

ESTUDO DA QUEIMA DE GÁS EM COMBUSTOR PULSANTE  
TIPO TUBO DE RIJKE

Momma, L.J.; Abdalla, V.R.; Ferreira, M.A.; e Carvalho, J.A. Jr  
Laboratório Associado de Combustão e Propulsão  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
12630-000 - Cachoeira Paulista - SP - Brasil

RESUMO

Neste trabalho apresentam-se os resultados do estudo experimental da queima de gás em combustores pulsantes tipo tubo de Rijke. O GLP (Gás Liquefeito de Petróleo) foi o gás utilizado em todos os testes. As condições de injeção do gás no combustor foram determinadas pelo número de tubos distribuidores, pela vazão de gás ( $\dot{m}$ ) e pela razão ar/combustível normalizada ( $\alpha$ ). Obteve-se que de uma maneira geral, a tendência das amplitudes de pressão acústica é a de inicialmente crescer com o aumento de  $\dot{m}$  ou de  $\alpha$  até um máximo valor, em torno do qual há uma certa estabilização para posteriormente decrescer.

INTRODUÇÃO

A combustão pulsante é estudada desde o século dezoito e o interesse na mesma tem sido renovado nos dias atuais devido às indicações de que sua aplicação na geração de energia pode oferecer as seguintes vantagens: economia de combustível, formação reduzida de poluentes, aumento das taxas de transferência de calor convectiva, escória reduzida e investimento de capital reduzido quando comparado às técnicas convencionais.

A chama musical ou cantante é, provavelmente, o primeiro exemplo conhecido de combustão pulsante, a qual foi relatada por Byron Higgins em 1777 (em Wood, 1966 e Tyndall, 1970). Som de considerável amplitude pode ser gerado quando uma chama é ancorada em um queimador de gás colocado dentro de um tubo. O som gerado é devido à excitação do modo acústico fundamental ou de um dos harmônicos do tubo, e sua ocorrência depende das características do queimador e da chama.

Um critério simples, que determina se a oscilação de pressão será amplificada ou não, devido ao processo de adição de calor, foi estabelecido por Lord Rayleigh (1945). Segundo Rayleigh, um processo de combustão exibirá caráter oscilatório quando o máximo e o mínimo da taxa de liberação de calor coincidirem com a fase de compressão e de rarefação da onda de pressão acústica, respectivamente; neste caso, as oscilações acústicas de pressão serão amplificadas. Ocorrendo o inverso, a oscilação de pressão será atenuada. Por outro lado, a frequência da oscilação, modificar-se-á se a adição de calor ao gás ocorrer instantaneamente quando a amplitude da oscilação de pressão for zero.

Putnam e Dennis (1953) colocaram o critério de Rayleigh em uma forma matemática precisa, que estabelece que a amplitude de oscilação crescerá quando

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

onde  $Q$  é a taxa de energia instantânea adicionada,  $P'$  a diferença entre a pressão instantânea e a pressão média (pressão acústica),  $t$  o tempo e  $\oint$  a integração sobre um ciclo de oscilação.

O critério de Rayleigh é uma condição necessária para a ocorrência de oscilações acústicas, mas não suficiente, uma vez que o mesmo não elucida o mecanismo responsável pelo surgimento das oscilações.

Um tipo de combustor pulsante que tem merecido atenção especial ultimamente é o combustor tipo tubo de Rijke. O tubo de Rijke (Lord Rayleigh, 1945; Wood, 1966) foi descoberto em 1859 por Rijke, o qual notou que fortes oscilações acústicas eram excitadas quando uma tela metálica aquecida era colocada na metade inferior de um tubo vertical aberto em ambas as extremidades, dentro do qual escoava ar frio, de baixo para cima.

O presente trabalho apresenta os resultados do estudo experimental da queima de gás em um combustor pulsante tipo tubo de Rijke. O Gás Liquefeito de Petróleo foi utilizado em todos os experimentos. Neste trabalho foram variadas as condições de injeção do gás no combustor, a saber: quanto à configuração do injetor, trabalhou-se sem os tubos, com seis tubos e com doze tubos de injeção, e quanto à razão ar/combustível normalizada (razão ar/combustível dividida pela razão ar/combustível estequiométrica), esta foi tanto constante como variável nos testes sem

tubos e nos com 12 tubos e apenas variável nos com seis tubos.

