

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE DIFERENTES CONFIGURAÇÕES PARA QUEIMADORES PULSANTES

Alexandre Dias Flügel

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Departamento de Propulsão
Pça. Mal. Eduardo Gomes 50, São José dos Campos – SP, Brasil, 12228-900
flugel@ita.br

Daniel Silva Ferreira

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

Ana Maura Araujo Rocha

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

Pedro Teixeira Lacava

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Departamento de Propulsão
Pça. Mal. Eduardo Gomes 50, São José dos Campos – SP, Brasil, 12228-900
placava@ita.br

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
joao@feg.unesp.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
marco@lcp.inpe.br

Resumo. *A combustão pulsante tem recebido interesse nas pesquisas atuais devido às indicações que sua aplicação na geração de energia pode oferecer diversas vantagens, tais como: economia de combustível, redução de formação de poluentes, aumento na taxa de transferência de calor convectiva e investimento reduzido quando comparada com outras técnicas. Contudo, os sistemas de combustão pulsante onde o processo de combustão induz as oscilações acústicas, em geral, são operacionalmente instáveis e não atrativos para aplicações industriais. Deste modo, o futuro das chamas pulsadas será em processos onde as oscilações são induzidas por um meio externo, por exemplo, por um alto-falante. No presente trabalho diferentes configurações para queimadores pulsantes são sugeridas e verificou-se a influência da geometria do queimador nas condições de oscilação.*

Palavras chave: combustão pulsante, queimadores pulsados, combustão com atuação acústica.

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 em comparação com técnicas convencionais. Entende-se como combustão pulsante o processo de queima que apresenta como característica principal o fato das variáveis de estado que descrevem as condições na zona de queima ocorrerem sob condições oscilatórias, isto é, mudando periodicamente com tempo (Zinn, 1986). Já nos processos de combustão convencionais, não há correlações entre as flutuações existentes em um determinado ponto da câmara de combustão e as flutuações de outro ponto, com exceção da própria estrutura turbulenta presente (Libby e William, 1994). Entretanto, para chamas pulsadas as correlações temporais ou espaciais são organizadas de tal forma que elevadas amplitudes são estabelecidas.

Alguns combustores são concebidos com geometria propícia para que o próprio processo de combustão gere as oscilações. Este é o caso do tubo de Rijke e de Bosscha e Riess (Zinn, 1986). Entretanto, nos projetos convencionais de câmaras de combustão é necessário utilizar atuadores externos como alto-falantes, os quais poderão tanto atenuar como amplificar o sinal acústico (Botura, 1998). Mesmo em combustores desenhados para geração de instabilidades acústicas, estas ocorrem apenas em algumas circunstâncias, o que restringe o intervalo operacional do dispositivo.

Apesar das vantagens já estabelecidas de um processo de combustão pulsado sobre o não pulsado, a implementação prática desse tipo de tecnologia ainda requer uma melhor atenção sobre os fenômenos envolvidos e ainda não devidamente equacionados.

Alguns trabalhos experimentais recentes realizados no Brasil sobre a combustão pulsante procuraram analisar como as condições de oscilação afetam a estrutura da chama. Nesses experimentos, as oscilações foram impostas à chama através de um alto-falante estrategicamente posicionado na linha de combustível ou oxidante do queimador utilizado.

Através de visualização com uma câmera CCD (*coupled charge device*) e posterior tratamento tomográfico das imagens obtidas, Lacava et al. (1999) estudaram o efeito da frequência e da amplitude de oscilação em chamas pré-misturadas de GLP (gás liquefeito de petróleo) e ar em proporção estequiométrica. As imagens mostraram que a presença do campo acústico afeta consideravelmente a estrutura da chama e que, para uma dada frequência de oscilação, o aumento da amplitude causa uma redução do comprimento visível desta. Por outro lado, para uma dada amplitude, notou-se que o aumento da frequência intensifica a zona de recirculação a jusante do queimador.

Bastos (2001) estudou o efeito do campo acústico sobre uma chama de difusão laminar livre, também utilizando a técnica de tomografia de chama e a análise dos gases de combustão no duto de saída de uma estrutura do tipo “capela”, onde o queimador foi internamente posicionado. Os resultados mostraram que, para determinadas combinações de frequência e amplitude, a coloração da chama, que sem a presença das oscilações é amarelada e com elevada presença de fumaça, muda para a tonalidade azul e com uma estrutura típica de chamas turbulentas. A análise da composição dos gases de combustão mostrou que quando a chama altera-se para esta condição turbulenta, a emissão de NO_x aumenta consideravelmente. Isto pode ser explicado pela melhor mistura entre os reagentes na zona de queima e o aumento da temperatura nessa região quando as oscilações são impostas.

Ferreira (2001) estudou a influência da atuação acústica sobre chamas parcialmente pré-misturadas e confinadas de GLP com ar para as razões de equivalência $\phi = 0,9$, $\phi = 1$ e $\phi = 1,1$. O queimador utilizado possuía dois canais concêntricos; no interno escoava uma pré-mistura de combustível e ar e no externo apenas o ar complementar. A atuação acústica era feita através de um alto-falante posicionado no canal interno, ou seja, somente no fluxo de pré-mistura. Os experimentos foram realizados em um reator cilíndrico. A análise de gases na saída desse reator mostrou que a presença do campo acústico afeta mais intensamente as chamas onde a quantidade de ar pré-misturado com o combustível é modesta, até 25 % do ar total, ou seja, chamas predominantemente difusivas. Notou-se uma substancial redução nas emissões de CO e aumento da emissão de NO_x .

No trabalho de Ferreira (2001) também foi utilizada a técnica de tomografia de chama. Com a colocação de um filtro adequado no sistema ótico utilizado, pôde-se visualizar a presença de fuligem na chama. As imagens mostraram que para as chamas com 12 e 25 % de ar pré-misturado e sem atuação acústica, há a intensa presença de fuligem; contudo, a introdução do campo acústico foi capaz de reduzir a formação de fuligem até o nível onde a emissão quimiluminescente desta não foi suficiente para ser detectada pelo sistema ótico. Para chamas com 50 e 60 % de pré-mistura, o sistema ótico não detectou a presença de fuligem nas situações com ou sem oscilação.

