

Estudo Experimental Sobre a Atuação Acústica Em Chamas Parcialmente Pré Misturadas.

Daniel Silva Ferreira

João Andrade de Carvalho Jr

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

Pedro Teixeira Lacava

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Divisão de Engenharia Aeronáutica
Pça. Mal. Eduardo Gomes, 50, Vila das Acácias, São José dos Campos, SP, Brasil, CEP: 12228-900
lacava@aer.ita.cta.br

Marco Aurélio Ferreira

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Laboratório Associado de Combustão e Propulsão
Rod. Presidente Dutra, km 40, Cachoeira Paulista, SP, Brasil, CEP: 12700-000

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, redução da formação de poluentes, aumento da taxa de transferência de calor convectiva e redução de investimento quando comparada com técnicas convencionais. 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 em uma câmara vertical refrigerada, com 1 m de comprimento e 25 cm de diâmetro interno, construída em aço inox. O combustor operou com gás liquefeito de petróleo (GLP) tanto para as situações de oscilação como sem oscilação, nas mesmas condições iniciais. Parte da mistura de reagentes (pré-misturada) foi excitada acusticamente antes da saída do queimador, por meio de alto-falante estrategicamente posicionado. O queimador foi alinhado com o eixo longitudinal da câmara e posicionado na sua extremidade inferior. Os experimentos foram conduzidos para 0,16 g/s de GLP queimando com razão de equivalência estequiométrica, 11% de excesso de oxidante e 9% de deficiência da oxidante. Além da análise de gases na saída do combustor, realizou-se uma análise visual das chamas, utilizando uma câmera do tipo CCD e uma rotina de reconstrução tomográfica aplicada às imagens integradas obtidas durante os ensaios. As principais conclusões foram: a) o processo de combustão pulsante produz uma distribuição combustível/ar mais uniforme do que processo não pulsante; b) a presença do campo acústico afeta drasticamente a geometria da chama e, como consequência, as emissões.*

Palavra chave: Combustão, Combustão Pulsante

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. Além destes podemos mencionar a possibilidade da confecção de dispositivos menores, pois, com incremento da taxa de transferência de calor, a mesma demanda de energia é atendida em menores volumes. Entende-se como combustão pulsante o processo de queima que apresenta como característica principal o fato das variáveis de estado que descrevem as condições na zona de queima ocorrerem sob condições oscilatórias, isto é, mudando periodicamente com tempo.

Além do aumento nas taxas de transferência de calor, outra característica típica desta tecnologia é a baixa emissão de poluentes de oxidação parcial, como a fuligem, o CO e os hidrocarbonetos não queimados. As oscilações incrementam o processo de mistura entre o combustível e o oxidante, favorecendo a oxidação do combustível e aumentando a eficiência do processo, além de reduzir a emissão dos poluentes citados (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 (atuação indireta), como é o caso dos combustores tipo tubo de Rijke (Carvalho, 1983). 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 (atuação direta) também podem ser acoplados em câmaras onde a própria chama induz as oscilações, com intuito de amplificar ou atenuar o sinal, visto que esse tipo de câmara não permite grandes variações de amplitude e frequência. Outra vantagem da atuação direta é o melhor controle do processo, pois quando se tem a excitação indireta (pela chama) as oscilações surgem em condições específicas, o que limita a operacionalidade do combustor. Desta forma, através da atuação direta, é possível escolher a frequência e ou amplitude de oscilação da câmara.

Para compreender como a presença do campo acústico afeta a estrutura da chama e a taxa de mistura entre o combustível e o oxidante, Lacava et al. (1999) analisaram o efeito da frequência e da amplitude de oscilação no formato de chamas pré-misturadas pulsadas de GLP (Gás Liquefeito de Petróleo) com ar, através de imagens obtidas por câmeras CCD. Os gases foram misturados instantes antes de entrarem no queimador e, através de um alto-falante estrategicamente posicionado na base do mesmo, a mistura foi excitada acusticamente. Os resultados desse trabalho mostraram que a presença do campo acústico modifica fortemente a estrutura da chama e, conseqüentemente, os processos físicos e químicos que ali se desenvolvem.

Recentemente, Bastos (2001) mostrou que a presença de um campo acústico sobre uma chama difusiva livre (não confinada) originalmente laminar, altera completamente a estrutura da chama. Em algumas combinações de frequência e amplitude a chama amarelada da situação sem atuação, aparência típica de uma difusiva de jato laminar de combustível, tornou-se totalmente azulada, identificando a melhor taxa de mistura entre os reagentes. Neste experimento, o queimador utilizado foi o mesmo de Lacava et al. (1999).

