

CONTROLE DA EMISSÃO DE NO_x ATRAVÉS DE COMBUSTÃO ESTAGIADA DURANTE A INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS AQUOSOS COM CHAMA ENRIQUECIDA COM OXIGÊNIO

Pedro Teixeira Lacava

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Divisão de Engenharia Aeronáutica, Pça. Mal. Eduardo Gomes, 50, Vila das Acácias, São José dos Campos, 12228-9000
lacava@aer.ita.br

Amilcar Porto Pimenta

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Divisão de Engenharia Aeronáutica, Pça. Mal. Eduardo Gomes, 50, Vila das Acácias, São José dos Campos - SP, 12228-9000
amilcar@aer.ita.br

Marco Aurélio Ferreira

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Laboratório Associado de Combustão e Propulsão, Rod. Presidente Dutra, km 40, Cachoeira Paulista - SP, 12700-00

João Andrade de Carvalho Jr.

Universidade Estadual Paulista, Campus de Guaratinguetá, Departamento de Energia, Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333, Guaratinguetá - SP, CEP: 12500-000
joao@feg.unesp.br

Resumo. *O enriquecimento do ar oxidante com oxigênio puro é uma atrativa maneira de aumentar a capacidade das câmaras de incineração de resíduos com baixo poder calorífico que necessitam de um combustível auxiliar para sustentar o processo de combustão, como é o caso dos resíduos líquidos aquosos (mais de 70% em massa de água). Apesar dessa técnica apresentar a vantagem descrita, sua desvantagem é o aumento da emissão de NO_x. A temperatura na região de chama pode aumentar demasiadamente com a concentração de oxigênio no oxidante, o que favorece os mecanismos de formação dos óxidos de nitrogênio. Desta forma, o presente trabalho apresenta uma investigação experimental sobre a ação do processo de estagiamento da combustão, ou seja, injeção gradativa de oxidante ou combustível, com intuito de conciliar a emissão de NO_x com o aumento da capacidade de incineração da câmara e com a emissão de compostos de oxidação parcial, como o monóxido de carbono. Os experimentos foram realizados em uma fornalha refratada operando com potência de 31906 cal/s e utilizando diesel como combustível auxiliar. Os resultados apontam que a através da combustão estagiada é possível reduzir a emissão de NO_x com a mesma capacidade de incineração da situação de combustão enriquecida sem o estagiamento.*

Palavras chave: *combustão enriquecida, combustão estagiada, emissão de poluentes, NO_x.*

1. Introdução

A maior parte dos processos industriais que fazem uso da energia térmica liberada pelas reações de combustão utiliza o ar como fonte de oxigênio. No entanto, este representa apenas 21% da composição volumétrica do ar, que ainda contém 78% de nitrogênio e 1% de traços de outros constituintes. Do ponto de vista térmico, o nitrogênio presente é inerte, ou seja, apenas consome parte de energia liberada pelas reações exotérmicas, que poderia estar disponível para o processo em questão. Desta forma, enriquecer o oxidante nada mais é que aumentar a porcentagem volumétrica de O₂ acima dos 21% encontrados no ar. Com isso, a vazão total dos gases de combustão diminui e a eficiência térmica do processo aumenta (Griffith, 1990). Basicamente, o enriquecimento do oxidante encontra espaço em processos industriais que necessitam temperatura elevada e alta eficiência térmica. As chamas enriquecidas são amplamente utilizadas para aumentar a capacidade de produção de fornalhas de fusão, entre elas as utilizadas nas indústrias de vidro, metais fundidos e óxidos metálicos.

Outra aplicação promissora é na incineração de resíduos com baixo poder calorífico, como os resíduos aquosos (Sharani et al., 1996). O uso de oxigênio para enriquecer o oxidante pode ser uma alternativa atrativa para aumentar a capacidade de incineração de uma câmara projetada para operar com ar como oxidante. Para uma certa vazão de combustível, se alguns parâmetros de incineração forem mantidos constantes (como temperatura da câmara, nível de turbulência e tempo de residência), o aumento da taxa de incineração torna-se possível com a injeção de oxigênio (Melo et al., 1998).

O emprego de tal tecnologia teve início nos anos cinquenta (Gitman, 1986) e, desde então, muitos estudos e desenvolvimentos foram realizados. No entanto, com aumento do preço dos combustíveis em relação ao preço do oxigênio, principalmente devido à crise do petróleo e à diminuição dos custos de produção do oxigênio com o avanço das técnicas criogênicas de separação do ar, as chamas enriquecidas surgiram como uma forte alternativa nos últimos anos (Shahani et al., 1996).

Apesar das vantagens citadas, o aumento de temperatura na região de queima pode aumentar drasticamente a emissão de NO_x . O termo NO_x é utilizado para designar a quantidade total de óxido de nitrogênio (NO) e dióxido de nitrogênio (NO_2). Em geral, nos processos de combustão, a formação do NO é bem mais pronunciada do que a do NO_2 ; no entanto, ao ser descarregado para atmosfera o NO é totalmente convertido a NO_2 . A alta temperatura de operação das câmaras de combustão industrial e a utilização de combustíveis com teores de nitrogênio são fatores que contribuem para a formação de NO_x que, além de, como o SO_2 , provocar a chuva ácida, é um componente importante das reações fotoquímicas que levam à formação de ozônio (O_3). Além dos fatores ambientais, o NO_x é responsável direto por diversos problemas de saúde do homem, como metaemoglobina ou cianose, edemas pulmonares e alteração das características hereditárias.

O NO_x emitido durante a combustão depende da composição do combustível, do modo de operação e do projeto dos queimadores e da câmara de combustão. Cada um desses parâmetros é significativo em relação ao nível final de NO_x emitido. A formação deste poluente é atribuída a duas fontes distintas, o N_2 presente no ar ou traços de nitrogênio contidos no combustível (Wood, 1994). O NO_x atmosférico segue principalmente dois mecanismos de formação: o térmico, sendo seu esquema reacional proposto inicialmente por Zeldovich e colaboradores (1947), e o “prompt”, formado na região de frente de chama, cujo esquema reacional foi proposto por Fenimore (1971). O mecanismo químico de formação do NO térmico, ou Zeldovich, se inicia pela reação $\text{N}_2 + \text{O} = \text{NO} + \text{N}$, que se desenvolve com menor velocidade que as reações de combustão dos hidrocarbonetos; sendo assim, a maior parte do NO térmico é formada na região pós-chama. O mecanismo conhecido como “prompt” envolve reações do N_2 com radicais de hidrocarbonetos, como, por exemplo, CH e CH_2 . Em comparação com o mecanismo de Zeldovich, essas reações são rápidas e características da região de frente de chama. Para o caso da formação do NO através da oxidação do nitrogênio presente no combustível; em geral, um composto nitrogenado primário é quebrado em radicais nitrogenados secundários (HCN, NH_2 , NH e N). Esses compostos intermediários são convertidos a NO através das mesmas reações do mecanismo de Fenimore. Maiores detalhes sobre os mecanismos de formação do NO podem ser encontrados na revisão feita Miller e Bowman (1989).

