

INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE SWIRL NA EMISSÃO DE NO_x EM UMA FORNALHA DE 110kW QUEIMANDO DIESEL

Pedro Teixeira Lacava

Amilcar Porto Pimenta

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Divisão de Engenharia Aeronáutica, Departamento de Propulsão, Pça. Mal. Eduardo Gomes, 50, São José dos Campos, SP, Brasil, 12228-900

lacava@aer.ita.cta.br, amilcar@aer.ita.cta.br

João Andrade de Carvalho Jr.

Universidade Estadual Paulista, Campus de Guaratinguetá, Departamento de Energia, Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333, Guaratinguetá, SP, Brasil, 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, 12700-000

Resumo

Um dos meios para minimizar a emissão de poluentes é controlar o processo de queima pelo formato da chama. No entanto, para queima de combustíveis líquidos este controle torna-se bem mais complexo do que para o caso de combustíveis gasosos, em função das interações entre os processos de atomização e vaporização com a taxa de mistura do combustível e oxidante. Desta forma, o presente trabalho apresenta resultados experimentais sobre a influência da estrutura da zona de recirculação próxima à região da chama, quantificada pelo número de *swirl*, na emissão NO_x em uma fornalha de paredes refratárias operando a uma potência de 110kW e diesel como combustível. Os resultados apontam que a alteração do número de *swirl* pode contribuir significativamente para minimizar a emissão de NO_x.

Palavras-chave: combustão industrial, emissão de NO_x, número de *swirl*.

1. INTRODUÇÃO

A alta temperatura de operação das câmaras de combustão industrial e de sistemas propulsivos e a utilização de combustíveis com alto teor de nitrogênio são fatores convenientes para a formação de NO_x (soma de NO e NO₂) que, além de, como o SO₂, provocar chuva ácida, é um componente importante das reações fotoquímicas que levam à formação do ozônio (O₃). Além dos fatores ambientais, o NO_x é responsável direto por diversos problemas de saúde, com a metaemoglobina ou cianose, edemas pulmonares e alteração das características hereditárias.

A formação deste poluente é atribuída à dois processos distintos: (a) NO_x do Combustível, formado a partir da quebra das ligações do nitrogênio presente no combustível e reação com oxigênio; (b) NO_x Atmosférico, formado a partir da oxidação do N₂ do ar atmosférico, seguindo dois mecanismos de formação, o NO_x Térmico, formado na região de pós-chama, e o NO_x *Prompt*, formado na região de frente de chama.

Em geral, quando não há presença de nitrogênio no combustível, o principal mecanismo de formação do NO_x é o Térmico, que possui dependência exponencial com a temperatura (Glarborg, 1993). Desta forma, algumas das técnicas utilizadas para minimizar a emissão deste poluente envolvem a redução da temperatura ou a não formação de regiões com pico de temperatura na chama. Entre elas destacam-se: combustão estagiada, injeção de água ou vapor, recirculação dos gases de saída da câmara e controle do formato da chama. O presente trabalho enfoca a minimização da emissão de NO_x através do controle no formato da chama por modificações na estrutura da zona de recirculação interna (ZRI) a jusante da saída do queimador. As alterações na ZRI provocam modificações na taxa de mistura entre o ar oxidante e o combustível vaporizado (para o caso da combustão de líquido), conseqüentemente, também alterando a temperatura e a concentração de oxigênio (razão de equivalência) na região de chama (Ballester e Dopazo, 1994).

2. MONTAGEM EXPERIMENTAL

Os ensaios foram realizados em uma câmara de combustão vertical, com parede refratária, sem refrigeração externa e com o volume total de 1000 litros. A Figura 1a apresenta o esquema da câmara. Para obtenção da distribuição de temperatura ao longo da câmara, foram previstos termopares nas posições: 0,18, 0,70, 1,05, 1,40, 1,75, 2,50, 3,00 e 4,20m a jusante do queimador.