O entendimento dos fenômenos relacionados à combustão pulsante é de fundamental importância, pois essa tecnologia demonstra um potencial muito grande para operações com baixa emissão de poluentes. As pulsações intensificam a mistura entre os reagentes, resultando em um processo de combustão mais intenso, com baixo desperdício de combustível e baixas emissões de CO e fuligem. Contudo, pouca pesquisa tem sido feita para entender a química do nitrogênio e as emissões de NO_x (óxidos de nitrogênio) em chamas pulsantes. A formação de NO_x nessa situação resulta de uma complexa interação entre dinâmica de fluidos e a química (Glarborg, 1993). Durante a fase de combustão do ciclo, significantes gradientes espaciais e temporais de temperatura ocorrem no combustor, em razão do mecanismo de transferência de calor não ser rápido suficiente para manter a temperatura homogênea. Localmente a temperatura pode se aproximar da temperatura de chama adiabática e gradientes de temperatura com mais de 300K podem ocorrer, favorecendo a formação do NO_x. Esses gradientes controlados pelos efeitos de mistura, em geral, ocorrerem de maneira mais pronunciada em sistemas não pré-misturados (Keller et al., 1993). Desta forma, o grande desafio dessa técnica é conciliar a emissão de compostos de oxidação parcial, como o CO, com a emissão de NO_x.

Conforme já discutido, a geometria da chama e a intensidade da mistura entre os reagentes são parâmetros afetados pela presença de um campo acústico, influenciando também os mecanismos reacionais de formação de poluentes. Desta forma, 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 poluentes, sobretudo NO_x. Os experimentos foram realizados em um combustor cilíndrico vertical com a parede refrigerada. A atuação acústica foi feita por um alto falante estrategicamente posicionado no queimador, cujo os detalhes são apresentados na próxima seção. Basicamente, os objetivos do presente trabalho foram: a) caracterizar as faixas de amplitude e frequência onde ocorre a estabilização da chama; b) realizar estudos das emissões de poluentes para as diferentes condições de amplitude e frequência de oscilação; c) realizar tomografia de chama para estudar a geometria da chama com a atuação acústica.

2. Arranjo Experimental

O queimador utilizado nos experimentos foi projetado com o objetivo de permitir operações tanto com chamas pré-misturadas como com chamas difusivas. No canal interno do queimador desenvolve o escoamento de GLP (Gás Liquefeito de Petróleo), utilizado como combustível, ou GLP + ar, no caso de chamas pré-misturadas. A vazão de GLP utilizada para projeto do queimador foi 0,16 g/s. Na base desse canal está acoplado um alto-falante responsável pela atuação acústica e na saída do canal foi posicionado um disco de 11,5 mm para ancorar a chama nas proximidades do queimador. No canal externo desenvolve o escoamento do ar difusivo, que não sofre atuação acústica. A espessura do canal de saída do escoamento interno (GLP + ar) é de 2,75 mm e escoamento externo 3,0 mm. No canal interno ainda está posicionado um transdutor de pressão piezoelétrico, denominados de transdutor P1, que serve de referência para amplitude e frequência de atuação sobre o escoamento. A Fig. 1 apresenta um esquema do queimador.

Os experimentos foram realizados em uma câmara cilíndrica, posicionada verticalmente, com 1 m 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 câmara, 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 Fig. 2 apresenta um esquema da câmara.

Para atuação acústica no queimador, um sinal elétrico senoidal é obtido a partir do gerador de funções Hewlett-Packard, modelo HP8116A, onde é atribuída a frequência desejada no alto-falante. Na sequência, a amplitude do sinal é ajustada no amplificador Proximity, modelo 750AP (480W), antes de chegar no alto-falante KD 202, com potência de 100W e Impedância de 16 Ohms. Conforme já descrito, no queimador e na câmara de combustão estão posicionados transdutores de pressão piezoelétrico Kistler 7261, faixa de 0-10 bar, que é responsável pela conversão do sinal de

pressão acústica em sinal elétrico. Os sinais de tensão dos transdutores passam por amplificadores de carga Kistler 5006 e são lidos em um osciloscópio Tektronix 7633 e no sistema de aquisição de dados.

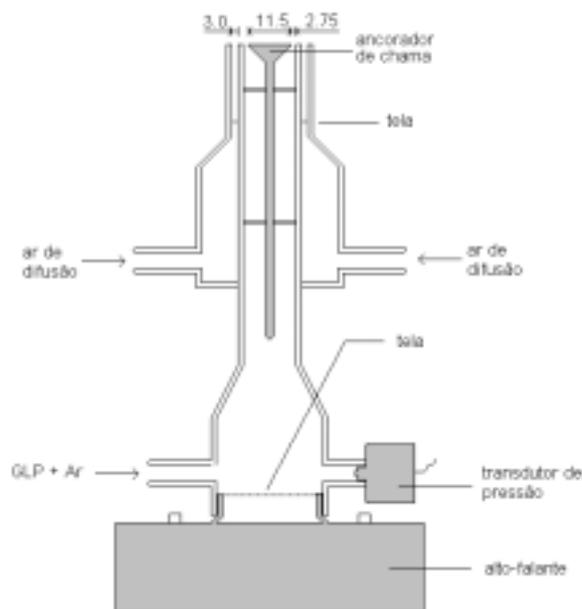


Figura 1 – Queimador pré-misturado / difusivo com atuação acústica (dimensões em mm).