O maior responsável pela quantidade total de NO_x formado em um processo de combustão é a temperatura. Desta forma, diversas técnicas de redução da emissão desse poluente estão baseadas no seu controle, como, por exemplo, a combustão estagiada. Tal técnica consiste na combinação de regiões ricas e pobres na câmara, evitando condições favoráveis de temperatura e concentrações para formação de NO. Essa técnica apresenta bons resultados para combustão de hidrocarbonetos com o ar (Wood, 1994), inclusive para as situações onde o ar é pré-aquecido acima de 1000°C , onde elevadas emissões de NO_x normalmente são encontradas (Syska, 1993). Contudo, poucas informações estão disponíveis sobre seu emprego na combustão enriquecida, sobretudo para situação de incineração.

Dentro deste contexto, o presente trabalho apresenta uma investigação experimental sobre o controle da emissão de NO_x através do estagiamento da combustão em uma câmara de incineração de resíduo líquido aquoso de escala laboratorial operando com chama enriquecida. Dois tipos de injeção estagiada foram realizados, a do combustível auxiliar e a do oxidante (ar + O_2).

2. Arranjo Experimental

Em todos ensaios realizados, utilizou-se apenas água para simulação do resíduo, em virtude das facilidades experimentais envolvidas e pelo fato do enriquecimento do oxidante ser vantajoso para incineração de resíduos não combustíveis. Além disso, o presente trabalho tem como objetivo caracterizar o controle da emissão de NO_x formado na combustão enriquecida, e não a destruição térmica de compostos presentes no resíduo.

Como combustível auxiliar utilizou-se diesel, injetado na câmara através de um atomizador tipo *Y-jet*. Na presente investigação, utilizou-se ar comprimido como gás auxiliar de atomização, com exceção do ensaio com 100% de O_2 como oxidante, onde o próprio oxigênio foi utilizado. Tal injetor foi acoplado à lança central de um queimador com dispositivo para ancorar a chama do tipo *swirler*.

Os ensaios foram realizados em uma câmara de combustão vertical, com parede refratária de 0,15 m de espessura, sem refrigeração externa e com o volume total de 1000 litros. A Fig. (1) apresenta um esquema da câmara, com o queimador posicionado em sua extremidade inferior. A injeção de resíduo (água) também é feita por um injetor tipo *Y-jet*, de tal forma que o spray formado não incida completamente sobre a chama para não apagá-la. Através de visores posicionados ao longo da câmara, observou-se que o resíduo vaporiza-se imediatamente após ser injetado na mesma, em função da temperatura elevada nessa região.

A instrumentação associada à câmara conta com medidas de temperatura, análise da composição dos gases de combustão e vazões. Para obtenção da distribuição de temperatura, foram previstos termopares nas posições: 0,18, 0,70, 1,05, 1,40, 1,75, 2,50, 3,00 e 4,20 m a jusante do queimador. Para as regiões mais próximas à chama (0,18 e 0,70 m) utilizaram-se termopares tipo “S”; para as regiões de menor temperatura, o tipo “K”.

A amostragem dos gases de combustão foi feita por uma sonda devidamente refrigerada posicionada a 30 cm da saída da câmara. Os gases de amostragem, sugados por uma bomba de vácuo, passam por filtros e condensadores antes

de chegarem aos analisadores contínuos de CO (infravermelho), CO₂ (infravermelho), O₂ (termomagnético) e NO_x (quimiluminescente). As leituras dos analisadores (em base seca), juntamente com as dos termopares, foram feitas em um sistema de aquisição de dados HP6554, que realiza três varreduras completas por minuto.

As vazões mássicas de diesel, ar de atomização do diesel, oxigênio de atomização do diesel, resíduo, ar de atomização do resíduo, oxigênio de atomização do resíduo e oxigênio de combustão, foram medidas através de rotâmetros. Já a vazão do ar de combustão foi medida através de um sistema de placa de orifício. Nos ensaios de injeção de combustível estagiado, utilizou-se como combustível para o segundo estágio o Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) e sua vazão mássica também foi obtida por um sistema de placa de orifício.

Para os ensaios sem combustão estagiada e com estagiamento do oxidante, manteve-se a vazão de diesel constante em 3,11 g/s, o que representa uma potência de 31906 cal/s. Para o caso da injeção estagiada de combustível, a combinação entre as vazões de diesel e GLP sempre foi realizada mantendo a potência liberada próxima a 31906 cal/s. As vazões de ar e de oxigênio foram combinadas de tal forma o excesso de oxidante (O₂) fosse em torno de 30%. Finalmente, o aproveitamento da energia disponibilizada pela redução da presença de nitrogênio foi feito ajustando a vazão de resíduo, mas mantendo a temperatura na saída da câmara em 1030 K.

Os detalhes sobre o processo de combustão estagiada e as modificações realizadas na montagem experimental estão apresentados na seção seguinte junto com os resultados.

