

RESULTADOS EXPERIMENTAIS SOBRE A EMISSÃO DE POLUENTES EM PROCESSOS DE COMBUSTÃO COM EXCITAÇÃO ACÚSTICA ⁽¹⁾

Ana Maura Araújo Rocha⁽²⁾

Daniel Silva Ferreira⁽³⁾

Pedro Teixeira Lacava⁽⁴⁾

João Andrade de Carvalho Junior⁽⁵⁾

Resumo

O objetivo do presente trabalho é mostrar como o controle da emissão de poluentes em processos de combustão pode ser atingido utilizando excitação acústica. Desta forma, resultados experimentais sobre formação de fuligem, emissões de monóxido de carbono e óxidos de nitrogênio são apresentados para queimadores pulsados. Os experimentos foram conduzidos em uma câmara de combustão refrigerada de escala laboratorial, onde o regime de combustão pulsante é atingido através de um alto-falante estrategicamente posicionado ao longo do corpo do queimador. Um sistema de atuação acústica controla frequência e amplitude desejada para excitação. Os ensaios foram realizados utilizando Gás Liquefeito de Petróleo e Gás Natural como combustíveis. Os resultados indicaram que há uma considerável mudança na estrutura da chama quando as oscilações acústicas estão presentes, intensificando o processo de mistura entre os reagentes. A consequência disso uma redução considerável nas emissões de poluentes oriundos de oxidação parcial, como CO e fuligem. Quanto as emissões de NO_x, os ensaios apontaram que a presença das oscilações pode reduzir a emissão desse poluente; contudo, em um pequeno intervalo de condição de oscilação.

Palavras-chave: Emissão de poluentes; Combustão pulsante; Queimadores pulsados.

¹ 60º Congresso Anual da ABM, 25 a 28 de julho de 2005, Belo Horizonte - MG

² Estudante de Doutorado – UNESP – Guaratinguetá

³ Estudante de Doutorado – UNESP – Guaratinguetá

⁴ Professor Adjunto – ITA – São José dos Campos

⁵ Professor Titular – UNESP – Guaratinguetá / Pesquisador – INPE – Cachoeira Paulista

1 INTRODUÇÃO

A preocupação com a emissão de poluentes em processos industriais, cada dia adquire proporções maiores devido às exigências ambientais. Não fugindo desse contexto, estão os equipamentos que utilizam a energia térmica liberada pelas reações de combustão, como é o caso das caldeiras, fornos, incineradores e motores (Carvalho Jr. e Lacava, 2003). Basicamente, há duas maneiras de se controlar a emissão de poluentes nesses processos: intervindo diretamente na combustão ou tratando os gases fora da câmara. Uma das recentes técnicas de intervenção direta é a combustão em condição de chama pulsada, ou seja, com a pressão e a temperatura variando periodicamente na região de queima. As pulsações aceleram a mistura entre os reagentes, resultando em um processo de combustão mais intenso, com baixo desperdício de combustível e um potencial para baixas emissões de poluentes decorrentes de oxidação parcial do combustível, como monóxido de carbono (CO) e a fuligem.

Contudo, apesar do grande potencial de redução nas emissões desses poluentes, poucos resultados são encontrados na literatura sobre a utilização da combustão pulsante para controlar as emissões de NO_x (soma de NO e NO_2). A formação de NO_x nessa situação resulta de uma complexa interação entre dinâmica dos fluidos e a química (Glarborg, 1993). Durante a combustão, significativos 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 são controlados pelos efeitos de mistura e, em geral, ocorrerem de maneira mais pronunciada em sistemas não pré-misturados (Kelly 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 .

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 dos 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 as emissões de CO e NO_x e a presença de fuligem.

