência de uma chama pré-misturada extremamente turbulenta. Por outro lado, para as frequências acima desse valor (700 Hz, 800 Hz e 900 Hz) a presença do campo acústico modifica de uma maneira muito mais sutil a chama.

### 3.2. Análise dos Gases de Combustão

Conforme visto na seção 2, os dados adquiridos na coleta dos gases foram salvos em formato de planilha eletrônica e todos os gráficos apresentados são resultado das médias dos gases coletados durante 5 minutos a uma taxa de aquisição de 30 leituras por minuto.

Os resultados obtidos para as concentrações de  $O_2$  e  $NO_x$  como função da frequência de atuação encontram-se nas Fig.'s (11) e (12), respectivamente. Em todos os casos, a concentração de CO medida foi muito baixa, inferior ao erro de leitura do analisador (0,01%). Nos gráficos, o ponto “sem atuação” refere-se à concentração dos gases analisados sem oscilações forçadas.

A Fig. (11) nos mostra que as concentrações volumétricas de  $O_2$  na saída da capela variaram entre 19,9 e 20,4 %, ou seja, próximas à concentração do oxigênio no ar. Desta forma, do total de ar carregado por difusão para interior da capela, o processo de combustão globalmente consumiu muito pouco de oxigênio. Tal resultado indica que em termos da disponibilidade de oxidante a combustão no interior da capela ocorre na condição de uma chama livre. Por outro lado, não se pode afirmar que o processo pulsante carregou menor ou maior quantidade de ar apenas considerando os dados aqui obtidos.

Em razão da grande quantidade de ar carregado para o interior da capela, em comparação com a vazão de GLP (0,16 g/s) a concentração de  $CO_2$  medida foi muito baixa, na faixa de 0,8%, correspondendo à apenas quatro vezes o erro de leitura do analisador (0,2). Desta forma, esses dados não devem ser conclusivos.

Na Fig. (12) observa-se claramente que o processo pulsante produz mais  $NO_x$  que o processo estável laminar. A frequência de 600 Hz foi aquela que aparentemente produziu mais do poluente. Conforme observamos nas Fig. (1), a condição (b) (20 mbar e 600 Hz) da mesma foi a que apresentou chama mais azulada, indicando uma intensa mistura de combustível e oxidante, possibilitando o aparecimento de picos de temperatura que favorecem a formação de  $NO_x$  térmico.

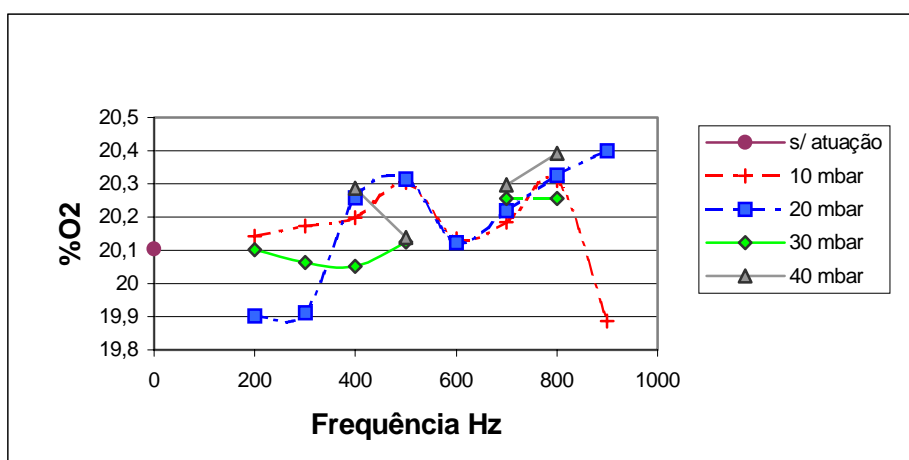


Figura 11. Concentrações volumétricas de  $O_2$  na saída da capela.