A captação dos gases na saída da câmara é feita por uma sonda devidamente refrigerada. Uma vez sugados por uma bomba de vácuo, os gases de combustão passam por filtros e condensadores antes de chegarem aos analisadores contínuos de CO (infravermelho), CO₂ (infravermelho), O₂ (termomagnético) e NO_x (quimiluminescente), todos com leitura em base seca. Os erros destes equipamentos são de 0,02%, 0,20%, 0,23%, e 5ppm, respectivamente.

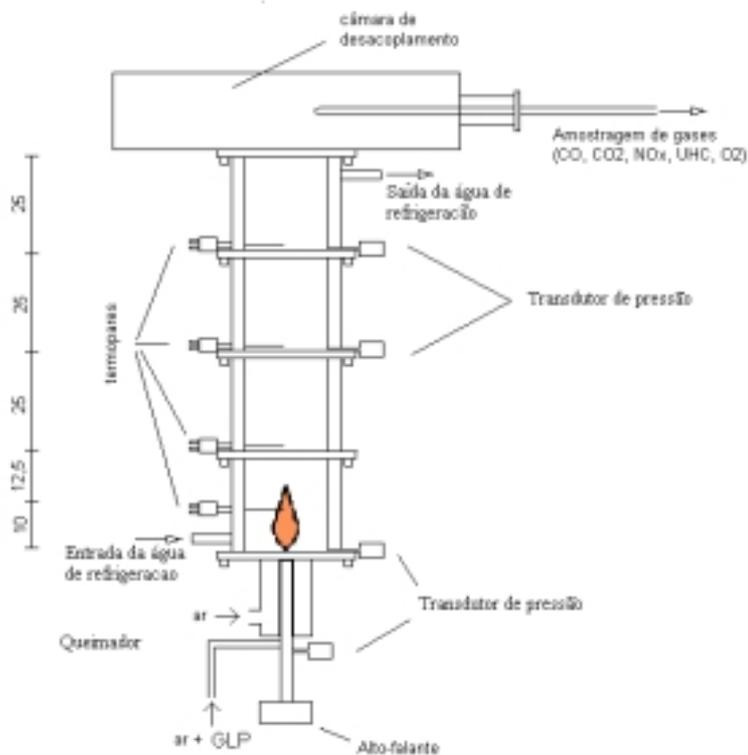


Figura 2 – Esquema da câmara de combustão.

Tanto o sinal proveniente dos analisadores de gases, bem como os dos termopares e os dos transdutores de pressão, são adquiridos em um sistema da National Instruments, 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 esquema de condicionamento para aquisição dos sinais de termopares, o SCXI1000, permitindo a multiplexação de um de entrada analógica para 32 canais para leitura de termopar. O sistema está configurado para realizar 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.

As vazões mássicas de GLP, ar de pré-mistura e ar de difusão foram obtidas por meio de placas de orifício. Os ensaios foram feitos para diferentes combinações entre as vazões de ar de pré-mistura e ar difusivo. O sistema de atuação acústica permitiu fixar uma determinada amplitude de oscilação e variar a frequência. Desta forma, foi possível estudar o efeito desses parâmetros de forma mais dissociada possível.

Foi utilizado o sistema de aquisição de dados SCXI1000, da National Instruments. Este equipamento conta com uma placa de aquisição de dados de 1,25 MS, com 16 canais de entrada analógicos e 2 canais de saída analógicos, sendo que estes canais podem ser multiplexados para 32 entradas(cada um). Foram realizadas as leituras de 6 temperaturas, 8 pressões e 4 analisadores. O sistema fazia 30 leituras por minuto, sendo que a 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. Entre as mudanças de condição de atuação não eram considerados os dados, sendo esperado até que o sistema entrasse em regime estacionário, isto porque havia uma inércia na leitura devido a distância entre os combustores e os analisadores.

Tomografia de chama

O objetivo desses ensaios foi visualizar na chama as regiões de intensa reação química, além da presença dos radicais C2 e CH e da fuligem. As imagens foram obtidas por meio de uma câmera CCD Marshall V-1070-EIA, com resolução espectral de 400nm a 1100nm, com controle do tempo de exposição entre 1/10000 e 1/60 segundos. O sensor ótico da câmera possui 811 pixels na horizontal e 510 na vertical, com sensibilidade mínima de 0,03 Lux. A área do sensor possui 7,95mm (horizontal) x 508mm (vertical). Acoplado à câmera foi utilizada uma lente Fujinon CF50B, f/1.4, com foco e abertura controlável, sendo a esta adicionados filtros de interferência nos comprimentos de onda 515,40, 431,09 e 802,00 nm, correspondentes aos comprimentos de onda da emissão quimiluminescente dos radicais C2, CH e fuligem, respectivamente. A transmitância para o filtro de C2 é 0,66 e para os de CH e fuligem é 0,55.