No mesmo combustor do trabalho de Ferreira (2001), Rocha (2002) analisou a situação de combustão pulsante com chamas de difusão de gás natural com ar, desde a estequiometria até a combustão extremamente pobre ($\phi = 0,3$). A excitação acústica é atingida por um alto falante posicionado na linha de ar. Os resultados para análise de gases na saída do combustor mostraram que há redução de CO e aumento da emissão de NO_x com a presença do campo acústico para combustão nas proximidades da estequiometria. No entanto, para regimes de combustão com elevado excesso de ar e determinadas combinações de frequência e amplitude de oscilação, foi possível obter baixa emissão desses dois poluentes.

Os resultados comentados sobre chamas atuadas acusticamente são oriundos de experimentos onde o alto-falante foi posicionado na base do queimador, por conveniência da montagem. Um exemplo típico é o queimador utilizado por Rocha (2002), esquematizado na Fig.1. Nenhum dos trabalhos citados visava estudar a influência da posição do alto-falante e da geometria do queimador sobre as oscilações acústicas. A imposição de uma onda acústica ao escoamento de ar ou combustível demanda um gasto de energia, correspondente à energia consumida pelo sistema de atuação (gerador de funções, amplificador de sinal e alto-falante). Se a posição do alto-falante em acordo com geometria do queimador for capaz de excitar o escoamento em um dos harmônicos naturais da montagem, menos energia será utilizada no alto-falante para se atingir uma determinada amplitude de oscilação. Além disso, a resposta acústica do queimador, ou seja, se ele se comporta como um tubo fechado/aberto (1/4 de onda) ou aberto-aberto (1/2 onda), é de fundamental importância para se determina teoricamente quais são as frequências naturais da montagem. Desta forma, o presente artigo apresenta resultados sobre o comportamento acústico de diferentes propostas para queimadores pulsantes e, no final, também apresenta um queimador projetado e construído baseado nos resultados encontrados.

2. Montagem Experimental

As configurações estudadas no presente trabalho simularam a atuação acústica no duto do ar oxidante de um queimador pulsante. Para isso, um tubo com 700 mm de comprimento e 3” de diâmetro foi utilizado como base da investigação. Para que diferentes posições e geometrias pudessem ser estudadas, foram utilizados “luvas” de acoplamento, divisores, câmara de desacoplamento e cone de fixação do alto-falante, conforme apresenta a Fig. 2; contudo, o comprimento e o diâmetro do duto sempre foram mantidos.

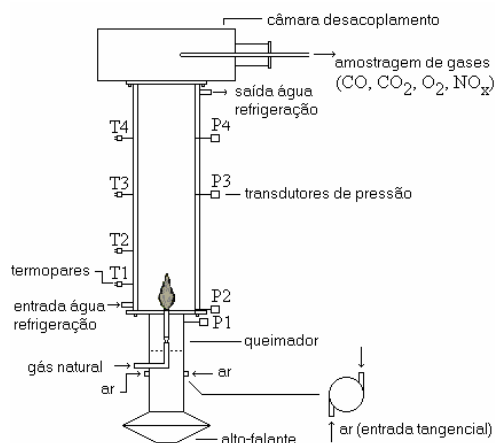


Figura 1. Montagem utilizada no trabalho de Rocha (2002).

Na Fig. 2, as setas indicam a posição onde o transdutor de pressão tipo piezelétrico foi acoplado na configuração em questão, sendo que L representa o comprimento do duto. A escolha dessas posições está relacionada com a tentativa de se identificar qual é o comportamento que o sistema mais se aproxima, se o de um tubo de 1/2 onda ou de 1/4 de onda.

A configuração 1 é típica dos queimadores pulsantes utilizados nos trabalhos citados no item anterior, ou seja, com o alto-falante posicionado na base do duto. A configuração 2 apresenta um tubo com extremidade fechada e a excitação acústica nessa extremidade, ou seja, no ventre de pressão. A configuração 3 continua sendo um tubo fechado – aberto, só que agora com excitação na extremidade aberta, nó de pressão. Na configuração 4, uma câmara de desacoplamento é adicionada em uma das extremidades, ou seja, uma câmara com seção transversal de tal forma superior à seção do tubo para que essa extremidade também possa ser considerada aberta. Desta forma, a configuração 4 simula um tubo aberto em ambas extremidades (tubo de 1/2 onda). Para a situação onde se deseja um queimador pulsante com geometria do tipo extremidades abertas, a câmara de desacoplamento faz-se necessária para que se possa adicionar o ar de combustão no queimador e não se perca a condição de tubo aberto-aberto. A configuração 5 é semelhante à configuração 4, com exceção da câmara de desacoplamento. O objetivo desta configuração é verificar se a presença da câmara de desacoplamento altera o comportamento acústico do tubo. No caso da configuração 6, o alto falante foi posicionado na extremidade oposta à da câmara de desacoplamento.

Um gerador de funções era responsável por gerar um sinal senoidal na frequência desejada para a atuação acústica. A amplitude era então ajustada em um amplificador de sinais e finalmente o sinal alimentava um alto-falante de 12” de diâmetro e potência máxima de 900W. O tensão de alimentação foi mantida constante em 10,00±0,05V, verificada constantemente através de um multímetro. Observou-se um ruído de fundo de 13mV na saída do amplificador, o que não compromete os resultados aqui encontrados. A leitura da condição oscilação (frequência e amplitude) no interior do tubo foi obtida através de um transdutor de pressão piezelétrico, o sinal passava por um amplificador de cargas e finalmente era lido em um osciloscópio. A frequência do sinal imposto ao alto-falante foi variada entre 50 e 1300Hz, mantendo sempre a tensão de alimentação em 10V. Tal intervalo foi escolhido por ser a faixa de melhor resposta do alto-falante. Finalmente um termômetro de mercúrio foi utilizado para se obter a temperatura ambiente, utilizada para o posterior cálculo da velocidade do som e das frequências naturais do tubo. Observou-se uma variação de 5°C durante os ensaios. É importante notar que não havia escoamento no interior do tubo, ou seja, as oscilações eram impostas em uma atmosfera estagnada.

3. Determinação das Frequências Naturais

O presente estudo está baseado na propagação de ondas num tubo; assim, mediu-se a temperatura durante os ensaios de cada configuração com intuito de calcular a velocidade do som (Eq. 1) e estudar as frequências naturais.

