

INVESTIGAÇÃO DE CHAMAS PULSANTES

Daniel Silva Ferreira

daniel@tupi.lcp.inpe.br

Vitória Hirth Bastos

vitoriahb@zipmail.com.br

Pedro Teixeira Lacava

lacava@aer.ita.cta.br

João Andrade de Carvalho Jr.

joao@feg.unesp.br

Resumo

Um estudo experimental foi conduzido com o objetivo de investigar a emissão de gases na combustão com oscilação acústica, especialmente monóxido de carbono e óxidos de nitrogênio. Os experimentos foram conduzidos de duas maneiras distintas: com o queimador em uma câmara vertical refrigerada e com o queimador de chama livre. O combustível foi gás liquefeito de petróleo (GLP). A mistura de reagentes foi excitada acusticamente antes da saída do queimador, por meio de alto-falante estrategicamente posicionado. Os experimentos foram conduzidos com vazões de 0,16 g/s de GLP. As principais conclusões foram: a) o processo de combustão pulsante produz uma distribuição combustível/ar mais uniforme do que o processo não pulsante; b) próximo à razão de equivalência estequiométrica, a combustão pulsante gera maiores taxas de NO_x ; c) a frequência tem uma forte influência na emissão de NO_x , mas a alteração da amplitude de pressão pouco afeta; d) a presença do campo acústico pode mudar drasticamente a emissão dos gases de combustão em chamas totalmente difusivas ou ligeiramente pré-misturadas.

Palavras-chave: *combustão pulsante, chamas confinadas, chamas livres.*

Abstract

An experimental study has been conducted with the objective of investigating the effects of combustion driven acoustic oscillations in the emission rates of combustion gases, especially carbon monoxide and nitrogen oxides. The experiments were conducted in two distinct set ups: with a burner inside vertical water-jacketed chamber and with a free flame burner. The fuel was liquified petroleum gas (LPG). The reactant mixture was acoustically excited before the burner exit, by a strategically positioned speaker. The experiments were conducted for 0,16 g/s of LPG. The main conclusions were: a) the pulsating combustion process produces more uniform fuel/air profile than the non pulsating process, b) close to the stoichiometric equivalence ratio the pulsating combustion process generates higher rates of NO_x ; c) frequency has strong effect on NO_x emission, but pressure amplitude has a weak effect; d) the presence of acoustic field may change drastically the combustion gas emissions in complete diffusion flames or partially pre-mixed flames.

Keywords: *pulse combustion, confined flames, free flames.*

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 de as variáveis de estado (pressão, temperatura, etc.), que descrevem as condições na zona de queima, ocorrerem sob condições oscilatórias, isto é, mudando periodicamente com o 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 eficiências 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 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 & 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, MCQUAY & GOTAÇ, 1997; DUBEY et al., 1997; LACAVAL, CARVALHO & MCQUAY, 1997).

Os sistemas de combustão pulsados, nos quais 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 em que 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 da chama, induzidas pela presença do campo acústico, com a emissão de gases, sobretudo CO e NO_x. Os experimentos foram realizados em duas configurações: um queimador em um combustor cilíndrico vertical com a parede refrigerada e um queimador livre. 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. Basicamente, o objetivo do presente trabalho foi realizar estudos das emissões de gases para as diferentes condições de amplitude e frequência de oscilação.

2. Arranjo Experimental

Para o estudo de chamas difusivas livres, o queimador utilizado tem diâmetro interno de 17 mm. Na saída do canal foi posicionado um disco de 11,5 mm para ancorar a chama nas proximidades do queimador, como pode ser visto nas Figuras 1 e 2.

A vazão de GLP (Gás Liquefeito de Petróleo) que atravessa o canal do queimador foi de aproximadamente 0,16 g/s. Na base do canal está acoplado um alto-falante responsável pela atuação acústica e está posicionado ainda um transdutor de pressão, que serve de referência para amplitude e frequência de atuação sobre o escoamento. Para os estudos de chamas confinadas, o queimador utilizado foi semelhante ao apresentado nas Figuras 1 e 2, com o acréscimo de um canal externo para passagem de ar, sem sofrer atuação acústica.

A determinação da composição dos gases resultantes da combustão nos permite verificar a emissão de poluentes. Experimentos foram realizados para se fazer análises de CO, CO₂, O₂ e NO_x. Os gases de combustão foram coletados por sucção por uma sonda, cujo esquema é mostrado na Figura 3.

A sonda para coleta dos gases foi construída em aço inoxidável, sendo o tubo para passagem dos gases com diâmetro de $\frac{1}{4}$ de polegada. A sonda foi posicionada horizontalmente na capela (descrita adiante) 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. A linha de condução dos gases também era de aço inoxidável com $\frac{1}{4}$ de polegada.

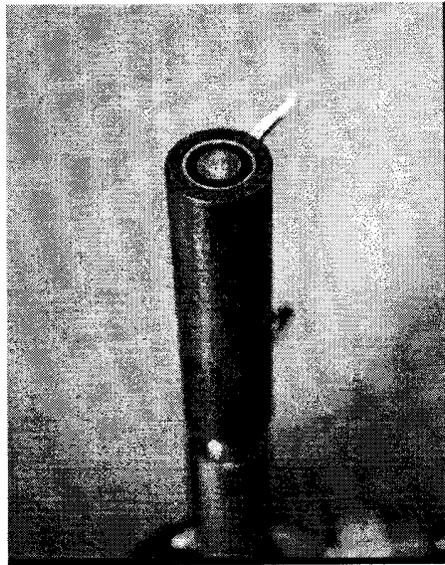


Figura 1. Fotografia do queimador.

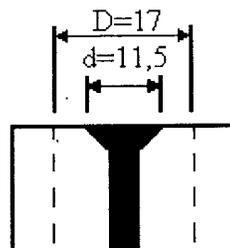


Figura 2. Detalhe do canal interno do queimador.