Uma placa de aquisição de imagens Matrox Meteor/RGB com capacidade de taxa de aquisição de até 42Mb/s, digitalizava as imagens adquiridas pela câmera. A partir destas era gerada uma imagem média de 100 imagens instantâneas e após era feita a reconstrução tomográfica. A reconstrução tomográfica obtém um perfil que quando integrado em uma revolução de 2π radianos gera a imagem integrada (imagem média obtida pela câmara). A Fig. 3 apresenta um esquema deste procedimento.

Para reconstrução das imagens utilizou-se o algoritmo de Souza (1998), desenvolvido em ambiente MATLAB. Tal modelo é aplicável a objetos axissimétricos e considera que cada pixel da câmera CCD integra a radiação emitida pela chama a partir de um caminho ótico conhecido. O mesmo procedimento acima é melhor descrito por Lacava (2000). Como a chama é considerada axissimétrica, é necessário se conhecer uma das metades da imagem reconstruída. Desta forma, o programa apresenta apenas a metade esquerda, a partir do eixo de simetria da chama. A Fig. 4 apresenta uma imagem obtida pela câmara e sua reconstrução tomográfica.

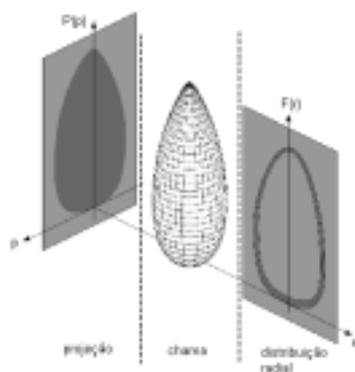


Figura 3 – processo de tomografia

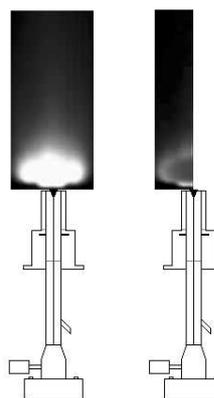


Figura 4 – Figura da chama integrada e da tomografia

Para evitar a interferência de fontes luminosas externas, que poderiam alterar os resultados obtidos, foi construído um duto que interligava o visor da câmara de combustão à câmera CCD, posicionada a cerca de 5 m distância do visor. Este duto é de madeira e fora pintado de preto fosco para não refletir a luz proveniente da chama.

3. Resultados

Conforme mencionado anteriormente, os ensaios foram realizados na vazão de 0,16 g/s de GLP com o ar total para $\phi=0,9$. Para melhor estabilizar a chama, do total de ar, parte 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 foi injetada na câmara de combustão através do canal externo do queimador, ou seja, sem sofrer atuação acústica. A Tabela 1 resume os casos mostrados neste trabalho.

Tabela 1 – Resumo das condições de ensaio.

ϕ	Ar	Frequências [Hz]	Amplitudes [mbar]
0,90	15% Pré 85% Difusivo	0 – 1300	10, 20 e 30
	60% Pré 40% Difusivo		

15% Pré 85% Difusivo

Para o caso onde a injeção de ar de pré-mistura é de 15% e a de ar difusivo 85% com menor massa sofrendo atuação, é visível através das figuras de tomografia que a zona de reação se localiza em um estreito canal entre os jatos de pré mistura e difusão. Observa-se que a atuação direta melhora a taxa de mistura entre os reagentes diminuindo a formação de fuligem como é mostrado na tabela 2 para os casos sem atuação e 225 Hz com 10, 20 e 30mbar de amplitude. Nesta situação todas as frequências e amplitudes estudadas apresentaram melhora em relação ao caso sem atuação

Sem atuação acústica, nota-se que para esta chama, predominantemente difusiva, existem duas regiões distintas de intensa emissão quimiluminescente. Nas proximidades do queimador a chama se estabelece em um estreito canal entre os jatos de pré-mistura e ar externo que emergem do queimador. Através das imagens com o filtro no comprimento de onda 802 nm, pode-se dizer que nessa região primária praticamente não há presença de fuligem. Já na região secundária nota-se uma forte emissão no comprimento de onda característico da presença de fuligem.

Comparando as imagens para o comprimento de onda 802 nm, verifica-se que tanto o aumento da frequência como da amplitude foram favoráveis à redução da fuligem na região secundária da chama, onde, em alguns casos, a concentração foi baixa tal que a emissão quimiluminescente não foi suficiente para ser detectada pelo sistema ótico.

Ainda analisando as imagens da tabela 2, nota-se que, além da região secundária, a presença do campo acústico também afeta a região primária. Aparentemente, para o presente caso, tanto o aumento da amplitude como o da frequência, fazem com que a chama, que se estabelecia originalmente em um estreito canal entre jatos, disperse-se para região interna, em direção ao eixo de simetria. Isto pode ser melhor observado analisando a emissão quimiluminescente em uma linha horizontal localizada na imagem a 20 pixels do queimador (cerca de 20mm de distância). A Figura 05 compara esse comportamento para a frequência de 225Hz variando a amplitude e a Figura 06 para amplitude 20mbar variando a frequência.

