

CONTROLE DE COMBUSTÃO: OTIMIZAÇÃO DO EXCESSO DE AR ¹

PAULO CÉSAR C. PINHEIRO e RAMON MOLINA VALLE

Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG
Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901 Belo Horizonte, MG

RESUMO

A atual preocupação ecológica, levou ao estabelecimento de normas ambientais rigorosas. Para otimizar a eficiência térmica das fornalhas é necessário minimizar o excesso de ar, assegurando ao mesmo tempo o cumprimento das normas ambientais. Neste artigo, mostramos a influência do excesso de ar na eficiência térmica e no nível de emissão de poluentes (CO, SO_x, NO_x) das fornalhas, a interrelação existente entre estes fatores, e os passos necessários para a otimização do coeficiente de excesso de ar.

PALAVRAS CHAVES: Fornos, Caldeiras, Controle de Combustão

1. INTRODUÇÃO

O controle da poluição e o controle do rendimento térmico de fornalhas é normalmente realizado de forma independente pelos respectivos operadores. Assim, a interrelação entre excesso de ar, rendimento térmico e emissão de poluentes, é mal compreendida e não é otimizada. O excesso de ar influencia tanto a eficiência térmica quanto o nível de emissão de poluentes (CO, SO_x, NO_x) das fornalhas.

2. EXCESSO DE AR

Para se realizar a combustão é necessário uma quantidade de ar estequiométrica, chamada ar teórico. Entretanto, para assegurar a combustão completa, é necessário um "excesso de ar" de modo a manter um teor suficiente de oxigênio até o final da chama, e superar as deficiências de mistura do queimador (Tabela 1).

O coeficiente de excesso de ar (α) é um modo de se expressar a relação ar/combustível, e é a razão entre a quantidade total de ar utilizada na combustão (V_{ar}) (kg/kg comb ou m³/kg comb) e a quantidade de ar estequiométrica (V_{ar}°):

$$\alpha = V_{ar}/V_{ar}^{\circ} \quad (\text{adm}) \quad (1)$$

O valor de α pode ser calculado a partir da análise da composição volumétrica (%) dos produtos da combustão:

$$\alpha = \% \text{CO}_2_{\text{estequiométrico}} / \% \text{CO}_2 \quad (2)$$

¹ PINHEIRO, Paulo César da Costa e VALLE Ramon Molina. Controle de Combustão: Otimização do Excesso de ar. In: II CONGRESSO DE EQUIPAMENTOS E AUTOMAÇÃO DA INDÚSTRIA QUÍMICA E PETROQUÍMICA, 09-11 Agosto 1995, Rio de Janeiro, RJ, Anais... Automação Industrial São Paulo: ABIQUIM, Associação Brasileira da Indústria Química e de Produtos Derivados, 1995, p.157-162.

$$\alpha = 20,9/[20,9 - (\%O_2 - \%CO/2)] \quad (3)$$

O excesso de ar é fator determinante da eficiência da combustão, pois controla o volume, temperatura e entalpia dos produtos da combustão. Um grande excesso de ar é indesejável, por que diminui a temperatura da chama, e aumenta as perdas de calor devido a entalpia dos gases efluentes (Q_2), reduzindo a eficiência térmica, além de diminuir o comprimento da chama. Por outro lado, um baixo excesso de ar pode resultar em uma combustão incompleta e na formação de CO, fuligem e fumaça, além de possibilitar a acumulação de combustível não queimado, causando risco de explosão.

O valor ótimo do excesso de ar é aquele onde estas duas influências estão em equilíbrio, suficientemente baixo para minimizar a perda de calor Q_2 , sem produzir combustão incompleta. Assim, o valor ótimo de depende da eficiência de combustão aceitável e dos limites de poluição impostos para NOx e CO, e é obtido experimentalmente pela análise dos produtos da combustão durante o ajuste do equipamento de combustão.

$$Q_2 = V_g C_{p_g} T_g - V_{ar}^o C_{p_{ar}} T_{ar} \quad (\text{kJ/kg comb}) \quad (4)$$

onde V_g , C_{p_g} e T_g são respectivamente o volume (m^3/kg CNTP), calor específico e temperatura de saída dos gases efluentes ($^{\circ}C$).