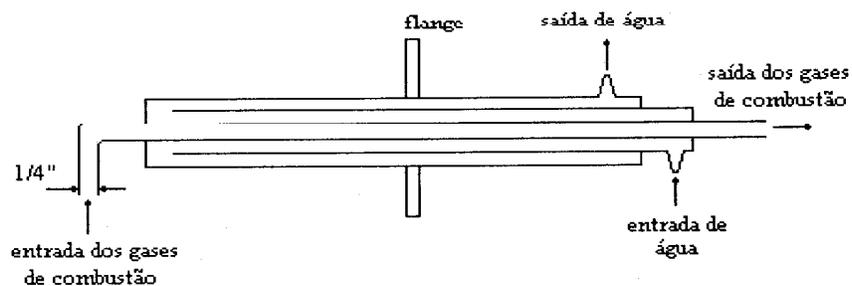


Figura 3. Sonda para coleta dos gases de combustão.

Os gases eram refrigerados ainda nas sondas, 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 se 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.

Os gases eram resfriados por meio de duas serpentinas imersas em banho de gelo a 3 °C. Os condensados e particulados maiores que 25 µm ficavam retidos em três filtros montados em série. Dois deles estavam situados na região de sucção, antes e depois do primeiro resfriamento, e o terceiro encontrava-se na região de pressão positiva da linha, na seqüência do segundo circuito de refrigeração. Em seguida o escoamento de gases era dividido em três caminhos diferentes: parte para o analisador de NO_x, parte para os demais analisadores e o restante do escoamento era descarregado na atmosfera. Os escoamentos que se encaminhavam para os analisadores eram forçados através de filtros de membrana Millipore de fibra de vidro, que retinham os particulados mais finos. Por fim os escoamentos eram conduzidos aos analisadores onde as medidas eram feitas em base seca. Um esquema da linha de condicionamento das amostras gasosas é mostrado na Figura 4.

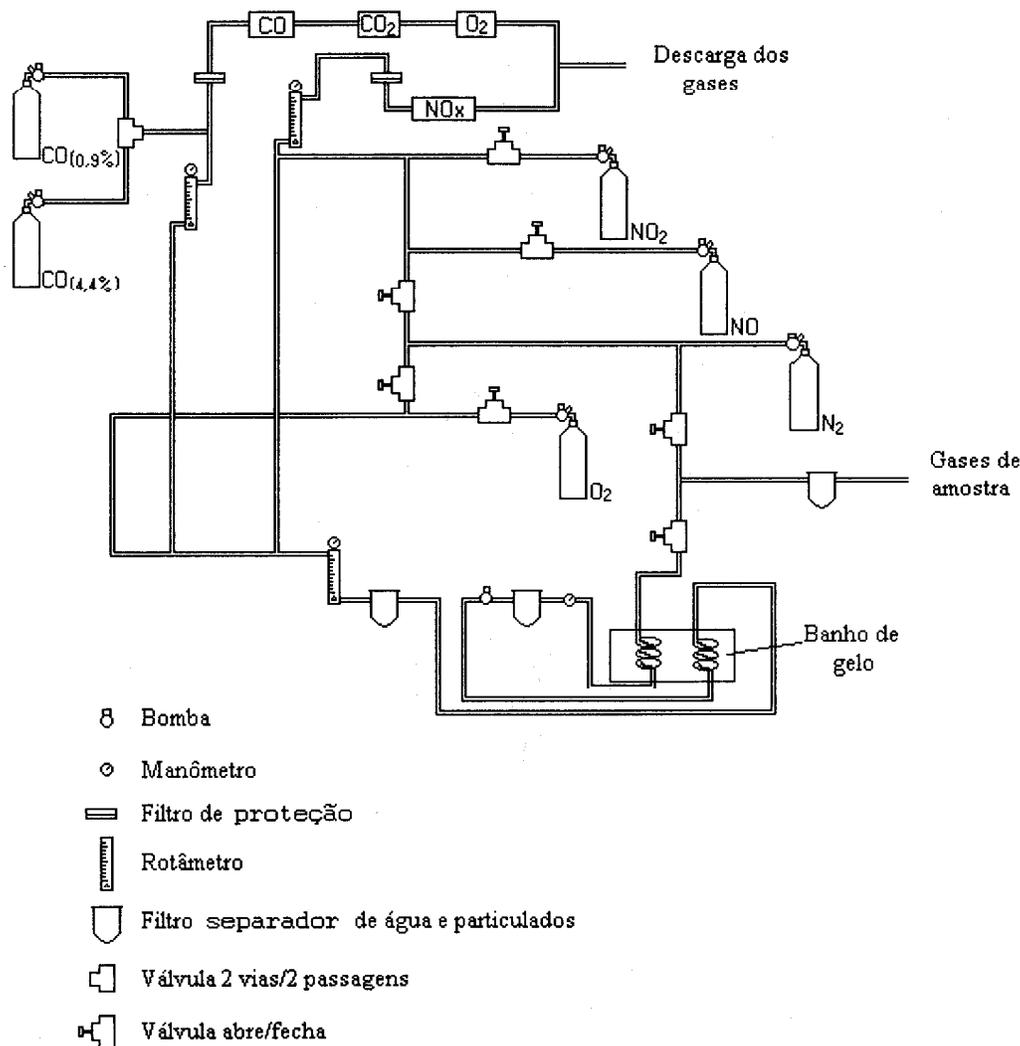


Figura 4. Esquema da linha de amostragem de gases.

Para a análise de CO e CO₂ foram utilizados analisadores tipo infravermelho, para O₂ o tipo termomagnético e para o NO_x o tipo quimiluminescente. Os analisadores de CO, CO₂ e O₂ puderam ser acoplados em série por não alterarem a composição química da amostra. Já o analisador quimiluminescente de NO_x precisa que o NO presente na amostra reaja com o ozônio (O₃) para formar NO₂ e O₂. Assim, foi necessária uma linha separada para o analisador de NO_x. O próprio analisador possui um sistema de geração de ozônio a partir do oxigênio alimentado por uma garrafa com o gás pressurizado.

Os analisadores possuem saídas em tensão que são ligadas ao sistema de aquisição de dados. Para se fazer a calibração as indicações do mostrador foram ajustadas para os valores da concentração dos gases de calibração de zero (N₂) e de fundo de escala, através dos potenciômetros correspondentes. Deste modo, a resposta em tensão elétrica para esses valores era

utilizada para determinar uma equação linear que associava o sinal de tensão com a concentração do gás no sistema de aquisição de dados. Para o analisador de O_2 , a calibração do zero foi feita com N_2 e do fundo de escala com um gás padrão de 19,8 % de O_2 .