O queimador utilizado possui um *swirler* com o ângulo entre pás variável, permitindo alterar a estrutura da zona de recirculação formada a frente do queimador. Através do controle do ângulo entre pás foi possível variar o número de *swirl*, parâmetro utilizado nesse trabalho para quantificar a intensidade da zona de recirculação. Para atomização do combustível foi usado um injetor do tipo “Y-Jet”. A Figura 1b apresenta um esquema do queimador com o injetor acoplado.

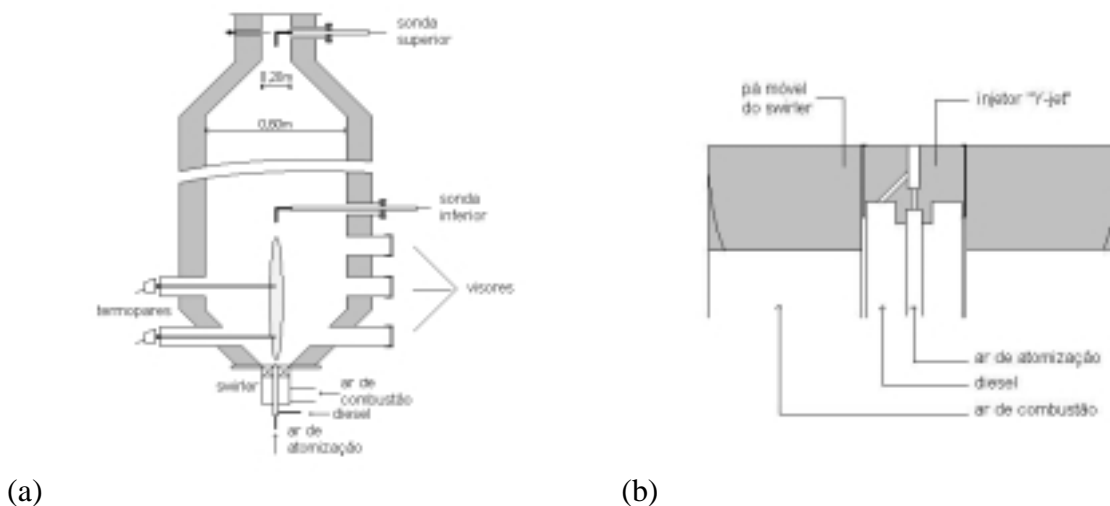


Figura 1. Montagem experimental. (a) Esquema da câmara de combustão. (b) Queimador.

Em todos ensaios, as vazões de diesel e ar de atomização foram mantidas constantes em 2,50 e 0,45g/s, respectivamente. Desta forma, o potência gerada pela queima de diesel foi fixada em 110kW. A vazão de ar de combustão também foi mantida fixa em 47,7g/s, que somada com a vazão do ar de atomização, representam um excesso de ar de 29% ou 5% de O_2 na saída da câmara (em base seca). As vazões de diesel e ar de atomização foram medidas

utilizando rotâmetros e a vazão de ar de combustão um medidor de vazão volumétrica tipo turbina.

As amostragens de gases foram feitas por duas sondas refrigeradas posicionadas em dois pontos da câmara: na região próxima ao final da chama, correspondendo ao volume 227 litros, e a 30cm da saída da câmara, correspondendo ao volume de 994 litros. Os gases de amostragem passam por filtros e condensadores antes de chegarem aos analisadores de CO (infravermelho), CO₂ (infravermelho), O₂ (termomagnético) e NO_x (quimiluminescente). As leituras dos analisadores, juntamente com as dos termopares, foram feitas em um sistema de aquisição de dados HP6554.

3. CÁLCULO DO NÚMERO DE SWIRL

A relação adimensional que caracteriza a intensidade do *swirl*, utilizado aqui para quantificar a intensidade da zona de recirculação, é dada pelo número de *swirl* S' , que corresponde a razão entre a componente axial do fluxo da quantidade de movimento angular e a componente axial do fluxo da quantidade de movimento linear. O modelo utilizado para cálculo do número de *swirl* é basicamente o apresentado por Lawn (1987), com as considerações de coeficiente de bloqueio feitas por Couto et al. (1995). A Figura 2 apresenta o esquema genérico de um *swirler* axial e os raios característicos.