Tabela 1. Valores Usuais do Coeficiente de Excesso de ar [4]

Combustível	Tipo de Fornalha ou Queimador	α
Carvão Pulverizado	Aquatubular completa	1,15-1,20
	Aquatubular parcial fundo seco	1,15-1,40
Carvão Britado	Fornalha Ciclone	1,10-1,15
Carvão	Grelha fixa	1,30-1,60
	Grelha vibratória	1,30-1,60
	Grelha rotativa	1,15-1,50
	Grelha fixa alimentação por baixo	1,20-1,50
Óleo Combustível	Queimadores de óleo tipo registro	1,05-1,15
	Queimadores multicomcombustível	1,05-1,20
Resíduo Acido	Queimadores chama plana a vapor	1,10-1,15
Gás Natural Gás Coqueria	Queimadores tipo registro	1,05-1,10
	Queimadores multicomcombustível	1,07-1,12
Gás Alto-forno	Queimadores de bocal intertubos	1,15-1,18
Madeira	Grelha	1,20-1,25
Bagaço	Todas as fornalhas	1,25-1,35
Licor Negro	Fornalhas recuperação Kraft e Soda	1,05-1,07

3. EFICIÊNCIA DA COMBUSTÃO

A eficiência da combustão (η_c) é definida por:

$$\eta_c = (Q_{disp} - Q_2 - Q_3)/Q_{disp} \quad (\text{adm}) \quad (5)$$

onde Q_{disp} é a energia disponível para a combustão, e Q_3 a perda de calor devido à combustão incompleta.

$$Q_3 = 126,4 \cdot V_{gs} \cdot \%CO \quad (\text{kJ/kg comb}) \quad (6)$$

onde V_{gs} é o volume dos produtos da combustão secos (m^3/kg CNTP). As perdas de calor devido à formação de H_2 e CH_4 são normalmente insignificantes e desprezadas. Na combustão de sólidos, a perda de calor devido ao combustível não queimado também deve ser considerada.

A eficiência máxima é obtida pela minimização de Q_2+Q_3 (figura 1). Estas perdas de energia são funções da composição e temperatura dos produtos da combustão, isto é, pelo excesso de ar na fornalha. Uma vez que as emissões são componentes dos produtos da combustão, a análise completa e a temperatura dos produtos é necessária para determinar a eficiência da combustão e os níveis de emissão.

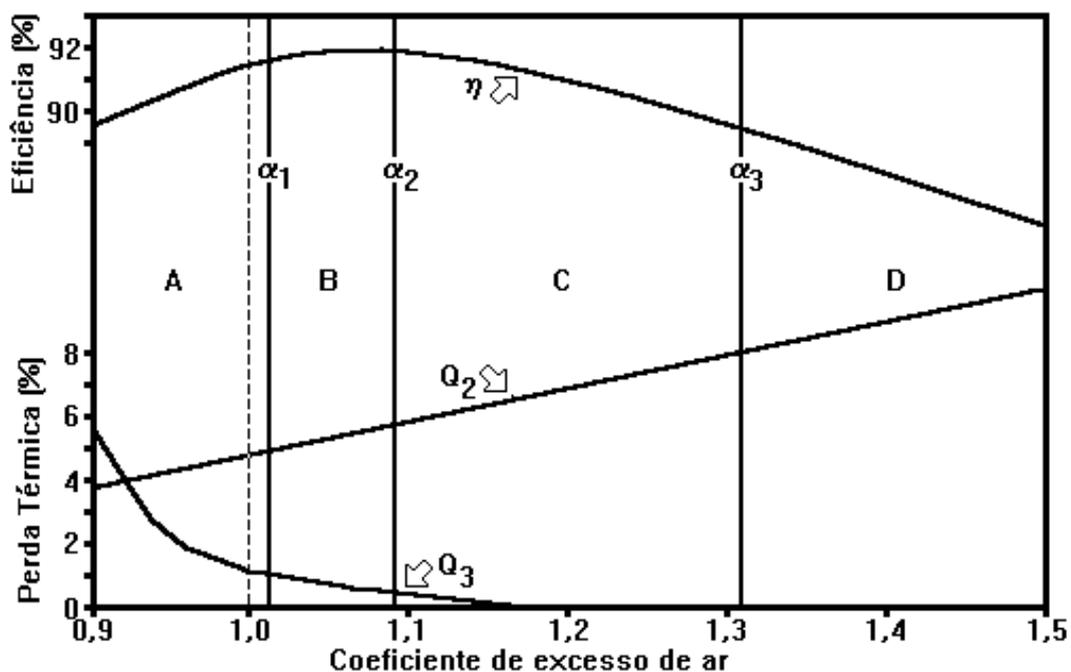


Figura 1. Balanço térmico da combustão.

