

# Emissão de óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ) na combustão industrial

*Nitrogen oxides emission ( $\text{NO}_x$ ) in industrial combustion*

Renato Vergnhanini Filho<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup> Laboratório de Engenharia Térmica, Centro de Tecnologia Mecânica, Naval e Elétrica, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

\*E-mail: vergnhan@ipt.br

## Resumo

Os óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}$  e  $\text{NO}_2$  -  $\text{NO}_x$ ) são conhecidos poluentes atmosféricos (poluente primário e um dos responsáveis pela acidez das chuvas, redução da camada de ozônio e formação de oxidantes fotoquímicos - *smog*), sendo suas emissões por processos industriais de combustão (caldeiras, fornos, incineradores) regulamentadas no Brasil por legislações nacionais e estaduais. A formação do  $\text{NO}_x$  na combustão é devida a reações envolvendo, basicamente, oxigênio e nitrogênio do ar (formação do " $\text{NO}_x$  térmico") ou oxigênio e nitrogênio do combustível (formação do " $\text{NO}_x$  combustível") e pode ser reduzida atuando-se diretamente no processo, desde alterações operacionais (excesso de ar, potência dissipada, recirculação de gases de combustão) até modificações substanciais, como estagiamento no fornecimento de ar ou combustível. Essa última é muito efetiva e amplamente utilizada no exterior, porém a eficácia de sua aplicação para óleos combustíveis da natureza dos utilizados no Brasil (elevadas viscosidade e teor de nitrogênio) não era conhecida. Por essa razão, essa técnica foi objeto no passado de uma extensa investigação experimental conduzida pelo Laboratório de Engenharia Térmica do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Foram estudados sistemas de requeima (*reburning*) e queimadores de baixa emissão de  $\text{NO}_x$  (*Low NOX burner*). O conhecimento adquirido nesse trabalho e o que vem sendo acumulado ao longo do tempo têm sido utilizados no apoio ao setor industrial na redução de suas emissões de  $\text{NO}_x$ . A equipe do Laboratório de Engenharia Térmica tem ido regularmente às indústrias com sua unidade móvel para levantamento das emissões de  $\text{NO}_x$  e demais variáveis do processo de combustão para, em seguida, recomendar e eventualmente implantar medidas que levem à redução das emissões.

### Palavras-chave:

óxido de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), combustão industrial, poluição atmosférica.

### Keywords:

*nitrogen oxides ( $\text{NO}_x$ ), industrial combustion, air pollution.*

## Abstract

*Nitrogen oxides (NO and NO<sub>2</sub> - NO<sub>x</sub>) are known air pollutants (pollutant primary and one responsible for the acidity of rain, depletion of the ozone layer and formation of photochemical oxidants - smog) and emissions from industrial combustion processes (boilers, furnaces, incinerators) regulated in Brazil by national and state laws. The formation of NO<sub>x</sub> in combustion is due to reactions involving primarily oxygen and nitrogen from air (formation of "thermal NO<sub>x</sub>") or oxygen and fuel nitrogen (formation of "fuel NO<sub>x</sub>") and can be reduced by acting directly on the process from operating changes (excess air, power input, flue gas recirculation) until substantial modifications, such as staging in supplying air or fuel. The latter, being very effective and uncertain application for fuel oils used in Brazil (high viscosity and nitrogen content), were the subject in the past of an extensive experimental research conducted by the Thermal Engineering Laboratory of Institute for Technological Research of the State of São Paulo. Reburning systems and low NO<sub>x</sub> burners were studied. The knowledge gained in this work and that has been accumulated over time has been used to aid the industry in reducing their NO<sub>x</sub> emissions. The Thermal Engineering Laboratory team has gone regularly to industries with its mobile unit for survey of NO<sub>x</sub> emissions and other variables of the combustion process to then recommend and eventually implement measures to take to reduce emissions.*

## 1 Introdução

A poluição atmosférica é a principal preocupação ambiental relacionada à queima de combustíveis, devido à emissão de efluentes gasosos, embora outras formas de poluição possam também estar presentes. Nos gases efluentes de processos industriais de combustão, encontram-se vários constituintes poluentes, sendo os óxidos de nitrogênio (NO e NO<sub>2</sub> - NO<sub>x</sub>), o material particulado (MP) e os compostos de enxofre (SO<sub>x</sub>), os mais preocupantes. Outros como o monóxido de carbono (CO) e os compostos orgânicos voláteis (VOC) são constituintes que, em equipamentos operando em condições normais, são emitidos a taxas muito pequenas, não causando qualquer dano ambiental. Outros, ainda, como alcatrões, acroleína, dioxinas e furanos, compostos reduzidos de enxofre (*TRS - total reduced sulphur*), metais pesados etc. são menos comuns, sendo específicos de determinados processos ou combustíveis (CARVALHO JUNIOR; LACAVA, 2003).