A chama era difusiva e era excitada na corrente de GLP através de um alto-falante posicionado em sua base. A Figura 5 mostra um esquema do sistema acústico utilizado. O sinal elétrico senoidal foi obtido a partir do gerador de funções Hewlett-Packard, modelo HP8116A, ao qual 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.

O sistema de aquisição de dados utilizado é composto por uma placa de aquisição de dados, modelo AT-MIO 16E1, com velocidade de aquisição de 1,25 MS e com 16 canais de entrada analógicos e 2 canais de saída analógicos. O sistema conta ainda com um sistema de condicionamento de sinais para aquisição dos sinais de termopares, o SCXI1000, 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, 8 transdutores de pressão e 4 analisadores de gases. No presente caso utilizou-se a leitura de 1 termopar e 4 analisadores (CO , CO_2 , NO_x e O_2), 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, cada leitura de pressão é uma média de 100 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. A Figura 6 mostra um esquema geral do sistema de aquisição de dados.

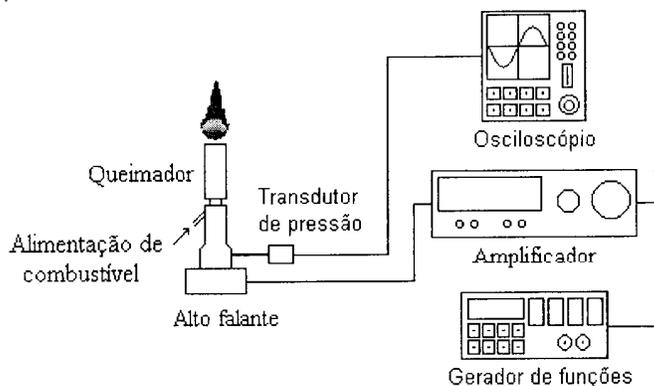


Figura 5. Esquema do sistema acústico.

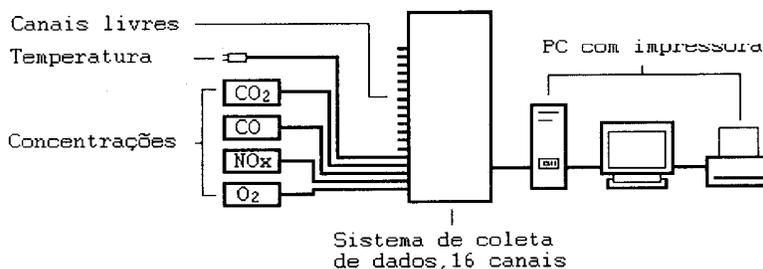


Figura 6. Esquema do sistema de aquisição de dados.

2.1 Arranjo Específico para Chamas Confinadas

Os experimentos de chamas confinadas foram realizados em uma câmara cilíndrica, posicionada verticalmente, com 1m de comprimento e 25 cm de diâmetro interno. Junto à parede da câmara foi provida uma camisa com água corrente, para sua

refrigeração. Ao longo da câmara também foram instalados termopares tipo “K” e transdutores de pressão piezoelétricos, para as leituras de temperatura e frequência e amplitude, respectivamente. Os termopares foram posicionados a 10 cm, 25 cm, 50 cm e 75 cm a jusante da base da câmara de combustão, denominados por T1, T2, T3 e T4, respectivamente. Já os transdutores de pressão foram posicionados na base da câmara e a 50 e 75 cm a jusante desta, denominados de P2, P3 e P4, respectivamente. Uma câmara de desacoplamento, posicionada na parte superior da do combustor, permite, sem mudar as características acústicas da câmara de combustão, a coleta de gases para análise contínua sem a infiltração de ar externo. Testes preliminares indicaram a necessidade dessa câmara de desacoplamento em virtude da penetração de ar adicional pela abertura superior do combustor. A Figura 7 apresenta um esquema da montagem.

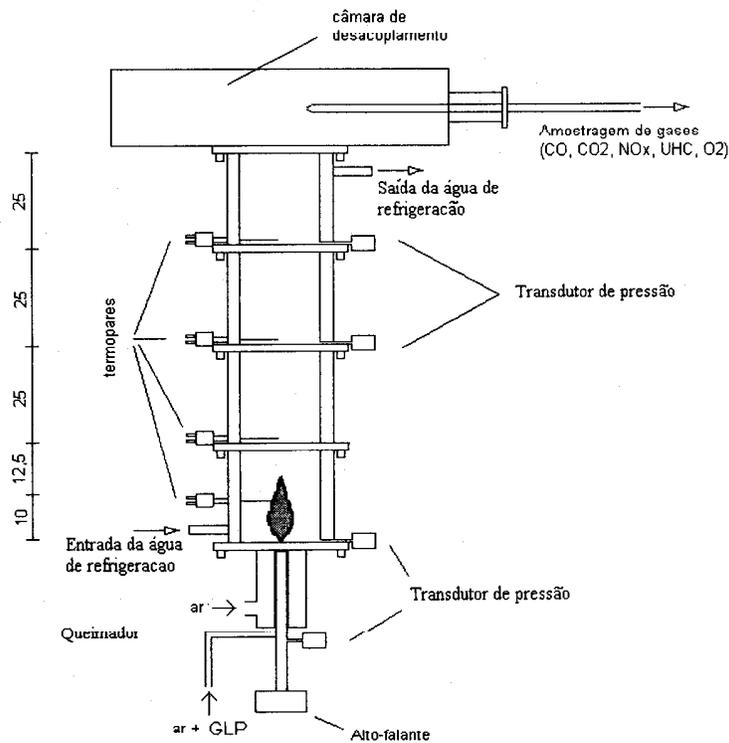


Figura 7. Esquema da montagem experimental para chamas confinadas.

2.2. Arranjo Específico para Chamas Livres

O arranjo experimental para o estudo com chamas livres é mostrado na Figura 8. A atuação acústica foi feita por meio de um alto-falante posicionado na base do queimador, permitindo atuar no fluxo de combustível ou de pré-mistura.