Geralmente a eficiência da combustão depende mais do método operacional do que dos queimadores e equipamentos auxiliares. De fato, a eficiência do processo de combustão está intimamente ligada à precisão de ajuste do excesso de ar de combustão.

4. INFLUÊNCIA DO EXCESSO DE AR NOS NÍVEIS DE EMISSÃO

Cada poluente é controlado por uma determinada norma ambiental. Os limites especificados dependem de um esquema complicado em função do tipo de combustível, capacidade nominal e consumo anual.

Os limites de NO_x admissíveis são apresentados para condições específicas de combustão. Muitas vezes é determinado pelas normas que o teor de O_2 nos produtos da combustão deve ser inferior a 3% (base seca), e que o teor de emissões de CO não deve

exceder 400 ppm. Assim, a norma que qualquer teor de NOx medido (NOx_{real}), seja recalculado nas condições de referência (NOx_{ref}) (3% O_2 em base seca):

$$\% \text{NOx}_{\text{ref}} = \% \text{NOx}_{\text{real}} \frac{18}{(21 - \% \text{O}_{2\text{real}})} \quad (7)$$

Esta equação permite converter o teor de NOx nos produtos da combustão real para as condições de referência, em uma larga faixa de valores de O_2 . Quanto maior o teor de O_2 nos produtos da combustão, mais diluídos serão os poluentes e menor o NOx medido.

Os óxidos de Nitrogênio (NOx) são produzidos durante a combustão a partir do Nitrogênio do ar (NOx térmico) ou do Nitrogênio do combustível (NOx combustível). Em uma chama de difusão turbulenta, a produção de NOx é altamente dependente da composição do combustível e da relação ar/combustível, que, para os combustíveis líquidos, é determinada pela mistura do spray combustível e o ar de combustão.

A temperatura e o teor de O_2 e N_2 nos produtos da combustão, são os principais fatores para a formação de NOx, e são controlados pelo excesso de ar. Assim, além da influencia na eficiência da combustão, determina os níveis de emissão de NOx e CO.

Pequenos excessos de ar geram altas temperaturas de chama e baixos teores de O_2 e N_2 , enquanto altos valores, o contrário. O teor de NOx atinge o máximo a um excesso de ar entre 1,05 e 1,3. Diminuindo o excesso de ar, o NOx diminui rapidamente porque os teores de O_2 e N_2 , potenciais formadores de NOx, diminuem. Com o aumento do excesso de ar o teor de NOx também diminui, devido à diminuição da temperatura da chama. Abaixo de 1500°C , a formação de NOx diminui drasticamente.

A relação típica entre o excesso de ar e a emissão de NOx e CO é apresentada na figura 2. As curvas de emissão de NOx e CO devem ser analisadas simultaneamente, pois a diminuição de um poluente pode levar ao aumento de formação do outro. Deve ser lembrado que, o teor de CO diminui rapidamente com o aumento do excesso de ar.

A diminuição das emissões de NOx é muitas vezes acompanhada de um aumento da emissão de particulados. Estas emissões de particulados consistem de fuligem (soot), que é produzida a partir dos constituintes em fase gasosa, cenosferas e coque, cuja produção é devida a natureza multi-componente do combustível, e das características de atomização. Ao minimizar a emissão de NOx pela redução do excesso ar, existe um aumento na produção de fuligem. Esta estequiometria local, controlada pela mistura turbulenta, determina a formação de NOx e de particulados nas chamas dos combustíveis líquidos.