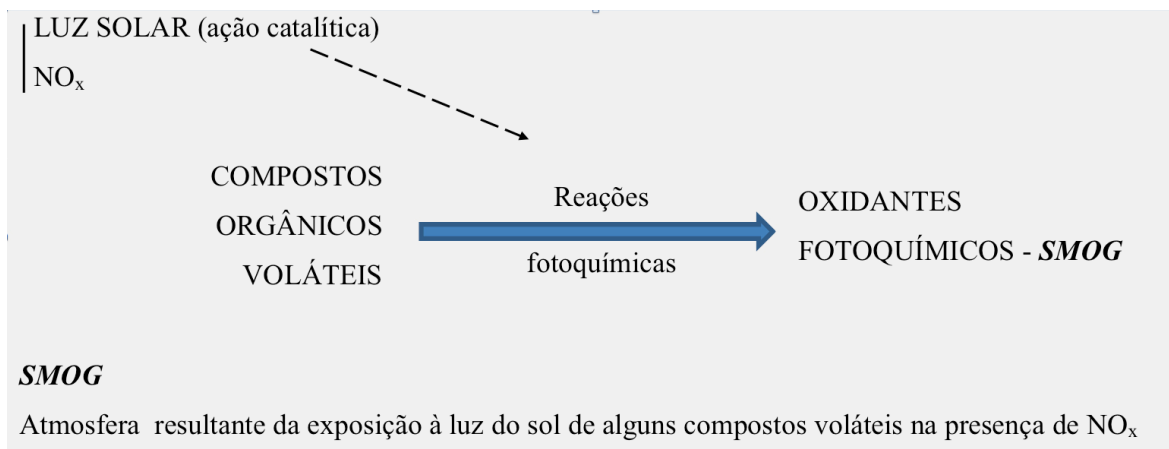
A emissão de NO<sub>x</sub> em processos de combustão tem sido, nos últimos anos, objeto de pesquisas científicas em todo o mundo. Os estudos visavam inicialmente a identificação dos processos de formação e as relações com parâmetros termodinâmicos da chama. Posteriormente, as pesquisas se voltaram para o desenvolvimento de técnicas de abatimento e controle. O mote dessas pesquisas tem sido a fixação pelos órgãos ambientais de padrões de emissão de NO<sub>x</sub> cada vez mais restritivos.

Dentro desse contexto, o Laboratório de Engenharia Térmica (LET) do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) tem realizado trabalhos envolvendo o NO<sub>x</sub>, que vão desde medições em unidades industriais acompanhadas de implantações e recomendações de medidas mitigadoras até projetos de P&D.

## 2 Óxidos de nitrogênio na atmosfera

Os óxidos de nitrogênio são poluentes primários - no homem, por exemplo, ataca as vias respiratórias. O  $\text{NO}_x$  participa na atmosfera de complexas reações fotoquímicas, alternando-se nos diferentes estágios de oxidação, contribuindo para o acréscimo na atmosfera de poluentes secundários, como os oxidantes fotoquímicos - ozônio, peróxidos, formaldeído etc. (SCHNEIDER; GRANT, 1982) (**Quadro 1**). O  $\text{NO}_x$  também está associado à chuva ácida (formação do ácido nítrico) e, na estratosfera, ao ataque à camada de ozônio.

**Quadro 1 – Formação dos oxidantes fotoquímicos**



Nos principais centros urbanos do país, vêm sendo registradas concentrações elevadas de  $\text{NO}_x$  e ozônio ( $\text{O}_3$ ), às vezes superiores aos padrões de qualidade do ar. Na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), por exemplo, no ano de 2015 o padrão estadual de 8 h para o  $\text{O}_3$  ( $140 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) foi ultrapassado em 36 dias e o padrão nacional de 1 h ( $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) foi excedido em 80 dias, considerando todas as estações que medem esse poluente. Já para o  $\text{NO}_x$ , não houve ultrapassagem do padrão horário ( $260 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) e nem do anual ( $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) em nenhuma das estações da RMSP. A estimativa é que o  $\text{NO}_x$  emitido na RMSP provenha 32 % de fontes fixas (indústrias) e o restante de fontes móveis (veiculares), principalmente de veículos a diesel (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2016).

## 3 Legislação ambiental

O  $\text{NO}_x$  tem sua emissão pela indústria regulamentada na grande maioria dos países. Os Estados Unidos, por exemplo, têm uma legislação bastante completa e abrangente (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1999).

A legislação brasileira é mais recente e não engloba a totalidade dos combustíveis e processos. As

fontes fixas de combustão que entraram em operação a partir de 02.01.2007 devem obedecer a resolução CONAMA no 382 (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2006) enquanto que para as "antigas" (anteriores a 02.01.2007) vale a CONAMA no 436 (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2011). Por exemplo, para um equipamento industrial novo e no qual não há contato direto dos produtos da combustão com o material ou produto processado (caldeiras e fornos petroquímicos, por exemplo) são fixados limites máximos de emissão (padrões de emissão) em função do seu porte e do combustível utilizado (Tabela 1).