#### DETALHES EXPERIMENTAIS

O equipamento de teste era basicamente constituído de cilindros de gás GLP, compressor de ar, medidores de vazão de gás do tipo placa de orifício concêntrico conectado a manômetros de tubo em U, injetor de gás, combustor pulsante tipo tubo de Rijke, sensores de pressão e temperatura e sistema de aquisição de dados.

O combustor, mostrado na Figura 1, é modular, de aço 1020, com 320 cm de comprimento máximo e 20 cm de diâmetro interno. Sob este dispositivo encontra-se uma câmara de desacoplamento de 65 cm de diâmetro interno e 120 cm de altura, para permitir tanto a simulação da condição de contorno de tubo aberto na extremidade inferior como o controle do fluxo de ar e de gás combustível. Alguns módulos são revestidos com camisa d'água para refrigeração de suas paredes.

O injetor de gás consiste de tubos de aço de 6 mm de diâmetro interno e 72 mm de comprimento dispostos de forma radialmente uniforme. O número máximo de tubos é 12, sendo possíveis, também, as versões de 6, 4, 3 e 0 tubos. Em cada tubo há 8 orifícios de 1 mm de diâmetro, igualmente espaçados, distribuídos ao longo de seu comprimento.

O injetor de gás está acoplado a um sistema cujo mecanismo de suspensão é similar ao de um telescópio, de forma que ambos possam ser posicionados em qualquer altura desejada. Em todos os ensaios o injetor de gás estava posicionado a aproximadamente 70 cm acima da base do tubo.

Na parede do combustor estão fixados três termopares chromel-alumel tipo K, bitola 1,5 mm, para medidas de temperaturas dos gases dentro do combustor nos seguintes locais: a 25 cm, 150 cm e 308 cm acima da base do tubo; nas posições de entrada e saída da água de refrigeração estão fixados os termopares chromel-alumel tipo K, bitola 6 mm. Tais termopares estão ligados ao sistema de aquisição de dados o qual fornece a leitura das temperaturas medidas. Os termopares são diretamente ligados ao HP sem compensação térmica porque o aparelho possui a compensação interna.

As amplitudes de pressão acústica são monitoradas por transdutores de pressão piezoelétricos Kistler tipo 7261 sendo que um deles está posicionado a 160 cm acima da base do tubo, ou seja, na seção média deste, que corresponde aproximadamente ao local onde a amplitude de pressão acústica do modo fundamental de oscilação é máxima. Os demais transdutores de pressão

estão instalados a 15 cm, 58 cm e 80 cm acima da base do tubo. Os sinais dos transdutores de pressão seguem para um amplificador de carga Kistler tipo 5006 e posteriormente são transferidos para uma tela do osciloscópio Tektronix modelo 7633 para a visualização das amplitudes e frequências da pressão acústica. A leitura das frequências da oscilação de pressão é efetuada por intermédio de frequencímetros Tektronix modelo FD15 e Analog modelo F1800.