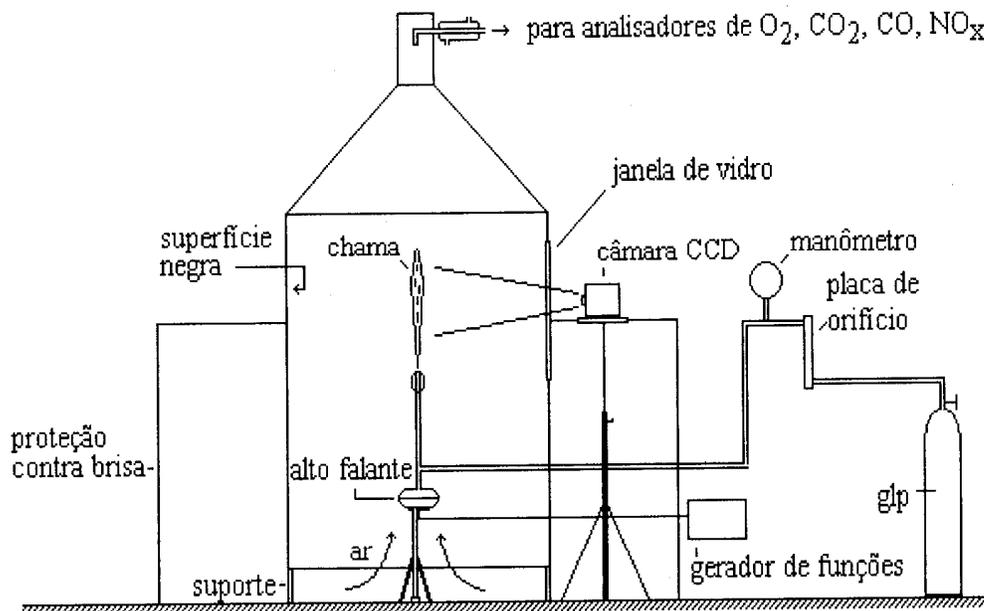


Figura 8. Esquema da montagem experimental para chamas confinadas.

3 Resultados para Chamas Confinadas

Conforme mencionado anteriormente, os ensaios foram realizados na vazão de 0,16 g/s de GLP com o ar total em proporção estequiométrica. Para melhor estabilizar a chama, do total de ar, 16% em massa foi pré-misturado com o combustível e, conseqüentemente, sofreu a ação direta do alto-falante posicionado na base do queimador. O restante da vazão mássica de ar (84%) foi injetada na câmara de combustão através do canal externo do queimador, ou seja, sem sofrer atuação acústica.

A própria presença da chama, ou seja, de uma intensa liberação de energia na câmara de combustão, que não deixa de ser uma cavidade acústica, pode induzir o surgimento de oscilações desde que satisfaça o critério de Rayleigh (LORD RAYLEIGH, 1945). De acordo com esta formulação a amplitude das oscilações crescerá quando

$$\oint Q \cdot p' \, dt > 0 \quad (1)$$

onde Q é a taxa de calor instantânea transferida ao escoamento, p' a diferença entre a pressão instantânea e a pressão média (pressão acústica), t o tempo e \oint a integração sobre o ciclo de oscilação. Esta expressão é proveniente das equações de conservação e a integral representa o acréscimo de energia da perturbação acústica por ciclo fornecida por uma fonte de calor. O formato da chama acaba sendo um parâmetro importante para o surgimento espontâneo das oscilações no interior da câmara (LACAVA, CARVALHO & MCQUAY, 1997). Para um tubo com uma extremidade fechada e outra aberta, espera-se que quanto maior for a liberação de energia na extremidade fechada, maior será a possibilidade do surgimento das oscilações.

Inicialmente foi verificado se as condições de atuação acústica empregadas no presente trabalho mantinham uma estrutura de escoamento pulsado no interior da câmara. A Figura 9 apresenta a pressão acústica, ou seja, a amplitude de oscilação, obtida pelos transdutores de pressão P2, P3 e P4, para a condição sem atuação (frequência = 0, na figura) e atuação com 30 mbar de amplitude (P1) no escoamento interno do queimador, para diversas frequências.

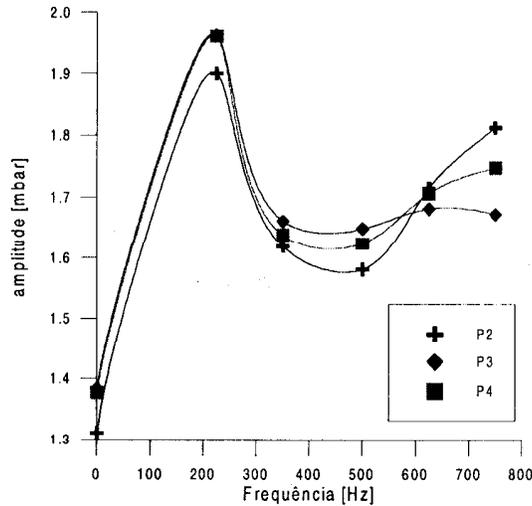


Figura 9. Medidas de amplitude no interior da câmara para condição sem atuação acústica (frequência = 0) e com atuação com 30 mbar de amplitude, em função da frequência.

Os resultados apresentados na Figura 9 mostram que as amplitudes de oscilação no interior da câmara não chegam a 10% do valor da amplitude induzida pelo alto-falante sobre mistura (GLP + ar) que flui no canal interno do queimador (30 mbar). Além da geometria da chama, a fraca intensidade de oscilação também pode ser atribuída à baixa potência de operação do queimador; assim, não há energia suficiente para manter o processo em maior amplitude no interior da câmara. Desta forma, pode-se admitir para o presente experimento, que as alterações das condições de combustão são principalmente devido às modificações na estrutura da chama em decorrência da atuação acústica no escoamento interno do queimador; a oscilação no interior da câmara contribui em menor intensidade. Em outras amplitudes de atuação acústica ($P1 = 10$ e 20 mbar) os resultados foram semelhantes aos da Figura 9 ($P1 = 30$ mbar).

A Figura 10, dividida em 10a, 10b e 10c, mostra as emissões de NO_x , CO , CO_2 e O_2 para as amplitudes de atuação $P1 = 10$, 20 e 30 mbar, em função da frequência de atuação. Em termos qualitativos, o comportamento da emissão de gases é bastante semelhante para ambas amplitudes de oscilação. A redução das emissões de CO e O_2 e, conseqüentemente, o aumento da emissão CO_2 , para as situações pulsadas em comparação com a situação sem atuação acústica (frequência = 0), mostram que há uma melhor taxa de mistura entre os reagentes no regime pulsado. A redução da emissão de CO chega a atingir 50% em comparação com o regime não pulsado.