**Tabela 1 – Padrões de emissão de NO<sub>x</sub>.**

Potência térmica nominal (MW)*	NO <sub>x</sub> , como NO <sub>2</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> , base seca)**
<b>Óleo combustível</b>	
Menor que 10	1600
Entre 10 e 70	1000
Maior que 70	1000
<b>Gás natural</b>	
Menor que 70	320
Maior ou igual a 70	200
<b>Bagaço de cana-de-açúcar</b>	
Menor que 10	Não aplicável
Entre 10 e 75	350
Maior que 75	350
<b>Derivados da madeira</b>	
Menor que 10	Não aplicável
Entre 10 e 30	650
Entre 30 e 70	650
Maior que 70	650

\* Obtida pela multiplicação da quantidade de combustível queimado por unidade de tempo (vazão) pelo poder calorífico inferior (PCI) do combustível.

\*\* Óleo e gás natural, referido a 3,0 % de O<sub>2</sub>; bagaço de cana e derivados de madeira, referido a 8,0 % de O<sub>2</sub>.

No Brasil, há estados que impõem padrões de emissão mais restritivos, considerando a localização da fonte ou a qualidade do ar no seu entorno. Outros preferem não estabelecer padrões estaduais, mais exigem que seja implantada a "melhor tecnologia de controle disponível" (BACT - *Best Available Control Technology*).

## 4 Formação de NO<sub>x</sub> em equipamentos de combustão industrial

Os óxidos de nitrogênio formados em equipamentos estacionários de combustão são, basicamente, o NO (óxido nítrico) e, em escala bem menor, o NO<sub>2</sub> (dióxido de nitrogênio); a Agência Ambiental dos Estados Unidos (EPA) considera que, em processos convencionais de combustão, o NO<sub>2</sub> responde por menos de 5 % do total do NO<sub>x</sub> formado (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1997). Em equipamentos muito particulares, outros óxidos podem estar presentes como, por exemplo, o N<sub>2</sub>O (óxido nitroso), formado na combustão em leito fluidizado.

O NO<sub>x</sub> pode se formar na combustão via três mecanismos: térmico (*thermal*), combustível (*fuel*) e imediato (*prompt*), recebendo a denominação "NO<sub>x</sub> térmico", "NO<sub>x</sub> combustível" e "NO<sub>x</sub> imediato", respectivamente (MOLERO, 1998).

### 4.1 NO<sub>x</sub> térmico

O NO<sub>x</sub> se forma no processo de combustão pela reação do nitrogênio do ar com oxigênio. Entre os parâmetros operacionais do processo, a temperatura é a que tem maior influência na sua formação. O NO<sub>x</sub> é formado principalmente em regiões da câmara de combustão onde as temperaturas são superiores a aproximadamente 1370 °C (Figura 1).

### 4.2 NO<sub>x</sub> combustível

O NO<sub>x</sub> se forma no processo de combustão pela reação do nitrogênio do combustível com oxigênio. As maiores taxas de formação de NO<sub>x</sub> são encontradas em regiões da câmara de combustão onde o teor de oxigênio é elevado. A queima de combustíveis com maior teor de nitrogênio tende a formar mais NO<sub>x</sub> (Figura 1).

### 4.3 NO<sub>x</sub> imediato

O NO<sub>x</sub> se forma pela reação do nitrogênio do ar com radicais hidrocarbônicos (CH<sub>2</sub>, CH) formados no processo de combustão. Em processos convencionais que operam com quantidade de ar acima da estequiométrica, a formação de NO<sub>x</sub> imediato não é significativa.