A formação de SO_2 depende do teor de enxofre do combustível, e o SO_3 é formado pela oxidação do SO_2 . A redução do excesso de ar diminui a quantidade de O_2 disponível para a oxidação do SO_2 em SO_3 , reduzindo a formação de H_2SO_4 nas partes frias da caldeira.

5. EXCESSO DE AR ÓTIMO

A dificuldade da análise e do controle do processo de combustão real, é devido ao fato que o coeficiente de excesso de ar afeta a eficiência e os níveis de emissão de maneiras diferentes e antagônicas. Assim, para simplificar, o efeito do coeficiente de excesso de ar será analisado em 4 faixas [2]. As figuras 1 e 2 representam valores típicos de eficiência e níveis de emissão.

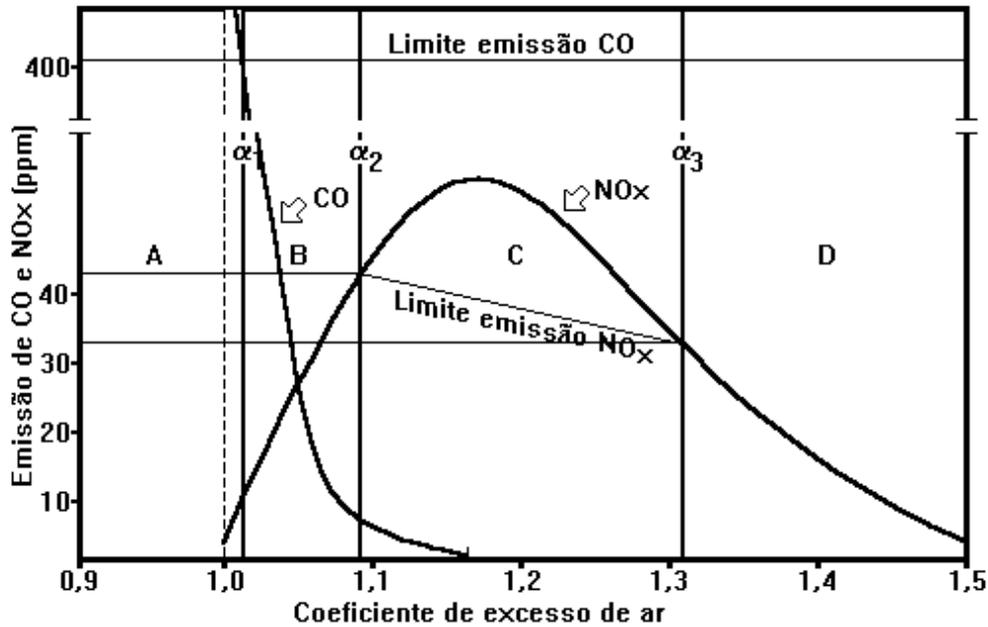


Figura 2. Emissão de poluentes na combustão.

A combustão com excesso de ar inferior a α_1 (faixa A), não é aceitável, porque o teor de CO nos produtos da combustão excede os limites. Com excesso de ar entre α_1 e α_2 (faixa B) tem-se uma combustão quase completa e um baixo α . Esta faixa é ideal devido às baixas emissões de CO e NOx, e à alta eficiência da combustão.

Entretanto, para operar na faixa B é necessário ajustar os queimadores ou modificar radicalmente o processo de combustão. Na maioria das instalações de combustão, a faixa B só pode ser realizada com combustão em multi-estágios, combustão sub-estequiométrica, ou recirculação de gases.

Na faixa C, os níveis de emissão de NOx excedem os limites da norma, e a operação só é possível com equipamentos de tratamento dos gases efluentes. A eficiência da combustão é inferior à da faixa B, mas ainda é aceitável. Na faixa D, os níveis de emissão de CO e NOx encontram-se dentro dos limites, mas a eficiência é baixa.

Pela análise da figura 2, verifica-se que a operação deve ser realizada nas faixas B ou C. Entretanto para operar nesta faixas muitas vezes é necessário implementar modificações no processo, ou instalar equipamentos de pós-combustão dos produtos. O balanço econômico (investimento/operação) vai determinar a instalação destes equipamentos, ou mesmo determinar a operação fora da região de eficiência ótima (faixa D). Certos sistemas de combustão comportam-se de modo diferente, e algumas das faixa citadas podem não existir.

