

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM SANEAMENTO E MEIO
AMBIENTE**

**ESTUDO DAS EMISSÕES DE NO_x NA QUEIMA
DE GÁS NATURAL E DOS SISTEMAS DE
TRATAMENTO - SCR E SNCR**

Luciana Figueiredo de Castro

Belo Horizonte

2011

Luciana Figueiredo de Castro

**ESTUDO DAS EMISSÕES DE NO_x NA QUEIMA DE
GÁS NATURAL E DOS SISTEMAS DE TRATAMENTO
- SCR E SNCR**

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Saneamento e Meio Ambiente da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Saneamento e Meio Ambiente.

Área de concentração: Controle Ambiental na Indústria

Orientador: Wilfrid Keller Schwabe

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG

2011

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que me apoiaram e que direta ou indiretamente contribuíram para a conclusão deste trabalho.

Em especial, agradeço ao professor Wilfrid Keller, pela atenção, apoio e sugestões de melhorias.

Aos meus colegas da empresa SETE Soluções e Tecnologia Ambiental, que me incentivaram à ingressar no curso de pós graduação.

À Isabela, minha querida irmã, à Elaine, minha colega da SETE e à Raquel, minha colega de curso, que revisaram o trabalho e contribuíram para sua conclusão.

E finalmente, ao Luiz Davi, meu querido esposo, que me apoiou diariamente sendo meu principal alicerce, me ajudando a acreditar, sempre.

RESUMO

Os problemas ambientais associados ao uso de combustíveis fósseis são cada vez mais evidentes e, nesse contexto, o gás natural tem-se destacado como uma opção promissora, devido, principalmente, às reduzidas taxas de emissão de poluentes atmosféricos. Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica relacionada ao panorama da utilização de gás natural como combustível alternativo por indústrias e como fonte de geração de energia em termoelétricas no Brasil. Para tanto, foram abordadas as questões ambientais envolvidas nos processos, sobretudo as emissões atmosféricas de NO_x – poluente mais representativo – e as tecnologias dos sistemas de tratamento desse poluente: Redução Seletiva Catalítica (SCR) e Redução Seletiva Não Catalítica (SNCR). Apesar de ser considerado um combustível limpo, a queima do gás natural emite quantidades de NO_x superiores às geradas na queima de outros combustíveis como o carvão, por exemplo. Esses óxidos são um dos precursores da formação do ozônio, poluente que, em determinadas concentrações na troposfera, pode causar danos à saúde humana. Conclui-se, portanto, que se faz necessária a avaliação da necessidade de instalação de sistemas de controle para minimizar a emissão dos NO_x , mesmo quando o combustível utilizado seja o gás natural.

Palavras-chave: Gás natural, NO_x , ozônio, sistemas de tratamento de emissões atmosféricas.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	IV
LISTA DE TABELAS.....	V
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	VI
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	2
2.1 OBJETIVO GERAL	2
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
3 METODOLOGIA.....	3
4 REVISÃO BILIOGRÁFICA	4
4.1 GÁS NATURAL.....	4
4.1.1 <i>Panorama do gás natural no Brasil</i>	4
4.1.2 <i>Emissões atmosféricas</i>	6
4.2 ÓXIDOS DE NITROGÊNIO.....	7
4.2.1 <i>Fontes de emissão</i>	7
4.2.2 <i>Formação de NO_x durante a combustão</i>	8
4.2.3 <i>Formação do ozônio troposférico</i>	9
4.2.4 <i>Legislação ambiental aplicável</i>	12
4.3 TRATAMENTO DAS EMISSÕES DE NO _x EM FONTES ESTACIONÁRIAS	14
4.3.1 <i>Redução Seletiva Catalítica (SCR)</i>	15
4.3.2 <i>Redução Seletiva Não Catalítica (SNCR)</i>	17
5 CONCLUSÕES.....	20
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	21

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 4.1. CONSUMO DO GÁS NATURAL NO BRASIL: 2005-2030	5
FIGURA 4.2. FONTES GLOBAIS DE EMISSÕES ANTROPOGÊNICAS DE NO _x	8
FIGURA 4.3: CICLO DO OZÔNIO	10
FIGURA 4.4: ESQUEMA DO CICLO FOTOLÍTICO DO DIÓXIDO DE	11
NITROGÊNIO E A FORMAÇÃO DO OZÔNIO.....	11
FIGURA 4.5: DESENHO ESQUEMÁTICO DO TRATAMENTO SCR	16
FIGURA 4.6: DESENHO ESQUEMÁTICO DO TRATAMENTO SNCR.....	18

LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1. EMISSÕES DE POLUENTES DE COMBUSTÍVEIS (kg/10 ⁷ CAL).....	6
TABELA 4.2. LIMITES DE EMISSÃO DE NO _x – ATIVIDADES DE GERAÇÃO DE CALOR E ENERGIA ELÉTRICA (mg/Nm ³).....	12
TABELA 4.3. LIMITES DE EMISSÃO DE NO _x – ATIVIDADES DIVERSAS (mg/Nm ³)	13
TABELA 4.4. PADRÕES DE QUALIDADE DO AR – NO ₂ E O ₃ (µg/m ³)	14
TABELA 4.5. PRINCIPAIS TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE NO _x	14
TABELA 4.6. EFICIÊNCIA DOS SISTEMAS DE TRATAMENTO DE NO _x	15
TABELA 4.7. COMPARAÇÃO ENTRE OS SISTEMAS DE TRATAMENTO SCR E SNCR	19

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional do Petróleo
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
JCR-Web	Journal Citation Reports on the Web
MME	Ministério de Minas e Energia
LNB	Low NOx burners
PPM	Parte por milhão
SCR	Redução Seletiva Catalítica
SNCR	Redução Seletiva Não Catalítica
UV	Radiação Ultra Violeta

1 INTRODUÇÃO

A utilização do gás natural como alternativa de combustível tem aumentado nos últimos anos, principalmente devido aos investimentos governamentais no setor e às descobertas de reservas no território nacional (ANP, 2010).

Os problemas ambientais associados ao uso de combustíveis fósseis são cada vez mais evidentes e, dentro desse contexto, o gás natural tem-se destacado como uma opção promissora, devido principalmente às reduzidas taxas de emissão de poluentes atmosféricos. No setor energético, por exemplo, esse aumento no consumo tende a permanecer pois o risco hidrológico reduz-se através da operação das usinas térmicas para geração de eletricidade (TURDERA, 2006).

Entretanto, verifica-se que a queima do gás natural, apesar de gerar reduzidas taxas de emissão de material particulado, SO_x (óxidos de enxofre) e CO (monóxido de carbono), dependendo das condições operacionais e da composição do gás, pode gerar emissões de NO_x (óxidos de nitrogênio) ainda maiores que as emissões geradas na queima de carvão (PINHEIRO, 1996). Os NO_x podem causar danos à saúde humana, além de serem precursores da formação do O_3 (ozônio) na troposfera.

O O_3 na estratosfera é produzido seguindo a fotólise do oxigênio molecular e a sua camada opera como uma barreira protetora de raios UV. Já na troposfera, o O_3 é um poluente secundário, formado a partir de reações entre NO_x e VOC_s (Compostos Orgânicos Voláteis) na presença de luz solar e, em determinadas concentrações, pode causar danos à saúde humana (ROYAL, 2008).

O objetivo deste trabalho é apresentar uma revisão bibliográfica sobre o panorama da utilização do gás natural no Brasil, bem como sobre as emissões de NO_x por fontes estacionárias que utilizam esse combustível, destacando-se os sistemas de tratamento SCR (Redução Catalítica Seletiva) e SNCR (Redução Seletiva Não Catalítica) como alternativas de controle das taxas de emissão de NO_x , representando, assim, uma forma de redução de O_3 na troposfera.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Apresentar uma revisão bibliográfica relacionada à implantação de tecnologias de pós-tratamento de NO_x durante a queima do gás natural nos setores energético e industrial brasileiros.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar o cenário atual de consumo de gás natural em atividades industriais e energéticas no Brasil e as principais questões ambientais envolvidas, com foco nas emissões atmosféricas de NO_x ;
- Apresentar as consequências das interações entre as concentrações de NO_x e O_3 na atmosfera e os possíveis riscos à qualidade do ar e à saúde humana;
- Apresentar os conceitos das tecnologias de pós-tratamento de NO_x para fontes estacionárias: SCR e SNCR.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho foi realizado a partir de uma revisão bibliográfica baseado em estudos de artigos, desdobrando-se em consultas a dissertações, teses, livros e outras publicações acessíveis em bibliotecas virtuais e/ou físicas, enfim, a produções científicas sobre o tema.

A seleção dos artigos foi baseada nos fatores de impacto estabelecidos pela *Journal Citation Reports on the Web (JCR-Web)*, priorizando as revistas com o fator acima de 1 (um). Esse fator é calculado através da divisão entre o número de citações nos dois anos anteriores ao ano corrente e o número de artigos publicados nos dois anos antecedentes.

A seleção de teses, dissertações e livros também foi baseada, preferencialmente, na presença destes nas referências bibliográficas de artigos selecionados.

A sequência das informações apresentadas nesse estudo inicia-se com o item “Gás natural”, objetivando introduzir em linhas gerais o cenário atual e futuro do consumo do gás natural no Brasil, enfatizando o papel das termoeletricas e das indústrias, e as principais implicações ambientais.