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (1)$$

onde temperatura é dada em escala absoluta, R = 8,314J/molK, M = 0,0029kg/mol e $\gamma = 1,4$. As respectivas incertezas foram calculadas conforme Eq.2:

$$\sigma_{v^2} = \left(\frac{\partial v}{\partial T} \sigma_T \right)^2 = \left(\frac{1}{2} \left(\frac{\gamma RT}{M} \right)^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{\gamma R}{M} \right) \sigma_T \right)^2 \quad (2)$$

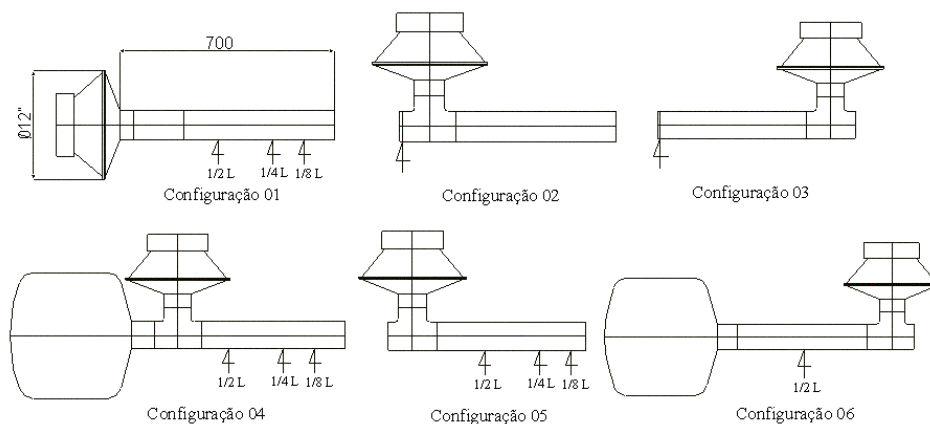


Figura 2. Configurações estudadas.

As ondas estacionárias podem ser estudadas em tubos com extremidades abertas, fechadas ou abertas e fechadas. Para um tubo com as duas extremidades abertas ou fechadas a Eq. 3 calcula as frequências dos harmônicos do tubo (n), sendo que $n = 1$ corresponde à frequência fundamental.

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{nv}{2L} = nf \quad \text{onde } n=1, 2, 3... \quad (3)$$

No caso de apenas uma extremidade aberta, as frequências são calculadas pela Eq. 4.

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{nv}{4L} = nf \quad \text{onde } n=1, 3, 5... \quad (4)$$

E para todas as configurações, o erro do cálculo das frequências utilizando as medidas de temperatura foi obtido conforme Eq. (5), sendo L o comprimento do tubo.

$$\sigma_{f_n}^2 = \left(\frac{\partial f_n}{\partial v} \sigma_v \right)^2 + \left(\frac{\partial f_n}{\partial L} \sigma_L \right)^2 \quad (5)$$

A hipótese da extremidade aberta do tubo ser um ventre de deslocamento está baseada na idéia da onda sonora ser unidimensional, o que é correto se o diâmetro do tubo for muito pequeno em comparação com o comprimento da onda sonora. Na prática o ventre de deslocamento e o nó de pressão estão ligeiramente além da extremidade aberta do tubo. Logo é necessário fazer uma correção terminal que é da ordem de grandeza do raio do tubo. Esse comprimento pode ser medido pela determinação da distância entre dois comprimentos de ressonância consecutivos, portanto o comprimento efetivo do tubo é dado conforme Eq. 6.

$$L_{ef} = L + \Delta L = \lambda_0 / 4 \quad (6)$$

Logo os cálculos foram refeitos com ou sem o comprimento corrigido e foram comparados com os espectros obtidos experimentalmente. Os resultados das temperaturas medidas para cada configuração e o resultado da velocidade do som estão resumidos na Tab. 1.

Tabela 1. Temperatura e velocidade do som.

Configuração	Temperatura (K)	Incerteza da medida de temperatura (\pm K)	Velocidade do som (m/s)	Incerteza do cálculo da velocidade (\pm m/s)
1	302	0,5	348,2	2,6
2	302	0,5	348,2	2,6
3	297	0,5	345,3	2,6
4	296	0,5	344,7	2,6
5	294,5	0,5	343,8	2,6
6	297,5	0,5	345,6	2,6

A princípio não se sabia o comportamento acústico das configurações; desta forma, calculou-se as frequências teóricas como se elas fossem tubos $\frac{1}{4}$ de onda e $\frac{1}{2}$ onda. Apesar dos resultados serem para situações idealizadas, eles são relevantes na comparação com as frequências encontradas experimentalmente. As Tab.'s 2 e 3 apresentam os resultados para as considerações de tubo de $\frac{1}{4}$ de onda e tubo de $\frac{1}{2}$ onda, respectivamente, e as Tab.'s 4 e 5 a mesma coisa mas corrigindo o efeito de extremidade.

Tabela 2. Harmônicos considerando a situação de tubo de $\frac{1}{4}$ de onda.

Tubo de $\frac{1}{4}$ de onda (Fechado-Aberto).						
n	Freq-Config-1	Freq-Config-2	Freq-Config-3	Freq-Config-4	Freq-Config-5	Freq-Config-6
1	124,4 (1,3)	124,4 (1,3)	123,3 (1,3)	123,1 (1,3)	122,8 (1,3)	123,4 (1,3)
3	373 (4)	373 (4)	370 (4)	370 (4)	368 (4)	370 (4)
5	622 (6)	622 (6)	617 (6)	616 (6)	614 (6)	617 (6)
7	871 (9)	871 (9)	863 (9)	862 (9)	860 (9)	864 (9)
9	1119 (12)	1119 (12)	1110 (12)	1108 (12)	1105 (12)	1111 (12)
11	1368 (14)	1368 (14)	1357 (14)	1354 (14)	1351 (14)	1358 (14)

Obs: frequências em Hz e valores entre parênteses correspondem ao erro.

Tabela 3. Harmônicos considerando a situação de tubo de $\frac{1}{2}$ de onda.

Tubo de $\frac{1}{2}$ onda (Aberto-Aberto).						
n	Freq-Config-1	Freq-Config-2	Freq-Config-3	Freq-Config-4	Freq-Config-5	Freq-Config-6
1	248,7 (2,6)	248,7 (2,6)	246,6 (2,6)	246,2 (2,6)	245,6 (2,6)	246,9 (2,6)
2	497,4 (5,1)	497,4 (5,1)	493,3 (5,1)	492,4 (5,1)	491,1 (5,1)	493,7 (5,1)
3	746,1 (7,7)	746,1 (7,7)	739,9 (7,7)	738,6 (7,7)	736,7 (7,7)	740,6 (7,7)
4	995 (10)	995 (10)	987 (10)	985 (10)	982 (10)	987 (10)
5	1244 (13)	1244 (13)	1233 (13)	1231 (13)	1228 (13)	1234 (13)

Obs: frequências em Hz e valores entre parênteses correspondem ao erro.