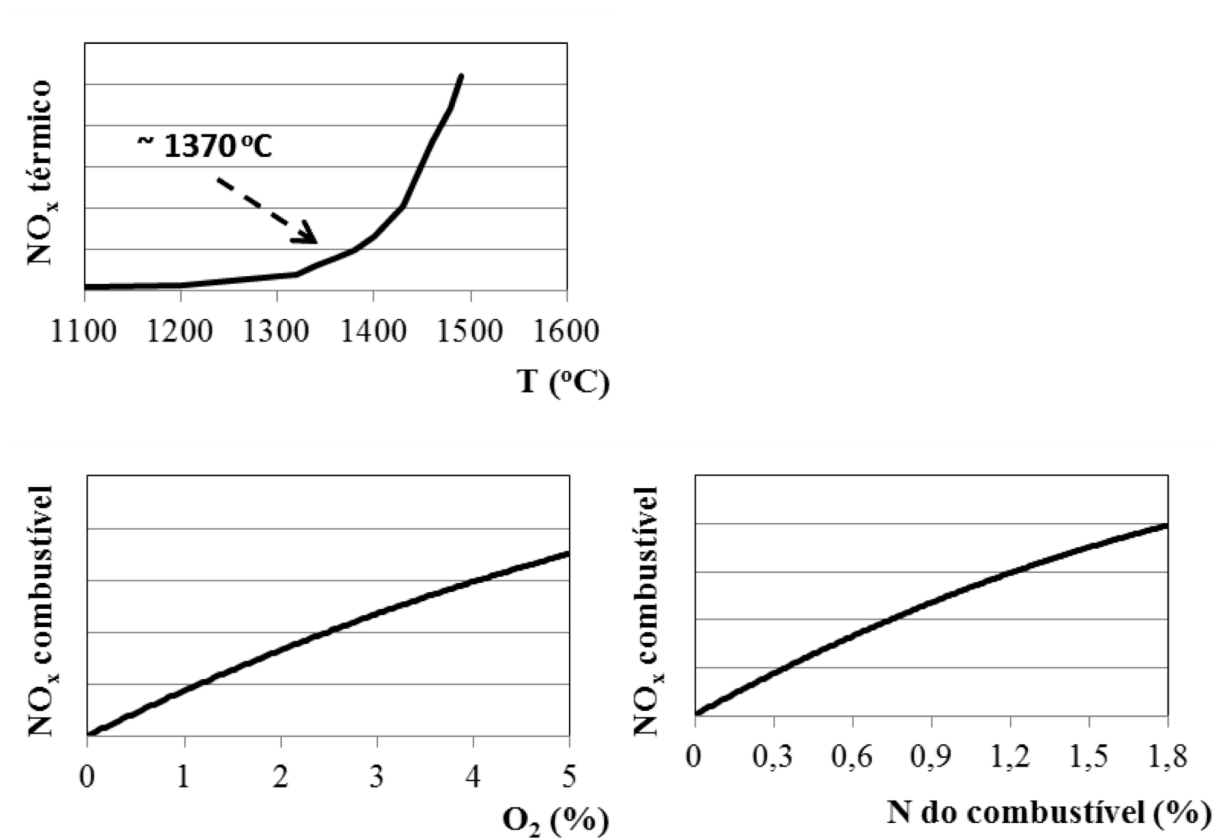


Figura 1 - Influência de parâmetros na formação de NO<sub>x</sub>

## 5 Técnicas de controle das emissões de NO<sub>x</sub>

As técnicas de controle das emissões de NO<sub>x</sub> em processos de combustão industrial se dividem em dois grupos: as aplicadas ao processo e as aplicadas aos gases de combustão. As primeiras costumam ser economicamente mais atraentes (BOZZUTO; MORIARTY, 1994).

A formação de NO<sub>x</sub> no processo pode ser reduzida, basicamente, por: (i) redução dos teores de oxigênio ou nitrogênio nas regiões da câmara de combustão de alta temperatura, ou redução do tempo de residência desses elementos nessas regiões e (ii) redução das temperaturas na câmara de combustão. Isso pode ser feito de várias formas, que vão desde alterações nas variáveis operacionais do processo de combustão, como redução do excesso de ar, redução da potência de operação, recirculação externa dos gases de combustão etc. até modificações substanciais no processo, como estagiamento no fornecimento de ar ou combustível. Essa última é muito efetiva, podendo reduzir as emissões de NO<sub>x</sub> em até 70 % e são largamente empregadas em equipamentos de combustão instalados na Europa e Estados Unidos. A tecnologia de estagiamento é ilustrada nos desenhos da

