

ESTRATÉGIAS PARA REDUÇÃO DE NO_x NA PELOTIZAÇÃO ATRAVÉS DE NOVA TECNOLOGIA DE QUEIMADORES*

Raphael Dias de Medeiros¹

Pedro Castro Souza Villela²

Diogo M. Pio³

Pedro H. F. Goncalves⁴

Sérgio F. Nunes⁵

Maurício C. Fonseca⁶

Guilherme A. Lima da Silva⁷

Resumo

A tecnologia aliada à sustentabilidade ambiental vem evoluindo muito nos últimos anos, e a busca por essas soluções se tornou algo crucial na competitividade e sobrevivência das empresas. Os fornos de pelotização possuem um ambiente oxidante que, junto a altas temperaturas de operação, criam condições para a formação de NO_x. Buscando novos patamares de excelência operacional, a Samarco com auxílio da ATS vem desenvolvendo soluções para redução de NO_x térmico através de um protótipo de queimador para os fornos de pelotização. Este queimador, denominado *Low NO_x*, opera com gás natural, água e ar. O projeto do queimador *Low NO_x* foi realizado utilizando simulações de CFD (do inglês: Fluido Dinâmica Computacional), acoplada com mecanismos de redução teóricos, através de modelos termodinâmicos. Para demonstrar a eficiência do queimador em condições reais de operação, foi fabricado um protótipo do queimador *Low NO_x* e um cavalete auxiliar. Durante os testes, foi possível medir o NO_x em função da dosagem de gás natural e de água, definidas nas simulações de CFD.

Palavras-chave: Queimador Low NO_x; NO_x; CFD; Pelotização

STRATEGIES FOR REDUCING NOX IN PELLETIZING USING NEW TECHNOLOGY OF BURNERS

Abstract

In recent years, the technology allied with environmental sustainability has advanced significantly, and the quest for these solutions became crucial for competitiveness and survival of the companies. Pelletizing furnaces, with their oxidizing environments and high operating temperatures, naturally produce NO_x. To achieve operational excellence and reduce NO_x emissions, Samarco, in collaboration with its partner company ATS, has developed a prototype of a burner called Low NO_x. This burner operates with natural gas, water, and air and has been designed to minimize the formation of thermal NO_x during pelletizing furnace operation. The development of the Low NO_x burner involved the use of CFD (Computational Fluid Dynamics) simulations, theoretical reduction mechanisms, and thermodynamic models to optimize its efficiency. To validate the burner's performance under real operational conditions, Samarco constructed a prototype of the Low NO_x burner and an auxiliary rack. During the tests, the NO_x levels associated with natural gas and water were measured, which were consistent with the CFD simulations.

Keywords: Low NO_x burner; NO_x; CFD; Pelletizing.

¹ Eng. Metalúrgico, Eng. de Processos Sênior, Samarco Mineração, Anchieta, ES, Brasil.

² Eng. Aeronáutico, sócio, ATS4i Eng., Estudos e Projetos Ltda, São Paulo, SP, Brasil.

³ Eng. Aeroespacial, Mestre, sócio, ATS4 Eng., Estudos e Projetos Ltda, São Paulo, SP, Brasil.

⁴ Químico, Mestre, Lab. de Bioenergia e Eficiência Energética (LBE) do IPT, São Paulo, SP, Brasil.

⁵ Eng. Metalúrgico, Eng. Especialista, Samarco Mineração, Anchieta, ES, Brasil.

⁶ Eng. Metalúrgico, Eng. Especialista, Samarco Mineração, Anchieta, ES, Brasil.

⁷ Eng. Mecânico, Doutor, sócio, ATS4i Eng., Estudos e Projetos Ltda., São Paulo, SP, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Os gases de óxido de nitrogênio NO_x, compostos pelo óxido nítrico NO e o dióxido de nitrogênio NO₂, são poluentes emitidos por fontes de combustão de gases ou de líquidos em alta temperatura. A taxa de reação do mecanismo de formação de gases NO_x pode ser aumentada conforme o aumento de temperatura e o excesso de ar. Há também efeitos do escoamento, da formação da chama assim como efeitos da concentração dos reagentes dada pela mistura turbulenta [1,3,6].

A emissão de NO_x pelas chaminés contribui para a poluição atmosférica, causando uma série de efeitos adversos à saúde humana. Os mais comuns incluem decréscimo da função pulmonar, asma, tosse, dor no peito e alterações no sistema imunológico de indivíduos saudáveis [4,5]. Além disso, a emissão de gases NO_x ocasiona a chuva ácida, favorece a redução da camada de ozônio e propicia a formação de oxidantes fotoquímicos, conhecidos como “smog”.