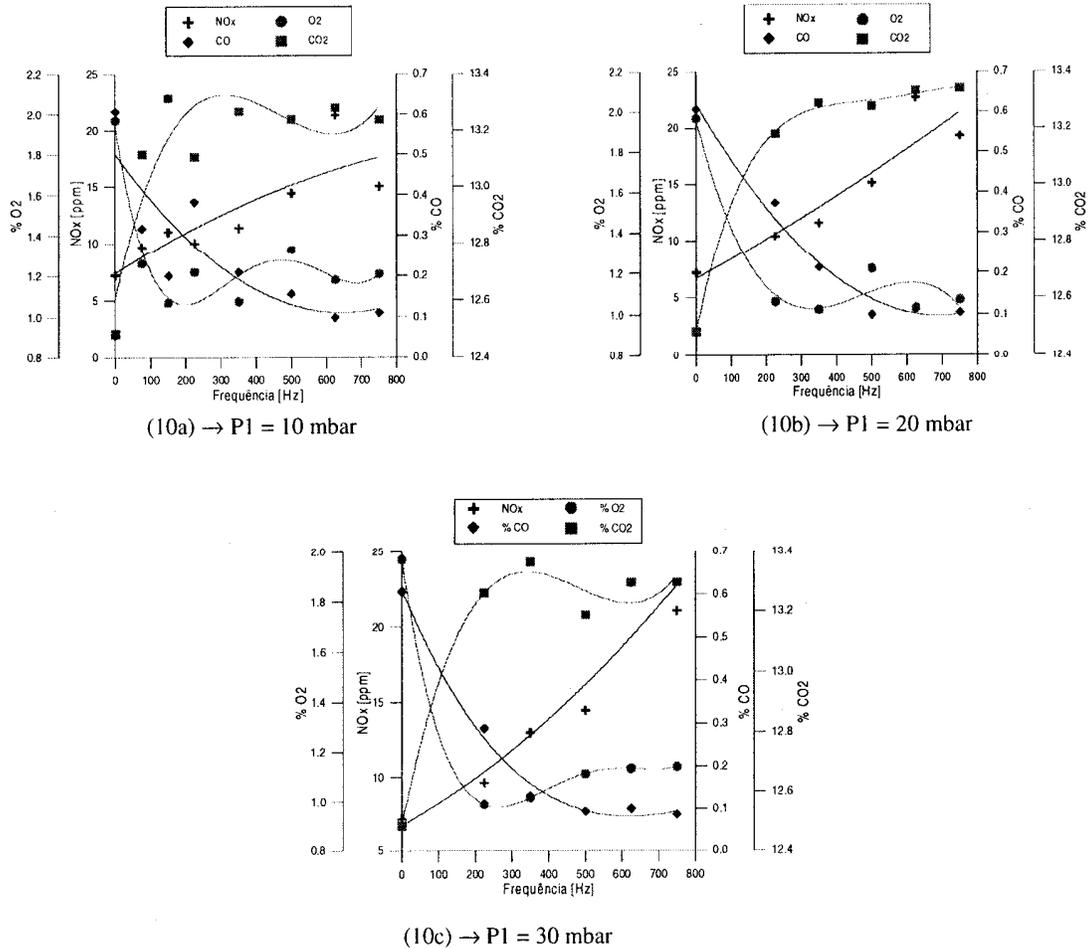


Figura 10. Emissões de NO_x , CO , CO_2 e O_2 para as amplitudes de atuação P1 = 10 (10a), 20 (10b) e 30 mbar (10c), em função da frequência de atuação.

Por outro lado, para as três amplitudes de atuação acústica estudadas, a emissão de NO_x aumentou com o também aumento da frequência, chegando a atingir cerca de 3 vezes a emissão da situação sem atuação acústica. As emissões de CO , CO_2 e O_2 mostraram que há um incremento substancial na taxa de mistura entre os reagentes. Em conseqüência, a tendência é que as distribuições espaciais de temperatura e de razão de equivalência na chama sejam mais uniformes. Desta forma, a presença do campo acústico aumenta as regiões ao longo da chama com razão de equivalência próxima à que são injetados o combustível e o oxidante, ou seja, a estequiométrica. Assim, também aumenta as regiões com temperatura elevada na chama, o que favorece a emissão de NO_x .

Basicamente, o comportamento da emissão de NO_x com a frequência segue o aumento de temperatura na câmara, em razão da melhor mistura entre os reagentes. Para exemplificar isso, a Figura 11 apresenta as medidas de temperatura obtidas pelo termopar 1 (T1), posicionado a 10 cm de distância do queimador e no eixo de simetria axial da câmara, em função da frequência, para as amplitudes de oscilação P1 = 10, 20 e 30 mbar. As medidas obtidas por esse termopar estão longe de serem valores representativos para as distribuições espaciais e temporais de temperatura; no entanto, mostram a tendência média do comportamento da temperatura na região de chama com o aumento da frequência.

A relação entre o grau de uniformidade da mistura reagente e a emissão de NO_x é bastante estreita e depende da razão de equivalência teórica com que o combustível e o oxidante são injetados na câmara. O trabalho teórico e experimental desenvolvido por LYONS (1981) mostrou que o aumento do grau de uniformidade da mistura reagente tende a elevar a emissão de NO_x se os reagentes estão em proporção estequiométrica, como no presente experimento. Por outro lado, à medida que a proporção dos reagentes se desloca para o lado pobre da combustão, o resultado é justamente o contrário, ou

seja, com o aumento do grau de uniformidade a emissão de NO_x diminui, pois a distribuição de temperatura tende a ser homogênea em torno de um valor mais baixo. COOPER (1980) também observou o mesmo resultado de LYONS (1981) para combustão pobre em uma câmara simulando a zona primária de combustão de uma turbina a gás. KELLER et al. (1993) e DELABROY et al. (1996) observaram que a intensa mistura causada pela presença de pulsações em condições de combustão pobre reduziu a emissão de NO_x . O comentário feito por GLARBORG (1993) parece ser bastante oportuno para resumir a relação entre a presença do campo acústico e a emissão de NO_x . Segundo esse autor a combustão pulsante se aproxima das condições de um reator de mistura homogênea, o que aumenta as emissões de NO_x quando a queima ocorre nas proximidades da estequiometria; por outro lado, há uma redução quando a combustão se desenvolve com elevado excesso de ar ($\phi = 0,6$). Dentro desse contexto, os resultados apresentados na Figura 10 são coerentes com os comentários encontrados na literatura.