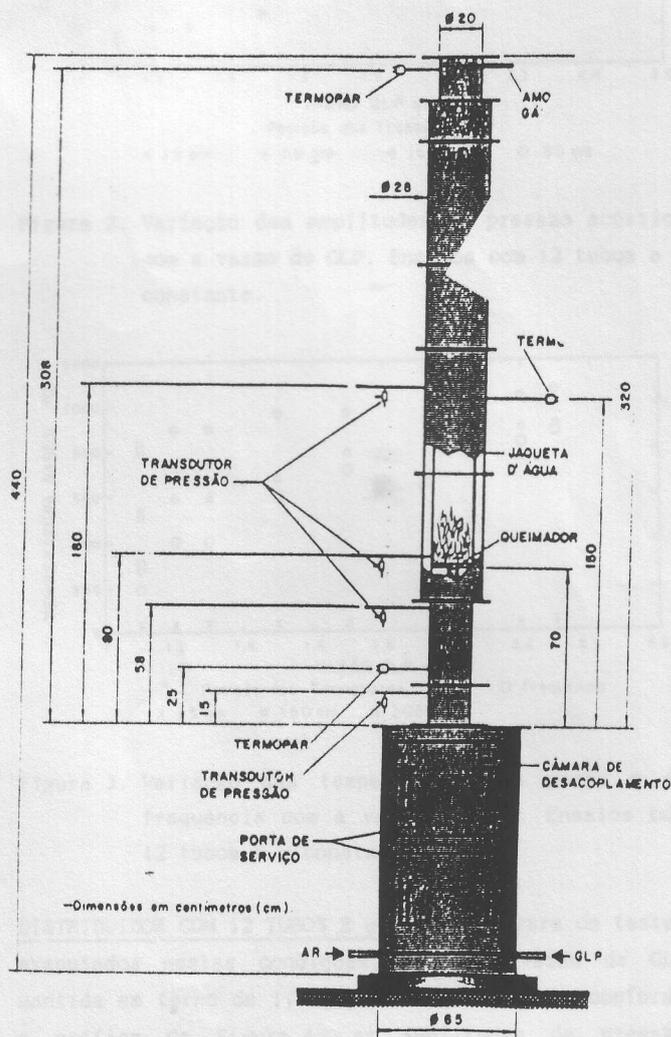


Figura 1. Combustor tipo tubo de Rijke e instrumentação associada.

Os dados são adquiridos, ao longo do teste, de um total de 500 varreduras. Em cada varredura faz-se as leituras de 6 termopares e 4 transdutores de pressão (pressões e frequências acústicas).

A ignição era efetuada usando-se uma pequena tocha a qual era previamente embebida em álcool. Imediatamente após a introdução da tocha acesa, através de uma das janelas do combustor, para dentro deste, no qual escoava ar, abria-se a válvula do gás combustível. Logo em seguida a janela era fechada.

Nos testes realizados com a razão ar/combustível normalizada constante, operou-se com variação tanto da vazão de combustível como de ar, de forma a manter tal razão em torno de 1,10.

Nos testes em que a razão ar/combustível normalizada não foi mantida constante, operou-se com vazão constante de combustível em torno de 1,20 g/s, incrementando-se a vazão de ar.

Ensaio sem os Tubos do Distribuidor. Com o bico injetor sem os tubos, não houve oscilações acústicas em momento algum por mais que se variasse a razão ar/combustível e a vazão de gás. Com esta configuração, a chama estava concentrada ao longo do eixo do tubo, tendo maior comprimento que as chamas divididas para a mesma vazão de gás. Com a distribuição de calor em uma região mais longa do tubo, é indicativo que o calor disponível em região determinada pelo critério de Rayleigh (na metade inferior do tubo) não era suficiente para excitação e manutenção das oscilações.

DISTRIBUIDOR COM 12 TUBOS E  $\alpha$  CONSTANTE. Para esta situação observa-se que as amplitudes de pressão acústica crescem com o aumento da vazão de combustível até  $\dot{m}_c$  aproximadamente 2,2 g/s, após a qual observa-se pouco crescimento das amplitudes, sugerindo assim uma estabilização dos valores das mesmas, como mostrado na Figura 2. Esta estabilização provavelmente se deve ao fato da chama estar ocupando toda a extensão do tubo, para o caso de altas vazões de ar e combustível. Esta observação concorda com o princípio de Bosscha e Riess que afirma que um aquecimento na metade superior do tubo de Rijke implica em amortecimento das oscilações acústicas. A amplitude máxima obtida, no centro do combustor, foi aproximadamente 30 mBar. As frequências das oscilações variaram entre 67 e 74 Hz.

Na Figura 3, observa-se que a temperatura dos gases de combustão cresce com o aumento das vazões de combustível. Nota-se que a diferença de temperaturas entre a saída e o centro do tubo diminui com o aumento da vazão de combustível, conforme esperado.

Nos experimentos realizados, observou-se que as queimas, apesar da presença das oscilações, eram bastante enfumaçadas e somente após o aumento do excesso de ar a fumaça era eliminada e as amplitudes de pressão acústicas incrementadas. Notou-se que, em um dos testes, ao ignitar-se em baixas vazões de ar e combustível, o regime oscilatório era impossível de ser atingido. Somente após o aumento destas vazões as pulsações se iniciaram. Em outro teste, apesar da

ignição ocorrer com altas vazões de ar e combustível, as oscilações iniciais apresentaram baixas amplitudes de pressão, sendo amplificadas somente após a injeção de ar comprimido no orifício destinado a um dos transdutores de pressão. Este fato indica que quaisquer perturbações são capazes de alterar os níveis de amplitudes de pressão.