A formação de gases NO_x durante a combustão de combustíveis fósseis é influenciada por dois parâmetros: a temperatura da chama T_{ch} e o coeficiente de excesso de ar, λ [6]. Eles são importantes para as três reações de formação de NO_x térmico, chamadas de reações de Zeldovich [1,2,8,11,12]. Ele resulta da oxidação do nitrogênio atmosférico em condições de altas temperaturas. O aumento da temperatura da chama acelera as reações de formação do NO_x térmico, enquanto o excesso de ar, expresso pelo coeficiente λ, modula a disponibilidade de oxigênio, influenciando diretamente as taxas das reações químicas envolvidas. As reações que caracterizam o mecanismo de formação do NO_x térmico podem ser descritas conforme apresentado a seguir [1,11]:

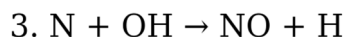
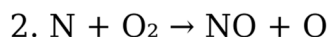
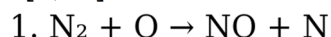


Figura 1. Reações de Zeldovich para geração de NO_x Térmico

O NO_x térmico possui relação exponencial com a temperatura, sendo este o fator determinante para sua concentração na combustão [6,7], conforme a Figura 2.

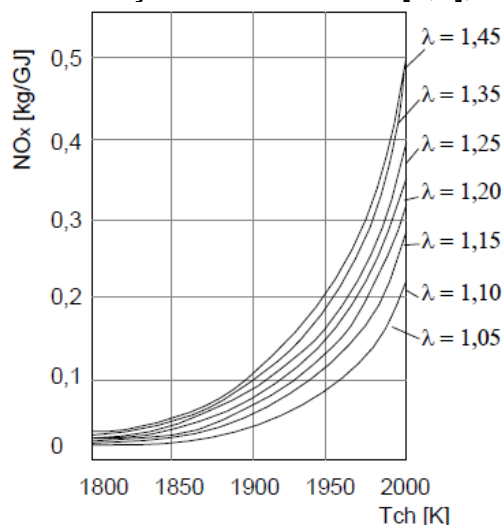


Figura 2. Emissão de NO_x térmico em função da temperatura de chama (T_{ch}) e do coeficiente de excesso de ar no caso de combustíveis sólidos [6,7].

Outro fator importante para a formação do NO_x é o teor de oxigênio dos gases. Portanto, deve-se monitorar a relação entre a formação de NO_x e a concentração de O₂ nos gases. Observando a Figura 3, constata-se uma relação quase linear entre as duas variáveis do processo. De acordo com a literatura, a concentração dos óxidos de nitrogênio é diretamente proporcional à concentração de oxigênio nos gases, independentemente do mecanismo de formação [6,8,10], conforme mostra o gráfico a seguir:

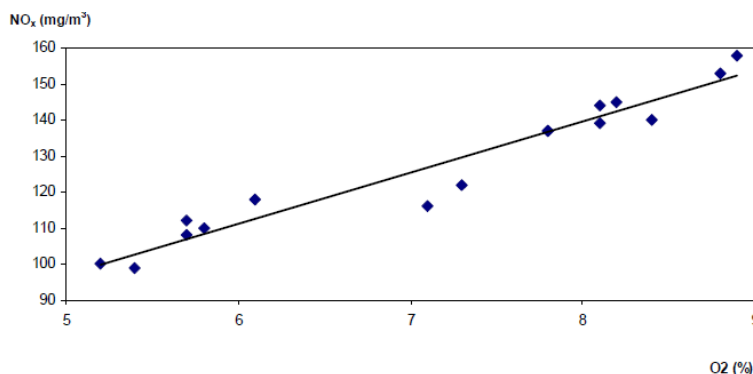


Figura 3. Relação entre a concentração de O₂ e a formação de NO_x [6,8].

Em relação às fontes geradoras, as maiores fontes de formação de NO_x global podem ser consideradas antropogênicas, sendo destas o maior percentual vindo das emissões veiculares, conforme visto na Figura 4 [6].

Atualmente, há muitos métodos de redução do NO_x formados nos processos industriais. A maior parte deles considera redução da temperatura da chama através de recirculação dos gases e redução do excesso de ar. São métodos basicamente classificados como pré-combustão (preventivos) ou métodos pós-combustão (corretivos) [6]. A tabela 1 mostra os métodos de controle de NO_x.

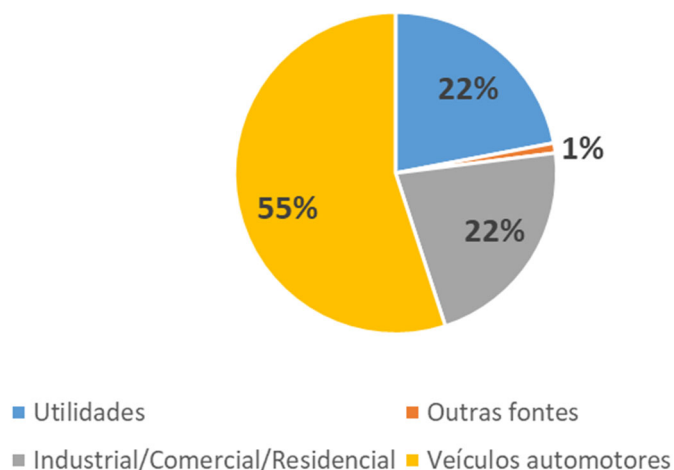


Figura 4. Origem das emissões antropogênicas de NO_x para o ano de 2003 [6].