2 ARRANJO EXPERIMENTAL

Os experimentos foram realizados em uma câmara de combustão cilíndrica vertical de escala laboratorial, com 1 m de comprimento e 25 cm de diâmetro interno e com refrigerada com água corrente por uma jaqueta envolvendo a câmara. Ao longo da câmara foram instalados termopares tipo "K" e transdutores de pressão piezelétricos, 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. 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. Uma câmara de desacoplamento foi posicionada na parte superior do combustor, permitindo que, sem mudar as características acústicas da câmara, a coleta de gases para análise contínua possa

ser realizada sem infiltração de ar externo. Testes preliminares indicaram a necessidade dessa câmara de desacoplamento em virtude da penetração de ar adicional pela abertura superior do combustor. A Figura 1 apresenta um esquema da montagem.

Na base da câmara de combustão foram acoplados o queimador de gás natural ou o de gás liquefeito de petróleo (GLP), dependendo da condição de operação desejada. Para atuação acústica, alto-falantes foram estrategicamente posicionados na base dos queimadores; sendo que, para o queimador de gás natural, a atuação acústica foi aplicada sobre o escoamento do ar de combustão; já para o queimador de GLP na linha de pré-mistura entre ar e o gás combustível. Um transdutor de pressão, denominados por P1, foi posicionado no corpo dos queimadores, para que se conhecesse a situação de oscilação acústica (amplitude e frequência) do escoamento que estava sendo excitado.

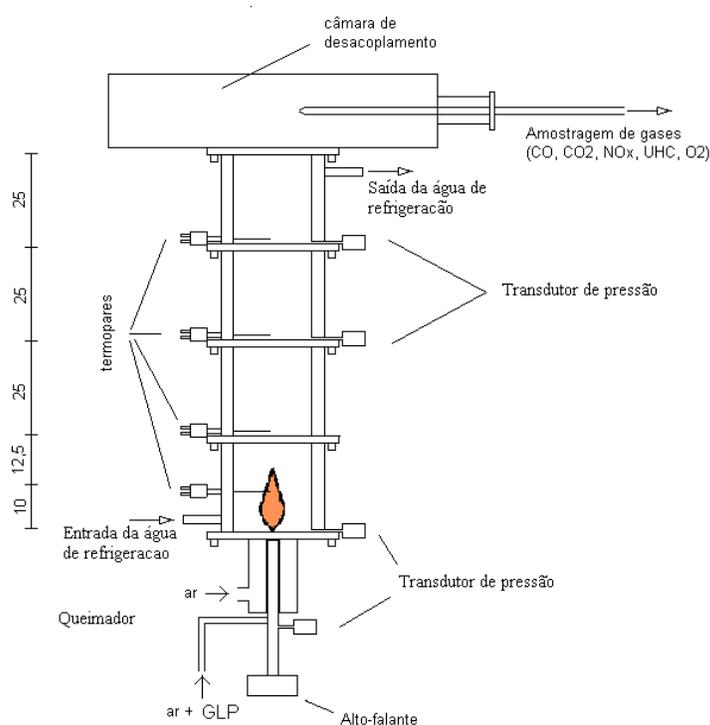


Figura 1. Esquema da montagem experimental.

Para se excitar acusticamente o escoamento, um sinal elétrico senoidal foi obtido a partir do gerador de funções Hewlett-Packard, modelo HP8116A, onde se atribuiu a frequência desejada para o alto-falante. Na seqüência, a amplitude do sinal foi ajustada num amplificador Proximity, modelo 750AP (480 W), antes de chegar ao alto-falante Unipower S50, com potência de 100 W e Impedância de 16 Ohms. Conforme já comentado, no queimador e na câmara de combustão foram posicionados transdutores de pressão piezoelétrico Kistler 7261, faixa de 0-10 bar, que eram responsáveis pela conversão dos sinais de pressão acústica em sinais de tensão. Finalmente esses sinais de tensão passavam por amplificadores de carga Kistler 5006 e eram lidos em um osciloscópio Tektronix 7633 e no sistema de aquisição de dados.

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 desacompladamente.

A captação dos gases na saída da câmara foi feita por uma sonda refrigerada. Através de sucção por uma bomba de vácuo, os gases de combustão eram conduzidos 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.

Tanto o sinal proveniente dos analisadores de gases, bem como os dos termopares e os dos transdutores de pressão, foram 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 gás natural, GLP, ar de pré-mistura (queima de GLP) e ar de combustão foram obtidas através de placas de orifício.