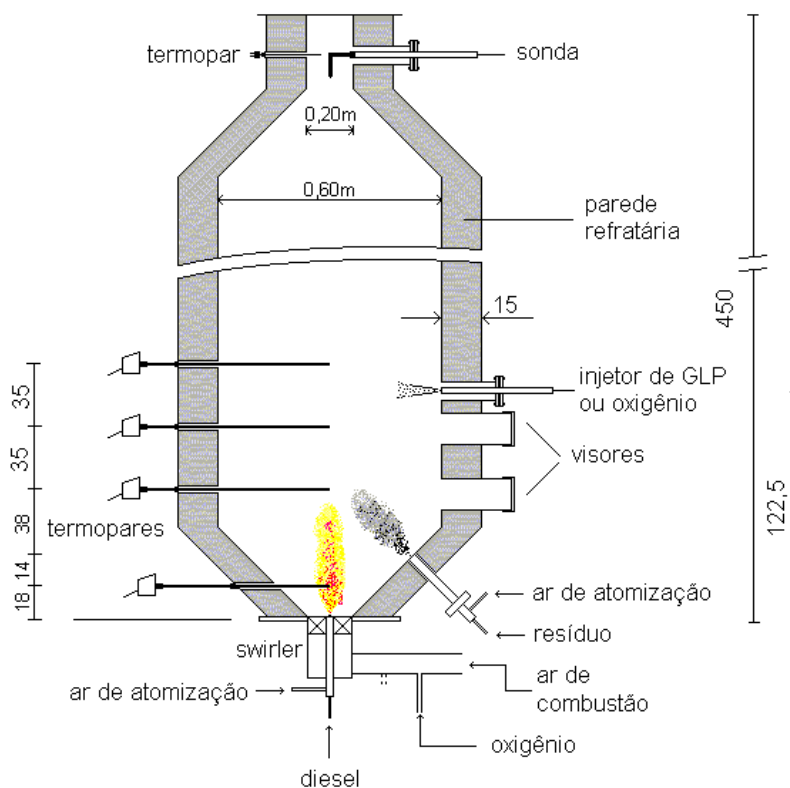


Figura 1. Esquema da câmara de combustão utilizada no ensaio (dimensões em cm)

3. Resultados e Discussões

3.1. Combustão não Estagiada

Inicialmente foram realizados ensaios sem estagiar a injeção de combustível ou oxidante. Nesta situação variou-se a porcentagem volumétrica do oxigênio no oxidante dos 21% encontrados no ar até 100% (oxigênio puro). O intuito desses ensaios foi o de verificar o aumento da capacidade de incineração da câmara e as alterações nas emissões de poluentes atmosféricos. Os resultados apontaram que, a despeito de se conseguir mais de 100% de aumento da capacidade de incineração da câmara, o valor atingido pela concentração de NO_x nos produtos de combustão acaba sendo o principal fator de preocupação para a aplicação da técnica de enriquecimento do oxidante. Os detalhes dos resultados obtidos podem ser encontrados em Lacava (2001).

Para investigar o processo de combustão estagiada como forma de conter as emissões de NO_x na incineração de resíduo líquido com oxidante enriquecido, escolheu-se a situação entre as condições não estagiadas que propiciou a maior emissão normalizada de NO_x, que foi 3,24 mg de NO₂/g de resíduo injetado, para o nível de enriquecimento de 43,46% de oxigênio. Definiu-se emissão normalizada como sendo a razão entre a vazão mássica de NO₂ descarregado

para atmosfera e a vazão mássica de resíduo injetado na câmara. O analisador de NO_x mede as porcentagens volumétricas de NO ou $\text{NO} + \text{NO}_2$; no entanto, as análises mostraram que praticamente todo NO_x medido na saída da câmara é apenas NO . Como ao ser descarregado para atmosfera, rapidamente o NO converte-se a NO_2 , a porcentagem volumétrica do NO medido foi convertida a fluxo mássico de NO_2 , ou seja, considerou-se que todo NO que deixou a câmara de combustão transformou-se em NO_2 . A forma de apresentação dos resultados como massa de NO_2 /massa de resíduo injetado na câmara torna-se bastante conveniente, pois não simplesmente apresenta a concentração do poluente nos gases de combustão, mas também a relaciona com a condição de carga da operação (Baukal, 1998). Assim, a situação escolhida para aplicar a combustão estagiada é a que provoca a maior emissão total de NO_x quando uma determinada quantidade de resíduo aquoso é incinerada nas condições estudadas, mesmo que a porcentagem volumétrica deste poluente não seja a mais elevada. Os resultados (Lacava, 2001) mostraram que a maior porcentagem volumétrica de NO_x nos gases de combustão ocorre para 74% de O_2 , cerca 2800 ppm; contudo, nesta condição a emissão normalizada corresponde a apenas 2,7 mg de NO_2 /g de resíduo injetado, 17% a menos do que para 43,46% de O_2 . A Tab. (1) apresenta maiores detalhes sobre a condição de operação sem combustão estagiada escolhida como referência.

Tabela 1. Condição de combustão não estagiada utilizada como referência.

m_{diesel} [g/s]	% O_2	$m_{\text{resíduo}}$ [g/s]	b %	ϕ	Potência [cal/s]	% CO	NO_x [ppm]	mg de NO_2 /g de resíduo
3,11	43,46	15	30	0,766	31906	< 0,02	1190	3,24

Obs: m_{diesel} é a vazão mássica de diesel, $m_{\text{resíduo}}$ é vazão mássica de resíduo, b é o excesso de oxidante e ϕ a razão de equivalência.

3.2. Combustível Estagiado

Nessa situação, parte do combustível é injetado na região inferior da câmara (primeiro estágio) e o restante a 1,225 m a jusante do queimador (segundo estágio), entre os termopares 3 e 4, conforme mostra a Fig. (1). O combustível injetado na parte superior foi o GLP (Gás Liquefeito de Petróleo), pelas facilidades de se trabalhar com gás no segundo estágio de combustão. A razão entre a vazão mássica de GLP e a vazão mássica de diesel ($m_{\text{GLP}}/m_{\text{diesel}}$) foi combinada de forma que a potência liberada na câmara fosse aproximadamente constante. Também se procurou não alterar bruscamente a razão entre a vazão mássica de ar de atomização e a vazão mássica de diesel ($m_{\text{ar/atm}}/m_{\text{diesel}}$), para que o processo de atomização influenciasse o mínimo possível os resultados. A idéia desse tipo de estagiamento é criar uma zona de queima pobre na região primária, com temperatura mais baixa, e uma região secundária onde o restante da potência é liberado na presença de produtos de combustão e resíduo vaporizado. A Tab. (2) apresenta as condições dos ensaios, lembrando que para todas essas condições a vazão mássica de resíduo injetado foi de 15 g/s.

Tabela 2. Ensaio com combustível estagiado.