Tabela 4. Harmônicos considerando a situação de tubo de $\frac{1}{4}$ de onda e levando em conta o efeito de extremidade.

Tubo de $\frac{1}{4}$ de onda (Fechado-Aberto) com efeito de extremidade.						
n	Freq-Config-1	Freq-Config-2	Freq-Config-3	Freq-Config-4	Freq-Config-5	Freq-Config-6
1	118 (1)	118 (1)	117 (1)	116 (1)	116 (1)	117 (1)
3	353 (3)	353 (3)	350 (3)	349 (3)	348 (3)	350 (3)
5	588 (4,5)	588 (4,5)	583 (4,5)	582 (4,5)	580 (4,5)	584 (4,5)
7	823 (6)	823 (6)	816 (6)	815 (6)	813 (6)	817 (6)
9	1058 (8)	1058 (8)	1050 (8)	1048 (8)	1045 (8)	1050 (8)
11	1293 (10)	1293 (10)	1283 (10)	1280 (10)	1277 (10)	1284 (10)

Obs: frequências em Hz e valores entre parênteses correspondem ao erro.

Tabela 5. Harmônicos considerando a situação de tubo de $\frac{1}{2}$ de onda e levando em conta o efeito de extremidade.

Tubo de $\frac{1}{2}$ onda (Aberto-Aberto) com efeito de extremidade.						
n	Freq-Config-1	Freq-Config-2	Freq-Config-3	Freq-Config-4	Freq-Config-5	Freq-Config-6
1	223,0 (2)	223,0 (2)	221,1 (2)	220,7 (2)	220,2 (2)	221,3 (2)
2	446,0 (3,5)	446,0 (3,5)	442,2 (3,5)	441,5 (3,5)	440,3 (3,5)	442,6 (3,5)
3	669 (5)	669 (5)	663 (5)	662 (5)	661 (5)	664 (5)
4	892 (7)	892 (7)	885 (7)	883 (7)	881 (7)	885 (7)
5	1115 (9)	1115 (9)	1106 (9)	1104 (9)	1101 (9)	1107 (9)

Obs: frequências em Hz e valores entre parênteses correspondem ao erro.

4. Comportamento Acústico das Configurações

Inicialmente esperava-se um comportamento de tubo de $\frac{1}{4}$ de onda para a configuração 1, ou seja, que a presença do alto-falante em uma das extremidades desse um caráter de tubo fechado-aberto. Desta forma, logo o transdutor de pressão foi posicionado na extremidade considerada nó de pressão, próximo ao cone de fixação do alto falante. Os resultados estão apresentados na Fig. 3. Comparando os resultados com os das Tab.'s 2 e 4, nota-se que o resultado da Fig. 3 não o de um tubo fechado-aberto como se pensava. Provavelmente o cone de acoplamento do alto-falante funciona como uma antecâmara, e essa extremidade comporta-se como aberta. Para verificar isso, o transdutor de

pressão foi posicionado no meio do tubo, onde se têm o máximo de amplitude acústica para um tubo de $\frac{1}{2}$ onda. Os resultados estão apresentados na Fig. 4.

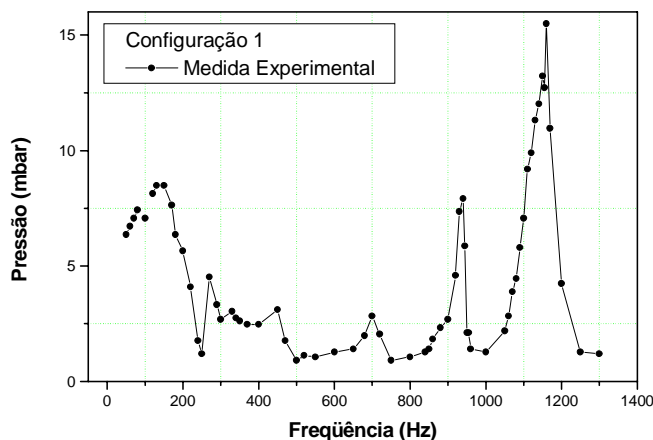


Figura 3. Comportamento acústico da configuração 1 com o transdutor posicionado na extremidade do alto-falante.

As barras que aparecem na Fig. 4, e nas demais figuras apresentadas adiante, correspondem às frequências calculadas com ou sem efeito de extremidade, para facilitar a interpretação dos dados. Comparando os resultados da Fig. 4 com os calculados para um tubo de $\frac{1}{2}$ onda, nota-se que os picos de amplitude concordam bem com os valores para o primeiro, terceiro e quinto harmônico. O segundo e o quarto harmônico não aparecem nesse espectro em razão do meio do tubo ser um nó de pressão para esses harmônicos. A Fig. 5 representa o comportamento da onda acústica em um tubo de extremidades abertas. Assim, novos ensaios foram realizados com o transdutor de pressão posicionado nos pontos de máxima amplitude para o segundo e o quarto harmônico (vide Fig. 2) e os resultados são apresentados na Fig.6.

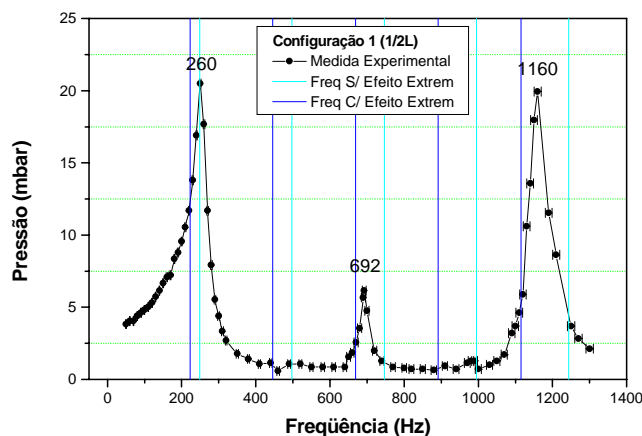


Figura 4. Comportamento acústico da configuração 1 com o transdutor posicionado na metade do tubo ($L/2$).