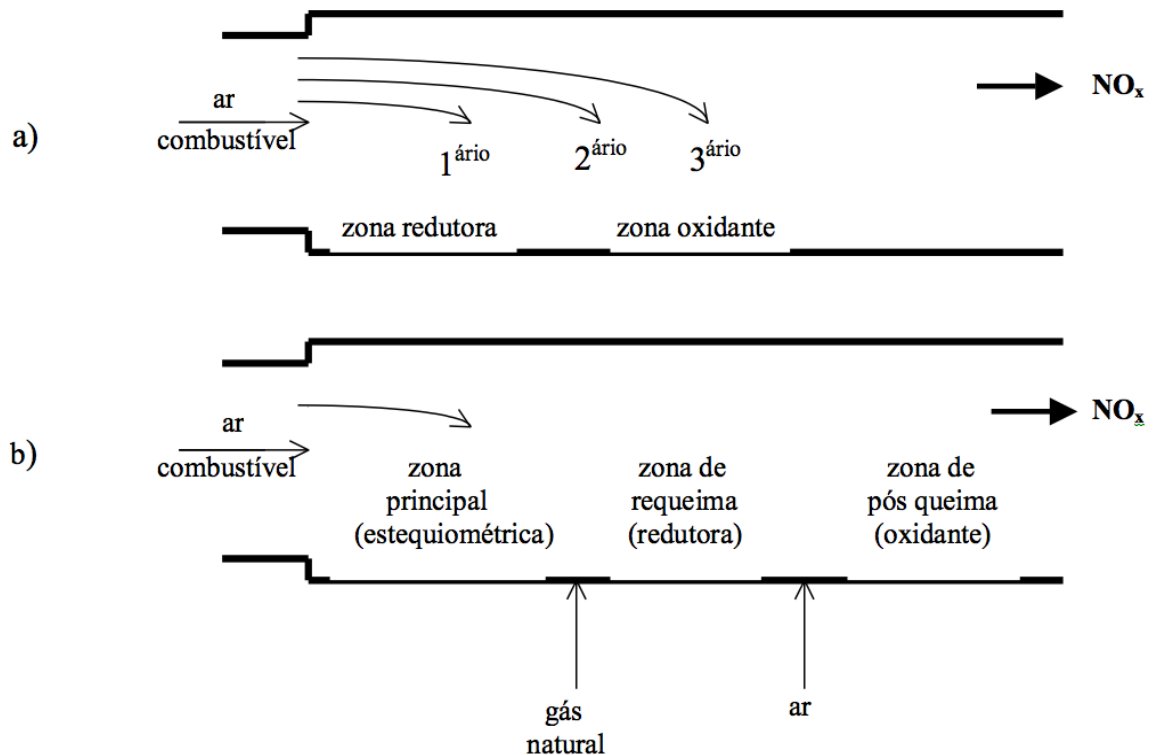


Figura 2 - Estagiamento no fornecimento de ar (a) e de combustível (b).

## 5.1 Estagiamento do ar de combustão

O estagiamento do ar de combustão é feito, em geral, por meio da substituição, ou modificação, do queimador convencional por outro especialmente projetado para o fornecimento de ar primário, secundário e, às vezes, terciário ao processo, de forma a se obter chamas constituídas de regiões com diferentes estequiometrias. Numa primeira região, próxima ao bocal do queimador, uma condição redutora permitirá que boa parte do nitrogênio presente no combustível seja convertida preferencialmente a nitrogênio molecular, e não a  $\text{NO}_x$ . Nas demais regiões, o aporte controlado de ar permitirá a oxidação completa dos demais elementos do combustível. Essa técnica visa, além da redução do  $\text{NO}_x$  formado devido à presença de nitrogênio no combustível ( $\text{NO}_x$  combustível), a diminuição da fração do nitrogênio do ar que se converte a  $\text{NO}_x$  ( $\text{NO}_x$  térmico), pois leva a temperaturas menores e mais uniformes ao longo da chama. Tais queimadores são os chamados *Low  $\text{NO}_x$  burners*.

## 5.2 Estagiamento do combustível

O estagiamento do combustível é feito, em geral, por meio do fornecimento de pequena parte do combustível numa região à frente da zona principal de combustão. Tal artifício visa basicamente

reduzir a emissão de  $\text{NO}_x$  pela sua conversão a nitrogênio molecular quando da sua passagem pela região onde a parcela minoritária de combustível é injetada. A imposição a essa região de uma condição redutora favorecerá as reações do  $\text{NO}_x$  presente com radicais hidrocarbônicos do combustível, resultando em sua conversão a nitrogênio molecular. A aplicação dessa técnica, conhecida como requeima (*reburning*), exige ainda o fornecimento de ar suplementar ao processo, ao final da câmara de combustão, objetivando a oxidação completa do combustível. Independente do combustível utilizado na zona principal, gás natural é o combustível comumente injetado à frente da zona principal.

## 6 Atuação do IPT

### 6.1 Investigação da emissão de $\text{NO}_x$ em chamas oxicomustíveis

Um dos primeiros trabalhos realizados pelo IPT envolvendo a emissão de  $\text{NO}_x$  foi financiado pela empresa White Martins e constou de um conjunto de experimentos na fornalha de testes do LET operando com óleo combustível e oxigênio puro como comburente. Foram estudadas as influências de parâmetros construtivos e operacionais de queimadores oxicomustíveis nas taxas de formação de  $\text{NO}_x$ , que tendem a ser elevadas em razão das elevadas temperaturas e teores de oxigênio reinantes na câmara de combustão.

O trabalho, apresentado num encontro nacional de ciências térmicas, mostrou que a posição relativa dos jatos de oxigênio e do *spray* central de combustível, a natureza do fluido de nebulização, a relação mássica fluido de nebulização/combustível, a estequiometria global do processo e a taxa volumétrica de combustão influem fortemente nas taxas de emissão de  $\text{NO}_x$  (SOUSA; MESSIAS; VERGNHANINI FILHO; KOBAYASHI, 1994).

### 6.2 Desenvolvimento de técnicas de redução de $\text{NO}_x$ aplicadas à queima de óleo combustível

O trabalho de P&D mais relevante realizado pelo IPT no tema foi financiado pela Petrobras e envolveu a redução na emissão de  $\text{NO}_x$  na queima de óleo combustível. O objetivo do trabalho foi verificar se as técnicas de estagiamento que vinham sendo empregadas em equipamentos de combustão instalados em países industrializados poderiam ser aplicadas aos óleos combustíveis nacionais, que têm tipicamente viscosidade e teor de nitrogênio muito elevados (GARCIA, 2013; LAGEMANN, 2016).