A Samarco, com o auxílio de projeto de engenharia com simulação CFD fornecido pela ATS, desenvolveu um protótipo de queimador, denominado low Nox, para reduzir a formação de NO_x durante a operação dos fornos de pelletização. Com o objetivo de comprovar a eficiência do queimador em condições reais de operação, foi fabricado um protótipo do queimador low NO_x e um cavalete auxiliar para permitir a dosagem de gás natural e de água, de acordo com vazões definidas nas simulações CFD, da câmara de combustão do forno. O protótipo utilizando o cavalete de medição foi testado em uma semana pela Samarco, ATS com apoio do IPT-SP. A utilização de

somente um protótipo e a minimização dos dias de teste foram possíveis devido ao uso intensivo de simulação CFD durante a fase de projeto do queimador.

O queimador low NO_x, opera com gás natural e água, que se converte em vapor d'água na chama, e tem uma camisa de ar envolvendo o escoamento da chama. O método de redução de NO_x consiste na utilização de água para reduzir a temperatura da chama. No entanto, para ter o mesmo resultado em taxa de entalpia ou potência necessária para o processo industrial, é necessário aumentar a vazão de ar e combustível.

Tabela 1. Métodos de controle de NO_x

Princípio do Método de Prevenção e Controle	Tecnologia	Prevenção da Poluição (2P) ou Tecnologia corretiva (TC)
Redução da Temperatura da chama	Recirculação de Gases	2P
	Redução do Excesso de ar	2P
	Combustão Catalítica	2P
	Estagiamento de ar e de combustível no queimador	2P
Redução Química dos NO _x	Redução Seletiva Catalítica (RSC)	TC
	Redução Seletiva não Catalítica (RSNC)	TC
Oxidação do NO _x com subsequente absorção	Injeção de oxidante (Ozônio)	TC

Além da metodologia de desenvolvimento do queimador em CFD, o presente artigo contempla os resultados obtidos durante a campanha de testes realizados no final do ano de 2022, no forno da Samarco em Ubu, ES.

2 DESENVOLVIMENTO

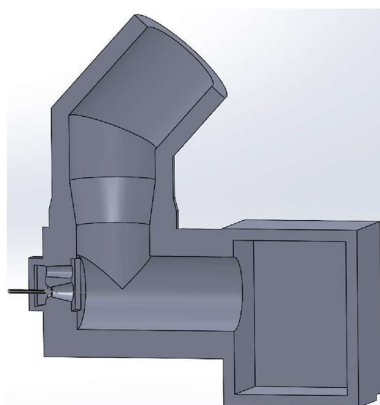


Figura 5. Geometria 3D de uma câmara de combustão do forno com o queimador.

A metodologia para avaliar a formação de NO_x foi feita com base em modelos químicos de combustão, combinados com a simulação CFD de um modelo 3D representativo da câmara de combustão. Os detalhes com a geometria do queimador e seu posicionamento na câmara de combustão também foram inseridos no modelo computacional.

Os parâmetros do queimador da Samarco foram carregados em modelos específicos, visando elaborar o design do queimador original. Para criar e processar o modelo computacional, utilizamos vários softwares. O SolidWorks foi usado para criar o modelo digital. O código NASA-CEA da NASA (National Aeronautics and Space

Administration, EUA) foi usado para quantificar de forma preliminar a vazão de água com modelos de cinética química.

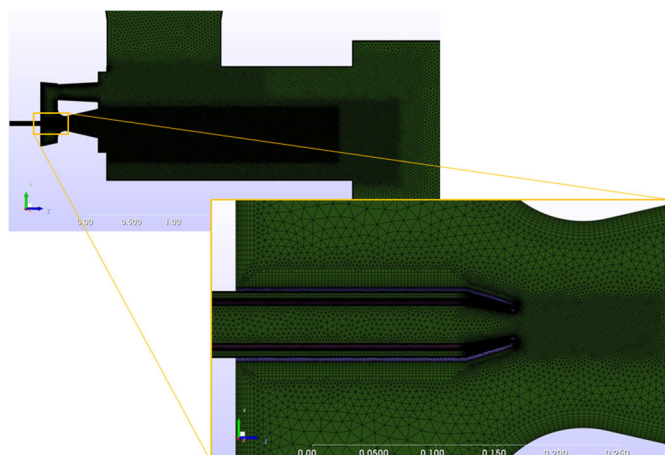


Figura 6. Malha computacional para análise de CFD e detalhe na região do queimador.

O código Kintech Lab foi usado para determinar os modelos químicos de combustão e os coeficientes de equilíbrio químico de formação de NO_x para inserir no modelo CFD. O Ennova Meshing foi usado para discretizar o domínio com a geração de malha. O CFD++ da Metacomp Technologies foi usado para resolver o escoamento compressível acoplado com as equações químicas de combustão. O Tecplot 360EX foi usado para pós-processamento e visualização dos resultados.