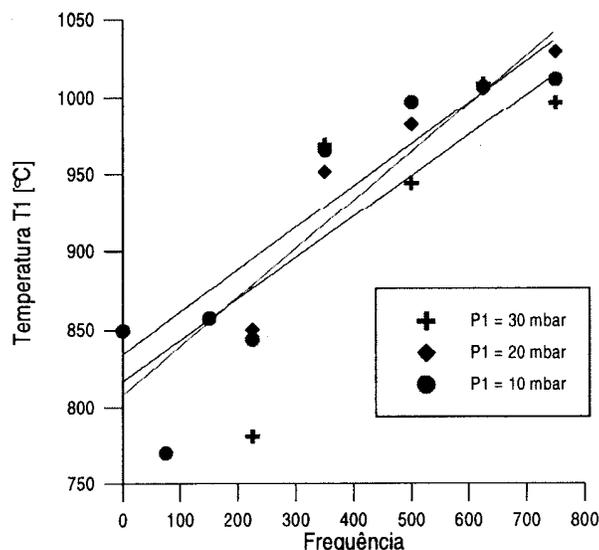


Figura 11. Medidas de temperatura obtidas pelo termopar 1 (T1) para as amplitudes de oscilação P1 = 10, 20 e 30 mbar.

Apesar da frequência de atuação acústica ter mostrado uma considerável influência na emissão de NO_x , isto já não ocorre com a amplitude. Há um aumento de emissão em comparação com a situação sem atuação acústica, mas, uma vez estabelecido o campo acústico, a mudança de amplitude de 10 para 20 ou 30 mbar praticamente não alterou a emissão de NO_x . Isto provavelmente está relacionado à maneira com que a amplitude ou a frequência alteram a estrutura da chama.

LACAVA et al. (1999), através de uma análise visual de chama em um queimador similar ao utilizado no presente trabalho, mostraram que a região de intensa reação química ocorre nas proximidades do disco ancorador de chama e que a frequência de atuação influencia demasiadamente a geometria dessa região. Sem atuação acústica a intensa reação química se estabelece em um estreito canal entre a saída do escoamento interno do queimador e a região de recirculação formada a jusante do disco ancorador. Com a atuação acústica e o aumento da frequência, as reações se dispersam do canal estabelecido sem atuação, para toda região de recirculação, denotando um processo de combustão melhor distribuído. Por outro lado, os resultados desse trabalho também mostraram que o aumento da amplitude pouco influencia essa região de intensa reação química próxima ao disco ancorador, apenas reduz ligeiramente o comprimento da chama em oscilações com frequências de até 200 Hz. Assim, a frequência de atuação possui um impacto muito maior sobre o processo de combustão do que a amplitude, pelo menos até 30 mbar.

4 Resultados para Chamas Livres

Devido ao excesso de ar que entrava e saía da capela, os gases coletados foram considerados diluídos e pensou-se fazer uma correção para 7 % de O_2 . Com os dados obtidos mostraremos que esta correção não faz sentido para os experimentos deste trabalho.

De acordo com CARVALHO & LACAVA (2001), para uma reação genérica de combustão de um hidrocarboneto com ar, com poluentes nos produtos, tais como monóxido de carbono (CO), óxido de nitrogênio (NO) e partículas, teremos:

$$[A]_{BS,corr} = \frac{0,21 - [O_2]_{BS,corr}}{0,21 - [O_2]_{BS,real}} [A]_{BS,real}, \quad (2)$$

onde A é um componente qualquer do gás de combustão (menos oxigênio) e os subscritos BS, corr e BS, real denotam base seca corrigida e base seca real, respectivamente. As concentrações na Eq. (2) são dadas em fração molar. A equação vale para qualquer tipo de combustível.

Os resultados para as concentrações de O₂, CO₂ e NO_x são apresentados nas Figuras 12 a 14, respectivamente. Em todos os casos, a concentração de CO medida foi essencialmente zero. Nos gráficos, o ponto “sem atuação” refere-se à concentração dos gases analisados sem oscilações forçadas.

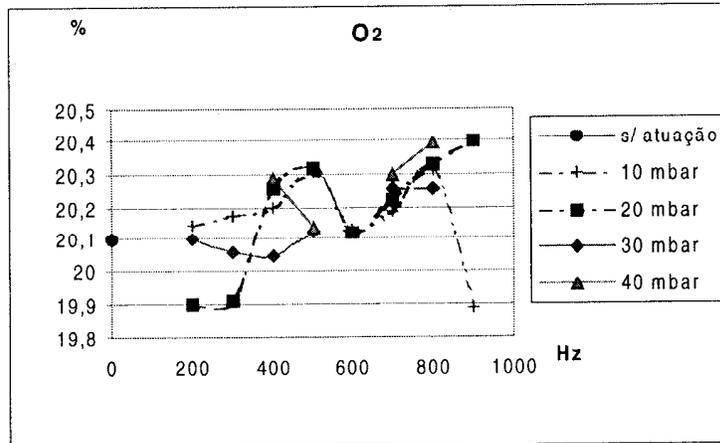


Figura 12. Concentração de O₂ como função da freqüência.

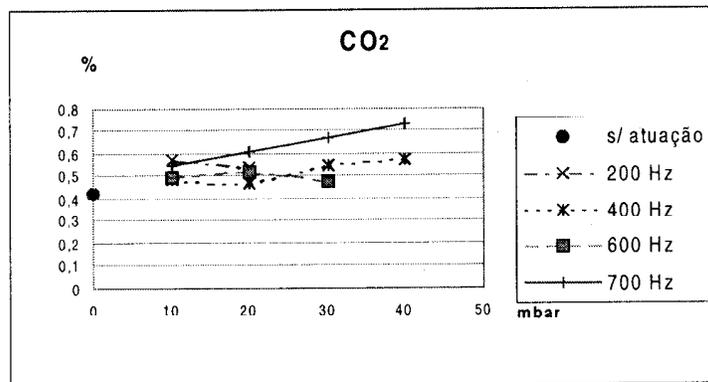


Figura 13. Concentração de CO₂ como função da amplitude de oscilação.