A visualização da presença de chama foi feita por meio de uma câmera CCD Marshall V-1070-EIA, com resolução espectral de 400 a 1100nm, acoplada a uma lente Marshall V-4906R. Foram utilizados filtros Melles-Griot de comprimento de onda característico da emissão da fuligem, 802 nm. As imagens adquiridas pela câmara foram digitalizadas numa placa de aquisição "frame grabber" com capacidade de taxa de aquisição de até 42Mb/s, instalada em um computador PC-Pentium 133MHz, 32Mb de memória RAM, com placa aceleradora Matrox Millennium com Mb. O programa de aquisição foi desenvolvido em ambiente de programação específico para a "frame grabber", que permite obter a imagem resultante da média de um determinado número de imagens adquiridas. Todos resultados apresentados no presente trabalho são imagens médias de 100 imagens adquiridas para a situação em estudo. As imagens médias sofreram um processo de tomografia desenvolvido por Souza (1998) que aplica a técnica de reconstrução algébrica para sistemas com simetria axial. Tal algoritmo foi desenvolvido em ambiente MATLAB e considera que cada pixel da câmara CCD integra a radiação emitida pela chama a partir de um caminho ótico conhecido, sendo que, de uma forma simplificada, considera que o CCD tem suas dimensões na mesma ordem de grandeza do objeto observado. A Figura 2 esquematiza o processo de reconstrução tomográfica da chama. Maiores detalhes sobre o algoritmo podem ser encontrado no próprio trabalho de Souza (1998) e no trabalho de Costa et al.(1998).

3 RESULTADOS E COMENTÁRIOS

Os efeitos da introdução do campo acústico sobre as emissões de NO_x e CO foram observados em ensaios realizados com a queima de gás natural em diversas condições de razão de equivalência - phi (proporção de ar – combustível) e condições de excitação acústica (frequência e amplitude). Neste caso, a excitação acústica aconteceu na linha de ar de combustão.

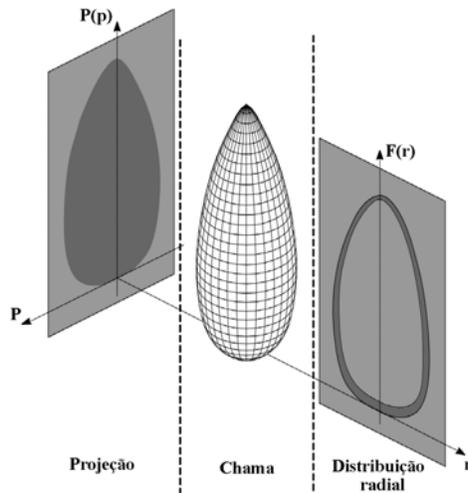


Figura 2. Reconstrução Tomográfica da chama.

Para observar a presença de fuligem através do processo de tomografia, foram realizados ensaios com GLP, pois a formação de fuligem em chamas de gás natural é muito baixa e a emissão luminosa devido a sua presença não é perceptível pelo sistema óptico utilizado no presente experimento. Para essa situação, a excitação acústica aconteceu na linha onde o GLP é pré-misturado com parte do ar introduzido na câmara.

3.1 Emissões de NO_x e CO

A Figura 3 apresenta curvas para as máximas e mínimas emissões de NO_x em situação pulsante e a emissão na situação não pulsante em função da razão de equivalência. Nota-se que nas proximidades da queima estequiométrica ($\Phi = 1$ e $0,89$) a presença do campo acústico sempre aumentou a emissão de NO_x . Com o aumento do excesso de ar, surgem situações, ou melhor, combinações de frequência e amplitude que reduzem a emissão de NO_x para um nível inferior ao da condição não pulsada. Conforme demonstrado por Lyons (1982), à medida que o excesso de ar e a taxa de mistura entre os reagentes aumentam, a tendência é de redução da emissão de NO_x . Desta forma, a Fig. 3 mostra que foi possível alcançar essa intensificação em determinadas condições de operação. No entanto, não é possível estabelecer uma conexão simples entre as condições de oscilação e emissão de NO_x , visto as intensas variações observadas quando se altera Φ e se ajusta a atuação para minimizar a emissão. Isso pode ser observado nas Fig.'s 4 e 5 que apresentam as frequências e amplitudes em função de Φ , respectivamente, para os máximos e mínimos de NO_x .