$\frac{m_{\text{GLP}}}{m_{\text{diesel}}}$	b_g (global) %	b_1 (1estágio) %	ϕ_g (global)	ϕ_1 (1estágio)	$\frac{m_{\text{ar/atm}}}{m_{\text{diesel}}}$	Potência (cal/s)	% CO
0	30,52	30,52	0,766	0,766	0,1446	31906	< 0,02
0,267	31,61	67,35	0,759	0,597	0,1456	31733	< 0,02
0,753	31,00	131,10	0,763	0,433	0,1470	31552	< 0,02
1,754	31,46	258,50	0,761	0,279	0,1363	32563	< 0,02

Obs: b_g = excesso de oxidante normalizado global da câmara, b_1 = excesso de oxidante normalizado do primeiro estágio, ϕ_g razão de equivalência global da câmara e ϕ_1 a razão de equivalência do primeiro estágio.

A Fig. (2) apresenta os resultados da emissão de NO_x na forma mg de NO_2 /g de resíduo, em função da razão de estagiamento do combustível ($m_{\text{GLP}}/m_{\text{diesel}}$). Nota-se quando se aumenta a razão de estagiamento, inicialmente a emissão de NO_x eleva, para posteriormente decrescer. Esse comportamento está diretamente relacionado com dois fatores do primeiro estágio: a razão de equivalência e a temperatura.

Através da Fig. (3), observa-se que quando a razão de estagiamento passa de 0 para 0,267, pouco se modifica a temperatura no primeiro estágio. Há uma maior disponibilidade de oxidante, pois a razão de equivalência (ϕ_1) alterou-se de 0,766 para 0,597, ou seja, a combustão nessa região tornou-se mais pobre, mas praticamente com a mesma temperatura. Se observarmos a Eq. (1), que descreve a taxa de formação do NO térmico (Glarborg, 1993), notamos que se a temperatura (T) for mantida constante e a concentração de oxigênio ($[\text{O}_2]$) aumentar, a taxa de formação do NO também irá aumentar. Para os valores de $m_{\text{GLP}}/m_{\text{diesel}}$ acima de 0,267, a temperatura no primeiro estágio diminuiu e com isso a emissão de NO_x também. Apesar da enorme disponibilidade de oxidante para $m_{\text{GLP}}/m_{\text{diesel}} = 0,753$ e 1,754, a taxa de formação do NO depende bem mais da temperatura do que da concentração de oxigênio.

$$\frac{dNO}{dt} = 1,3 \cdot 10^5 \cdot \exp(-67650/T) \cdot [O_2]^{1/2} \cdot [N_2] \quad (1)$$

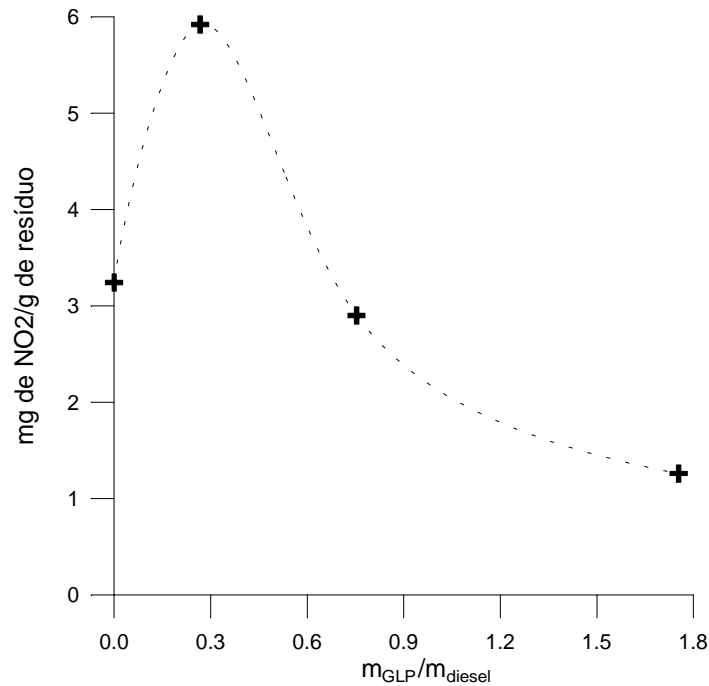


Figura 2. Comportamento da razão mg de NO₂/g de resíduo na saída da câmara em função da razão de estagiamento do combustível (m_{GLP}/m_{diesel}).

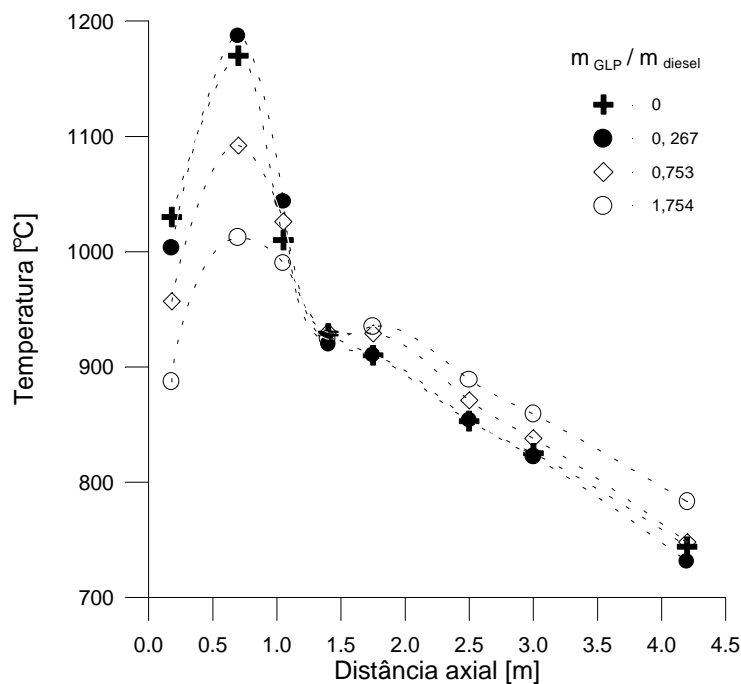


Figura 3. Distribuição de temperatura para combustão com combustível estagiado (perfil de medidas na linha de centro da câmara).