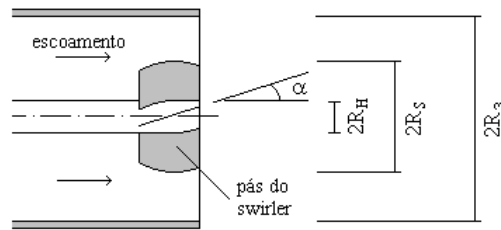


Figura 2 . Esquema genérico de um *swirler* axial

O número de *swirl* pode ser definido baseando-se na distribuição de velocidade no próprio swirler (Lawn, 1987), que, para o caso onde apenas o escoamento secundário externo passa pelo *swirler* (ar de combustão), pode ser escrito como (Couto et al., 1995):

$$S' = \frac{S'_s}{(1 + Mr)} \quad , \quad (1)$$

onde S'_s é o número de *swirl* do escoamento secundário e Mr a razão entre as componentes axiais dos fluxos da quantidade de movimento linear dos escoamentos primário interno (combustível) e secundário externo (ar de combustão). S'_s e Mr podem ser calculados como:

$$S'_s = \frac{G_\phi}{(R_3 - R_H) \cdot G'_x} \quad , \quad (2)$$

$$Mr = \frac{(\rho / m^2)_s \cdot (m^2 / \rho)_p \cdot (R_3^2 - R_H^2)}{R_I^2} \quad , \quad (3)$$

sendo ρ a massa específica, m a vazão mássica, R_I o raio do orifício do injetor de combustível e os subscritos p e s são referentes aos escoamentos primário e secundário, respectivamente.

A razão entre as componentes axiais do fluxo da quantidade de movimento angular e fluxo da quantidade de movimento linear é dada por:

$$\frac{G_{\phi}}{G_x'} = \frac{2.(CB).tan\alpha.(R_s^3 - R_H^3)}{3.(R_s^2 - R_H^2)} \quad , \quad (4)$$

onde α é ângulo entre pás do *swirler* e CB é o coeficiente de bloqueio devido a espessura finita das pás direcionais. O cálculo do coeficiente de bloqueio foi feito seguindo a metodologia apresentada por Couto et al. (1995), que considera a situação de pás direcionais com espessura finita e a influência do número de Reynolds como pequena. Assim, o coeficiente de bloqueio depende apenas das dimensões geométricas das pás direcionais na seção reta perpendicular ao eixo do duto, sendo verificado que:

$$CB = \frac{l}{(l - \sigma)} \quad , \quad (5)$$

onde σ o fator de bloqueio dado por:

$$\sigma = \frac{(A_s - A_{ef})}{(A_{3a} - A_s)} \quad , \quad (6)$$

sendo: A_{3a} a área anular entre o *swirler* e a parede do tubo, A_s a área da coroa circular do *swirler* e A_{ef} a área efetiva de escoamento no próprio *swirler*, que é determinada geometricamente por:

$$A_{ef} = 2.(R_s - R_H).(K - 2T).cos\alpha \quad , \quad (7)$$

onde K é dado por:

$$K = cos(\pi / 2.Z).[R_s.sin(\pi / Z) + R_H.tan(\pi / Z)] \quad . \quad (8)$$

sendo Z o número de pás do *swirler* e T a espessura das mesmas. As dimensões geométricas do *swirler* são: $R_3 = 79\text{mm}$, $R_s = 79\text{mm}$, $R_H = 21\text{mm}$, $R_l = 0,875\text{mm}$, $\alpha = 0 - 70^\circ$, $Z = 8$ e $T = 2\text{mm}$. Como para o queimador utilizado $R_s = R_3$, os ensaios foram realizados na condição de máximo bloqueio para um determinado ângulo de inclinação α .