Em seguida, visando a discutir um dos principais poluentes gerados pela queima do gás natural, aparece o item “Óxidos de nitrogênio”. Nesse item, apresenta-se a definição desse poluente, bem como a descrição da sua geração durante o processo de combustão. São apresentadas, ainda, as implicações ambientais decorrentes da geração dos NO_x , descrevendo as interações desses óxidos na atmosfera, com ênfase nas reações fotoquímicas e a consequente geração do ozônio. O último tema abordado nesse item são os requisitos legais a serem atendidos, tanto para as emissões, quanto para o atendimento dos níveis de qualidade do ar.

Por fim, o trabalho apresenta os possíveis tratamentos disponíveis para controle das emissões de óxidos de nitrogênio em fontes estacionárias. A ênfase é atribuída aos métodos pós-combustão, descrevendo-se então as tecnologias SCR e SNCR.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Gás natural

O gás natural é um combustível fóssil não renovável constituído por uma mistura de hidrocarbonetos e encontrado na crosta terrestre. Para a sua distribuição e venda, o gás bruto passa por um processo em que são removidos os hidrocarbonetos líquidos e impurezas como o sulfeto de hidrogênio (H_2S), dióxido de carbono (CO_2) e água (H_2O). O gás residual representa uma mistura de metano (CH_4), etano (C_2H_6) e propano (C_3H_8) (TUSSING, 1995) e a proporção dos seus constituintes pode variar, dependendo de sua origem (RANGEL; BUCHLER, 2005).

4.1.1 Panorama do gás natural no Brasil

A indústria de gás natural no Brasil iniciou suas atividades na década de 1940 com a descoberta de óleo e gás na Bahia, entretanto foi na década de 1980 que se pôde verificar um aumento representativo da sua participação na matriz energética nacional, tendo em vista a descoberta da Bacia de Campos localizada entre as costas do Rio de Janeiro e do Espírito Santo (MORAES, 1989).

A introdução do gás natural na matriz energética brasileira como um gás competitivo o suficiente para ocasionar a substituição do óleo combustível, carvão mineral, biomassa e energia elétrica, só poderia ser concretizada se fossem concedidos incentivos por parte do governo (ANP, 2010).

Na década de 1990, o governo brasileiro formalizou a meta para aumentar a participação do gás natural, visando a atenuar a dependência do país em relação às hidrelétricas, dando início à construção do gasoduto Brasil-Bolívia. Em 1999, iniciou-se a operação desse empreendimento com capacidade de transportar 30 milhões de m^3 /dia de gás, tornando-se um fator de consolidação para a indústria de gás natural no país (CORTES, 2010).

Com objetivo de garantir uma melhor gestão política das questões que envolvem o mercado do gás natural, em 4 de março de 2009, foi publicada a Lei nº 11.909 (Lei do Gás), que regulamentou as atividades de transporte, tratamento, processamento, estocagem, liquefação e comercialização do gás natural no Brasil, representando um importante ponto de partida, ainda que de forma superficial, para o setor de gás no Brasil (FARIA, 2010).

Com o auxílio dessas medidas, o gás natural vem sendo utilizado na diversificação da matriz energética brasileira, principalmente para a geração da eletricidade e para o uso no setor industrial (CORTES, 2010). A Figura 4.1, a seguir, apresenta a distribuição dos principais setores de consumo do gás natural no Brasil no ano de 2005 e previsão para o ano de 2030.

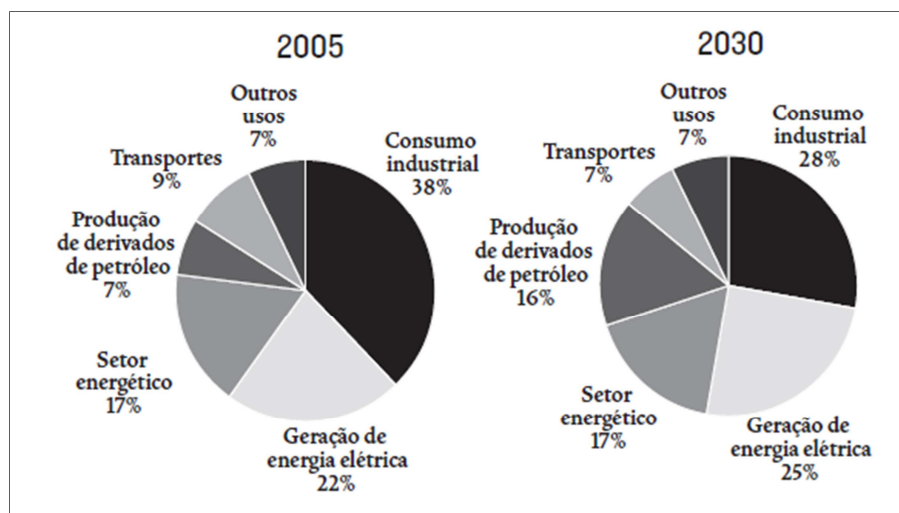


FIGURA 4.1. Consumo do gás natural no Brasil: 2005-2030

Fonte: TOMALSQUIM *et al.*, 2007.