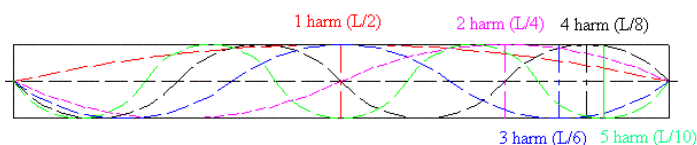


Figura 5. Comportamento dos harmônicos de um tubo com ambas extremidades abertas.

Comparando os resultados da Fig. 6 com os da Tab. 5, nota-se que os picos de ressonância são muito próximos das frequências calculadas com o efeito de extremidade, com exceção do primeiro harmônico que apresenta 13% de desvio, contudo conclui-se que o cone de acoplamento do alto-falante simula uma câmara aberta e o efeito de extremidade é significativo. Esse resultado é importante para queimadores do tipo utilizado por Rocha (2002) (vide Fig. 1).

A configuração 2, imaginada ser um tubo fechado-aberto, tem sua excitação acústica próxima ao ventre de pressão, ou seja, próxima à extremidade fechada, onde também está posicionado o transdutor de pressão (vide Fig.2). A Fig. 7 apresenta os resultados dessa configuração. Os resultados seguem a tendência de um tubo de quarto de onda; no entanto, não concordam com os valores apresentados nas Tab.'s 2 e 4. Possivelmente o arranjo experimental tenha distorcido um pouco a configuração de um tubo fechado-aberto, pois o divisor utilizado para acoplar o alto-falante possui dimensões significativas. O gráfico mostra que o pico de 124,3Hz não é bem definido, mas os demais estão bem representados, com exceção do 373Hz. Nessa configuração o efeito de extremidade não coincidiu com as medidas experimentais, sendo essas mais próximas das frequências teóricas sem efeito de extremidade. O 9º harmônico fornece pouco mais de 50mbar de pressão, o que é um excelente resultado para excitar um processo de combustão.

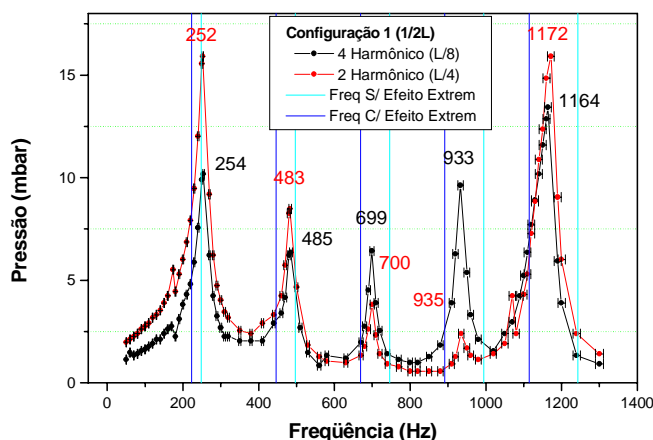


Figura 6. Comportamento acústico da configuração 1 com o transdutor nas posições correspondentes ao máximo de amplitude de pressão acústica dos segundo (L/4) e quarto (L/8) harmônicos de um tubo aberto em ambas extremidades.

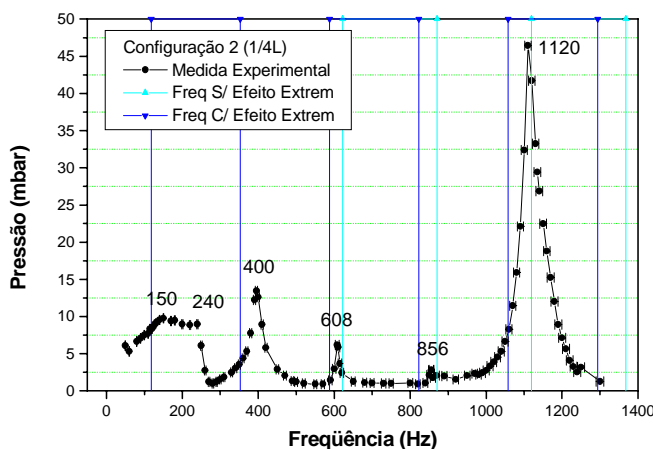


Figura 7. Comportamento acústico da configuração 2.

Na configuração 3 o tubo aberto-fechado recebe excitação no nó de pressão, ou seja, na extremidade aberta, e o transdutor de pressão continua posicionado no ventre de pressão (vide Fig. 2). Os resultados apresentados na Fig. 8 concordam muito bem com os da Tab. 4, ou seja, para um tubo de $\frac{1}{4}$ de onda com correção para o efeito de extremidade. Nesse arranjo, os harmônicos são bem definidos e têm-se dois picos pronunciados em 816 Hz (793 Hz experimental) e em 116 Hz (126 Hz experimental).

Na configuração 4, uma câmara é acoplada em uma das extremidades do tubo (vide Fig. 2) para que a condição de tubo aberto em ambas extremidades se mantenha e, numa situação prática de um queimador pulsante, o ar de combustão possa ser alimentado. Nessa configuração o alto-falante foi posicionado próximo à extremidade da câmara (nó de pressão). A Fig. 9 apresenta o resultado para o transdutor de pressão posicionado na seção médio do tubo e a Fig. 10 para o transdutor posicionado nos pontos de maior amplitude para os segundo e quarto harmônicos. Os resultados concordam muito bem com os calculados para tubo aberto-aberto com correção do efeito de extremidade (Tab. 5). O único ponto que apresentou algum desvio significativo foi o do primeiro harmônico. A Fig. 10 também apresenta o desvio dos valores calculados em relação ao experimental.

A câmara de desacoplamento posicionada na configuração 4, aparentemente não interfere no comportamento de tubo aberto-aberto. Contudo, para melhor comprovação desse comportamento, a mesma situação de tubo aberto-aberto é estudada na configuração 5, com exceção da presença da câmara de desacoplamento (vide Fig. 2). A Fig 11 apresenta o resultado para a configuração 5 com o transdutor de pressão posicionado no meio do tubo, nota-se que os resultados concordam bem com os da Fig. 9, ou seja, com a presença da câmara de desacoplamento.