Ainda sobre a emissão de NO_x , nota-se que para combustão extremamente pobre, Φ igual $0,39$ e $0,3$, as emissões máximas e mínimas são praticamente iguais às da situação não pulsada. Para este nível de empobrecimento da mistura, observou-se que a presença do campo acústico teve pouca influência no processo de combustão, provavelmente em razão da vazão de ar atingir um valor alto suficiente para que energia adicionada pelo alto-falante não seja mais suficiente para criar uma oscilação de pressão no escoamento.

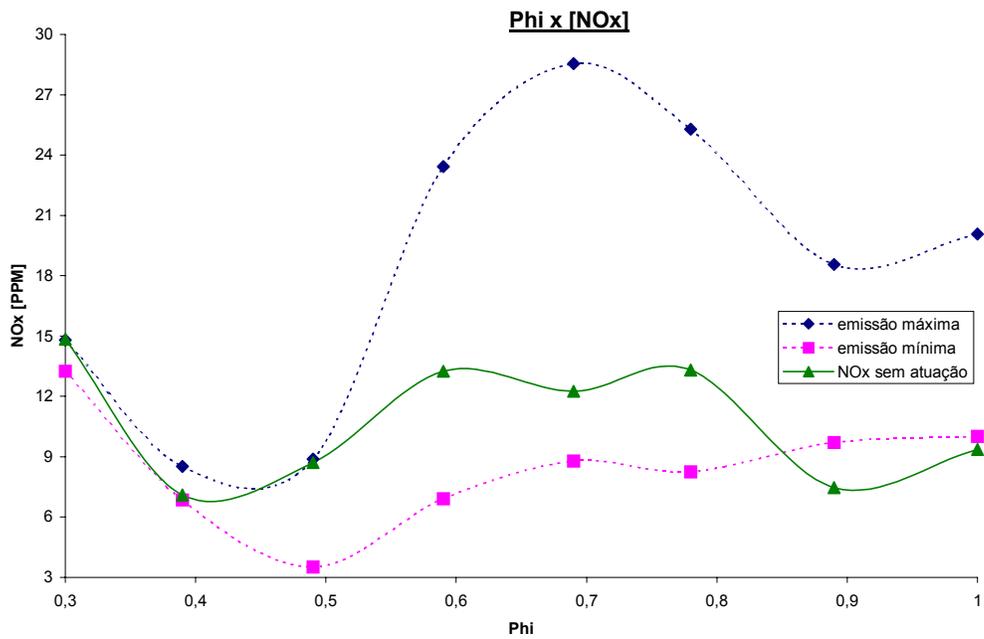


Figura 3. Máximas e mínimas emissões de NO_x para combustão pulsada e emissão para combustão não pulsada em função de Phi.