6. O CONTROLE DO EXCESSO DE AR

O controle da combustão (razão ar/combustível) não pode ser realizado através do controle da vazão de combustível, uma vez que a energia gerada pela caldeira (vazão de vapor), depende da quantidade de combustível introduzido. Assim a única variável que pode ser regulada é a vazão de ar de combustão.

Tradicionalmente a vazão de ar é regulada por um sistema de controle em malha aberta, em função da vazão de combustível ou de vapor produzido, acionando diretamente o damper de ar ou o controle da vazão de ar. O controle em malha aberta estabelece uma relação ar/combustível fixa, insatisfatória em muitos casos (tabela 1). Demandas de carga variáveis e queima de combustíveis alternados, comuns nos processos industriais, modificam a relação ar/combustível ótima. A queima de misturas de combustíveis e de combustíveis com composição, temperatura, viscosidade e PCI variáveis, e temperatura do ar variável, requer reajustes freqüentes, tornando impraticável este controle. Assim, para assegurar a combustão completa, mesmo nas piores condições operacionais, é necessário um grande excesso de ar (20 a 30%).

Para otimizar o excesso de ar é necessário um controle de combustão mais preciso, que pode ser obtido por um sistema de controle em malha fechada (feedback). Isto é realizado a partir da análise do CO_2 , O_2 e CO nos produtos da combustão na saída da fornalha.

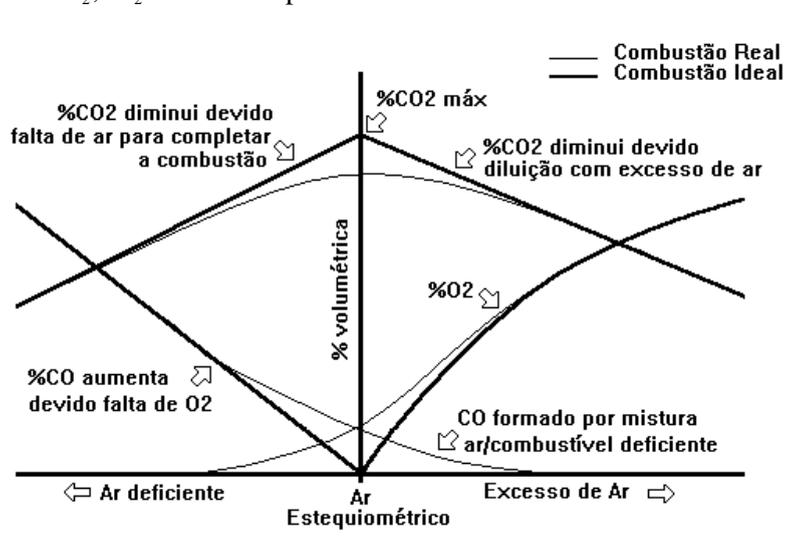


Figura 3. Produtos da combustão.

O controle do excesso de ar pode ser realizado a partir da análise do teor de CO_2 (equação 2). Sua desvantagem é que o set-point deve ser ajustado para cada combustível e é muito mais caro que o analisador de O_2 . A não ser no caso de medidas descontínuas, manuais, realizados por analisadores químicos, seu uso não é recomendado.

Analisadores de O_2 tem sido muito usados no controle da combustão, pois são de baixo custo, possuem tempo de resposta pequeno, pouca manutenção e medem diretamente o excesso de ar na chaminé. Sua principal desvantagem é que o set-point deve ser ajustado para cada combustível e taxa de combustão, pois o valor medido não depende unicamente da estequiometria da reação. O O_2 presente nos produtos pode ser devido a queimadores inativos, portinholas abertas, infiltrações etc. Assim, a infiltração de ar na fornalha pode inviabilizar o controle baseado na medição de O_2 .

O controle baseado na medição de CO tem a vantagem do valor do set-point ser independente do tipo de combustível e da carga da caldeira. A formação do CO é devido a uma quantidade de ar local insuficiente para completar a combustão. Se a combustão é completa, o nível de CO tende a zero. Uma vez que a mistura ar/combustível perfeita não é realizável, os níveis práticos de CO são, para qualquer combustível ou combinação de combustíveis, a qualquer carga, entre 120 e 250 ppm (figura 4). Entretanto, o analisador deve

medir até 1000 ppm para poder detectar transientes.