O comportamento descrito pode ser mais bem analisado, comparando a emissão do NO_x medida com a calculada para o equilíbrio químico (programa Gaseq, Morley (2000)), utilizando a temperatura obtida experimentalmente pelo termopar 2. A Fig. (4) compara esses resultados e também apresenta as temperaturas medidas pelo termopar 2, em função da razão de equivalência no primeiro estágio. O NO_x medido possui um comportamento qualitativo semelhante ao calculado para condição de equilíbrio químico, indicando que o processo de estagiamento deve ser aplicado apenas

para condições extremamente pobres no primeiro estágio, principalmente para altos níveis de enriquecimento, caso contrário a emissão de NO_x aumentará. É evidente que as temperaturas obtidas pelo termopar 2 estão longe de representar a temperatura média da chama, por isso a diferença numérica entre os resultados. No entanto, serve para indicar como se dá a influência da combinação entre a razão de equivalência e a temperatura no primeiro estágio de combustão pobre e verificar se os resultados experimentais estão condizentes com a situação esperada.

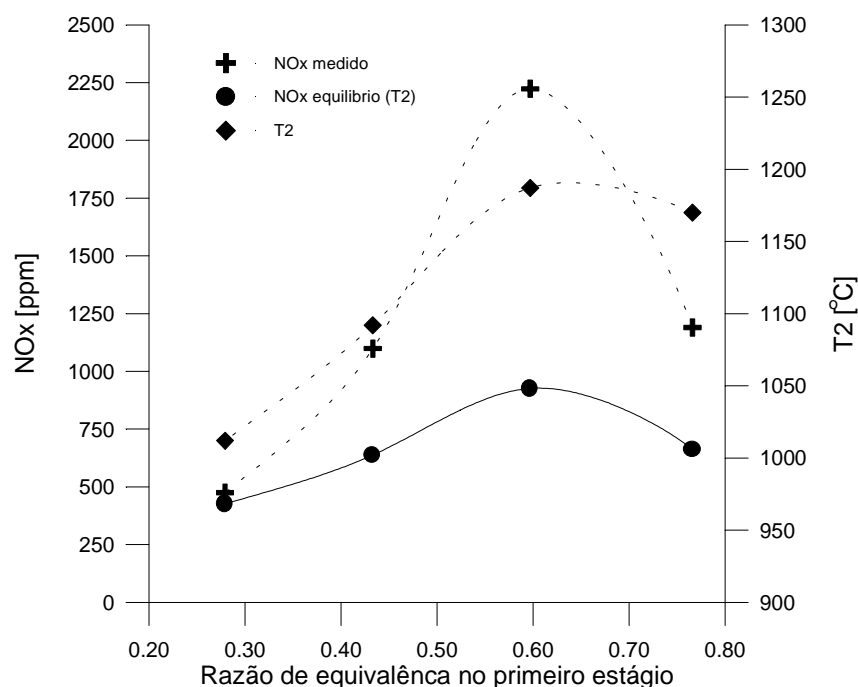


Figura 4. Emissão de NO_x medida (saída da câmara) e calculada para equilíbrio químico (usando T2) e temperatura obtida pelo termopar 2 em função da razão de equivalência no primeiro estágio.

Para a situação experimental analisada, o resíduo é injetado antes do segundo estágio de combustão, conforme a Fig. (1). Isso faz com que a temperatura nesse estágio não aumente substancialmente, pois a combustão secundária ocorre na presença de uma grande quantidade de resíduo em processo de evaporação. A injeção de resíduo entre os estágios é de fundamental importância para reduzir a emissão de NO_x , pois caso contrário, à medida que a razão de equivalência do primeiro estágio fosse sendo reduzida, a do segundo estágio iria aumentar e, como consequência, a temperatura nessa região também. A Tab. (3) apresenta a relação entre as razões de equivalência do primeiro e do segundo estágios. O cálculo da razão de equivalência do segundo estágio foi feito considerando a combustão completa no primeiro estágio, o que é bastante razoável para esse nível de enriquecimento. A Tab (3) ainda apresenta o consumo de oxidante no primeiro estágio e a sua disponibilidade para o segundo.

Tabela 3. Relações entre o primeiro e segundo estágios de combustão.

ϕ_1 (1 estágio)	m_{diesel}	ar total [g/s]	O_2 total [g/s]	ar consumido no primeiro estágio [g/s]	O_2 consumido no primeiro estágio [g/s]	ar disponível para o segundo estágio [g/s]	O_2 disponível para o segundo estágio [g/s]	m_{GLP}	ϕ_2 (2 estágio)
0,279	1,10	20,11	9,28	5,52	2,55	14,59	6,73	1,93	0,670
0,433	1,70	18,89	9,28	8,17	4,02	10,72	5,26	1,28	0,580
0,597	2,40	20,20	9,28	12,07	5,55	8,13	3,73	0,65	0,403
0,766	3,11	20,84	9,28	20,84	9,28	0	0	0	0

A faixa de valor da razão de equivalência no segundo estágio favorece a elevada emissão de NO_x para o nível de enriquecimento próximo a 44% de O_2 . Além disso, o oxidante remanescente do primeiro estágio já está pré-aquecido. Contudo, conforme mostra a Fig. (3), após a injeção de resíduo a temperatura na câmara não atinge valores propícios para o desenrolar dos mecanismos de formação do NO. Daí a importância da injeção de resíduo em uma posição intermediária aos estágios de combustão. A Fig. (3) ainda mostra que há um ligeiro aumento de temperatura após o termopar 4, com o aumento da razão de equivalência no segundo estágio. No entanto, esse aumento de temperatura

pode ser controlado adicionando-se mais resíduo, o que inclusive aumentaria a taxa de incineração e reduziria a emissão normalizada de NO_x (mg de NO_2/g de resíduo).

Deve-se destacar que a emissão de CO na saída da câmara manteve-se abaixo de 0,02% (limite do analisador) para qualquer condição de estagiamento do combustível e que há uma redução na emissão de NO_x de 3,24 mg de NO_2/g de resíduo ($m_{\text{GLP}}/m_{\text{diesel}} = 0$) para 1,26 ($m_{\text{GLP}}/m_{\text{diesel}} = 1,754$), cerca de 61%.