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 3 apresenta o comportamento da emissão de NO_x em função do número de *swirl* para as amostragens de gases feitas em 994 e 227 litros. As curvas da figura mostram comportamentos qualitativos e quantitativos bastante semelhantes para as emissões de NO_x em ambos pontos de amostragem, indicando que a maior parte do NO_x é formado na região de chama e não ao longo da câmara. Isso deve-se principalmente à queda de temperatura dos gases de combustão em função da transferência de calor para a parede da câmara após a região de chama. A temperatura obtida na saída da fornalha foi em torno de 850°C , com o tempo de residência de aproximadamente 5 segundos.

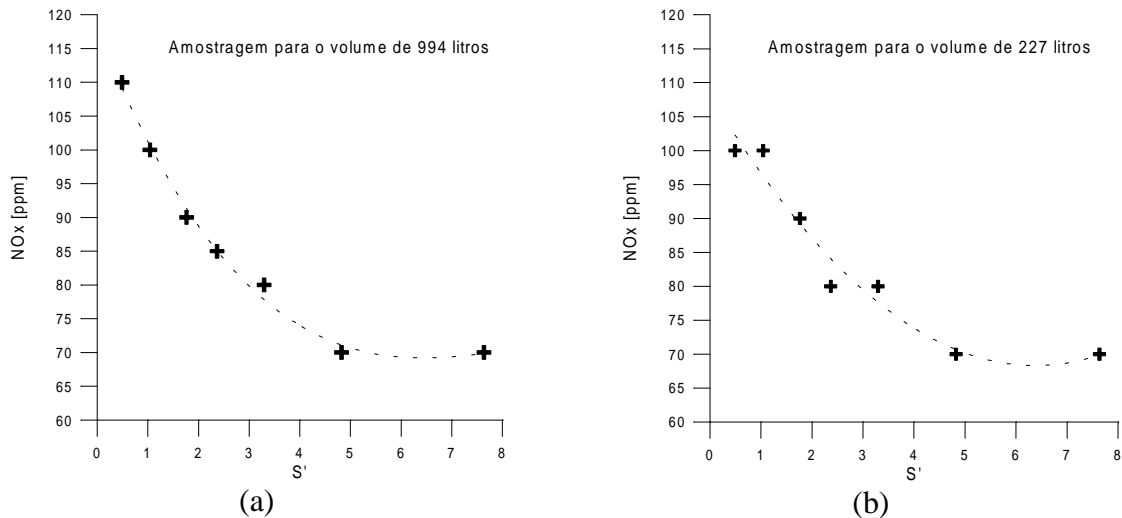


Figura 3. Comportamento da emissão de NO_x (base seca) em função do número de *swirl*: (a) amostragem dos gases feita a 994 litros e (b) amostragem dos gases feita a 227 litros.

O comportamento da emissão de NO_x observado na Figura 3 está atrelado às interações existentes entre o processo de vaporização das gotas do spray com a estrutura da zona de recirculação. Basicamente, a combustão de sprays com a presença de uma zona de recirculação interna (ZRI), gerada pela presença do *swirler* no escoamento do ar oxidante, segue as observações experimentais feitas por Ballester e Dopazo (1994). O spray é injetado diretamente na ZRI, com as gotas mantendo-se concentradas ao longo do cone formado pelo spray. As gotas passam a ser aquecidas pela radiação proveniente da chama e das paredes da câmara, além de uma combinação de convecção e condução devido aos gases quentes retornados da chama que são carregados para ZRI. Desta forma, as gotas evaporam e são desaceleradas ao longo de suas trajetórias a uma taxa que depende do tamanho de cada uma. Gotas de menores diâmetros tendem a seguir o escoamento reverso e evaporam quase instantaneamente, suprindo as condições de ignição e ancorando a chama próxima ao queimador. Por outro lado, as gotas maiores possuem quantidade de movimento suficiente para atravessar o escoamento reverso e terão a vaporização completa a jusante da ZRI. No entanto, parte da vaporização ocorre ainda na ZRI, resultando em uma região de alta geração de vapor e apenas uma limitada quantidade de oxigênio é suprida do escoamento de ar ao redor do spray, caracterizando uma região de combustão rica com alta concentração de hidrocarbonetos não queimados e CO. A medida que fortalece-se a região de recirculação, aumentando-se S' grande parte da vaporização das gotas é confinada nessa região (Barreiros et al., 1993).