Conforme pode ser verificado na Figura 4.1, cerca de 50% de todo o gás natural produzido é consumido apenas pelos setores de geração de energia elétrica e industrial, sendo o último o principal consumidor.

A Figura 4.1 mostra ainda que o consumo do gás natural pelas indústrias tende a diminuir no ano de 2030, mas Montes (2000) considera que essa participação irá aumentar.

A hidroeletricidade ainda representa cerca de 75% da oferta de energia elétrica no país, mas a maior parte do potencial hídrico remanescente encontra-se na região da Amazônia, onde os impactos ambientais são de alta relevância (PEREIRA, 2011). Além desse entrave, destaca-se a vulnerabilidade desse tipo de fonte, pois pode haver déficit na geração de energia nos períodos de estiagem (TURDERA, 2006). Nesse contexto, a busca por fontes alternativas e com baixo potencial poluidor se faz necessária, sendo que uma das mais promissoras é a utilização de termoeletricas a gás natural e conjugadas (gás + vapor) (SALOMON, 2003).

De acordo com dados divulgados pelo Ministério de Minas e Energia (MME, 2008), a participação do gás natural na matriz energética nacional elevou de 2% para 9% nos últimos anos e apresenta uma tendência de crescimento, podendo alcançar 15% nos próximos 20 anos.

As reservas comprovadas do gás natural no Brasil são da ordem de 230 bilhões de m³, dos quais 48% estão localizadas no estado do Rio de Janeiro, 20% no Amazonas, 9,6% na Bahia e 8% no Rio Grande Norte (ANP, 2010). A previsão de crescimento no consumo de gás natural no Brasil para 2030 será de 250 milhões de m³/dia, ou seja, cerca de 180% a mais do que o consumo atual de 90 milhões de m³/dia (FARIA, 2010).

4.1.2 Emissões atmosféricas

A queima de combustíveis fósseis representa uma fonte de poluição atmosférica. A Tabela 4.1, abaixo, apresenta uma comparação entre as taxas de emissão de poluentes a partir da utilização dos combustíveis gás natural, carvão e óleo, considerando a mesma quantidade de calor gerada por quilograma (Kg) de combustível consumido.

TABELA 4.1. Emissões de poluentes de combustíveis (kg/10⁷ cal)

Poluentes atmosféricos	Combustíveis fósseis		
	Gás natural	Óleo	Carvão
SO _x	0,007	20,0	29,2
Material Particulado	0,2	1,8	100
CO	0,3	0,7	1,5
NO _x	3,3	8,2	1,5

Fonte: PINHEIRO, 1996 (adaptado).

Conforme pode ser verificado na Tabela 4.1, a queima do gás natural, quando comparada com a queima dos demais combustíveis fósseis, apresenta uma redução na emissão de óxidos de enxofre (SO_x), material particulado e monóxido de carbono (CO), sendo a redução deste menos significativa.

De acordo com EPA (2007), uma das principais vantagens de se utilizar o gás natural em detrimento de outros combustíveis, como o carvão e óleo diesel, é a “limpeza” dos gases de combustão traduzida por teores mais reduzidos de SO_x, CO, NO_x e particulados.

Entretanto, de acordo com a Tabela 4.1, com relação às emissões de óxidos de nitrogênio, verifica-se que a queima de gás natural gera taxas superiores ($3,3\text{kg}/10^7\text{cal}$) quando comparadas às taxas geradas pela queima do carvão ($1,5\text{kg}/10^7\text{cal}$). Além disso, dentre os poluentes gerados pela queima do gás natural, os óxidos de nitrogênio são os mais representativos.

Dessa forma, apesar de diversos estudos considerarem o gás natural como uma opção ambientalmente viável (MORAES, 1989; VIEIRA *et al.* 2005; ANEEL, [200-]; EPA, 2007), deve-se levar em consideração as taxas de emissão dos óxidos de nitrogênio para avaliar a necessidade de medidas controle.

4.2 Óxidos de nitrogênio (NO_x)

A atmosfera, quando não poluída, é composta por 78% de nitrogênio (N_2). De acordo com Nevers (2000), a maior parte desse gás é inerte, apesar de formar oito diferentes óxidos. Os principais tipos relacionados à poluição atmosférica são o óxido nítrico (NO), um gás incolor pouco solúvel em água, e o dióxido de nitrogênio (NO_2), um gás de coloração marrom e odor característico (JACOBSON, 2002). Esses dois óxidos são denominados NO_x e são um dos precursores da formação do ozônio troposférico, e se relacionam, ainda, ao *smog* fotoquímico e à chuva ácida.