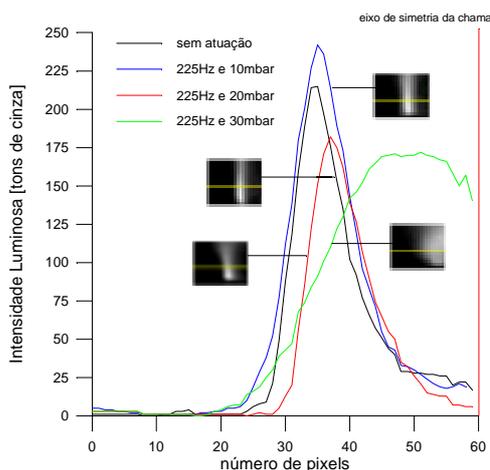


Figura 05 – Variação da intensidade luminosa como função do número de pixels para as condições sem atuação, 225 Hz, e 10, 20 e 30 mbar.

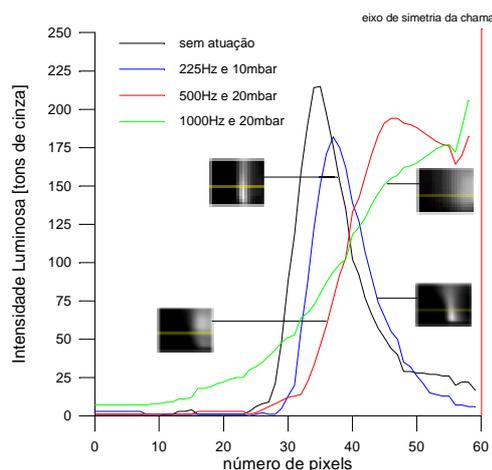


Figura 06 - Variação da intensidade luminosa como função do número de pixels para as condições sem atuação, 225 Hz e 10 mbar, 500 Hz e 20 mbar, e 1000 Hz e 30 mbar

Em casos onde a porcentagem de ar de pré-mistura foi pequena, como no caso em questão (15%), não se observou acoplamento entre a frequência de atuação e a frequência natural do combustor para qualquer amplitude de atuação, pois a pressão acústica obtida no transdutor 2 sempre esteve próxima a da situação sem oscilação, como pode ser observado na figura 07.

A formação de NO_x se manteve praticamente constantes para este caso, como é mostrado na Figura 08. Apesar da redução de fuligem e do aumento da espessura da chama, ela ainda tem um caráter de chama difusiva, onde a emissão de NO_x tende a ser menor do que uma chama predominantemente pré – misturada. Isto também está correlacionado com as baixas temperaturas obtidas na chama, quando trabalhamos com uma maior porcentagem de ar de pré-mistura temos zonas com temperatura mais elevadas nesta região.

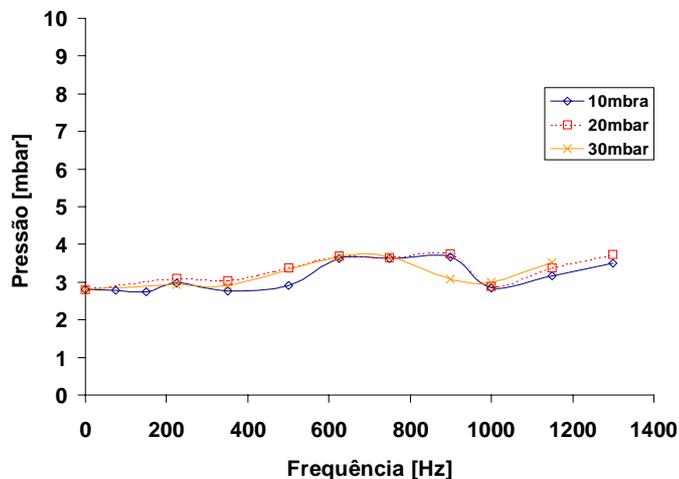


Figura 07 – Pressão P2 no combustor em relação a frequência de atuação.

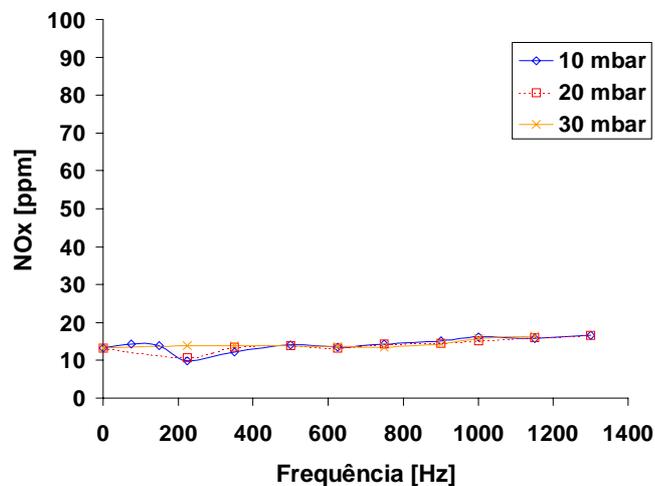


Figura 08 – Variação da emissão de NO_x em relação a frequência de atuação.