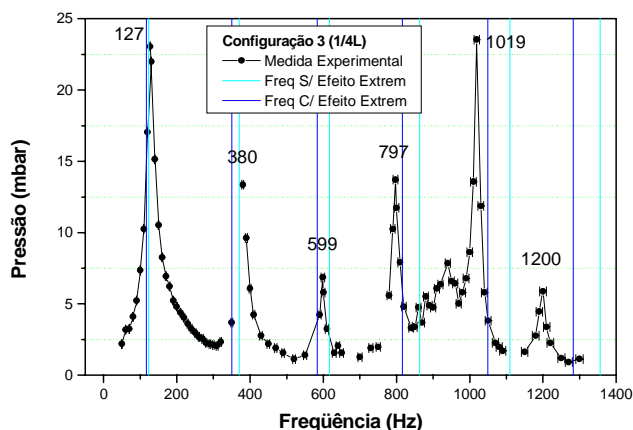


Figura 8. Comportamento acústico da configuração 3.

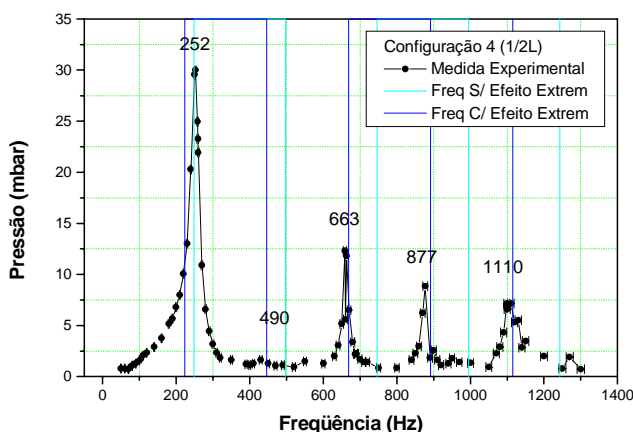


Figura 9. Comportamento acústico da configuração 4 com o transdutor posicionado na metade do tubo (L/2).

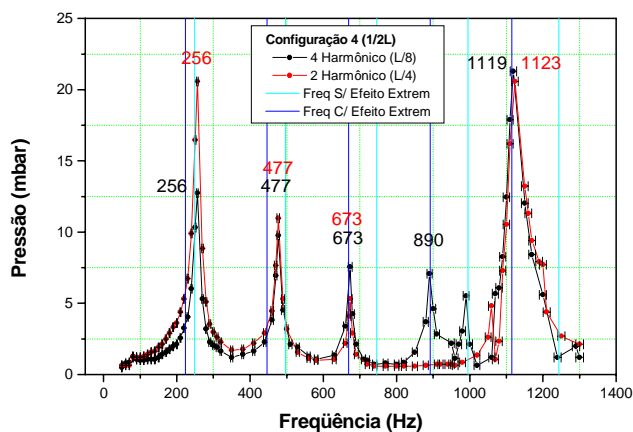


Figura 10. Comportamento acústico da configuração 4 com o transdutor nas posições correspondentes ao máximo de amplitude de pressão acústica dos segundo (L/4) e quarto (L/8) harmônicos de um tubo aberto em ambas extremidades.

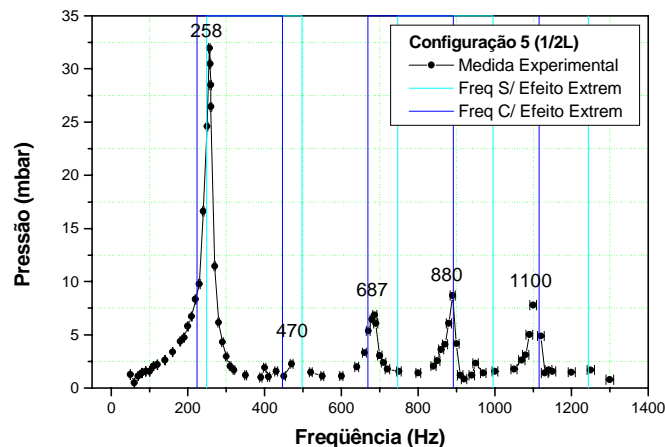


Figura 11. Comportamento acústico da configuração 5 com o transdutor posicionado na metade do tubo ($L/2$).

Finalmente a Fig. 12 apresenta os resultados para configuração 6, onde novamente conecta-se a câmara de desacoplamento em uma das extremidades, semelhante à configuração 4, mas a excitação ocorre próximo à outra extremidade. O transdutor de pressão continuou posicionado no meio do tubo. O espectro da Fig. 12 mostra que comportamento da configuração 6 também é o de um tubo aberto-aberto e que para os primeiros harmônicos se aproximam dos cálculos com efeito de extremidade; contudo, para frequências acima de 800 Hz o desvio dos cálculos em relação aos valores experimentais é superior a 10%.

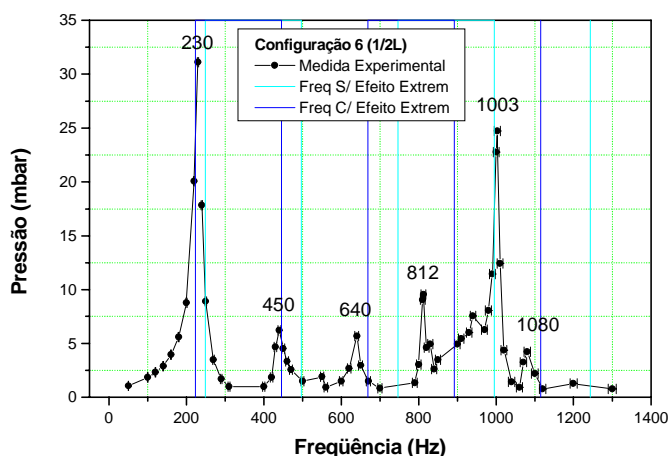


Figura 12. Comportamento acústico da configuração 6.

Os resultados apresentados nessa seção do artigo mostraram como se aproxima o comportamento acústico da cada configuração proposta para queimadores pulsantes com atuação acústica através de alto-falantes. Os valores calculados foram importantes para essa observação, apesar dos naturais desvios em relação aos valores experimentais, pois as configurações não são tubos perfeitos, existem interferências das peças utilizadas nas montagens.

Dentre as configurações ensaiadas, a que mais se aproximou das previsões foi a configuração 4. Além disso foi capaz de propiciar valores razoáveis de amplitudes de atuação. Desta forma, parece ser uma configuração bastante conveniente para queimadores pulsantes. Baseado nisso, a próxima seção apresenta um queimador tipo Delft adaptado para pulsante seguindo a estrutura da configuração 4.