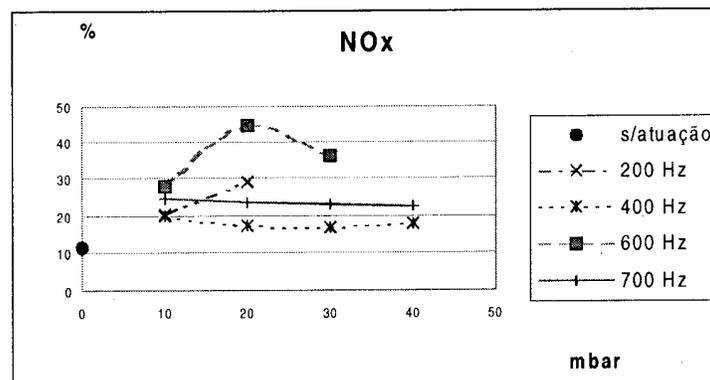


Figura 14. Concentração de NO_x como função da amplitude de oscilação.

O primeiro conjunto de resultados em termos de concentração de gases é apresentado na Figura 12, que mostra a concentração de O₂ em função da frequência de oscilação para todas as amplitudes. Vemos que muito pouco oxigênio foi consumido globalmente no processo (as concentrações variaram de 19,9 a 20,4 %) indicando que a montagem experimental pode realmente ser considerada como tendo produzido uma chama livre. Não se pode afirmar que o processo pulsante carregou menor ou maior quantidade de ar apenas considerando os dados aqui obtidos.

Ainda com relação aos teores obtidos de O₂, não podemos utilizá-los para corrigir quaisquer concentrações de outros gases para 7 % de O₂. Isto porque o erro do analisador causará uma significativa aproximação ao valor 0,21 (em fração molar) no denominador da Eq. (2), porque os valores da concentração de O₂ estão muito próximos de 0,20.

O segundo conjunto de resultados é apresentado na Figura 13, que mostra a concentração de CO₂ em função da amplitude de oscilação no queimador. Aqui também as medidas são meramente qualitativas. O analisador de CO₂ produz um erro de 1% de fundo de escala. Como estamos medindo valores abaixo de 0,8 % e o fundo de escala é 20 %, nosso erro é 0,2 % (absoluto), que corresponde a pelo menos 25 % dos valores medidos.

Uma estimativa do excesso de ar global do processo pode ser obtida. Consideremos o GLP com a fórmula C_{3,425}H_{7,824} (BASTOS, 2001). Para esta formulação, temos a seguinte reação de combustão com ar para um excesso de ar normalizado α :



Considerando que a concentração de O₂ em base seca é da ordem de 20 %, temos:

$$[\text{O}_2]_{\text{BS}} = \frac{5,831\alpha}{27,3\alpha - 1,956} \approx 0,2 \quad \text{p} \quad \alpha \approx 14,7 .$$

Com $\alpha = 14,7$ obtemos $[\text{CO}_2]_{\text{BS}} \approx 0,9 \%$, que faz sentido dentro dos erros de medida inerentes aos experimentos e à incerteza na composição química do GLP. Assim, o excesso de ar global do processo é estimado como da ordem de 1370 %.

Em seguida, na Figura 14, apresentam-se as concentrações obtidas de NO_x como função da amplitude de oscilação. 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.

Ensaio foram também realizados variando a altura do queimador e sua posição no interior da capela. Os resultados obtidos são apresentados nas Tabelas 1 a 3. Nos ensaios em que o queimador foi deslocado do centro da capela, a amplitude foi mantida em 27 mbar porque para 30 mbar a chama apagava.

A concentração de O₂, apresentada na Tabela 1 mostrou-se essencialmente a mesma para todas as situações investigadas.

Tabela 1. Variação da concentração de O₂ com a posição do queimador no interior da capela.

O ₂	% (sem atuação)	% (600 Hz 30 mbar)
A 65 cm da sonda, posição central	19,4	19,4
A 88 cm da sonda, posição central	20,0	19,9
A 115 cm da sonda, posição central	20,2	20,3
A 115 cm da sonda, 14 cm do centro (27 mbar)	20,3	20,3
A 115 cm da sonda, 26 cm do centro (27 mbar)	20,3	20,3

Tabela 2. Variação da concentração de CO₂ com a posição do queimador no interior da capela.

CO ₂	% (sem atuação)	% (600 Hz 30 mbar)
A 65 cm da sonda, posição central	1,11	1,08
A 88 cm da sonda, posição central	0,65	0,76
A 115 cm da sonda, posição central	0,51	0,48
A 115 cm da sonda, 14 cm do centro (27 mbar)	0,45	0,44
A 115 cm da sonda, 26 cm do centro (27 mbar)	0,45	0,46

Tabela 3. Variação da concentração de NO_x com a posição do queimador no interior da capela.

NO _x	p.p.m. (sem atuação)	ppm (600 Hz 30 mbar)
A 65 cm da sonda, posição central	44	73
A 88 cm da sonda, posição central	27	48
A 115 cm da sonda, posição central	24	36
A 115 cm da sonda, 14 cm do centro (27 mbar)	22	32
A 115 cm da sonda, 26 cm do centro (27 mbar)	24	41

Apesar do erro do instrumento nas medidas de concentração de CO₂, as concentrações deste gás, mostradas na Tabela 2, diminuíram conforme o queimador era baixado, permanecendo essencialmente as mesmas conforme o queimador era aproximado da parede.

As concentrações de NO_x, apresentadas na Tabela 3, mostraram a mesma tendência das concentrações de CO₂. Para as distâncias fora do centro consideradas (14 e 26 cm, respectivamente), a presença da parede não afetou as concentrações do poluente, ou seja, não influenciou nas temperaturas médias na chama.

5 Conclusão

Foram estudadas neste trabalho as características de chamas pulsantes difusivas livres e chamas parcialmente pré-misturadas confinadas, 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.

Neste trabalho foram realizadas as seguintes etapas: a) caracterização das faixas de amplitude e frequência onde ocorre a estabilização da chama, e b) realização de medidas das emissões de CO, CO₂, O₂ e NO_x para diferentes condições de trabalho.