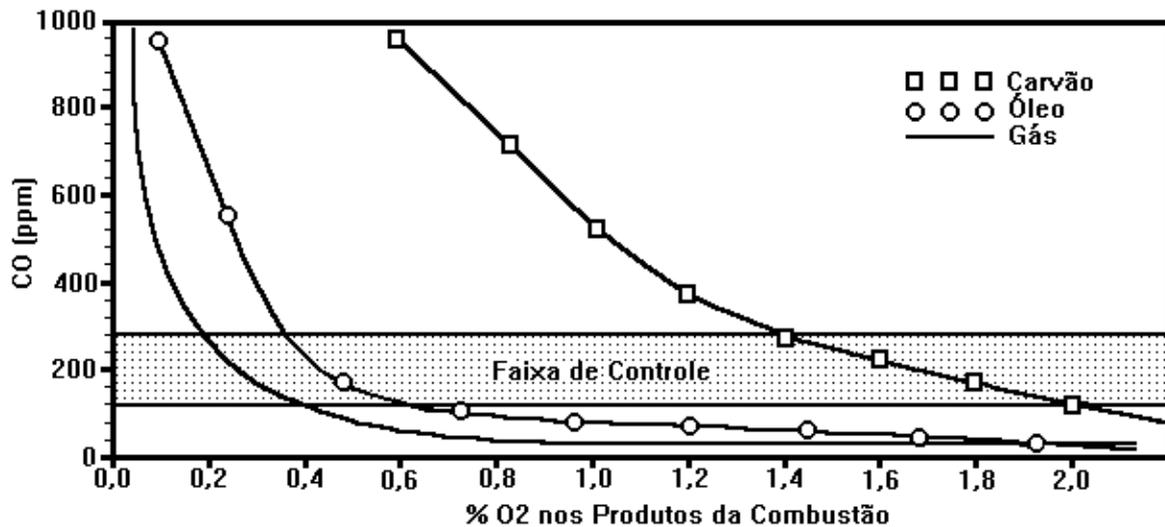


Figura 4. Emissão de CO em caldeiras industriais típicas [7].

Isto elimina a necessidade de se ajustar o valor do set-point em função das condições operacionais. Além disso como o teor de CO nos gases é pequeno (ppm), infiltrações ou registros mal regulados não interferem nos valores medidos, uma vez que a diluição é pequena. Outra vantagem é que o CO é um produto intermediário da combustão, tendo assim uma relação direta com o desenvolvimento da reação de combustão no fim da chama e emissão de particulados [12].

Entretanto, o teor de CO também não tem uma relação unívoca com o excesso de ar. Com queimadores em boas condições, as caldeiras a óleo começam a fumar entre 600 e 800 ppm. Queimadores sujos podem causar fumaça abaixo de 300 ppm. As caldeiras a gás podem exceder 2000 ppm antes da fumaça tornar-se perceptível. Com queimadores sujos ou uma mistura deficiente, o controle baseado no CO leva a um aumento do excesso de ar e uma diminuição da eficiência da combustão. Uma análise do uso de medidor de CO no controle da combustão é apresentada em [7 e 12].

O medidor de CO pode ser utilizado para controlar o excesso de ar, mas é limitado à operação em regime permanente, pois pequenas variações de carga podem causar grandes variações do valor medido. O controlador de CO deve ser desligado durante mudanças de carga e operações a baixa carga. Um controle mais eficaz é obtido usando o medidor de CO como ajuste fino do set-point do controlador de O₂.

No caso de combustão de gases, onde a composição pode variar bastante, o esquema de feedback apresentado pode ser prejudicado pelo tempo morto entre a mudança na composição e a detecção da mudança resultante nos produtos da combustão. Durante o tempo morto, o excesso de ar não é ajustado, reduzindo a eficiência da combustão. Neste caso um controle feedforward é necessário, para produzir um ajuste da razão ar/combustível antes que o efeito das perturbações na composição sejam sentidas na combustão. Os controles feedback e feedforward são então combinados na configuração de controle em cascata para obter a melhor característica de ambos [10].