Não foi possível diminuir a razão de equivalência no primeiro estágio para valores inferiores a 0,279, pelo fato deste estar próximo ao limite de chama estável. Esse pode ser um dos entraves encontrados na utilização do sistema de combustão de combustível estagiado, quando se opera com chamas enriquecidas. Por exemplo, quando se altera a condição de operação com a razão de estagiamento de combustível em 1,754, 44% de O_2 e excesso de oxidante global em torno de 31%, para mesma situação só que com o oxidante passando a ser apenas ar, a razão de equivalência no primeiro estágio permaneceria em 0,279 e dificilmente a chama se estabilizaria nessa condição. Desta forma, seria necessário ajustar a razão de estagiamento do combustível para cada nível de enriquecimento, o que complicaria os procedimentos operacionais. Outra saída seria ajustar o número de swirl, que quanto mais alto tendem a estabilizar melhor as chamas geradas por sprays. No entanto, é necessário prever no queimador um “swirler” com ângulo entre as pás variável.

3.3. Oxidante Estagiado

Foram investigadas duas situações de combustão com oxidante estagiado: 1) a situação 1 corresponde ao oxigênio sendo injetado na mesma altura que o resíduo, ou seja, a 0,32 m acima do queimador, só que deslocado 180° em relação ao ponto de injeção do resíduo; 2) a situação 2 corresponde à injeção do oxigênio a 1,225m acima do queimador, exatamente no mesmo ponto de injeção do GLP para o caso do estagiamento de combustível. O ar de combustão foi todo adicionado através do queimador.

As condições de ensaio das situações 1 e 2 são basicamente as mesmas da Tab. (1), com exceção da posição de injeção do oxigênio. É importante destacar que a vazão de ar no primeiro estágio, por volta de 21g/s, representa o valor mínimo para que a chama permaneça estável. A razão de equivalência no primeiro estágio (ϕ_1) é igual a 2,055 para ambas condições. As Fig.s (5) e (6) apresentam a emissão de NO_x em mg de NO_2/g de resíduo e ppm, respectivamente. Para as duas condições de estagiamento, a redução foi bastante eficiente, com maior destaque para a condição 2. A eficiência desta técnica deve-se principalmente a três fatores: baixa concentração de oxigênio na região primária, temperatura e o tempo de residência em que os gases permanecem na região rica. Em chamas de hidrocarbonetos ricos, o principal meio de formação do NO é a fixação do nitrogênio atmosférico por hidrocarbonetos fragmentados, principalmente pelas reações (2) e (3), sendo que o nitrogênio proveniente da reação (2) pode participar da reação rápida (4). No entanto, se houver temperatura e tempo suficientes, o NO e os demais compostos nitrogenados serão convertidos a N_2 (Syska, 1993). Assim, ao contrário do estagiamento do combustível, deseja-se que a temperatura mantenha-se elevada no primeiro estágio, de preferência acima de 1100°C , onde há um aumento substancial da taxa de conversão do NO para HCN e posteriormente desse para N_2 .



Splithoff et al. (1996) observaram que o aumento do tempo de residência no primeiro estágio favorece substancialmente a decomposição das espécies nitrogenadas gasosas (NO, NH_3 e HCN), sobretudo pelo fato dessas reações serem mais lentas do que as do mecanismo de oxidação dos hidrocarbonetos. Também observaram que o aumento da temperatura nessa região acelera a taxa de conversão dessas reações. A Fig. (7) apresenta a distribuição de temperatura ao longo da câmara para as condições de estagiamento e para o oxigênio injetado no fluxo de ar.

Através das curvas da Fig. (7), nota-se que a distribuição de temperatura altera-se muito pouco entre as condições de estagiamento. Desta forma, não se pode atribuir a melhor eficiência da condição 2 pela aceleração da taxa conversão devido à temperatura. Com relação ao tempo de residência, pode-se dizer o primeiro estágio é confinado entre o início da câmara de combustão e a região onde o resíduo reduz a temperatura dos gases, estancando o processo de decomposição das espécies nitrogenadas e formação de NO. Como as condições de injeção de resíduo, de ar e de combustível não foram alteradas, o tempo de residência no primeiro estágio também permaneceu o mesmo para as duas condições.

Uma possível explicação para a pior eficiência da condição 1, em comparação com a 2, é que o oxigênio foi injetado próximo ao primeiro estágio. Assim, uma parte do jato de oxigênio pode seguir em direção a essa região, ou ser carregado pela recirculação dos gases. Com isso, algumas regiões da chama queimam em condição estequiométrica ou ligeiramente pobre, aumentando a formação do NO.

A distribuição de temperatura (Fig. (7)), ainda mostra que, a despeito da grande quantidade de oxigênio injetado e da combustão ocorrer com praticamente 100% de O_2 no segundo estágio, a temperatura nessa região permaneceu em patamares favoráveis a não formação de NO, em função da grande quantidade de energia consumida pelo resíduo.

O fator que limita esse tipo de estratégia para redução da emissão de NO_x é a quantidade mínima de ar que deve ser injetada no primeiro estágio para que a chama permaneça estável. Para 3,11 g/s de diesel, a mínima vazão de ar foi em torno de 21g/s. Isto significa que o ajuste do nível de enriquecimento com o excesso global de oxidante tem que levar em conta essa vazão mínima para estabilização da chama. Apesar dessa consideração, esse tipo de estagiamento mostrou ser bastante eficiente na redução de NO_x . Além disso, a emissão de CO foi inferior a 0,02% na saída da câmara, indicando que, apesar da combustão rica no primeiro estágio, os compostos de oxidação parcial remanescentes são completamente oxidados no segundo estágio.

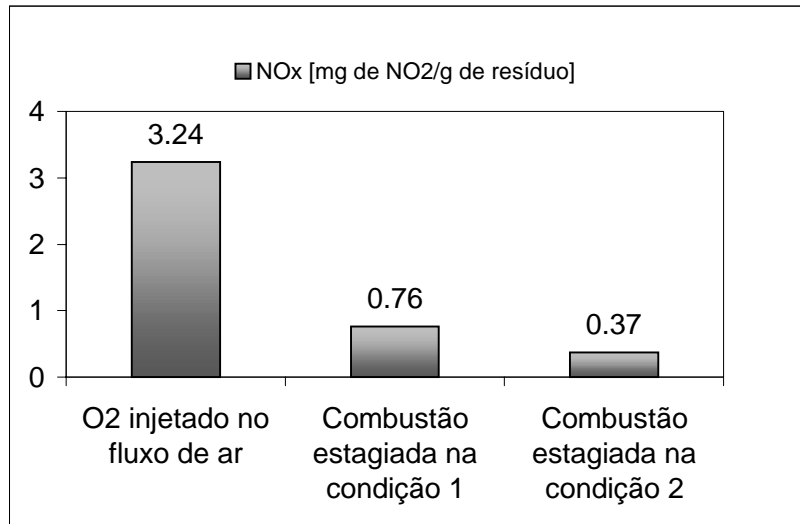


Figura 5. Emissão de NO_x , em mg de NO_2 /g de resíduo para as condições de estagiamento do oxidante.