O óxido nitroso (N_2O) também é um poluente atmosférico por interferir no efeito estufa, porém, como cerca de 90% das emissões desse gás são decorrentes de atividades agropecuárias (JUNIOR, 2010), esse óxido não será tratado nesse estudo.

4.2.1 Fontes de emissão

As principais fontes de emissão de NO_x são antropogênicas (estacionárias e móveis), representadas pela queima de combustível e biomassa e naturais, como relâmpagos, atividades vulcânicas e microbianas no solo, oxidação da amônia e processos biológicos nos oceanos (SIGNORETTI, 2008).

Em 2004, conforme citado por Cònsul *et al.* (2004), 80% das emissões globais de NO_x foram provenientes de fontes antropogênicas. Entre 1970 e 1986, verificou-se um aumento de 18,1 Tg/ano para 24,3 Tg/ano (SEINFELD; PANDIS, 1998) nas emissões globais de NO_x , o que

representa uma taxa de crescimento anual de 2%. Já entre 2006 a 2009, observou-se, um aumento de cerca de 3% ao ano (LAMSAL *et al.*, 2011).

A Figura 4.2, a seguir, apresenta as principais fontes globais de emissões antropogênicas de NO_x.

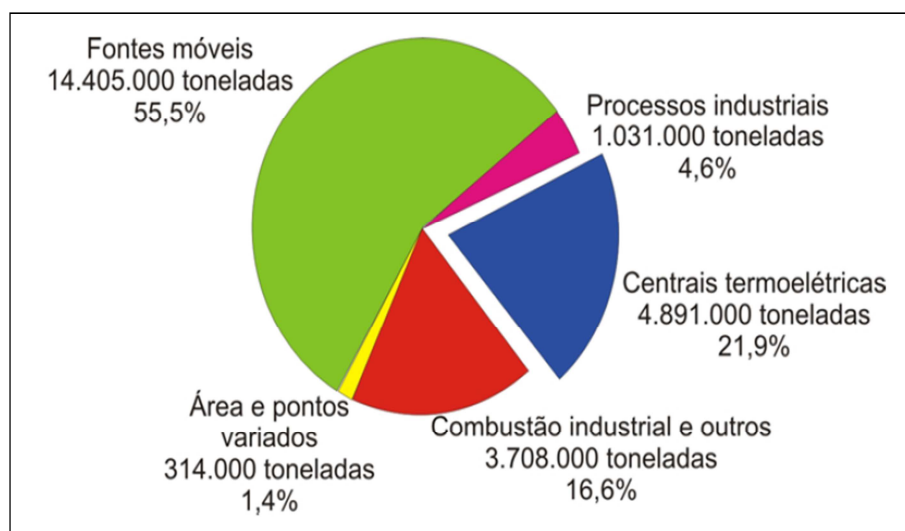


FIGURA 4.2. Fontes globais de emissões antropogênicas de NO_x

Fonte: EPA, 2003 *apud* SIGNORETTI, 2008.

Conforme pode ser verificado na Figura 4.2, as centrais termoelétricas e a combustão industrial somam cerca de 40% das emissões totais de óxidos de nitrogênio.

4.2.2 Formação de NO_x durante a combustão

Durante o processo de combustão, os NO_x podem ser formados de três formas: NO térmico, NO de constituição e NO direto. A maior parte do NO_x é formada através da reação de oxidação do N₂ atmosférico com O₂ em altas temperaturas (EPA, 1999), quando se tem excesso de oxigênio na chama, formando o **NO térmico**, conforme as seguintes reações:



Dessa forma, independente do tipo de combustível a ser utilizado, verifica-se que a ocorrência da formação de óxidos de nitrogênio (BRIMBLECOMBE, 1996). A taxa de formação do NO térmico é significativa a temperaturas acima de 1.000 K (RANGEL; BRUCHLER, 2005).

De acordo com Nevers (2000), nas chamas com deficiência de ar e em baixas temperaturas, prevalece a formação dos NO_x devido à rápida reação dos radicais hidrocabônicos livres presentes no combustível com a molécula de nitrogênio atmosférico, formando o **NO direto** (*NO prompt*), de acordo com as seguintes reações:



A maior parte dos combustíveis possui uma pequena parcela de nitrogênio em sua constituição, porém a contribuição para a formação de óxido de nitrogênio é mínima. A reação dos compostos nitrogenados existentes no combustível forma o **NO de constituição** (NEVERS, 2000).

A formação dos óxidos de nitrogênio depende da temperatura da chama, da duração da combustão e da relação ar-combustível (LORA, 2000). A emissão dos gases NO_x de constituição, por exemplo, não diminui com a temperatura da chama como é o caso do NO_x térmico, proveniente do nitrogênio do ar (EPA, 1999).