A Figura 4 apresenta um esquema da região de queima e fotografias do primeiro visor da câmara (centro do visor a 18cm do queimador) para chamas em três condições diferentes de número de *swirl*. Para $S'=0,264$ ($\alpha = 15^\circ$) não é possível visualizar a influência da ZRI na estrutura da chama. No entanto, sua atuação se faz presente, visto que para S' inferiores a esse valor não foi possível estabilizar a chama. As fotografias ainda mostram que a medida que S' aumenta a tendência da chama é de concentrar-se mais próxima ao queimador. Isto também pode ser comprovado pelo comportamento da temperatura medida pelo termopar 1 posicionado 18cm a jusante do queimador (Figura 5a). O aumento da temperatura com o incremento do número de *swirl*, comprova que há uma maior liberação de energia por unidade de volume nas proximidades do queimador.

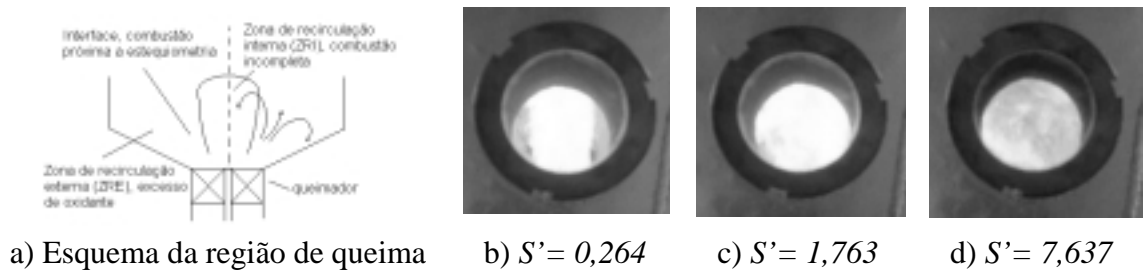


Figura 4. Esquema da região de queima e fotografias a 18cm do queimador.

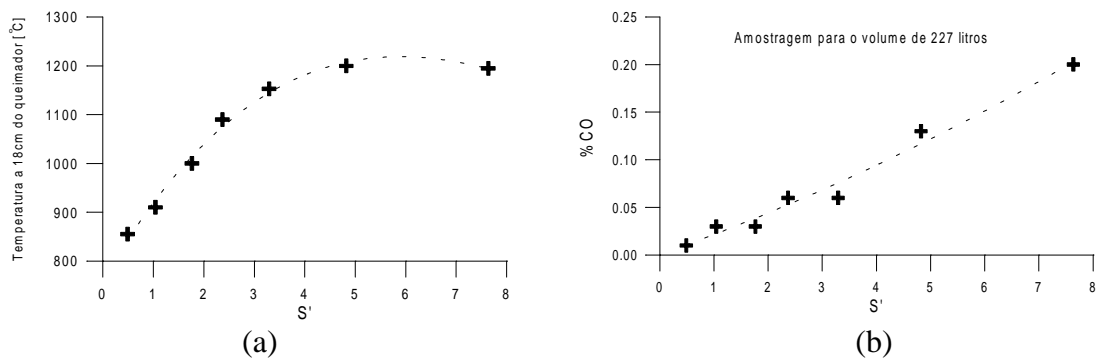


Figura 5. (a) Comportamento da temperatura medida pelo termopar posicionado a 18cm do queimador, com a variação do número de *swirl*. (b) Comportamento da porcentagem de CO com S' . Amostragem dos gases de combustão feita para o volume da câmara de 227 litros.