5. Queimador de Delft com Excitação Acústica

O objetivo do queimador de Delft é estudar chamas difusivas turbulentas de gás natural. Para tal, montou-se no Laboratório Associado de Combustão e Propulsão do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais de Cachoeira Paulista, uma instalação idêntica a utilizada e caracterizada na Universidade Técnica de Delft – TUDelft e nos laboratórios SANDIA (De Vries, 1994, Stroomer, 1995, Van Den Bercken, 1998). Tal queimador consiste de dois tubos

concêntricos, o central para o combustível e o anular para o ar primário. Chamas pilotos ancoram a chama principal nas proximidades da saída do queimador, sendo esta protegida de grandes estruturas de circulação do ar atmosférico por uma corrente de ar secundário de baixa velocidade. A corrente de ar primário também apresenta características de jato e desta forma a mistura turbulenta entre o combustível e o ar é intensificada. A escolha desse tipo de montagem para o estudo de chamas excitadas acusticamente surge em razão das chamas não excitadas do queimador de Delft terem sido amplamente estudadas e diversos resultados estão disponíveis na literatura, além de procedimentos experimentais. Assim, tornou-se bastante conveniente adotar tal configuração, apenas alterando o queimador inicial para inclusão do alto-falante e a câmara de desacoplamento. A Fig. 13 apresenta um esquema da montagem.

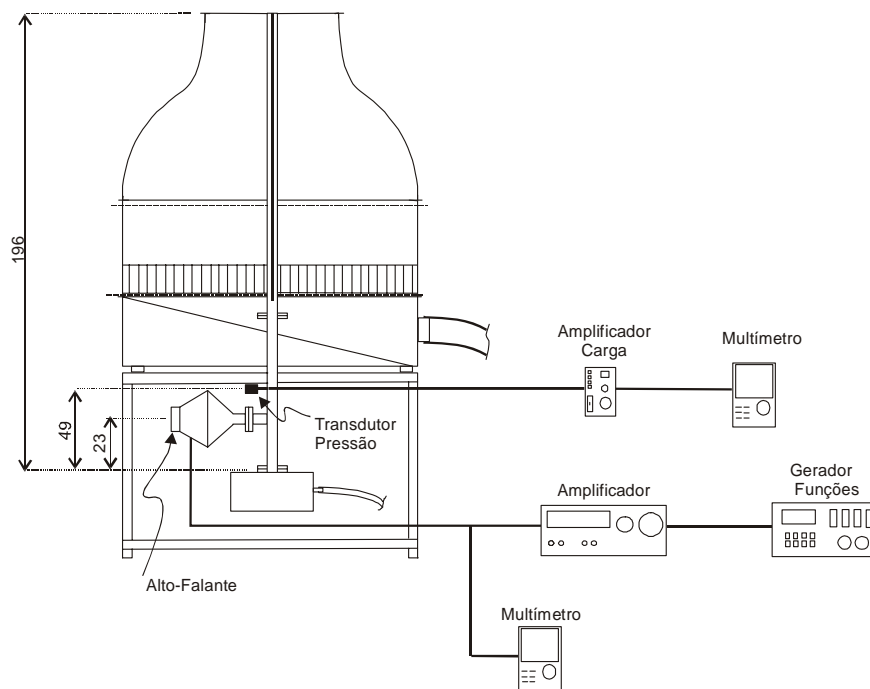


Figura 13. Montagem experimental – Queimador de Delft com excitação acústica (dimensões em cm).

O queimador possui 196 cm de comprimento e diâmetro do canal interno de 4,5 cm, por onde passa o escoamento de ar que sofre a atuação acústica. O centro do alto falante foi posicionado a 23 cm da base do queimador e o transdutor de pressão a 49 cm, posição conveniente para a leitura dos cinco primeiros harmônicos. O combustível utilizado na chama principal é o Gás Natural Veicular (GNV) e para as chamas pré-misturadas pilotos uma mistura de hidrogênio e acetileno de tal forma que se mantenha a mesma relação carbono hidrogênio do GNV. A Tab. 6 resume as duas condições de operação do queimador.

Tabela 6. Condições de ensaio.

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

O estudo das frequências naturais foi para a situação sem escoamento de ar passando pelo queimador e para as condições I e II da Tab. 6. Os resultados estão apresentados na Fig. 14. Nota-se que a presença do escoamento de ar pouco afeta o comportamento acústico do queimador e os cinco primeiros harmônicos estão bem definidos. A Tab. 7 compara as frequências obtidas experimentalmente com o cálculo considerando o queimador um tubo aberto-aberto. Notou-se que para essas dimensões do queimador o cálculo sem o feito de extremidades acompanhou melhor o resultado experimental, o que pode ser explicado pelo diâmetro do tubo (4,5cm) ser muito inferior ao seu comprimento (192cm).

Para exemplificar os efeitos da presença de um campo acústico em uma chama turbulenta difusiva, a Fig. 15 apresenta as fotografias de uma chama na condição I sem atuação acústica e outra submetida a 282 Hz e 42 mbar. Nota-se que para a situação sem atuação acústica a chama possui uma aparência típica de uma chama difusiva turbulenta, com predomínio da coloração amarela. Por outro lado, a imposição de um campo acústico muda completamente a estrutura da chama, tornando-a azulada, com aparência de uma chama pré-misturada. Quando o escoamento de ar emerge do queimador sob condições oscilatórias, há uma maior indução de ar para zona de queima, muitas vezes

causando localmente uma pré-mistura com o combustível. Maiores estudos sobre esse assunto estão sendo conduzidos na montagem experimental apresentada, justamente para entender melhor a dinâmica dos processos físicos que controlam a queima na zona de chama; isso passa por análises com termopar de fio fino, tomografia de chama, composição dos gases, velocimetria a laser, entre outras técnicas experimentais.