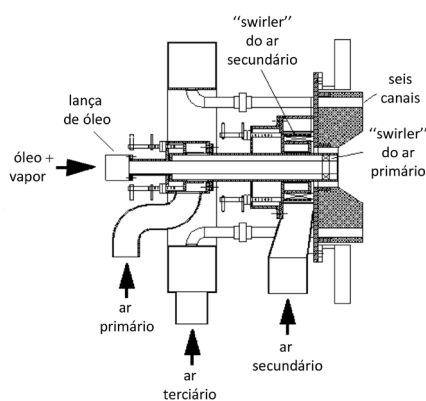
O trabalho envolveu o projeto, construção e ensaio na fornalha de testes do IPT de sistemas de injeção de gás natural e ar suplementar - requeima (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1996) (**Figura 3**) e de queimador de baixa emissão de  $\text{NO}_x$  (BEÉR, 1995) (**Figura 4**). Envolveu, também, a construção de um modelo cinético de predição da eficiência da requeima quanto à redução das emissões de  $\text{NO}_x$  (KILPINEN; GLARBORG; HUPA, 1992).

óleo combustível  
ar principal  
vapor de nebulização



gás natural  
ar suplementar

Figura 3 - Fornalha de testes do IPT com sistema de requeima instalado.



ar terciário  
ar secundário  
ar primário  
óleo combustível  
vapor de nebulização

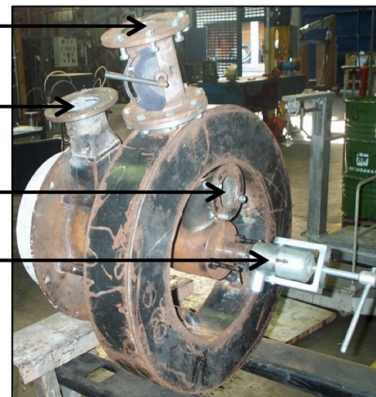


Figura 4 - Queimador de baixa emissão de  $NO_x$  desenvolvido pelo IPT.

Os ensaios realizados com a fornalha operando com óleo combustível tipo 4A mostraram que tanto a aplicação da tecnologia de requeima como o uso do queimador *Low NO<sub>x</sub>* são eficientes na redução das emissões de  $NO_x$ .

O emprego da técnica de requeima apresentou eficiência crescente na redução das emissões de  $NO_x$  (63 % a 71 %) com a quantidade empregada de gás natural (13 % a 17 % da potência fornecida) e não levou ao aumento na emissão de produtos incompletos da combustão - hidrocarbonetos voláteis, CO e material particulado. Quando se aplicou a requeima, foi verificado aumento no tamanho médio do MP presente nos gases de combustão (de 0,6  $\mu m$  a 1,5  $\mu m$  para 20  $\mu m$  a 50  $\mu m$ ). O modelo cinético construído, constituído de 347 reações e 358 espécies químicas, foi validado com dados da literatura. Sua aplicação aos dados reais mostrou que ele não consegue simular adequadamente o processo, sendo necessário acoplar um modelo de mistura.

O emprego do queimador *Low NO<sub>x</sub>*, fornecendo ar primário, secundário e terciário ao processo nas proporções de 19 %, 19 % e 62 %, respectivamente, reduziu as emissões de  $NO_x$  de 47 % em

relação à combustão convencional (ar primário e secundário nas proporções de 25 % e 75 %, respectivamente), porém levou ao aumento da concentração de MP dos gases de combustão de 64 mg/Nm<sup>3</sup> 0 % O<sub>2</sub> para 166 mg/Nm<sup>3</sup> 0 % O<sub>2</sub>.

O emprego simultâneo das técnicas de requeima (16 % da potência liberada via gás natural) e do queimador *Low NO<sub>x</sub>* (vazões de ar primário, secundário e terciário de 19 %, 19 % e 62 % do ar total, respectivamente) reduziu as emissões de NO<sub>x</sub> de 80 % em relação à combustão convencional, porém levou ao aumento na concentração de MP de 64 mg/Nm<sup>3</sup> 0 % O<sub>2</sub> para 224 mg/Nm<sup>3</sup> 0 % O<sub>2</sub>.

Os resultados satisfatórios obtidos permitiram sua divulgação nos meios nacional e internacional de maior relevância da área de engenharia térmica/combustão (VERGNHANINI FILHO; SOUSA; MARQUES; BERTRAN; SERFATY, 2003a; VERGNHANINI FILHO; SOUSA; MARQUES; BERTRAN; SERFATY, 2003b; BERTRAN; MARQUES; VERGNHANINI FILHO, 2004).

### 6.3 Prestação de serviços à indústria

A equipe do LET tem ido regularmente às indústrias com sua unidade móvel (VERGNHANINI FILHO; ANDRADE; BRITO, 2013) equipada com instrumentação adequada para a medição de variáveis do processo de combustão (**Figura 5**), em particular com analisador contínuo de óxidos de nitrogênio que opera pelo princípio da quimiluminescência. Feito o monitoramento, são elaboradas recomendações de medidas que levem à redução das emissões de NO<sub>x</sub>. Quando implantadas as medidas, é usual a realização de um novo monitoramento para a verificação de sua eficácia e a implementação de ajustes e correções.