O modelo computacional com o queimador original foi utilizado como referência para comparação com o queimador low NO_x proposto. A única diferença entre as geometrias está no queimador inserido na câmara de combustão. A geometria 3D do domínio analisado em CFD foi ilustrada na Figura 5. A malha foi adensada na região do queimador e ao longo da câmara de combustão, onde a chama ficava posicionada, ver Figura 6. Por meio de modificações na geometria do queimador e da análise dos modelos de equilíbrio químico com a adição de pequenos jatos de água no queimador, foram estabelecidas as condições ideais de operação do queimador. A partir destas condições identificadas nas simulações, foi projetado o queimador low NO_x.

2.1 Avaliação da geração de NO_x – Nova tecnologia de queimador

Após a análise dos resultados da geometria atual em CFD, combinada com a avaliação dos modelos de cinética química, foi criada a geometria para o queimador low NO_x. A camisa de água possui um bocal de saída com pequenos orifícios e angulações distintas. Na geometria é possível observar que o queimador possui furos na circunferência para o jato d'água. A camisa de ar foi mantida para garantir a compatibilidade com o bloco do queimador original. Ela tem uma pequena redução na área de saída devido ao aumento causado pela camisa de água. A ilustração do queimador está disponível na Figura 7.

Realizou-se um estudo do fluxo da quantidade de movimento para determinação do diâmetro do furo, de forma a obter uma chama com rigidez similar ao do queimador original do forno.

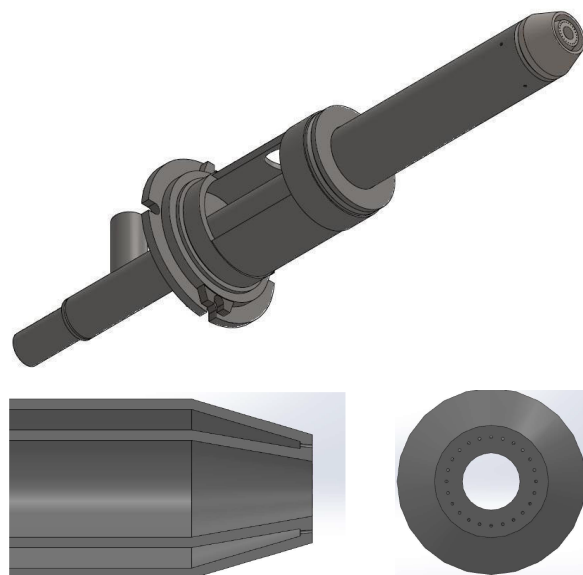


Figura 7. Geometria do queimador Low NOx com detalhe da lança interna.

- | | |
|--|--|
| 1. $\text{CH}_4 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2$ | 9. $\text{O} + \text{N}_2 \leftrightarrow \text{N} + \text{NO}$ |
| 2. $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$ | 10. $\text{N} + \text{O}_2 \leftrightarrow \text{O} + \text{NO}$ |
| 3. $\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ | 11. $\text{N} + \text{OH} \leftrightarrow \text{H} + \text{NO}$ |
| 4. $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$ | 12. $\text{CH} + \text{N}_2 \leftrightarrow \text{HCN} + \text{N}$ |
| 5. $\text{H} + \text{O}_2 \rightarrow \text{OH} + \text{O}$ | 13. $\text{HCN} + \text{O} \leftrightarrow \text{NCO} + \text{H}$ |
| 6. $\text{H}_2\text{O} + \text{H} \rightarrow \text{OH} + \text{H}_2$ | 14. $\text{NCO} + \text{H} \leftrightarrow \text{NH} + \text{CO}$ |
| 7. $\text{H}_2 + \text{O} \rightarrow \text{OH} + \text{H}$ | 15. $\text{NH} + \text{H} \leftrightarrow \text{N} + \text{H}_2$ |
| 8. $\text{CO} + \text{OH} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}$ | |

Figura 8. Mecanismo de 15 reações proposto por Chen e Zeng [12]

2.2 Avaliação da geração de NOx – Mecanismo de combustão

Para realizar o cálculo de geração de NOx foi desenvolvido um estudo dos mecanismos de combustão a serem inseridos na simulação CFD. Estes mecanismos permitem realizar o cálculo da concentração de NOx na combustão de CH₄+ar atmosférico+H₂O.

Essa modelagem permite simular de forma rápida, permitindo um estudo comparativo entre os mecanismos ilustrados na Figura 8. Foi utilizado o software KINTECH LAB para ajudar a definir os mecanismos de combustão [9,11].