As fontes estacionárias de emissão de NO_x consistem em uma mistura de cerca de 95 % NO e 5% de NO_2 (BUSCA, 1998). Entretanto, tendo em vista a rápida reação de oxidação do NO considera-se que 100% da concentração de NO_x na saída das fontes estacionárias é representada pelo NO_2 (NEVERS, 2000). Dessa forma, conforme será apresentado no item 4.2.5, os limites legais de emissão de óxidos de nitrogênio são representados apenas pela concentração de NO_2 .

4.2.3 Formação do ozônio troposférico

O ozônio (O_3) é um constituinte natural da atmosfera e está presente tanto na estratosfera quanto na troposfera. Na estratosfera, a camada de ozônio opera como um filtro responsável pela minimização da incidência de raios UVA e UVB na superfície terrestre. Já na troposfera, o ozônio é um poluente secundário formado por reações fotoquímicas entre NO_x e compostos orgânicos voláteis (VOC), incluindo o CH_4 e o CO (BRASSEUR, 2003).

A distribuição espacial e temporal do ozônio é controlada por processos de transporte, incluindo dispersão, trocas entre estratosfera e troposfera, deposição na superfície e produção e destruição fotoquímica na troposfera. A Figura 4.3, a seguir, apresenta o ciclo do ozônio com seus principais processos de transporte.

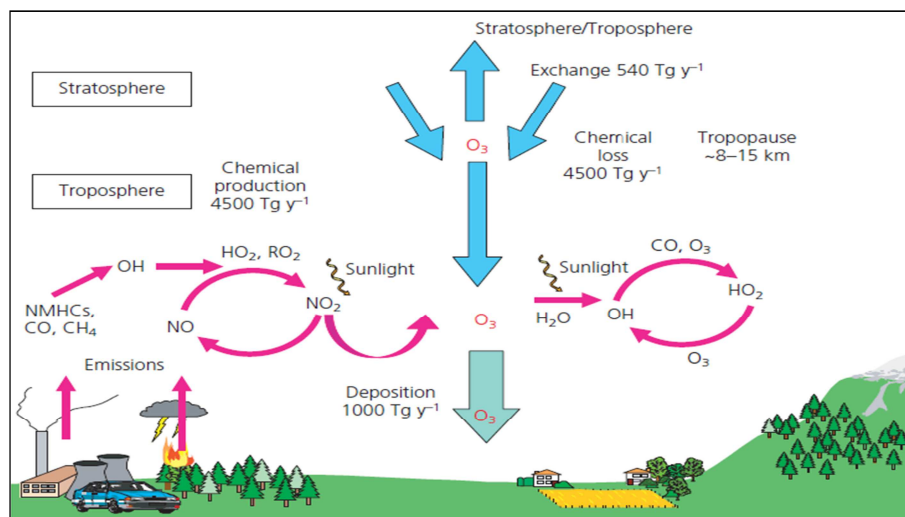


FIGURA 4.3: Ciclo do ozônio

Fonte: DENMAN *et al.*, 2007 *apud* ROYAL, 2008.

O tempo de permanência média dos gases na atmosfera varia de minutos a anos, dependendo da concentração e da efetividade dos processos de remoção. Como resultado dos processos de dispersão dos poluentes, alguns contaminantes são depositados de forma rápida e, conseqüentemente, acumulam-se nas proximidades de suas fontes de emissão, enquanto que aqueles que são removidos mais gradativamente são transportados a distâncias maiores (SCHROEDER; LANE, 1988 *apud* PRETTO, 2005). De acordo com Stevenson *et al.* (2006), o tempo de vida médio do ozônio na atmosfera é de cerca de 22 dias podendo, dessa forma, ser considerado um poluente global capaz de ser transportado a longas distâncias dependendo das condições meteorológicas. Wuebbles *et al.* (2003) citam que, nos últimos cem anos, houve um aumento gradual e significativo, de cerca de duas vezes nas concentrações globais de ozônio troposférico.

Concentrações elevadas de ozônio na superfície atmosférica são nocivas tanto para a saúde humana quanto para a vegetação (fitotoxicidade) (TRAINER *et al.*, 2000) e variam de acordo com a incidência solar, temperatura, pressão, concentrações dos gases precursores e do vapor de água (ATKINSON, 2000 *apud* ROYAL, 2008). Nos seres humanos o excesso de ozônio produz irritação do sistema respiratório, tosse, irritação na garganta e no nariz, respiração

ofegante, dor no peito durante respirações profundas e envelhecimento dos tecidos pulmonares (BAIRD, 2002; BAKONY *et al.*, 2004). As consequências à saúde humana dependem da duração da exposição e das características dos indivíduos – em crianças, idosos e pessoas com problemas respiratórios, os efeitos são verificados de forma mais rápida e intensa (STANEK, *et al.*, 2010). Já na vegetação, o ozônio pode causar variações fisiológicas e alterações no crescimento (ROYAL, 2008).