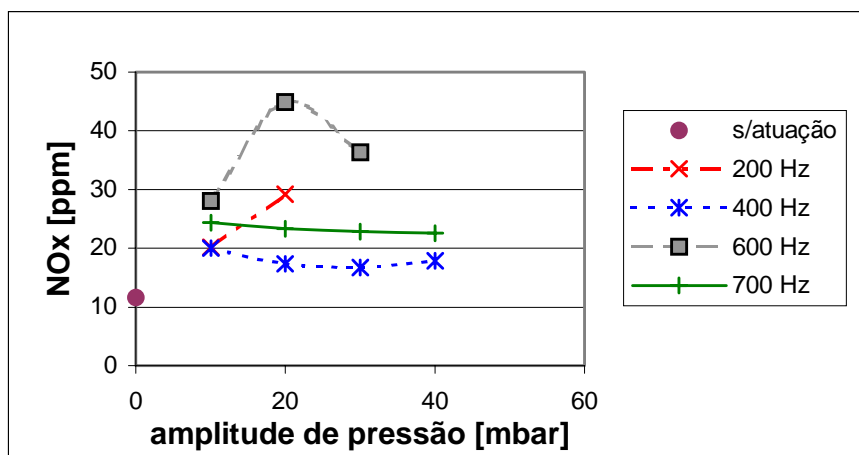


Figura 12. Concentrações volumétricas de  $\text{NO}_x$  na saída da capela.

#### 4. Conclusões

Foram estudadas neste trabalho as características de chamas pulsantes difusivas livres, utilizando como combustível o gás liquefeito de petróleo (GLP). Vários estudos anteriores indicaram as vantagens dos sistemas de combustão pulsados, porém a implementação desses sistemas em larga escala depende do melhor entendimento do complexo acoplamento de vários parâmetros controladores e fenômenos envolvidos, especialmente na interação direta com uma chama.

Assim, neste trabalho foram realizados os seguintes estudos: a) utilização sistema de tomografia de chama para estudar a geometria da chama e a região de presença de fuligem de acordo com a variação da amplitude e da frequência; b) realização de medidas das emissões de  $\text{NO}_x$  para diferentes condições de trabalho.

Observou-se que a combustão pulsante para sistema montado no presente trabalho altera substancialmente a estrutura da chama. Em alguns casos, a chama outrora amarela tornou-se azul, indicando uma melhor taxa de mistura entre combustível e oxidante, diminuindo as quantidades geradas de fuligem. Por outro lado, a intensificação da mistura entre os reagentes aumentou as concentrações formadas de  $\text{NO}_x$ .

#### 5. 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 Chamas”, Proc. 96/10310-0.

#### 6. Referências

- Carvalho, J.A., 1983, “Investigation of the Characteristics of a Coal Burning Rijke Type Pulsating Combustor”, Tese de Doutorado, Georgia Institute of Technology.
- Carvalho, J.A., Ferreira, M.A., Bressan, C., and Ferreira, J.L.G., 1989, “Definition of Heater Location to Drive Maximum Amplitude Acoustic Oscillations in a Rijke Tube”, *Combustion and Flame*, Vol. 76, No. 1, pp. 17-27.
- Carvalho, J.A., McQuay, M.Q., and Gotaç, P.R., 1997, “The Interaction of Liquid Reacting Droplets with the Pulsating Flow in a Rijke-Tube Combustor”, *Combustion and Flame*, Vol. 108, No. 1-2, pp. 87-103.
- 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., Poinsot, 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*, Vol. 119, pp. 397-408.
- Dubey, R.K., Black, D.L., McQuay, M.Q., and Carvalho J.A., 1997, “The Effect of an Acoustic Field on the Burning of a Hydrogen-stabilized Ethanol Spray Flame in a Propane-fired Rijke-tube Combustor”, *Combustion and Flame*, Vol. 110, pp. 25-38.
- Ferreira, M.A. and Carvalho J.A., 1990, “Performance Characteristics of an Experimental Rijke Type Pulsating Combustor”, *Fuel*, Vol. 19, No. 6, pp. 684-689.
- Ferreira, M.A., 1997, “Abordagem Teórica e Experimental de Combustores do Tipo Rijke”, Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista.
- Foa, J.V., 1960, “Elements of Flight Propulsion”, John Wiley and Sons, New York.
- Glarborg, P., 1993, “ $\text{NO}_x$  Chemistry in Pulse Combustion”, Proc. of the Workshop in Pulsating Combustion and its Applications, Keynote Lecture C, Lund Institute of Technology, Sweden.