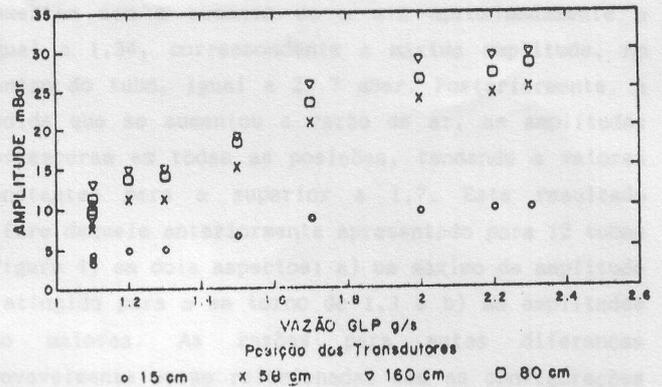


Figura 2. Variação das amplitudes de pressão acústica com a vazão de GLP. Ensaio com 12 tubos e  $\alpha$  constante.

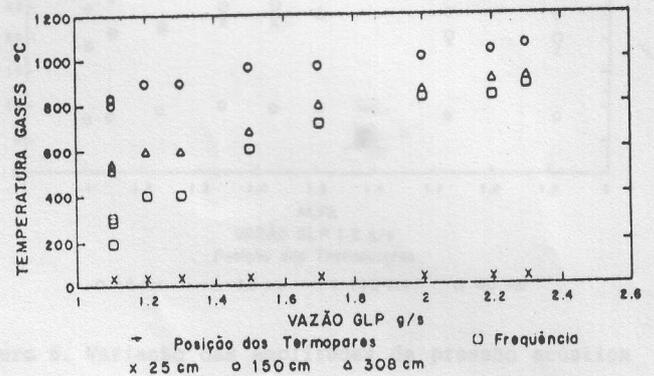


Figura 3. Variação das temperaturas dos gases e da frequência com a vazão de GLP. Ensaio com 12 tubos e  $\alpha$  constante.

DISTRIBUIDOR COM 12 TUBOS E  $\alpha$  VARIÁVEL. Para os testes executados nestas condições, sendo a vazão de GLP mantida em torno de 1,2 g/s, observa-se que, conforme o gráfico da Figura 4, as amplitudes de pressão acústica crescem à medida que a razão ar/combustível normalizada é aumentada. Este crescimento da amplitude de pressão se deve ao aumento da velocidade dos gases no tubo, caso similar ao de uma flauta. A combustão, porém, é necessária para gerar as perturbações e assim manter as oscilações acústicas. No centro do combustor, a máxima amplitude de pressão obtida foi 27,2 mbar correspondendo ao valor de  $\alpha$  igual a 1,91.

Na Figura 5 são apresentadas as temperaturas dos gases de combustão na seção média e na saída do

combustor. Na seção média do tubo, a temperatura dos gases aumenta de 777°C até 830°C, que é a temperatura máxima atingida, quando  $\alpha$  aumenta de 1,05 a 1,21. Isto se justifica face ao aumento da eficiência de combustão e a variações do comprimento de chama conforme  $\alpha$  aumenta. Posteriormente a temperatura naquele local experimenta um leve declínio à medida que a vazão de ar cresce, fato explicado pela maior disponibilidade de oxidante.

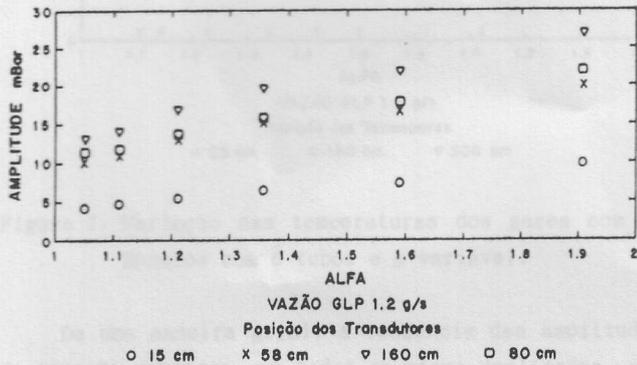


Figura 4. Variação das amplitudes de pressão acústica com  $\alpha$ . Ensaios com 12 tubos e  $\alpha$  variável.

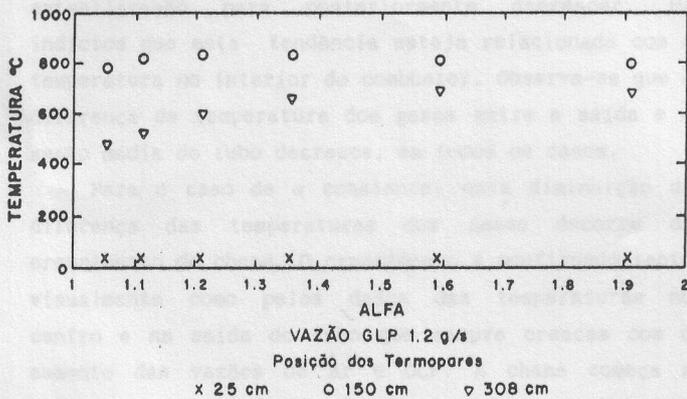


Figura 5. Variação das temperaturas dos gases com  $\alpha$ . Ensaios com 12 tubos e  $\alpha$  variável.