7. CUSTOS DO CONTROLE

Os investimentos de capital nos equipamentos de controle de poluição do ar aumentam à medida que as leis se tornam mais rígidas. Nos Estados Unidos, por exemplo, os custos do controle do NOx e CO aumentaram 45% entre 1985 e 1988. Assim, é necessário encontrar meios criativos para controlar os custos e atingir a qualidade de ar requerida.

As normas de controle do ar da "Environmental Protection Agency - EPA" de 1990, estabeleceram cotas de emissões para termoelétricas (tipicamente 1 ton/ano). As instalações que emitirem abaixo da cota, podem negociar este excesso com outras instalações. Acredita-se que esta nova regulamentação pode reduzir o custo do controle do SO₂ em mais de 25%.

O custo é um dos mais importantes critérios na escolha do dispositivo e técnica de controle. Para se reduzir a emissão de NOx podem ser utilizados os seguintes métodos: filtragem, precipitação eletrostática, lavagem dos gases, redução química, e controle e modificação na combustão (combustão em multi-estágios, recirculação de gases e operação com baixo excesso de ar).

A redução do excesso de ar possui um efeito sobre a emissão de NOx, mas abaixo de certo limite (0,5%) a emissão de particulados aumenta consideravelmente [12]. Felizmente, a formação de SOx e NOx produzido nestas condições já atingiu o mínimo por razões termodinâmicas e de cinética química.

Novas tecnologias de transferência de calor podem aumentar a eficiência e reduzir as emissões. A maioria dos equipamentos em uso possuem projetos de mais de 30 anos. Estas construções são antiquadas e não se adaptam as necessidades dos processos atuais.

A combustão em multi-estágios é a técnica mais efetiva para o controle do NOx térmico, uma vez que a sua formação depende principalmente da estequiometria local e não da temperatura da chama. A combustão em multi-estágios pode ser obtida dividindo a câmara de combustão em várias zonas, ou com um queimador de mistura rica localizada. Os queimadores de baixo NOx controlam a relação ar/combustível inicial, criando uma chama rica que retarda a formação do NOx, diminuindo a sua emissão em mais de 50%. Injeções de ar secundário são necessárias para completar a combustão.

A adição de água ou recirculação de gases também reduzem a formação de NOx térmico devido a redução da temperatura, mas influenciam pouco na emissão de NOx combustível. Somente a combustão em multi-estágios tem influência sobre a formação do NOx combustível, pois a formação do NOx combustível não é dependente da temperatura da chama. A redução do preaquecimento de ar e a recirculação de gases tem influência somente no NOx térmico.

A combustão catalítica de hidrocarbonetos pode minimizar a formação de NOx. Sistemas catalíticos em desenvolvimento atualmente são capazes de reduzir a temperatura da chama de 1800°C para 1300°C, o que permitirá levar a emissão de NOx de 200 ppm para menos de 1 ppm. Otimizando o queimador e a câmara de combustão, as caldeiras atuais podem atingir rendimentos de 99,8%, com uma emissão de NOx e CO em cerca de 40 ppm.

Conciliar o aumento dos custos dos combustíveis com as normas ambientais é um trabalho de engenharia delicado. O preaquecimento do ar de combustão para aumentar a eficiência dificulta a obtenção de baixos níveis de emissão de NO_x (figura 5). Aumentando-se as superfícies de transferência de calor e a velocidade dos gases num novo projeto de fornalha pode resolver este problema. Os ganhos de eficiência viabilizam a instalação de queimadores com tecnologia baixo NO_x.

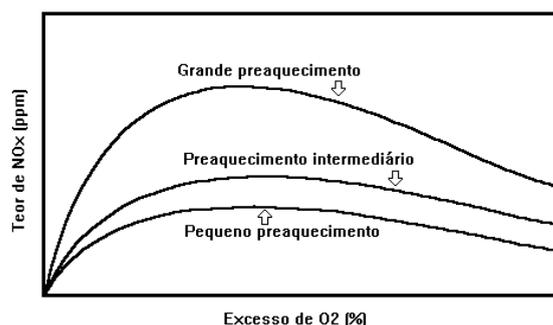


Figura 5. Teor de NO_x.