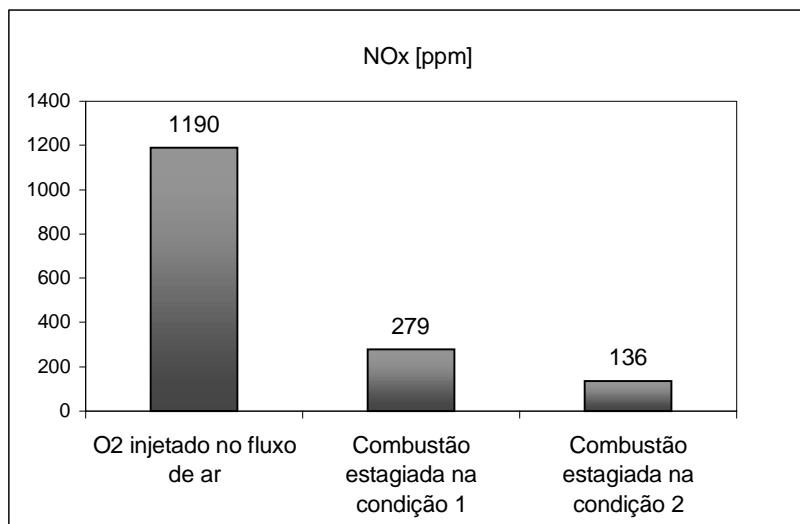


Figura 6. Emissão de NO_x em ppm para as condições de estagiamento do oxidante.

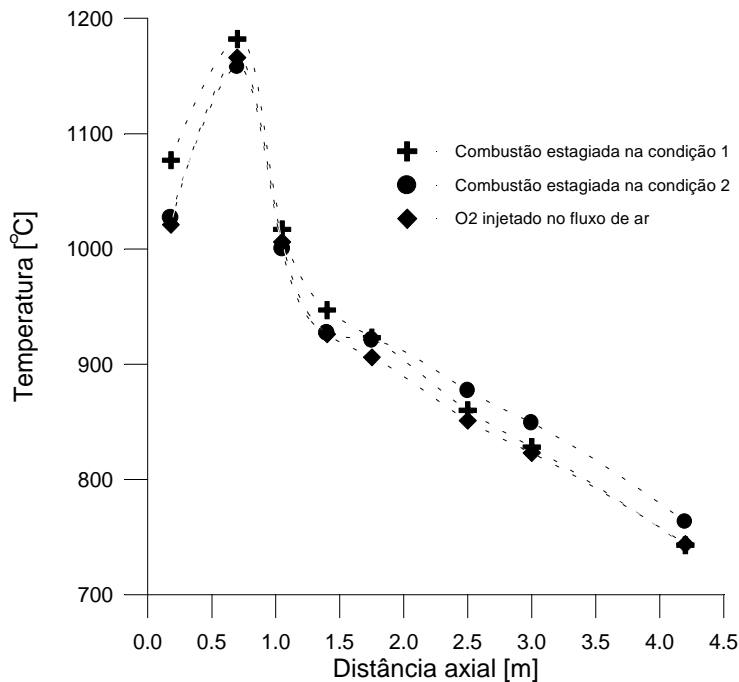


Figura 7. Distribuição de temperatura ao longo da câmara para as condições de estagiamento do oxidante e para o oxigênio injetado no fluxo de ar (perfil de medidas na linha de centro).

4. Conclusões

No presente trabalho investigou-se experimentalmente o controle da emissão de NO_x através do estagiamento da combustão em uma câmara laboratorial que simula a incineração de resíduos líquidos aquosos. Por facilidade laboratorial, o resíduo aquoso foi simulado como sendo apenas água, visto que o interesse do trabalho está relacionado com a formação de NO_x a partir das condições de combustão, e não a degradação térmica de nenhum composto presente no resíduo. O intuito do emprego de tal técnica consiste na combinação de regiões ricas e pobres na câmara, evitando condições favoráveis de temperatura e concentrações para formação de NO . Na seqüência destacam-se algumas conclusões baseadas nos resultados alcançados.

- 1) No combustão com a injeção estagiada de combustível, procurou-se criar uma zona de queima pobre na região primária (proximidades do queimador), com temperatura mais baixa, e uma região secundária onde o restante da potência é liberado na presença dos produtos de combustão e resíduo vaporizado, dificultando o surgimento de regiões favoráveis à formação de NO . Os resultados mostraram que a para o nível de enriquecimento dos ensaios, cerca de 43% de O_2 , o estagiamento passa a ser eficiente para razões de equivalência inferiores a 0,43 na zona primária da câmara, ou seja, combustão com elevado excesso de oxidante, cerca 130%. Tal fato deve-se à “competição” entre a temperatura e a disponibilidade de oxigênio na região de chama. No entanto, conseguiu-se uma redução de 61% na emissão normalizada de NO_x em comparação com a combustão não estagiada.
- 2) A injeção de oxigênio a jusante da região de queima principal mostrou ser extremamente eficiente para controlar a emissão de NO_x , chegou-se a reduzir a emissão normalizada em 88% em comparação com a combustão não estagiada. O ponto de injeção também mostrou ser fundamental na eficiência desse processo. A injeção de oxigênio a 1,225 m a jusante do queimador foi mais eficiente do que a 32 cm, ou seja, na mesma seção do injetor de resíduo. Isto ocorre, principalmente por que na primeira situação o oxigênio está sendo injetado em uma região onde o resíduo absorve boa parte da energia liberada pela queima dos produtos de oxidação parcial provenientes da região primária. No entanto, é preciso ter em mente que para que haja reação na região secundária, a temperatura na região onde o oxigênio está sendo injetado deve ser suficiente para iniciar as reações.
- 3) Ambas as situações de estagiamento, do combustível e do oxidante, apresentam como fator complicativo a instabilidade de combustão nas condições extremas de excesso e falta de oxidante. Os limites de combustão estável vão depender dos diversos fatores operacionais, como: excesso de oxidante, nível de enriquecimento e condições dos fluxos de combustível e oxidante através do queimador. Sendo assim, a lógica do procedimento para se realizar o estagiamento pode não ser trivial em câmaras de incineração que operam em variadas condições.
- 4) Apesar das modificações nas condições de combustão, para as duas situações de estagiamento não houve uma mudança na emissão de CO que pôde ser detectada pelo analisador. Além disso, a eficiência do processo não foi comprometida, pois para qualquer condição de estagiamento a vazão de resíduo foi mantida em 15 g/s e não alterou o nível de temperatura desejado na saída da câmara (1030 K). Este fato é importante, pois a grande vantagem do enriquecimento em processos de incineração é justamente aumentar a capacidade de operação do sistema (carga incinerada por unidade de tempo). Se a medida aplicada para controlar a emissão de poluentes não conservar essa