O mecanismo químico de combustão e geração de NOx é simplificado e tem 15 reações. A ideia é ter o mínimo de reações possível para que se rode o CFD de forma mais rápida com uma malha com mais elementos. As condições de contorno foram estabelecidas de forma a comparar o queimador original com o queimador Low NOx. Condições de contorno para a análise CFD foram apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Condições de contorno ou operacionais da simulação CFD

Parâmetro	Valor	Unidade
Entrada de ar do downcomer		
Vazão	19.000	Nm³/h
Temperatura	1266,15	K
Diferencial de pressão na saída de ar	-300	Pa
Caso Original do queimador – 3,01 MWatt		
Entrada de gás natural	280	Nm³/h
Temperatura do gás natural	303,15	K
Entrada de ar	330	Nm³/h
Temperatura do ar	303,15	K
Caso do queimador Low NOx – 3,01 MWatt		
Entrada de gás natural	305	Nm³/h
Temperatura do gás natural	303,15	K
Entrada de água líquida	250	L/h
Temperatura da água líquida	303,15	K

2.3 Testes industriais com protótipo de queimador Low NOx

Os testes foram executados com a instalação de um cavalete auxiliar para a dosagem de gás e de água, que alimentam o queimador Low NOx desenvolvido especificamente para os testes de acordo com as Figuras 9 e 10. Durante a operação, os gases de combustão foram analisados pelo método de análise contínua extrativa para avaliar o impacto na formação de óxidos de nitrogênio NOx com diferentes vazões de gás e de água, previamente calculadas para serem fornecidas ao queimador. Além de comparar a operação do queimador low NOx com o queimador original e identificar os melhores parâmetros de operação do queimador low NOx.

Tabela 3. Analisadores Contínuos

Constituinte	Fabricante	Modelo	Princípio de operação	Faixa de medição (volume, base seca)
O ₂	HORIBA	PG 350	Óxido de zircônio	0 - 25 %
CO	HORIBA	PG 350	Absorção da radiação infravermelha	0 - 5000 ppm
CO ₂	HORIBA	PG 350	Absorção da radiação infravermelha	0 - 30 %
SO ₂	HORIBA	PG 350	Absorção da radiação infravermelha	0 - 2500 ppm
NO, NO ₂	HORIBA	PG 350	Quimiluminescência	0 - 2500 ppm

Todos os instrumentos de análise de gases estão na Tabela 3 e cavalete de medição de vazão na Figura 10. A instalação dos equipamentos foi feita pela equipe da Samarco, que seguiu um plano de testes previamente definido, obedecendo as normas e regras de segurança para instalações de redes de gás industrial. O IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas) foi contratado para realizar a análise contínua dos gases na câmara de combustão e através das medições, validar os resultados das simulações CFD.



Figura 9. Queimador Low Nox e Camisa de ar.

2.4 Resultados Numéricos de Simulação CFD

A potência do queimador foi avaliada com base na temperatura da chama e na deflexão do jato de gás que sai do queimador, por meio de cálculos de quantidade de movimento. O foco principal foi a redução do NOx térmico, que se forma de forma mais significativa a partir de 1370°C [11]. A adição de água foi utilizada para reduzir o pico de temperatura.



Figura 10. Cavalete auxiliar de medição.

O modelo de CFD do presente trabalho estimou uma redução de 29% na emissão do NOx. Devido às limitações do mecanismo químico utilizado, que tinha um número reduzido de reações (15) para otimizar o processamento com a malha refinada focada na fluidodinâmica, a análise das simulações se concentrou em resultados relativos, em vez de determinar valores absolutos exatos para as emissões de NOx. Um trabalho posterior, não utilizado aqui, aprimorou o mecanismo de reação, desenvolvendo um mecanismo de 51 reações que fornece previsões precisas da concentração absoluta de NOx na chaminé. Este modelo foi desenvolvido com o software Cantera, com modelos em Python. Para executar a simulação de CFD com 51 reações foi necessário usar uma malha mais grosseira com menos elementos sem prejudicar a fluidodinâmica da câmara de combustão.

Observa-se que os contornos de temperatura tiveram uma leve alteração com o aumento de potência do queimador, conforme visto na Figura 11.

2.5 Resultados e discussões dos testes industriais

Ao todo, foram realizados 42 testes para avaliar o NOx em câmara específica do forno de pelletização. Além disso, foram realizados testes de comissionamento e de avaliação da vazão de água no queimador low NOx e de avaliação do melhor local para a análise de gases.

2.5.1 Resultados do limite de água para vazão máxima de gás natural

Na vazão máxima de gás, o teste com água se limitou a 450 l/h e não ocorreu problema de apagamento da chama e nem foi detectada a presença de metano na

análise de gases de combustão. A presença inicial de metano seria um indicativo de uma queima incompleta e a refrigeração excessiva da chama.