As reações fotoquímicas ocorrem quando as espécies químicas envolvidas reagem apenas através da absorção do fóton de luz. Na atmosfera, o NO₂ é uma das espécies mais ativadas fotoquimicamente sendo que na troposfera, as principais reações que ocorrem são apresentadas a seguir:



Fonte: RYERSON *et al.*, 2001.

O NO₂ na troposfera é decomposto por um fóton de luz produzindo NO e radical de oxigênio (6). Esse radical reage com o O₂ para formar O₃ (7) que reage com o NO para formar o NO₂, liberando uma molécula de O₂ (8). Dessa forma, verifica-se que cada molécula de NO₂ emitida na atmosfera produz uma de NO e, indiretamente, uma de O₃ que pode reagir com o NO e inverter a reação (RYERSON, *et al.*, 2001). A Figura 4.4, a seguir, apresenta de forma esquemática as reações que ocorrem na troposfera para a formação fotoquímica do ozônio.

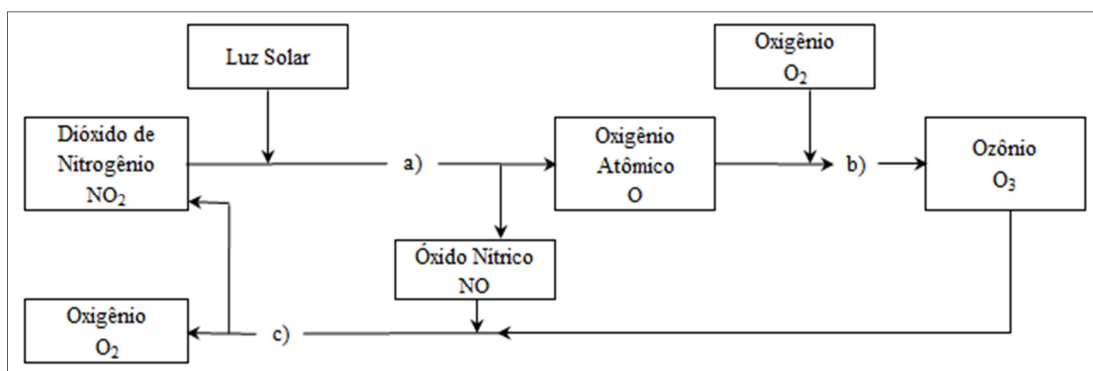


FIGURA 4.4: Esquema do ciclo fotolítico do dióxido de nitrogênio e a formação do ozônio

Fonte: adaptado de WARK *et al.*, 1998.

De acordo com Wark *et al.* (1998), o tempo de residência médio dos gases de NO_x é normalmente baixo sendo cerca de 1 dia em ambientes poluídos e até 10 dias na alta troposfera, sendo que a cinética das reações supracitadas pode ser representada pela equação a seguir:

$$[O_3] = \frac{k \cdot I \cdot [NO_2]}{[NO]} \quad (9)$$

Nessa equação, *I* representa a intensidade da luz solar. Pode-se observar que a concentração do ozônio troposférico aumenta proporcionalmente com a concentração de NO₂, enquanto a concentração de O₃ aumenta a de NO diminui.

4.2.4 Legislação ambiental aplicável

No Brasil, as legislações que tratam a respeito dos padrões de qualidade do ar e dos padrões de emissões atmosféricas são as Resoluções CONAMA 03/1990 e 382/2006, respectivamente. Em ambas são apresentadas concentrações máximas para material particulado, óxidos de enxofre, monóxido de carbono e óxidos de nitrogênio, sendo que na CONAMA 03/1990 são definidas ainda as concentrações de ozônio.

A Tabela 4.2, a seguir, apresenta as concentrações máximas legais de emissão de NO_x em fontes estacionárias para atividades de geração de calor e energia elétrica e a Tabela 4.3 apresenta as concentrações para fontes estacionárias de atividades diversas, conforme a Resolução CONAMA 382/2006.

TABELA 4.2. Limites de emissão de NO_x – Atividades de geração de calor e energia elétrica (mg/Nm³)

Geração de calor	Potência térmica nominal (MW)		
	Menor que 10	Entre 10 e 70	Maior que 70
Óleo Combustível	1.600	1.000	1.000
Gás Natural	320	320	200
Bagaço de Cana de Açúcar	N.A.	350	350
Derivados de Madeira	N.A.	650	650
Geração de energia elétrica por turbina a gás			
Gás Natural		50	
Combustíveis Líquidos		135	

N.A. – Não aplicável

Fonte: adaptado de BRASIL (2006).