Observando a Fig. 09, que mostra a variação na formação de CO em relação a variação da frequência de atuação, nota-se que em todos os casos ocorre uma diminuição da emissão desse poluente (erro de 0,02%). Para a frequência de 500 Hz é obtido o mínimo valor de CO. Estes valores são mais expressivos quando lembramos que, para o atual caso, já estamos trabalhando com um excesso de ar ($\phi=0,9$) o que desfavorece a formação de CO.

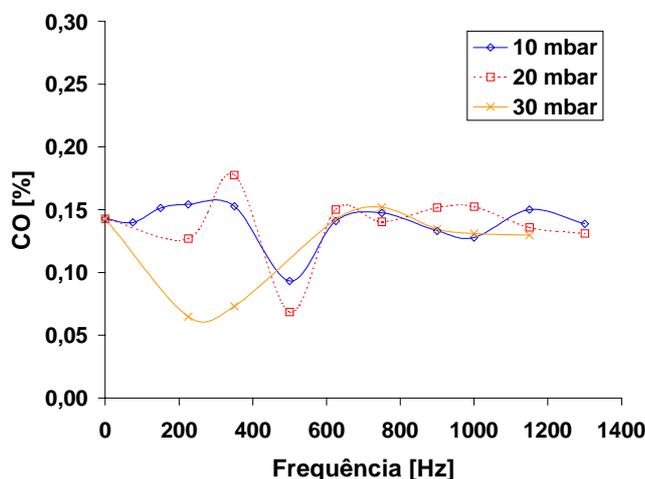


Figura 09 – Variação da emissão de CO em relação a frequência de atuação

60% Pré 40% Difusivo

No outro caso mostrado, onde a injeção de ar de pré-mistura é de 60% e a de ar difusivo 40% observa-se claramente que a zona de reação da chama não se localiza mais em um estreito canal entre os jatos de pré-mistura e de difusão estando posicionada acima da base do queimador em uma região mais dispersa, isto porque a pré-mistura oferece condições para que as reações ocorram naquela região. O formato da chama é diferente do observado para o caso anterior, temos temperaturas mais altas próximas à base do queimador e não observamos a formação de fuligem, pelo menos em intensidade suficiente para que a câmera utilizada fosse capaz de captar.

Para a condição de 500 Hz observa-se um aumento da amplitude pressão no combustor (Figura 9). Neste momento tem-se uma geometria de chama na forma elíptica bem próxima a base do queimador. 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 (1945). De acordo com esta formulação a amplitude das oscilações crescerá quando

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

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 a integração é 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 et al., 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. Desta forma, a estrutura da chama nesta condição onde ocorreu o acoplamento parece satisfazer o critério de Rayleigh. É o que se observa nas imagens da tabela 3

Em relação a emissão de NO_x os níveis são bem maiores que os do caso anterior, Fig. 11, em razão do nível de pré-mistura ser maior. Observa-se que até a frequência de atuação de 800 Hz o nível de NO_x cai em relação a condição sem atuação, o mesmo ocorrendo para 1150Hz Um dos motivos para esta redução está na redução do comprimento da chama, como é observado na tabela 3. Como o NO_x térmico depende do tempo em que os gases ficam expostos à temperatura elevada, quanto maior for a zona de gases quentes, maior será a formação de NO . Esta diminuição também se deve a uma melhor distribuição de temperaturas na chama (Keller et al., 1993).

A Fig. 12 mostra a variação da emissão de CO em relação a variação da frequência de atuação. Devido a porcentagem de pré-mistura ser alta, 60% da massa total de ar, praticamente não se observa a formação desse composto, visto que o erro do analisador é de 0,02%.

Tabela 2 – Imagens do teste 15Pré85Dif

Frequência [Hz]	Amplitude [mbar]	Imagem sem filtro	Imagem 802nm (fuligem)
0	0	 A = 11 t = 1/125 s	 A = 1.4 t > 1/60 s
225	10	 A = 11 t = 1/125 s	 A = 1.4 t > 1/60 s
225	20	 A = 8 t = 1/125 s	 A = 1.4 t > 1/60 s
225	30	 A = 8 t = 1/125 s	Sistema ótico não identico u emissão quimilumi-nescente

Tabela 3 – Imagens do teste 60Pré40Dif.