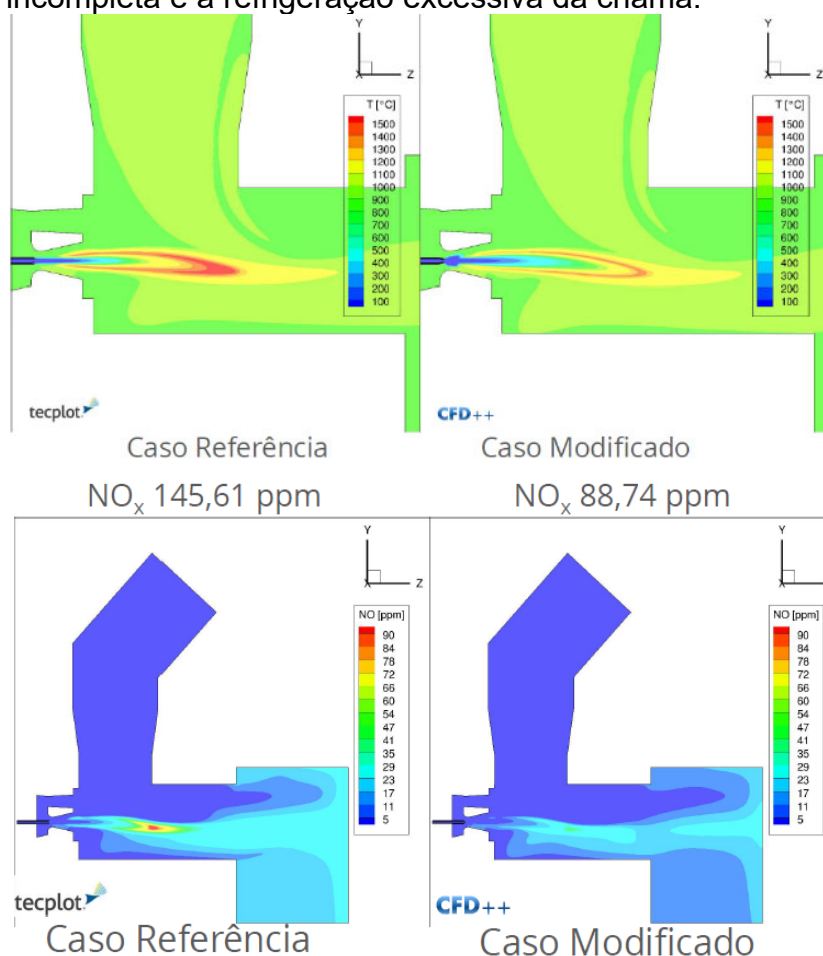


Figura 11. Simulações em CFD: Referência (sem água) e Modificado (low NOx com água).

O limite de água foi identificado para uma vazão de gás de 252 Nm³/h que corresponde a 70% de abertura da válvula. O teste foi iniciado com 150 l/h com incremento de 100 l/h. Ao atingir uma vazão de 550 l/h de água, foi identificada a presença de metano (200 a 800 ppm) nos gases de combustão.

2.5.2 Resultados de NOx com o queimador Low NOx

A operação do queimador low NOx no forno da SAMARCO foi realizada com gás natural e água. Foram consideradas 3 vazões de gás: mínima, intermediária e máxima. Em cada etapa de teste a vazão de gás sofreu um pequeno aumento de acordo com a adição de água com a finalidade de manter a potência de operação. As vazões de água utilizadas nos testes ficaram entre 150 l/h e 650 l/h. Podemos fazer as seguintes observações a partir dos resultados: 1) O abatimento mais significativo de NOx ocorreu para vazões elevadas de GN. 2) O abatimento máximo de NOx ficou próximo a 40% com vazão de 450 l/h de água, conforme visto na Figura 12. 3) Mesmo com o aumento da vazão de gás para manter a potência do forno, ainda ocorreu o abatimento do NOx. 4) A operação com a vazão mínima de água (150 l/h) apresentou abatimento de NOx na ordem de 15%. Os pontos de medição de NOx para a vazão intermediária – “vazão méd [50%]” - de gás natural da Figura 13 mostram curvas diferentes, pois foram realizadas em dias diferentes (com uma operação industrial completamente diferente).

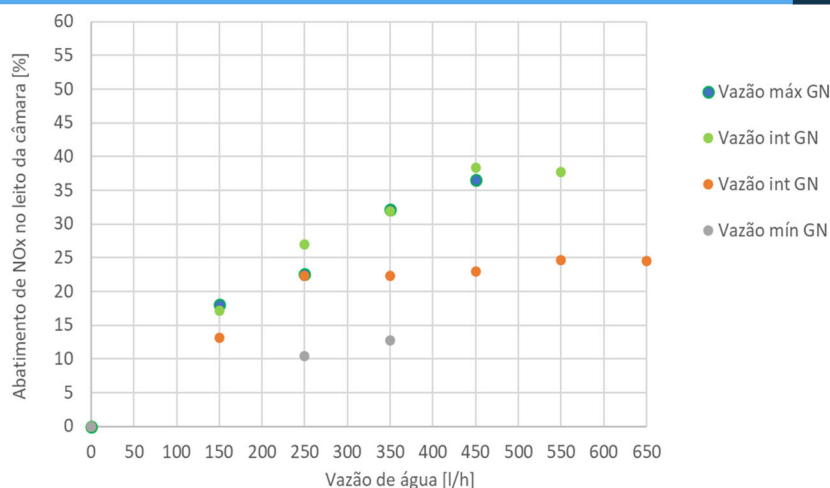


Figura 12. Resultados de abatimento relativo de NOx em função da vazão de água para diferentes faixas de vazão de GN.