Observou-se que a combustão pulsante nos sistemas investigados no presente trabalho altera substancialmente as condições de combustão. Baseado nos resultados para as emissões de CO, CO₂ e O₂, notou-se que a presença do campo acústico intensifica a taxa de mistura entre os reagentes, tanto em chamas confinadas como nas livres. Por outro lado, essa alteração ocasiona um aumento de temperatura na região próxima ao queimador, o que favorece maiores emissões de NO_x, principalmente para proporção estequiométrica de injeção de reagentes.

6 Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESP pela bolsa de mestrado de Daniel Silva Ferreira (processo 99/01300-9) e ao CNPq pelo auxílio à pesquisa (processo 462051/2000-5).

7 Referências

- BASTOS, V.H. *Investigação de chamas de GLP pulsantes difusivas livres*. 2001. 58 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- CARVALHO, J. A. *Investigation of the characteristics of a coal burning Rijke type pulsating combustor*. 1983. 148 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Georgia Institute of Technology, Atlanta.
- CARVALHO, J. A. et al. Definition of heater location to drive maximum amplitude acoustic oscillations in a Rijke tube. *Combustion and Flame*. New York, v. 76, n. 1, p. 17-27, Apr. 1989.
- CARVALHO, J. A.; MCQUAY, M. Q.; GOTAÇ, P. R. The interaction of liquid reacting droplets with the pulsating flow in a Rijke-tube combustor. *Combustion and Flame*. New York, v. 108, n. 1, p. 87-103, Jan. 1997.

CARVALHO, J. A.; LACAVA, P. T. *Emissões em processos de combustão*. Guaratinguetá: Universidade Estadual Paulista, 2001. 76 p.

COOPER, L. P. *Effect of degree of fuel vaporization upon emissions for premixed partially vaporized combustion system*. Relatório NASA TP - 1582, 1980. 22 p.

DELABROY, O. et al. A study of NO_x reduction by acoustic excitation in a liquid fueled burner. *Combustion Science and Technology*, London, v. 119, n. 1, p. 397-408, Oct. 1996.

DUBEY, R. K. et al. 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*, New York, v. 110, n. 3, p. 25-38, July 1997.

DUBEY, R. K. *A parametric study on the effect of an acoustic field on a spray fired, Rijke-tube pulse-combustor*. 1998. 186 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Brigham Young University, Provo.

FERREIRA, M. A. *Abordagem teórica e experimental de combustores do tipo Rijke*. 1997. 227 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

FERREIRA, M. A.; CARVALHO J. A. Performance characteristics of an experimental Rijke type pulsating combustor. *Fuel*, London, v. 69, n. 6, p. 684-689, June 1990.

FOA, J.V. *Elements of flight propulsion*. New York: John Wiley and Sons, 1960, 445 p.

GLARBORG, P. NO_x chemistry in pulse combustion. In: WORKSHOP PULSATING COMBUSTION AND ITS APPLICATIONS. 1993. Lund. *Anais...* Lund Institute of Technology. 1993.

HANBY, V. I. Convective heat transfer in a gas-fired pulsating combustor. *ASME Journal of Engineering for Power*, New York, v. 91, p. 48-52, Apr. 1969.

HEISKANEN, V. P. et al. Pulsating combustion boiler. Patente Finlandesa 91558, International Publication Number: 94/14002. Helsinki, Finlândia, 1994, 4 p.

KELLER, J. O. et al. NO_x and CO emissions from a pulse combustor operating in a lean premixed mode. *Combustion and Flame*, New York, v. 99, n. 3, p. 460-466, Dec. 1993.

LACAVA, P. T.; CARVALHO J. A.; MCQUAY, M. Q. Pulsating combustion characteristics of a spray flame in a Rijke tube with two different atomizers. *Fuel*, London, v. 76, n. 9, p. 845-851, July 1997.

LACAVA, P. T. et al. Efeito da frequência e da amplitude de oscilação no formato de chamas pré-misturadas pulsadas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 15., 1999, Águas de Lindóia. *Anais...* Águas de Lindóia: ABCM, 1999, 1CD.

LORD RAYLEIGH. *The theory of sound*. New York: Dover Publications, 1945, 504 p.

LYONS, V. J. Fuel / air nonuniformity - effect of nitric oxide emissions. *AIAA Journal*. New York, v. 20, n. 5, p. 660-665, May 1981.

MARTINS, C. A. *Emissões de NO_x em combustor pulsante tipo tubo de Rijke operando com combustível gasoso*. 1998. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

TORRES, E. A. et al. Pulsating combustion of a palm oil fruit bark. *Fuel*, London, v. 71, n. 3, p. 257-261, Mar. 1992.

TYNDALL, J. On sounding and sensitive flames. *Physical Sciences*, London, v. 2, p. 30-37, Feb. 1970.

WOOD, A. *Acoustics*. New York: Dover Publications, 1966, 588 p.

ZINN, B. T. *Pulsating combustion*. Advanced combustion methods. London: Academic Press. 1986, 400 p.

Daniel Silva Ferreira

Engenheiro Mecânico pela Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, da Universidade Estadual Paulista, em 1998. Atualmente é mestrando em Engenharia Mecânica na mesma Faculdade.

Vitória Hirth Bastos

Engenheira Química pela Faculdade de Engenharia Química de Lorena em 1996, M.Sc. em Engenharia e Tecnologia Espaciais pelo INPE em 2001.

Pedro Teixeira Lacava

Engenheiro Mecânico pela Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, da Universidade Estadual Paulista, em 1992, M.Sc. em Engenharia e Tecnologia Espaciais pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais em 1995, D.Sc. pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica em 2000. Atualmente ocupa o posto de professor adjunto junto à Divisão de Engenharia Aeronáutica do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, onde atua em nível de graduação e pós-graduação.

João Andrade de Carvalho Jr.

Engenheiro de Infraestrutura Aeronáutica pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica em 1976, M.Sc. em Engenharia Aeroespacial pelo Georgia Institute of Technology em 1980, Ph.D. pelo Georgia Institute of Technology em 1983. Atualmente ocupa o posto de professor titular junto ao Departamento de Energia da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, da Universidade Estadual Paulista, onde atua em nível de graduação e pós-graduação. Pesquisador Nível 1A do CNPq.