Frequência [Hz]	Amplitude [mbar]	Imagem sem filtro	Imagem 802nm (fuligem)
0	0	 A = 11 t = 1/125 s	Sistema ótico não identico u emissão quimilumi-nescente
350	10	 A = 11 t = 1/125 s	Sistema ótico não identico u emissão quimilumi-nescente
500	10	 A = 11 t = 1/125 s	Sistema ótico não identico u emissão quimilumi-nescente
500	20	 A = 11 t = 1/125 s	Sistema ótico não identico u emissão quimilumi-nescente

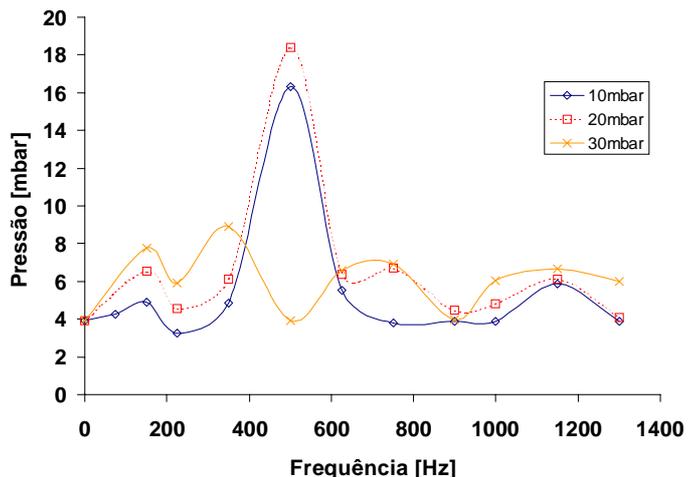


Figura 10 – Pressão P2 no combustor em relação a frequência de atuação.

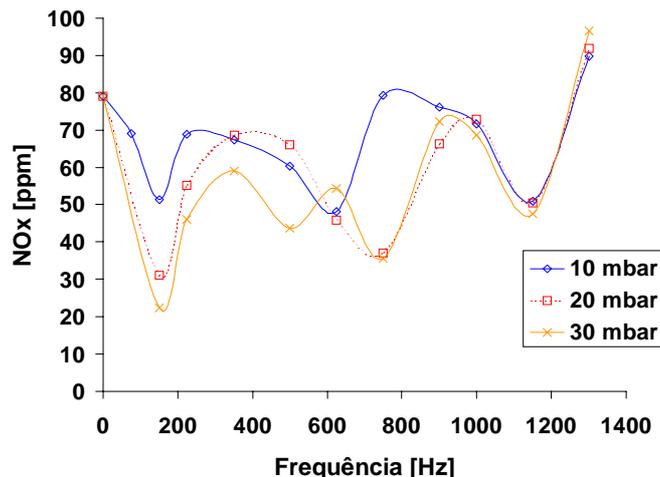


Figura 11 – Variação da emissão de NO_x em relação a frequência de atuação.

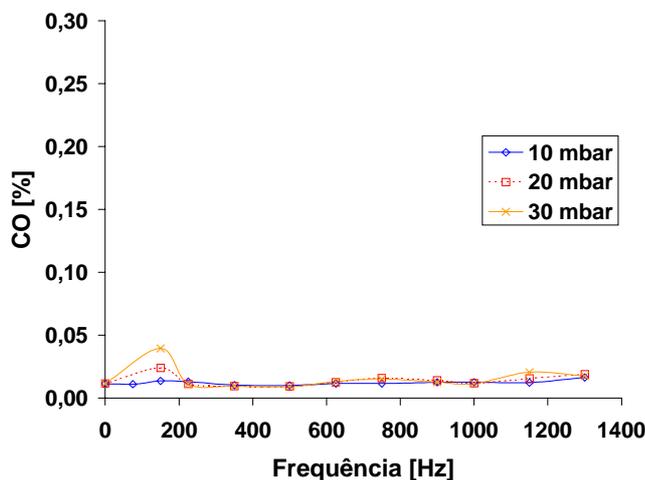


Figura 12 - Variação da emissão de CO em função da frequência de atuação.

4. Conclusões

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.

Observou-se que a combustão pulsante nos sistemas investigados no presente trabalho altera substancialmente as condições de combustão. Baseado nos resultados para a emissão de CO, notou-se que a presença do campo acústico intensifica a taxa de mistura entre os reagentes. Por outro lado, essa alteração ocasiona um aumento de temperatura na região próxima ao queimador, o que favorece maiores emissões de NO_x.

Através dos sensores de amplitude de pressão posicionados ao longo da câmara, observou-se que o acoplamento no combustor ocorre quando o sistema de atuação propicia uma geometria de chama na forma elíptica bem próxima a base do queimador. Para que amplitudes mais altas sejam estabelecidas na câmara de combustão o critério de Rayleigh precisa ser satisfeito, pois é uma condição necessária.

A massa que sofre a atuação direta do alto falante difere dependendo da condição do teste, maior ou menor quantidade de ar de pré-mistura, e como foi observado isto influi no resultado final, quando temos uma massa maior sendo excitada acusticamente a atuação é mais efetiva.