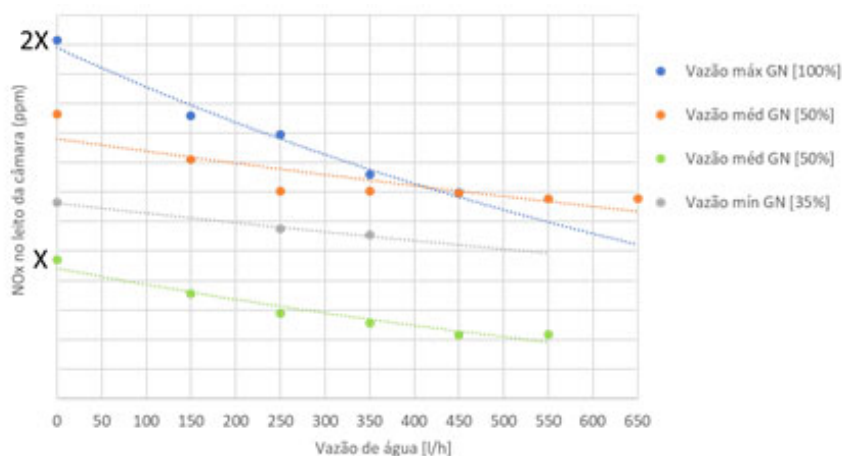


Figura 13. Resultados de NOx em função da vazão de água para diferentes faixas de vazão de GN.

Foi feita uma avaliação da temperatura de 2 câmaras para garantir que a operação do queimador low NOx com água não estava prejudicando o forno. Através do gráfico na Figura 14 foi possível observar que a temperatura na câmara se manteve estável a acompanhou a variação natural do ajuste do forno. A partir dos dados tabelados o pênalti de consumo de gás observado experimentalmente foi de 4 a 6%, menor que o teórico de 8,9% para 250 l/h de água. Não foi possível quantificar a influência dos 3 demais queimadores sobre os resultados dos testes do queimador low NOx. Certamente o abatimento de NOx deve ser superior ao medido experimentalmente, se todo o conjunto estivesse operando com queimadores low NOx.

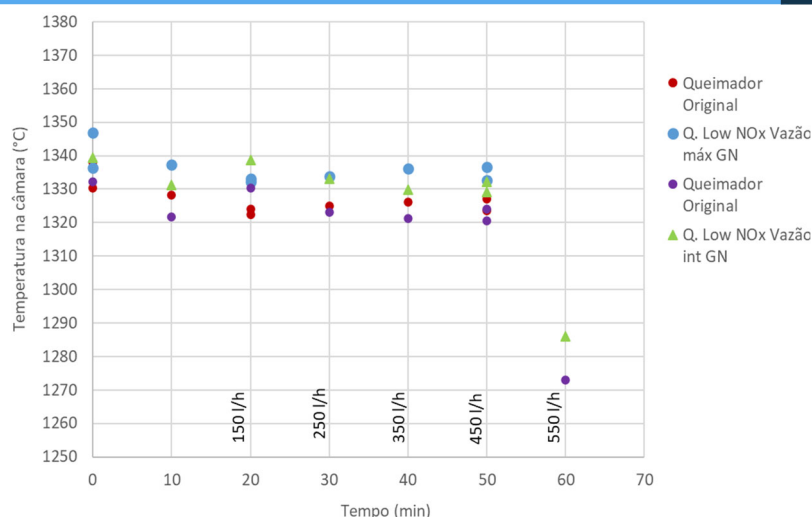


Figura 14. Resultados de temperatura da câmara do forno com a operação do queimador low NOx.

2.5.3 Resultados Experimentais para Variação de Vazão de Água

Durante a fase de projeto do queimador low NOx, foram realizadas diversas simulações com o objetivo de comparar possíveis queimadores que provocaram uma grande redução de NOx.

Os resultados obtidos, tanto nos testes físicos quanto no modelo computacional, apresentaram redução significativa de geração de NOx com o uso de água. O abatimento previsto no modelo CFD foi de 29% para uma vazão de água de 250 l/h, valor coerente com o que foi observado nos testes.

Em resumo, após os testes realizados durante a operação real do forno, foram obtidos os resultados para o efeito de redução de NOx e de penalidade de aumento de vazão de GN com a variação de vazão de água conforme a Figura 15.