Apesar do aumento da temperatura na região próxima ao queimador, devido a redução do comprimento da chama e confinamento da vaporização das gotas na ZRI, quando S' aumenta a combustão acaba acontecendo sob condição rica e os gases de combustão apresentam alto teor de hidrocarbonetos não queimados e CO. A Figura 5b mostra o aumento da porcentagem de CO nos gases de combustão logo após a região de chama. No entanto, a jusante da ZRI tais compostos de oxidação parcial vão reagindo com o oxigênio presente em alta concentração. Na saída da câmara a porcentagem de CO nos gases de combustão manteve-se em zero para qualquer valor de S' , demonstrando que o tempo de residência em torno de 5 segundos foi suficiente para mistura dos gases provenientes das reações da ZRI com o oxigênio remanescente e que as reações de oxidação foram finalizadas.

Comparando as curvas (a) e (b) da Figura 3 percebe-se que a maior parte do NO_x é formado na região de chama. Sabe-se que a formação de NO por meio do mecanismo reacional térmico ou de Zeldovich é predominantemente na região de pós-chama, em virtude das reações de tal mecanismo serem lentas quando comparadas com as reações de oxidação dos hidrocarbonetos. Além disso, o mecanismo Térmico é extremamente dependente de elevada temperatura, acima de 1500°C , em função da alta energia de ativação das reações envolvidas. A dependência da taxa de formação de NO com a temperatura e com as concentrações de O_2 e N_2 está representada na equação (9) (Glarborg, 1993).

$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = 1,3 \cdot 10^5 \cdot \exp(-67650/T) \cdot [\text{O}_2]^{1/2} \cdot [\text{N}_2] \quad (9)$$

Em função das observações feitas para a Figura 3 é bastante razoável considerar que a que uma boa parte do NO é formado através do mecanismo *Prompt NO_x*, onde a formação de NO envolve radicais intermediários do mecanismo reacional de oxidação dos

hidrocarbonetos. Em chamas de hidrocarbonetos em condições de combustão rica, considera-se que a principal fonte de NO é a fixação do nitrogênio atmosférico (N₂) por hidrocarbonetos fragmentados, em reações como (Syska, 1993):



O nitrogênio proveniente da reação (10) pode participar da reação rápida:



Contudo, os outros produtos, HCN e NH, serão parcialmente convertidos em N₂ em temperaturas acima de 1100°C. Ainda para o caso de chamas ricas, o NO pode ser convertido em N₂ através da reação intermediária (13), que converte o NO em HCN, sendo este último finalmente reduzido a N₂. Spliethoff et al. (1996) também relataram para queima de carvão pulverizado, que o aumento da temperatura em regiões ricas acelera as taxas de decomposição dos compostos nitrogenados, diminuindo a emissão de NO_x.



A interpretação para o comportamento do NO_x pode ser dada como segue: segundo a fotografia (b) da Figura 4, para S' baixo, o jato cruza a fraca região de recirculação e as gotas acabam vaporizando em regiões com alta concentração de oxigênio, o que é fundamental para formação de NO_x. Aumentando-se S', fortalece-se a ZRI, confinando a vaporização das gotas na região rica. Isto resulta em uma progressiva redução na conversão do nitrogênio para NO_x.

Apesar dos comentários feitos sobre redução do NO formado pelo mecanismo *Prompt*, não se pode descartar que flutuações locais de temperatura (que não podem ser detectadas pelos termopares utilizados) e concentrações de superequilíbrio de O e OH em algumas regiões da chama, possam acelerar a taxa de reação das reações (14) e (15) do mecanismo de Zeldovich.



Assim, o aumento da temperatura na região próxima ao queimador pode favorecer a formação do NO_x térmico, explicando o fato de que a medida que S' vai aumentando a sua eficiência na redução da emissão de NO_x vai diminuindo. Ou seja, a medida que S' aumenta a vaporização das gotas em regiões ricas diminui a formação do NO_x *Prompt*, por outro lado eleva a temperatura na região próxima ao queimador, podendo favorecer a formação do NO_x térmico. Os valores de temperatura apresentados na Figura 5a estão longe de representar a distribuição de temperatura na chama, mas indicam a tendência da mesma.