Figura 5 – Unidade móvel do IPT.

Exemplo desse tipo de trabalho ocorreu numa empresa baiana da área de mineração (VERGNHANINI FILHO, 2010). A coloração castanha avermelhada dos gases lançados na atmosfera pelos fornos de sinterização da empresa (os denominados *Shaft Kiln*) foi atribuída pelo IPT, após intenso conjunto de medições, à elevada concentração de NO<sub>x</sub> dos gases. A região de combustão dos fornos *Shaft* reúne condições favoráveis à formação de NO<sub>x</sub>, seja pelas elevadas temperaturas, que são necessárias

para a sinterização do minério, seja pelas elevadas vazões de ar introduzidas, que são necessárias para a adequada combustão do óleo e para o resfriamento do minério após a sua sinterização. Para a resolução do problema, entre as várias medidas discutidas com o IPT, a empresa optou pela instalação de sistema de injeção de água nas regiões do forno de maior temperatura. Seguiu-se à instalação a realização pelo IPT de novo monitoramento. Foram praticadas diferentes condições operacionais do sistema, constatando-se uma redução de 45 % na quantidade de NO<sub>x</sub> formada na condição mais favorável.

Outro exemplo recente foi a realização de um levantamento dos teores de NO<sub>x</sub> dos gases nas chaminés e no interior dos fornos de pelotização de uma siderúrgica situada no litoral do Espírito Santo (VERGNHANINI FILHO, 2012). As elevadas concentrações de NO<sub>x</sub> dos gases levou a empresa a substituir um dos queimadores de gás natural (GN) de um de seus fornos por um queimador *Low NO<sub>x</sub>*. O queimador, tendo várias entradas de combustível (GN radial, GN primário e GN secundário) e de ar de combustão (ar radial e ar primário ou ar principal), foi ajustado de forma a proporcionar zonas de queima com temperaturas e concentrações de oxigênio menores e mais uniformes do que as obtidas pelo queimador original, levando à menor formação de NO<sub>x</sub>. Para verificar a eficácia da medida, o IPT foi novamente chamado. Constatou-se que a medida levou à redução significativa do teor de NO<sub>x</sub> dos gases na região do forno de influência desse queimador. O percentual exato de redução não foi possível determinar, seja devido à configuração do forno, em que as zonas de combustão geradas por cada queimador recebem gases de zonas vizinhas, seja pelo fato das temperaturas internas do forno nos pontos de medição não terem sido constantes.

Uma empresa distribuidora de gás combustível foi, também, atendida pelo IPT num extenso trabalho que envolveu, entre outras atividades, o levantamento das emissões de NO<sub>x</sub> por empresas situadas nas regiões metropolitanas de São Paulo e Campinas (VERGNHANINI FILHO, 2014). As medições em cada empresa foram seguidas de um seminário no qual eram apresentados e debatidos os resultados obtidos e as estratégias de redução das emissões, desde as de custo zero e aplicação imediata, como modificações nos procedimentos operacionais do equipamento até medidas de médio prazo, envolvendo troca e aquisição de equipamentos e instrumentos.

## 6.4 Disseminação de conhecimento

A difusão do conhecimento que vem sendo adquirido pela equipe do LET tem sido feita por meio da publicação de artigos, da participação em eventos e, principalmente, da apresentação do tema no curso "Combustão Industrial", que vem sendo ministrado regularmente pelo IPT desde 1986 nas modalidades aberta e *in-company* (VERGNHANINI FILHO, 1986).

## 7 Referências

BEÉR, J. M. Low NO<sub>x</sub> burners for boilers, furnaces and gas turbines; drive towards the lower bounds of NO<sub>x</sub> emissions. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMBUSTION TECHNOLOGIES FOR A CLEAN ENVIRONMENT, 3., Lisbon, 1995. Proceedings... Boca Raton: CRC Press, 1995.

BERTRAN, C. A.; MARQUES, C. S. T.; VERGNHANINI FILHO, R. Reburning and burnout simulations of natural gas for heavy oil combustion. **Fuel**, v. 83, n. 1, p. 109-121, Jan. 2004.

BOZZUTO, C. R.; MORIARTY, R. J. Overview of current NO<sub>x</sub> control technologies. *Energy Engineering*, v. 91, n. 4, p. 6-46, 1994.

CARVALHO JUNIOR, J. A.; LACAVALA, P. T. **Emissões em processos de combustão**. São Paulo: UNESP, 2003. 135 p.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Qualidade do ar no Estado de São Paulo 2015**. São Paulo: CETESB, 2016. (Série Relatórios).

GARCIA, R. **Combustíveis e combustão industrial**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2013. 340 p.