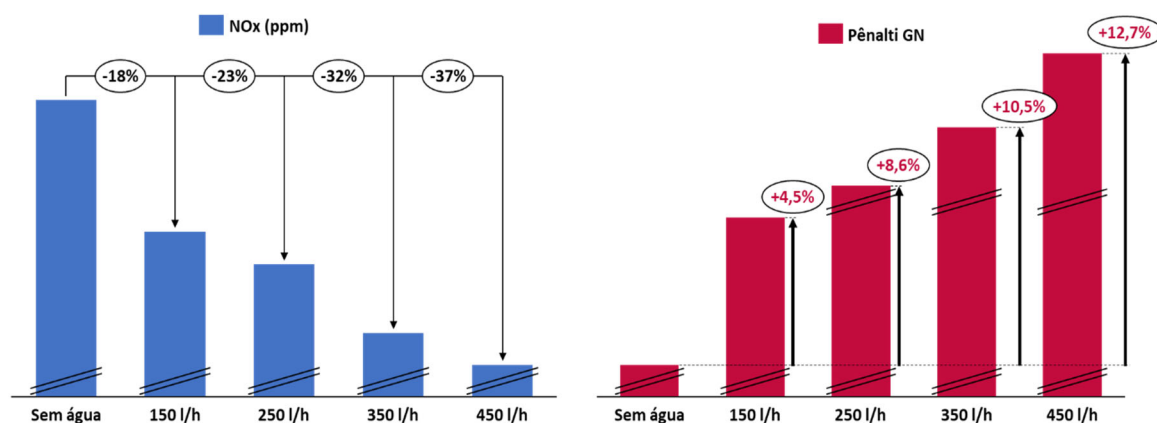


Figura 15. Resumo operacional para abatimento de NOx com protótipo de queimador low NOx.

3 CONCLUSÕES

Em linhas gerais, para um maior abatimento do NOx recomenda-se utilizar a vazão de água entre 250 l/h e 450 l/h para média e alta vazão de gás. Vale lembrar que o consumo de gás aumenta de acordo com a entrada da entalpia da água e diminuição da temperatura pois é preciso manter a potência do forno.

Os testes foram realizados com sucesso e foi possível avaliar a operação do queimador low NOx para vazões de gás natural no intervalo de 120 Nm³/h a 297 Nm³/h com vazões de água de 150 l/h até 650 l/h. Foi possível obter reduções de 15% a 37% de NOx com o queimador low NOx entregando a mesma potência. A penalidade no consumo de gás natural para 250 l/h medido nos testes foi de 4% a 6%. O abatimento

de NOx previsto na simulação foi próximo ao observado nos testes. Previsto pelo CFD++ foi 29% de abatimento e foi medido de 22% a 27% para uma vazão de 250 l/h de água. Por se tratar de um protótipo em teste, os resultados foram satisfatórios e indicam a possibilidade de aplicação industrial.

REFERÊNCIAS

- 1 Martins CA, Ferreira MA. Considerações sobre a formação de NOx na combustão. In: VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica; 2010 Aug 18-21; Campina Grande, PB, Brasil.
- 2 Duarte CLL, et al. Entendimento dos mecanismos de formação de NOx e SO2 no forno de pelotização de Vargem Grande em ritmo reduzido de produção. In: 43º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 14º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 1º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro; 2014 Sep 1-4; Belo Horizonte, MG, Brasil.
- 3 Bucco MVS. Construção e testes de validação de amostradores passivos para dióxido de nitrogênio e ozônio [dissertation]. Curitiba: Universidade Federal do Paraná; 2010. 114 p.
- 4 Ferreira RR, Oliveira RA. Comparativo de emissões de NOx entre queimadores convencionais e Low NOx [undergraduate thesis]. Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná; 2011. 72 p.
- 5 Martins LC, et al. Poluição atmosférica e atendimentos por pneumonia e gripe em São Paulo, Brasil. Rev Saude Publica. 2002;36(1):88-94.
- 6 Primo KR. Formação, controle e dispersão atmosféricas dos óxidos de nitrogênio decorrentes da queima de bagaço em caldeiras industriais [dissertation]. Itajubá: Universidade Federal de Itajubá; 2005. 94 p.
- 7 Cardu M, Baica M. Regarding the relation between the NOx content and CO content in thermal power plants flue gases. Energy Convers Manag. 2005;46:47-59.
- 8 Teixeira FN. Caracterização e controle das emissões de óxidos de nitrogênio e material particulado em caldeiras para bagaço [dissertation]. Itajubá: Universidade Federal de Itajubá; 2005. 259 p.
- 9 Cuoci A, Frassoldati A, Faravelli T, Ranzi E. Formation of soot and nitrogen oxides in unsteady counterflow diffusion flames. Combust Flame. 2009;156(10):2010-22. doi:10.1016/j.combustflame.2009.06.023.
- 10 Ravary B, Colomb C, Johansen ST. Modelling combustion and thermal NOx formation in electric arc furnaces for the production of ferro-silicon and silicon-metal. In: INFACON XI; 2007.
- 11 Hill SC, Smoot LD. Modeling of nitrogen oxides formation and destruction in combustion systems. Prog Energy Combust Sci. 2000;26:417-58.
- 12 Chen S, Zheng C. Numerical investigation on the flow, combustion and NOx emission characteristics in a 10 MW premixed gas burner. Open Fuels Energy Sci J. 2015;8:1-9.