Outro fato também observado é que a frequência e a amplitude de atuação não são diretamente proporcionais a taxa de melhora da mistura. A frequência de atuação esta correlacionada com a frequência natural da cavidade acústica do combustor utilizado e a amplitude de atuação, dentro dos níveis investigados, auxilia ate certo ponto e a partir dai muda o escoamento de tal forma que dificulta a mistura (o processo de combustão).

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESP pela bolsa de mestrado de Daniel Silva Ferreira (processo 99/01300-9), pelo projeto 96/10310-0 e ao CNPq pelo auxílio à pesquisa (processo 462051/2000-5).

6. Referências

- Bastos, V.H., “Investigação de Chamas de GLP Pulsantes Difusivas Livres”, São José dos Campos, 2001. Dissertação (Mestrado em Ciência Espacial/Combustão) – Laboratório Associado de Combustão e Propulsão, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001.
- Carvalho Jr., J. A. Investigation of the characteristics of a coal burning Rijke type pulsating combustor. Georgia, 1983. Thesis (Doctorado Thesis in Science) - Georgia Institute of Technology.
- Glarborg, P.; Miller, J.A.; Kee, R.J. Kinetic modeling and sensitivity analysis of nitrogen oxide formation in well-stirred reactors. *Combustion and Flame*, v.65, p.177-202, 1986.
- Glarborg, P. NOx chemistry in pulse combustion. In: Workshop in Pulsating Combustion and its Applications, 1993. Proceedings... Sweden: Lund Institute of Technology.
- Keller, J.O., Bramlette, T.T., Barr, P.K., Alvarez, J., Paper presented at the 1993 Spring Meeting of the Western States Section/The Combustion Institute, Utah, 1993.
- 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.
- Lacava, P.T., Ferreira, D.S., Carvalho, J.A., e Caldeira Pires, A.A., 1999, “Efeito da Frequência e da Amplitude de Oscilação no Formato de Chamas Pré-misturadas Pulsadas”, XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Anais/CD, Área de Combustão.
- Lacava, P. T. Investigação experimental do enriquecimento do ar na incineração de resíduos aquosos. São José dos Campos, 2000. Tese (Doutorado em Energia) – Divisão de Engenharia Aeronáutica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica.
- Martins, C. A. Emissões de NOx em combustor pulsante tipo tubo de Rijke operando com combustível gasoso. São José dos Campos, 1998. Dissertação (Mestrado em Ciência Espacial/Combustão) – Laboratório Associado de Combustão e Propulsão, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1998.
- Rayleigh, L. The theory of sound. New York: Dover, 1945. v.2.
- Souza, N., Processamento de Imagem Tomográfico. Lisboa, Portugal, 1998. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, 1998.

Experimental Study on the Acoustic Actuation in Partially Premixed Flames.

Daniel Silva Ferreira

João Andrade de Carvalho Jr.

State university From São Paulo, Campus of Guaratinguetá, Depto. of Energy
Av. Dr. Ariberto Pereira of Cunha, 333, 12500-000 - Guaratinguetá, SP, Brazil
daniel@lcp.inpe.br , joao@feg.unesp.br

Pedro Teixeira Lacava

Technological institute of Aeronautics, Division of Aeronautical Engineering Depto of Propulsion
Pç. Badly. Eduardo Gomes, 50, 12228-900 - São José of Campos, SP, Brazil
lacava@aer.ita.cta.br

Marco Aurélio Ferreira

National institute of Space Researches, Laboratory Associated of Combustion and Propulsion
Rod. President Dutra km 40, 12700-000 – Cachoeira Paulista – SP, Brazil

Abstract. Pulse combustion has gained interest in today’s research due to indications that its applications in energy generation may offer several advantages, such as: fuel economy, reduced pollutants formation, increase of convective heat transfer rates and investment reduction when compared with conventional techniques. An experimental study was conducted with the objective of investigating the emissions in the product gases in the combustion with acoustic oscillations. The studied gases were carbon monoxide and nitrogen oxides. The experiments were performed in a stainless steel vertical refrigerated chamber, with a length of 1m and an internal diameter of 25 cm. The fuel was liquefied petroleum gas (LPG). The combustor was operated in non pulsating and pulsating conditions, with the same mass flow rates of fuel and air. Part of the reactants mixture (premixed) was acoustically excited by means of a strategically positioned speaker, before the burner outlet section. The burner was aligned with the chamber axis and positioned at its bottom section. The experiments were performed for 0.16 g/s of LPG burning in three conditions: stoichiometric, 11 % air excess and 9 % air deficiency. Besides the gas analysis at the combustor outlet, a flame visual analysis was performed by means of a CCD chamber. A tomographic reconstruction routine was applied to the integrated images obtained during the experiments. The main conclusions were: a) the pulse combustion process produces a more uniform distribution of the fuel/air mixture; b) the presence of the acoustic field affects drastically the flame geometry and, as consequence, the pollutants emission rates.

Keywords: *Combustion, Pulsating Combustion.*