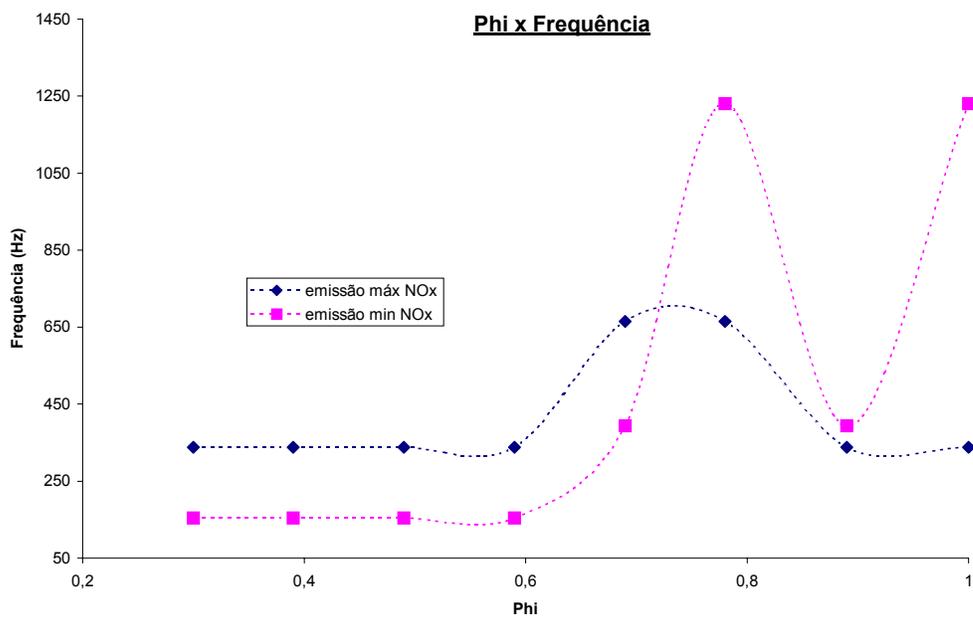


Figura 4. Frequências que apresentam emissões máximas e mínimas de NO_x em função de Phi.

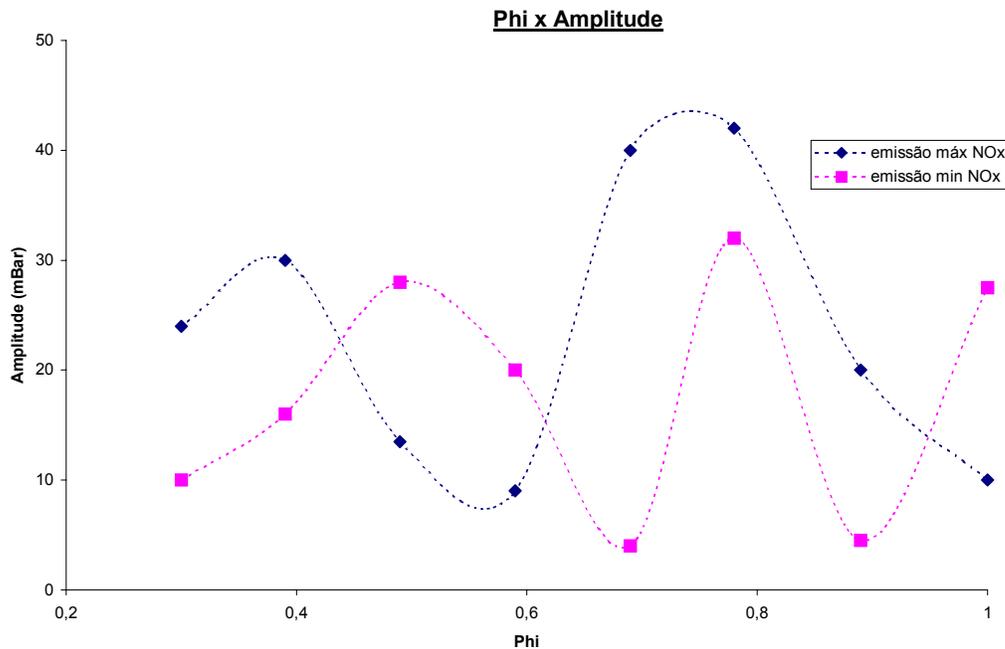


Figura 5. Amplitudes que apresentam emissões máximas e mínimas de NO_x em função de Phi.

A Figura 6 compara as emissões de CO para as situações de máxima e mínima emissão de NO_x com atuação acústica e a situação sem atuação. É importante destacar que entre Phi igual a 0,59 e 0,78 foi possível obter emissões de NO_x inferiores às da situação não pulsada, de acordo com o que foi observado na Figura 3; sendo que, nestas mesmas condições a emissão de CO esteve no mesmo nível da situação não pulsante (Figura 6 curva para mínima emissão de NO_x). Este resultado para o intervalo de Phi igual a 0,59 a 0,78 é importante para demonstrar a possibilidade de utilizar a combustão pulsante como tecnologia capaz de conciliar as emissões de produtos de combustão de oxidação parcial, como o CO, com a emissão de NO_x , que é uma grande dificuldade em diversos dispositivos que utilizam a combustão como fonte de energia.