Quanto à temperatura dos gases na saída do tubo, inicialmente há uma forte elevação de 474 até 656°C a medida que  $\alpha$  aumenta de 1,05 até 1,36. Esta elevação íngreme da temperatura é justificada pelo fato de que o aumento da vazão de ar tende a elevar a eficiência de combustão, assim liberando mais calor. Posteriormente, a elevação desta temperatura segue uma tendência mais suave e estável com o aumento do excesso de oxidante.

A ignição nestes testes foi efetuada em regime de baixas vazões de ar e as oscilações iniciaram-se imediatamente após a ignição. No entanto, a queima se apresentava enfumaçada. Com o aumento do excesso de ar, a fumaça foi eliminada.

Distribuidor com 6 Tubos e  $\alpha$  Variável. Os primeiros resultados para o distribuidor de 6 tubos são apresentados na Figura 6, de onde se observa que as amplitudes de pressão acústica na seção média do tubo aumentam com o aumento de  $\alpha$  até aproximadamente  $\alpha$  igual a 1,34, correspondente à máxima amplitude, no centro do tubo, igual a 29,7 mBar. Posteriormente, à medida que se aumentou a vazão de ar, as amplitudes decresceram em todas as posições, tendendo a valores constantes para  $\alpha$  superior a 1,7. Este resultado difere daquele anteriormente apresentado para 12 tubos (Figura 4) em dois aspectos: a) um máximo de amplitude é atingido para  $\alpha$  em torno de 1,3 e b) as amplitudes são maiores. As razões para estas diferenças provavelmente estão relacionadas com as configurações de chama e com a perdas de carga através do queimador para os dois casos.

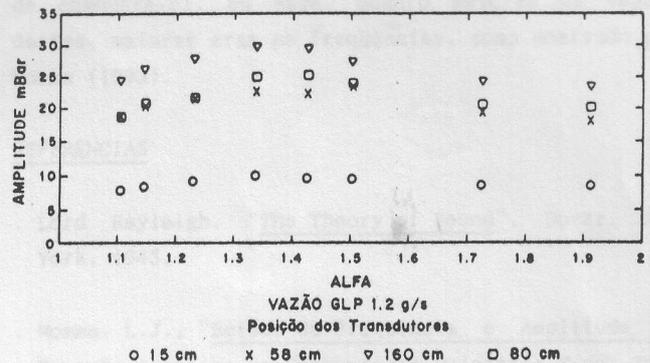


Figura 6. Variação das amplitudes de pressão acústica com  $\alpha$ . Ensaios com 6 tubos e  $\alpha$  variável.

Com relação à temperatura dos gases de combustão, observa-se na Figura 7 que a temperatura no centro do combustor manteve-se praticamente constante em 850°C com o aumento da razão ar/combustível normalizada até esta razão assumir o valor 1,43, e, em seguida, diminuiu lentamente. Todavia a temperatura medida na saída do combustor, elevou-se até a razão ar/combustível normalizada assumir o valor 1,43 correspondendo à temperatura dos gases na saída igual a 657°C. Esta temperatura não se alterou, mesmo com os aumentos posteriores da razão ar/combustível normalizada. Uma comparação com os dados para 12 tubos (Figura 5) mostra que não houve alterações substanciais entre as temperaturas dos gases obtidas para as duas configurações do queimador.

#### CONCLUSÃO

A queima de gás no combustor pulsante tipo tubo de Rijke foi relativamente simples porque, para sua efetivação, o aparelho foi adaptado a dispositivos

simples. O controle da alimentação do combustível foi facilitado pelo uso de válvulas, sendo a ignição efetuada sem dificuldades. As amplitudes de pressão rapidamente alcançavam patamares estáveis e foi possível a realização dos ensaios por longos períodos, sem interrupção.