O comportamento para o NO_x em função de S' relatado no presente trabalho está de acordo com os resultados experimentais observados por Barreiros et al.(1993), em experimentos de queima de óleo pesado. Para os números de *swirl* 0,6, 0,9, e 1,3 a emissão de NO_x foi de 400, 150 e 100ppm, respectivamente. Também observaram que a eficiência na redução da emissão de NO_x também diminui com aumento de S' e que temperatura também aumentou na região de chama. Para o caso da queima de óleo pesado, também está presente a formação de NO devido ao nitrogênio contido no combustível. No entanto, Barreiros et al. observaram que o comportamento do NO proveniente do combustível, frente a presença da ZRI, é o mesmo observado para o NO_x *Prompt*.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou os resultados da investigação experimental sobre o comportamento da emissão de NO_x com número de *swirl*, em uma fornalha laboratorial operando a 110kW e utilizando diesel como combustível. Os resultados apontam que o aumento do número de *swirl* causa uma redução na emissão de NO_x . Aumentando-se *S'* fortalece-se a zona de recirculação interna, confinando a vaporização das gotas nessa região onde a penetração de oxigênio é reduzida. Assim, cria-se uma região de combustão extremamente rica a jusante do queimador e os compostos de oxidação parcial formados nessa região, como por exemplo CO e hidrocarbonetos não queimados, são oxidados na região pós-chama, onde há oxigênio presente em alta concentração. Além disso, para caso de chamas de hidrocarbonetos ricas, os compostos nitrogenados HCN e NH são preferencialmente convertidos para N_2 e o NO formado pode ser convertido para N_2 através da reação com o radical CH, dependendo da razão de equivalência e da temperatura.

Apesar da utilização de zonas de recirculação fortes a jusante do queimador mostrar ser conveniente para a redução da emissão de NO_x , é preciso prever um tempo de residência suficiente para oxidação completa dos compostos intermediários (como CO e hidrocarbonetos não queimados). Desta forma, em câmaras de combustão com baixo tempo de residência o controle da emissão de NO_x por meio da intensificação da zona de recirculação, pode aumentar a emissão de CO e diminuir a eficiência de combustão.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores desse trabalho agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP pelo suporte dado através do projeto 95/4167-7 e ao Laboratório Associado de Combustão e Propulsão do INPE por disponibilizar sua estrutura e equipamentos.

7. REFERÊNCIAS

- Ballester, J.M., Dopazo, C., 1994, "Experimental Study of the Influence of Atomization Characteristic on Combustion of Heavy Oil, Comb. Sci. and Tech., vol. 103, pp. 235-263.
- Barreiros, A., Carvalho, M.G., Costa, M., Lockwood, F.C., 1993, "Predictions of Near Burner Region and Measurements of NO_x and Particulate Emissions in Heavy Fuel Oil Spray Flames", Combustion and Flame, vol. 92, pp. 231-240
- Couto, H.S., Muniz, W.F., Bastos-Netto, 1995, "Geometrical Parameters for Flows Across Axial Swirlers", 3rd Asian-Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization, Hong Kong, pp.255-260.
- 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.
- Lawn, C.J., 1987, "Principles of Combustion Engineering for Boilers, New York, Academic, 628p.
- Splithoff, H., Greul, U., Rudiger, H., Hein, K.R.G., 1996, "Basic Effects on NO_x Emissions in Air Staging and Reburning at a Bench-Scale Test Facility", Fuel, vol. 75, n^o5, pp.560-564.
- Syska, A., 1993, "Low NO_x Staged Air Recirculation Burner Undergoing Field Trials After Excellent Test Performance", Industrial Heating, september, pp. 40-43.