3.2 PRESENÇA DE FULIGEM

A Tabela 1 apresenta uma seqüência de imagens resultantes do processo de tomografia, correspondentes à emissão luminosa da fuligem presente na região de chama para situações com e sem oscilação acústica. Tais imagens foram obtidas para chamas de GLP, Phi igual a 0,9, sendo que 16% do ar é pré-misturado com o combustível e o restante injetado direto no câmara.

Os resultados da tomografia apresentam apenas a metade esquerda da chama, pois a imagem média é possui simetria axial. Nota-se que o aumento da amplitude de oscilação reduz a emissão no comprimento de onda de 802nm, típico da fuligem; até que em 30mbar a concentração de fuligem é tão baixa que o sistema ótico não é mais capaz de detectar emissão. Como a formação de fuligem está associada à presença de regiões de deficiência de oxidante na chama, pode-se concluir que presença de um campo acústico e sua intensificação com aumento da amplitude melhoraram consideravelmente a mistura entre o combustível e o ar,

reduzindo essas regiões deficientes e, conseqüentemente, diminuindo a presença de fuligem.

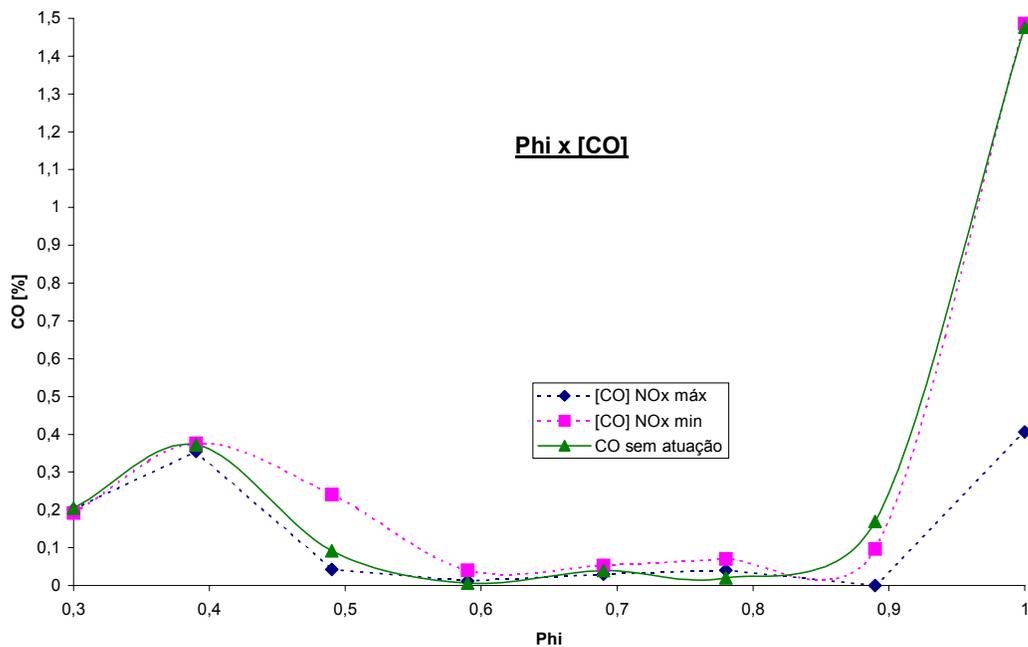


Figura 6. Emissões de CO para situações de máximas e mínimas emissões de NO_x para combustão pulsada e emissão de CO para combustão não pulsada em função de Phi.

Tabela 1. Verificação da presença de fuligem através de tomografia de chama.