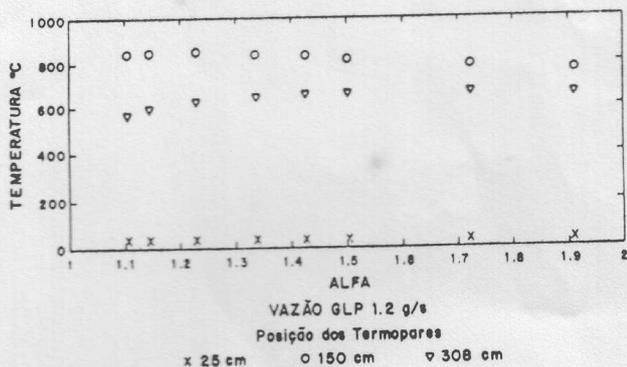


Figura 7. Variação das temperaturas dos gases com  $\alpha$ . Ensaio com 6 tubos e  $\alpha$  variável.

De uma maneira geral, a tendência das amplitudes de pressão acústica, em todos os casos analisados, é a de inicialmente crescer com o aumento da vazão de combustível ou da razão ar/combustível normalizada até um máximo valor, em torno do qual há uma certa estabilização para posteriormente decrescer. Há indícios que esta tendência esteja relacionada com a temperatura no interior do combustor. Observa-se que a diferença de temperatura dos gases entre a saída e a seção média do tubo decresce, em todos os casos.

Para o caso de  $\alpha$  constante, esta diminuição da diferença das temperaturas dos gases decorre do crescimento da chama. O crescimento é confirmado tanto visualmente como pelos dados das temperaturas no centro e na saída do tubo que sempre crescem com o aumento das vazões de ar e GLP. A chama começa a procurar ocupar toda a extensão do tubo, à medida que se aumentam as vazões de ar e combustível, diminuindo então o gradiente de temperatura entre a posição 1/4 do comprimento do tubo e a saída do mesmo. Assim, a máxima liberação de calor deixa de ocorrer na metade inferior do tubo como estabelecido por Rijke. Consequentemente, o amortecimento das oscilações é favorecido. Evidentemente, há diversos fatores que também favorecem o amortecimento, dependendo do caso.

Para o caso de  $\alpha$  variável, também ocorre o decréscimo da diferença de temperaturas dos gases na saída e no centro do combustor. Contudo, observa-se que a temperatura no centro do tubo sempre diminui conforme se aumenta  $\alpha$ , enquanto na saída a temperatura ou cresce ou mantém-se aproximadamente estável. Estes

dados indicam que ocorre diminuição do comprimento da chama com o incremento da vazão de oxidante, concentrando-se a troca de calor nas regiões mais próximas à metade inferior do tubo. Desta maneira, as amplitudes crescem até um valor limite e posteriormente tendem a decrescer quando as vazões de oxidante são mais elevadas, devido à perda de calor da chama para o excesso de ar, e aquecimento por convecção dos gases da parte superior do tubo, os quais diminuem o gradiente de temperatura entre a metade inferior e a saída do combustor. Assim, à medida que as temperaturas nos diversos pontos do combustor tornam-se próximas e não mais ocorrendo máxima liberação de calor na metade inferior do tubo, as amplitudes tendem a decrescer.

Constatou-se de todos os ensaios, exceto para o teste com 6 tubos e  $\alpha$  variável no qual obteve-se a frequência de 69 Hz constante durante todo o ensaio, que o crescimento das frequências de oscilações está relacionada com o aumento das vazões tanto de ar como de combustível, ou seja, quanto maiores as vazões destes, maiores eram as frequências, como mostrado por Momma (1993).

#### REFERÊNCIAS

- . Lord Rayleigh, "The Theory of Sound", Dover, New York, 1945.
- . Momma, L.J., "Estudo da Frequência e Amplitude de Pressão Acústica em Combustores Pulsantes Tipo Tubo de Rijke", Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil, 1993.
- . Putnam, A.A. and Dennis, W.R. "A Study of Burner Oscillations of the Organ-Pipe Type", Transaction of ASME, Vol. 75, pp. 15-28, 1953.
- . Tyndall, J., "Sound", Physical Sciences, Vol. 30, pp. 231-257, 1970.
- . Wood, A., "Acoustics", Dover, New York, 1966.

#### ABSTRACT

This paper presents the result of an experimental study of the gas burning in Rijke type pulsating combustor. The LPG was utilized in all experiments. The injection condition was varied by the number of distributor tube, by the mass flow of gas fuel ( $\dot{m}$ ) and by the normalized air/fuel ratio ( $\alpha$ ). The general behavior of the amplitude of acoustics pressure is the

initial rise with the increase of  $\mu$  or  $\alpha$  up to it reaches a maximum value, around one there is a stabilization and afterwards it decreases.