- Glassman, I., 1987, "Combustion", Second Edition, Academic Press Inc.
- Hanby, V.I., 1969, "Convective Heat Transfer in a Gas-fired Pulsating Combustor", ASME Journal of Engineering for Power, pp. 48-52.
- Heiskanen, V.P., Orjala, M., Carvalho, J.A., Ferreira, M.A., Bressan, C., 1994, "Pulsating Combustion Boiler", Patente Finlandesa 91558, Int. Publ. No.: 94/14002.
- Lefebvre, A.H., 1983, "Gas Turbine Combustion", Taylor & Francis.
- 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, Vol. 76, No. 9, pp. 845-851.
- Mallinson, S.G., Reizes J.A, Hong, G., 2001, "An Experimental and Numerical Study of Synthetic Jet Flow", The Aeronautical Journal, 105(1043), 41-49.
- Martins, C.A., 1998, "Emissões de NO<sub>x</sub> em Combustor Pulsante Tipo Tubo de Rijke Operando com Combustível Gasoso", Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- Souza, N., 1998, Processamento de imagem tomográfico, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, IST, Lisboa, Portugal.
- Torres, E.A., Victório, J.R.S., Ferreira, M.A., and Carvalho, J.A., 1992, "Pulsating Combustion of a Palm Oil Fruit Bark", Fuel, Vol. 71, No. 3, pp. 257-261.
- Tyndall, J., 1970, "On Sounding and Sensitive Flames", Physical Sciences, The Royal Institution Library of Science, Vol. 2, pp. 30-37.
- Williams, A., 1976, "Fundamentals of Oil Combustion", Progress in Energy and Combustion Science, 2(3): 167-179.
- Wood, A., 1966, "Acoustics", Dover, New York.
- Zinn, B.T., 1986, "Pulsating Combustion", In Weinberg, F. J., ed., Advanced Combustion Methods, Academic Press, London, Academic Press, pp. 113-181.

## CHARACTERISTICS OF FREE DIFFUSION PULSATING FLAMES

### Vitória Oliveira Hirth Bastos

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Laboratório Associado de Combustão e Propulsão, Rod. Presidente Dutra, km 40, Cachoeira Paulista – SP, 12700-00  
vitoriahb@zipmail.com.br

### Pedro Teixeira Lacava

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Divisão de Engenharia Aeronáutica, Pça. Mal. Eduardo Gomes, 50, Vila das Acácias, São José dos Campos, 12228-9000  
lacava@aer.ita.br

### Marco Aurélio Ferreira

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Laboratório Associado de Combustão e Propulsão, Rod. Presidente Dutra, km 40, Cachoeira Paulista – SP, 12700-00

### João Andrade de Carvalho Jr.

Universidade Estadual Paulista, Campus de Guaratinguetá, Departamento de Energia, Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333, Guaratinguetá – SP, CEP: 12500-000  
joao@feg.unesp.br

**Abstract.** *Pulsating combustion has won interest in current research due to the indications that its application in energy generation can offer several advantages, such as: fuel economy, reduced pollutants formation, increase the rate of convective heat transfer and reduced investment when compared with conventional techniques. However, pulsating combustion systems where the combustion process induces the acoustic oscillation, in general, are operationally unstable and are not very attractive for industrial applications. In this way, the future of pulsating flames will be in processes where the oscillation is induced by external means, for example by a speaker. The present work presents and discusses the effect of the amplitude and frequency in the format of free diffusion flame of LPG. A strategically positioned speaker acoustically excites the mixture before the burner exit, and a CCD camera made the flame visualization. Then, a tomographic reconstruction process was applied in the obtained images. Combustion gases concentrations were also analyzed (CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and O<sub>2</sub>). The results show that oscillations conditions can change substantially the flame structure. The presence of an acoustic field may improve the reactants mixing rate. Without oscillations the flame is laminar and has a yellow aspect. Depending the frequency and amplitude, the flame becomes turbulent and blue closed to the burner jet exit. However, due the improve of reactants mixing, NO<sub>x</sub> emissions is higher than non-pulsating condition.*

**Key words:** *Pulsating Combustion, Flame Tomographic Reconstruction.*