			Sistema ótico não identificou presença de fuligem (comprimento de onda de 802nm).
Sem oscilação	Freqüência de 225Hz e amplitude de 10mbar	Freqüência de 225Hz e amplitude de 20mbar	

4 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo estudar os efeitos de um campo acústico sobre a combustão de combustíveis gasosos com ar, sobretudo na emissão de poluentes. Foram feitas comparações entre as concentrações obtidas com e sem atuação acústica, variando-se a razão de equivalência, a freqüência e a amplitude

de atuação. A meta principal foi obter condições de operação adequadas, onde se obtivesse baixas emissões de produtos de combustão parcial, como o CO, aliado à redução das emissões de NO_x.

Apesar dos resultados mostrarem que ser possível conciliar as emissões de compostos de oxidação parcial com as de NO_x, isto só ocorre para combinações específicas entre o excesso de oxidante, frequência e amplitude, modificando-se acentuadamente o resultado quando qualquer um desses três parâmetros é alterado. Assim, não se pode formular um raciocínio direto ou simples sobre o efeito das condições de oscilação no combate à emissão de poluentes. Para que tal técnica seja empregada é preciso determinar experimentalmente como o sistema queimador /câmara de combustão/ atuador acústico responde, e assim fazer uma programação de qual condição de atuação deve ser imposta para uma determinada situação de queima, ou seja, existe a necessidade de um controle ativo do sistema.

Além da conciliação das emissões de NO_x e CO, o presente trabalho ainda mostrou que é possível reduzir consideravelmente a presença de fuligem através da combustão pulsante.

Agradecimentos

Para Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, através do projeto 02/12802-0, e ao Laboratório de Combustão e Propulsão do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, pelo suporte aos experimentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 CARVALHO JR, J.A.; LACAVALA, P.T., 2003, **Emissões em Processos de Combustão**. São Paulo: Editora UNESP, v. 1. 135 p.
- 2 COSTA, F.A., CALDEIRA-PIRES, A., ANACLETO, P., CARVALHO JR, J.A., 1998, Análise de chamas por tomografia: caracterização de turbinas a gás LPP, **Anais VII Encontro Nacional de Ciências Térmicas**, Rio de Janeiro, Brasil.
- 3 GLARBORG, P., 1993, NO_x Chemistry in Pulse Combustion, **Workshop in Pulsating Combustion and its Applications**, Keynote Lecture C, Lund Institute of Technology, Sweden, August 2-5.
- 4 KELLER, J.O., BRAMLETTE, T.T., BARR, P.K., ALVAREZ, J., 1993, **Anais Spring Meeting of the Western States Section/The Combustion Institute**, Utah.
- 5 LYONS, V. J., 1982, Fuel/Air Nonuniformity-Effect of Nitric Oxide Emissions, **AIAA Journal**, 20(5):660-665.
- 6 SOUZA, N., **Processamento de Imagem Tomográfico, 1998**. Lisboa, Portugal, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico.

EXPERIMENTAL RESULTS FOR POLLUTANT EMISSIONS ON COMBUSTION PROCESSES WITH ACOUSTIC EXCITATION

*Ana Maura Araújo Rocha
Daniel Silva Ferreira
Pedro Teixeira Lacava
João Andrade de Carvalho Junior*

Abstract

The objective of the present work is to show how the acoustic excitation may control the pollutants emissions in combustion process. So that, experimental results about soot formation, carbon monoxide (CO) and nitrogen oxides (NO_x) emissions are presented for pulsed burners. The experiments were conducted in a water refrigerated chamber of laboratorial scale, where the pulsating combustion was reached by a speaker strategically positioned on the burner. An acoustic actuation system controls the frequency and amplitude of excitation. The experiments were realized using natural gas and petrol liquefied gas (LPG) as fuels. The results show considerable changes in the flame structure when an acoustic field is present, intensifying the mixing process between the reactants. As consequence, there is a reduction in the partial oxidation pollutants emissions, as CO and soot. However, for NO_x, the acoustic field can reduce the emissions in narrow oscillation conditions.

Key-words: Pollutant emissions; Pulsating combustion; Pulsed burners.