vantagem, o próprio processo de enriquecimento pode não se justificar mais. A operação desta câmara com ar como oxidante e mantendo 1030 K na saída, resulta na capacidade de incineração de 11 g/s de resíduo, ou seja, 35% a menos do que a condição estuda aqui (Lacava 2001).

Através dos resultados apresentados, espera-se ter contribuído para mostrar que é possível conciliar operações com chamas enriquecidas a qualquer nível com a emissão de NO_x . Evidentemente que esta discussão não se encerra aqui, pois os resultados apresentados são específicos para uma determinada condição experimental. No entanto, são suficientes para estimular o direcionamento de pesquisas para esta área.

5. Agradecimento

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pelo financiamento parcial do presente trabalho através dos projetos: 95/4167-7 e 97/5511-9.

6. Referências

- Baukal, C.E., 1998, "Oxygen – Enhanced Combustion", Edited by: Baukal, C.E., CRSC Press.
- Fenimore, C. P., 1971, "Formation of Nitric Oxide in Prmixed Hydrocarbon Flames", 13th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, p.373-380.
- Gitman, G., Pyretron, 1986, "a Variable Gas/Oxygen/Air Combustion System", Proceedings of Industrial Combustion Technology Symposium, Chicago, Il, p.p. 171-178.
- Glarborg, P., 1993, "NO_x Chemistry in Pulse Combustion", Proc. of the Workshop in Pulsating Combustion and Its Applications, Keynote Lecture C, Lund Institute of Technology", Sweden, August 2-5.
- Griffith, C.R. , 1990, "Diverse Experience Using Oxygen Systems in Waste Incineration", presented at the Fourth Annual National Symposium on Incineration of Industrial Wastes, Houston, Texas.
- Lacava, P.T., 2001, "Investigação Experimental do Enriquecimento do Ar na Incineração de Resíduos Aquosos.", Dissertação de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica.
- Morley, C., , 2000, "Gaseq: Chemical Equilibrium for Perfect Gases Software", version 0.63.
- Miller, J.A.; Bowman, C.T., 1989, "Mechanism and Modeling of Nitrogen Chemistry in Combustion", Progress in Energy and Combustion Science, 15:287-338.
- Melo, G.F.; Lacava, P.T.; Carvalho, J.A.Jr., 1998, "A Case Study of Air Enrichment in Rotary Kiln Incineration", International Communications in Heat and Mass Transfer, 25(5):681-692.
- Shahani, G.H.; Gunardson, H.H.; Easterbrook, N.C., 1996, "Consider Oxygen for Hydrocarbon Oxidations", Chemical Engineering Progress, 92(11):66-71.
- 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, 75(5):560-564.
- Syska, A., , 1993, "Low NO_x Staged Air Recirculation Burner Undergoing Field Trials After Excellent Test Performance", Industrial Heating, 60:40-43.
- Wood, S.C., 1994, "NO_x Control", Chemical Engineering Progress", 90(1):31-38.
- Zeldovich, Ya. B.; Sadovnikov, P. Ya.; Frank-Kamenetskii, D. A., 1947, "Oxidation of Nitrogen in Combustion" (transl. by M. Shelef), Academy of Sciences of USSR, Institute of Chemical Physics, Moscow-Leningrad.

NO_x EMISSION CONTROL USING STAGED COMBUSTION IN AQUEOUS RESIDUES INCINERATION OPERATING WITH ENRICHED FLAME

Pedro Teixeira Lacava

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Divisão de Engenharia Aeronáutica, Pça. Mal. Eduardo Gomes, 50, Vila das Acácias, São José dos Campos, 12228-9000
lacava@aer.ita.br

Amilcar Porto Pimenta

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Divisão de Engenharia Aeronáutica, Pça. Mal. Eduardo Gomes, 50, Vila das Acácias, São José dos Campos - SP, 12228-9000
amilcar@aer.ita.br

Marco Aurélio Ferreira

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Laboratório Associado de Combustão e Propulsão, Rod. Presidente Dutra, km 40, Cachoeira Paulista – SP, 12700-00

João Andrade de Carvalho Jr.

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

Abstract: The advantages of air enrichment in combustion systems are: increase of productivity, high thermal efficiency, reduction of combustion gas volume, increase of operation temperature, intensification of heat transfer process and reduction of fuel consumption. However, due the high temperatures reached in the combustion chamber, the increase of NO_x emission may be a problem in operation with enriched flame. In this way, the present work shows the result of an experimental investigation on the control of NO_x emissions using staged combustion in an incineration chamber of liquid aqueous residues, operating with air enriched with oxygen and diesel oil as auxiliary fuel. First, some experiments were conducted without staged combustion to verify the increase of chamber incineration capacity as function of air enrichment and to evaluate the emissions gases behavior, mainly NO_x . Both oxidant and fuel staged combustion experiments were conducted in an enrichment condition that promotes high normalized NO_x emission (NO_2 mass flow rate/ residue mass flow rate), 43,42% of O_2 . Fuel staged combustion reduced the NO_x emission on 61% and, in the case of the oxygen injected 1,225m above de burner, the reduction was 88% for the oxidant staged combustion.

Keywords: *combustion, NO_x emission, staged combustion, enrichment, incineration.*