KILPINEN, P.; GLARBORG, P.; HUPA, M. Reburning chemistry: a kinetic modeling study. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 31, n. 6, p. 1477-1490, 1992.

LAGEMANN, V. **Combustão em caldeiras industriais**. Rio de Janeiro: Interciência, 2016. 281 p.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 382, de 26 de dezembro de 2006. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. *Diário Oficial da União, Brasília*, 2 jan. 2007. p. 131.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 436, de 22 de dezembro de 2011. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas instaladas ou com pedido de licença de instalação anteriores a 02 de janeiro de 2007. *Diário Oficial da União, Brasília*, 26 dez. 2011.

MOLERO, L. J. Pollutant formation and interactions in the combustion of heavy liquid fuels. 1998. 258 f. Thesis (Doctor of Philosophy) - Department of Chemical Engineering, University of London, London, 1998.

SCHNEIDER, T.; GRANT, L. Air pollution by nitrogen oxides. Amsterdam: Elsevier, 1982. 1093 p. (Studies in Environmental Science 21).

SOUSA, F. D. A.; MESSIAS, L. S.; VERGNHANINI FILHO, R.; KOBAYASHI, W. T. Emissão de óxidos de nitrogênio em chamas oxi-combustíveis. In: ENCONTRO NACIONAL DE CIÊNCIAS TÉRMICAS, 5., / SIMPÓSIO DE ENGENHARIA TÉRMICA, 2., 1994, São Paulo. Anais... Rio de Janeiro: ABCM, 1994.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Control of NO<sub>x</sub> emissions by reburning. Washington: EPA, 1996. (EPA/625/R-96/001).

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. External combustion sources. volume 1: stationary point and area sources. In: AP-42, Compilation of air pollutant emission factors. 5th ed. Washington: EPA, 1997. v. 1, cap. 1.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Part 60 - Standards of performance for new stationary sources. The Code of Federal Regulations (CFR), Title 40 - Protection of Environmental, Chapter I - Environmental Protection Agency, Subchapter C - Air Programs. Washington: EPA, 1999. Disponível em: <[http://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?tpl=/ecfrbrowse/Title40/40cfr60\\_main\\_02.tpl](http://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?tpl=/ecfrbrowse/Title40/40cfr60_main_02.tpl)>. Acesso em: 13 maio 2016.

VERGNHANINI FILHO, R. Formação de poluentes em processos industriais de combustão: óxidos de nitrogênio. São Paulo: IPT, 1986, 28 p. (Apostila do Curso Combustão Industrial).

VERGNHANINI FILHO, R., Conservação de energia: IPT avalia rendimento térmico e emissões atmosféricas de caldeiras e aquecedores de fluido térmico. **IPT Notícias**, São Paulo, 08 maio 2014. Disponível em: <[www.ipt.br/noticia/814.htm](http://www.ipt.br/noticia/814.htm)>. Acesso em: 5 jun. 2016.

VERGNHANINI FILHO, R., Emissão atmosférica: equipe do IPT investiga emissão de poluentes em fornos de pelletização de minério de ferro no Espírito Santo. **IPT Notícias**, São Paulo, 05 jun. 2012. Disponível em: <[www.ipt.br/noticia/519.htm](http://www.ipt.br/noticia/519.htm)>. Acesso em: 5 jun. 2016.

VERGNHANINI FILHO, R., Emissões industriais: grupo do IPT realiza medição de poluentes para subsidiar projetos de redução de impacto ambiental. **IPT Notícias**, São Paulo, 30 ago. 2010. Disponível em: <[www.ipt.br/noticia/210.htm](http://www.ipt.br/noticia/210.htm)>. Acesso em: 10 maio 2016.

VERGNHANINI FILHO, R.; SOUSA, F. D. A.; MARQUES, C. S. T.; BERTRAN, C. A.; SERFATY, R. NO<sub>x</sub> abatement from oil combustion - reburning and Low NO<sub>x</sub> burner. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENERGY FOR A CLEAN ENVIRONMENT, 7., 2003, Lisbon. **Proceedings...** Lisboa: Instituto Superior Tecnico, 2003a.

VERGNHANINI FILHO, R., SOUSA, F. D. A.; MARQUES, C. S. T.; BERTRAN, C.A.; SERFATY, R. NO<sub>x</sub> abatement from oil combustion - reburning and Low NO<sub>x</sub> burner. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 17., 2003, São Paulo. **Proceedings...** Rio de Janeiro: ABCM, 2003b.

VERGNHANINI FILHO, R.; ANDRADE, L. A.; BRITO, H. B. Unidade móvel para avaliação do consumo de energia e da emissão de poluentes atmosféricos de equipamentos industriais de combustão. In: SEMINÁRIO DE BALANÇOS ENERGÉTICOS GLOBAIS E UTILIDADES, 34., / ENCONTRO DE PRODUTORES E CONSUMIDORES DE GASES INDUSTRIAIS, 28., 2013, Vitória. Anais... São Paulo: ABM, 2013.