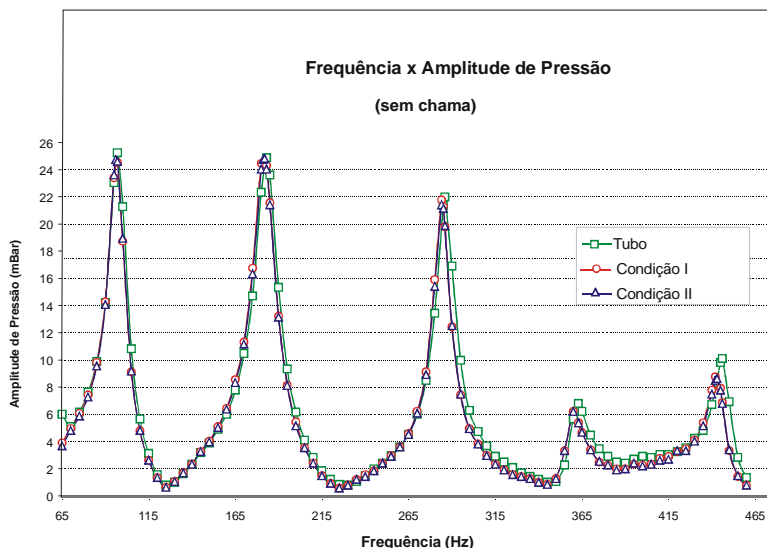
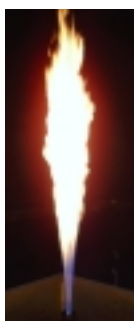


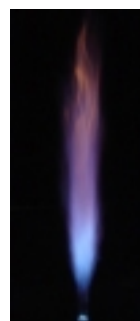
Figura 14. Espectro de frequência para situação sem escoamento de ar (tubo) e para as condições I e II da Tab. 6.

Tabela 7. Comparação entre os resultados experimentais e os calculados.

Tubo	Harmônico Calculado	Condição I	Condição II	Harmônico Calculado
Frequência medida p/ T = 26 °C	T = 26 °C	Frequência medida p/ T = 24 °C	Frequência medida p/ T = 24 °C	T = 24 °C
97Hz	88,4Hz	97Hz	96Hz	88,1
183Hz	176,7Hz	180Hz	182Hz	176,2
286Hz	265,1Hz	284Hz	284Hz	264,2
363Hz	353,5Hz	360Hz	360Hz	352,3
446Hz	441,9Hz	442Hz	443Hz	440,4



(a) Sem atuação acústica.



(b) Atuação acústica, 282Hz e 42mbar.

Figura 15 – Chama sem atuação acústica (a) e com atuação acústica (b).

6 . Conclusões.

O presente trabalho apresentou uma avaliação experimental do comportamento acústico de seis propostas de configuração para queimadores pulsantes com excitação obtida por meio de um alto-falante. A comparação com os cálculos teóricos para tubos de 1/2 onda (aberto-aberto) e 1/4 de onda (fechado-aberto) foi importante para se determinar a qual cavidade acústica que a configuração se assemelha.

Os resultados apontaram que a configuração 4, ou seja, com uma câmara de desacoplamento e a excitação acontecendo nas proximidades da extremidade da câmara, responde bem ao comportamento de um tubo de 1/2 onda.

Esse resultado é importante para se prever qual será o comportamento acústico de projetos de queimadores baseados nessa configuração.

Um queimador de Delft para estudos de chama difusivas turbulentas foi adaptado para que o escoamento de ar primário recebesse atuação acústica, seguindo o modelo da configuração 4. A comparação entre os resultados experimentais e os cálculos teóricos mostraram que a versão pulsante do queimador de Delft responde como um tubo de $\frac{1}{2}$ onda. Os resultados preliminares indicam que as oscilações impostas ao escoamento de ar primário são capazes de mudar a estrutura da chama, mudando de um caráter difusivo para pré-misturado em aparência. Contudo, experimentos mais apurados são necessários e estão sendo realizados para um melhor entendimento da dinâmica dos processos físicos que controlam a combustão de uma chama com atuação acústica.

7. Referências

Bastos, V.H., 2001, Investigação de Chamas Pulsantes Difusivas Livres, *Dissertação de Mestrado*, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

Botura, C.A., 1998, Estudo e Projeto de um Controlador Usando Lógica Difusa Aplicada ao Controle Ativo de um Combustor Tipo Tubo de Rijke, *Dissertação de Mestrado*, Universidade Estadual Paulista.

De Vries, J.E., 1994, Study on Turbulent Fluctuations in Diffusion Flames Using Laser Induced Fluorescence, *Tese de Doutorado*, Universidade Técnica de Delft.

Ferreira, D.S., 2001, Queimadores Pulsantes para Baixas Emissões de Poluentes, *Dissertação de Mestrado*, Universidade Estadual Paulista.

Lacava, P.T.; Ferreira, D.S.; Carvalho, J.A.; Caldeiras Pires, A.A., 1999, Efeito da Frequência e Amplitude de Oscilação no Formato de Chamas Pré-misturadas Pulsadas, *XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*, Águas de Lindóia, Seção SR4, pp AAAGGH.

Libby, P.A.; Williams, F.A., 1994, *Turbulent Reacting Flows*, Academic Press, New York.

Rocha, A.M.A., 2002 Análise Experimental em Chamas Difusivas Pulsadas de Gás Natural, *Dissertação de Mestrado*, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

Stroomeer, P.P.J., 1995, Turbulence and OH Structures in Flames, *Tese de Doutorado*, Universidade Técnica de Delft, Holanda.

Van den Bercken, R.E.J., 1998, IR Emission/Absorption Tomography in Flames, *Tese de Doutorado*, Universidade Técnica de Delft, Holanda.

Zinn, B.T., 1986, Pulsating Combustion, In: F.J. Weinberg (ed.), *Advanced Combustion Methods*, Academic Press, 113-181.

EXPERIMENTAL EVALUATION OF DIFFERENT PULSATING BURNER CONFIGURATIONS

Alexandre Dias Flügel

Instituto Tecnológico de Aeronáutica Pça. Mal. Eduardo Gomes 50, São José dos Campos, Brasil, 12228-900, flugel@ita.br

Daniel Silva Ferreira

Universidade Estadual Paulista, Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333, Guaratinguetá, Brasil, CEP: 12500-000, daniel@lcp.inpe.br

Ana Maura Araújo Rocha

Universidade Estadual Paulista, Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333, Guaratinguetá, Brasil, CEP: 12500-000, maura@lcp.inpe.br

Pedro Teixeira Lacava

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Pça. Mal. Eduardo Gomes 50, São José dos Campos, Brasil, 12228-900, placava@ita.br

João Andrade de Carvalho Jr.

Universidade Estadual Paulista, Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333, Guaratinguetá, Brasil, CEP: 12500-000, joao@feg.unesp.br

Marco Aurélio Ferreira

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Rod Presidente Dutra, km 40, Cachoeira Paulista, Brasil, CEP: 12700-000, marco@lcp.inpe.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. In the present work different configurations for pulsating burners were suggested and it was verified the influence of the burner geometry on the oscillation condition.

Keywords: pulsating combustion, pulsating flames.