8. CONCLUSÕES

O excesso de ar influencia tanto a eficiência térmica quanto o nível de emissão de poluentes (CO, SO_x, NO_x) das fornalhas. O seu controle preciso permite otimizar a eficiência térmica das fornalhas, assegurando ao mesmo tempo uma diminuição do nível de emissão de poluentes e o cumprimento das normas ambientais.

Em muitos casos, o controle do excesso de ar é a solução de melhor custo/benefício para a redução da emissão de poluentes, e deve ser analisada prioritariamente.

O desenvolvimento tecnológico trouxe uma diminuição dos custos dos sensores de O₂ e CO, e dos controladores, tornando o seu emprego viável economicamente, mesmo em pequenas instalações de combustão.

9. BIBLIOGRAFIA

- [1] ANTONY S.M. Check Excess Air Quickly. Chemical Engineering, v.88, n.25, p.107-8, 14 Dezembro 1981.
- [2] BURD V. Squeezing Clean Energy from Boilers and Heaters. Chemical Engineering, v.99, n.3, p.145,146,148,150, Março 1992.
- [3] CONAMA. Resolução n°8 de 06 de Dezembro de 1990.
- [4] CONSIDINE D.M. Energy Technology Handbook. McGraw-Hill, 1977.
- [5] DATTATREYA S. Include Ambient Temperature in Combustion Control. Hydrocarbon Processing, p.87-88, Janeiro 1985.
- [6] DENOYERS J. ROY J. Oxygène et Combustion. Données de Base Théorique et experimentales. Revue Générale de Thermique, v.4, n.40, p.527-551, Maio 1965.
- [7] GILBERT L.F. CO Control Heightens Furnace Efficiency. Chemical Engineering, v.87, n.15, p.69-73, 28 Julho 1980.
- [8] INSTITUTO NACIONAL DE ENERGIA. Optimización de la Combustión en Quemadores Industriales. Quito, 1990, 30p.
- [9] KUNZ R.G. et alii. Control NO_x From Furnaces. Hydrocarbon Processing, v.71, n.8, p.57-60,62, Agosto 1992.
- [10] MORT A. VERHAPPEN I. Improving Fuel Efficiency With Statistics. Chemical Engineering, v.98, n.6, p.143,4,6, 28 Julho 1991.
- [11] MUNRO A.J.E. WESTLAKE D. LEWIS A. The Conservative Use of Liquid Fuel.

Journal of Institute of Fuel, p.10-19, Março 1978.

[12] RACINE M. Les Ensembles de Dosage d'Oxygène dans les Gaz de Combustion. Révue Générale de Thermique, v.2, n.23, p.1267-74, Novembro 1963.

[12] STEWART J.P. CO/O₂ Trim Control System Cuts Costs. Modern Power Systems, v.9, n.1, p.56-7, Janeiro 1989.

Tabela 2. Ação e conseqüências dos principais poluentes.

POLUENTE	MODO DE AÇÃO	CONSEQÜÊNCIAS
CO	Combina-se com a hemoglobina do sangue no lugar do O ₂ , impedindo a circulação do O ₂ no organismo	Dor de cabeça, cansaço, desconforto, palpitações no coração, vertigem, diminuição dos reflexos. Em ambiente fechado: Morte
NO _x	Transforma-se em ácido nítrico em contato com os líquidos do corpo.	Irritação de olhos, nariz, garganta, pulmões. Agrava doenças respiratórias.
Hidrocarbonetos	Não se sabe	Supõe-se que provoquem câncer.
O ₃	Não se sabe	Irritação das mucosas, redução da capacidade pulmonar. Acredita-se que destrua enzimas e proteínas.
Pb	Acumula-se no organismo.	Saturnismo. Envenenamento lento que causa uma degeneração do sistema nervoso central e doenças nos ossos, principalmente em crianças.
Aldeídos	Não se sabe	O Aldeído Fórmico provoca tumores em cobaias. Não há informações sobre os efeitos no homem.
Material Particulado (Poeira e fuligem)	Abaixo de 10 µm não são retidos pelas defesas naturais do organismo (pêlos das mucosas)	Irritação e entupimento dos alvéolos pulmonares.