TABELA 4.3. Limites de emissão de NO_x – Atividades diversas (mg/Nm³)

Processo de Refinaria de Petróleo	Potência térmica menor que 10 mW	320	
	Potência térmica entre 10 e 70 mW	320	
	Potência térmica maior que 70 mW	200	
Unidade de craqueamento catalítico	600		
Conversor de Amônia	720		
Fabricação de Celulose	Caldeira de recuperação	470	
	Forno de cal	470	
Fornos de Fusão de Vidro ⁽¹⁾	Classificação	Incolor	Colorido
	Doméstico	4,5	7,5
	Plano	4,3	6,7
	Embalagem	3,2	5,4
	Especiais Técnicos	4,5	6,7
Processo de produção de cimento - Fornos	650		
Fabricação de Ácido Nítrico ⁽²⁾	Torre de absorção de HNO ₃	1,6	
Indústrias Siderúrgicas Integradas e Semi-integradas	Coqueria - Câmara de combustão dos fornos de coque	700	
	Sinterização - Sistema 1 de despoeiramento	700	
	Sistema de despoeiramento dos fornos de cal	470	
	Laminação - Fornos de reaquecimento	700	
	Pelotização - Sistema de exaustão do forno	700	
	Central Termelétrica - Caldeira com queima de gases	350	

(1) Emissão de NO_x em relação à produção de vidro fundido, kg/t

(2) Emissão de NO_x em relação à produção de vidro fundido, medido como HNO₃ kg/t

Fonte: adaptado de BRASIL (2006).

A Resolução CONAMA 03/1990 define os padrões primários e secundários de qualidade do ar. Os padrões primários são aqueles que se ultrapassados poderão afetar a saúde da população, já os padrões secundários definem aquelas concentrações abaixo das quais são previstos efeitos mínimos adversos sobre o bem estar da população, danos à fauna e flora (BRASIL, 1990). A Tabela 4.4 apresenta as concentrações máximas permitidas para NO₂ e O₃.

TABELA 4.4. Padrões de qualidade do ar – NO₂ e O₃ (µg/m³)

Padrões	Dióxido de nitrogênio		Ozônio
	Média aritmética anual	Média de 1 hora	Média de 1 hora
Primário	100	320	160
Secundário	100	190	

Fonte: adaptado de BRASIL, 1990.

4.3 Tratamento das emissões de NO_x em fontes estacionárias

A redução das emissões de NO_x em fontes estacionárias pode ser alcançada, independente do tipo de combustível a ser utilizado, através da aplicação de métodos de pré-combustão (preventivos) ou métodos de pós-combustão (corretivos), conforme apresentado na Tabela 4.5.

TABELA 4.5. Principais tecnologias de tratamento de NO_x

MÉTODOS	DESCRIÇÃO
Recirculação dos produtos da combustão	
Combustão estagiada	
Queimadores com baixa emissão de NO _x (LNB)	Diminuição da temperatura e da concentração de oxigênio no núcleo da chama
Métodos pré-combustão (preventivos)	
DryLow-NOx (queima pobre)	
Injeção de água e vapor	
Combustão com leito fluidizado	Temperaturas de combustão menores que em sistemas convencionais para combustíveis sólidos pulverizados
Método pós-combustão (corretivos)	
Redução catalítica seletiva	Injeção de amônia com o uso de catalisadores
Redução não catalítica seletiva	Injeção de amônia sem o uso de catalisadores

Fonte: adaptado de LORA, 2000; SALOMON, 2003; SIGNORETTI, 2008.

A redução das emissões de NO_x poderiam ser alcançadas apenas com a utilização de métodos de pré-combustão, modificando o processo de combustão para prevenir a formação de NO_x, como por exemplo, através da redução da temperatura do gás na saída das chaminés, porém

esses processos são lentos (BUSCA, 1998; LORA, 2000). Dessa forma, para atender padrões mais restritivos, um tratamento adicional de pós-combustão, ou seja, tratar quimicamente o gás de combustão após a queima, para converter NO_x em nitrogênio (N₂), faz-se necessário [EPA, 200-]. A Tabela 4.6 apresenta a eficiência de tratamento das tecnologias de pré e pós-combustão.

TABELA 4.6. Eficiência dos sistemas de tratamento de NO_x

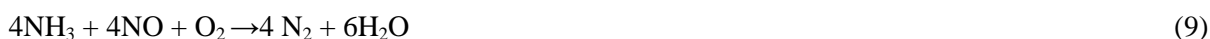
MÉTODOS	EFICIÊNCIA (%)
Recirculação dos produtos da combustão	20-50
Combustão estagiada	20-50
Queimadores com baixa emissão de NO _x (LNB)	30-40
DryLow-NOx (queima pobre)	10-30
SCR	60-90
SNCR	30-70

Fonte: NEGRI, 2002.

4.3.1 Redução Seletiva Catalítica (SCR)

A tecnologia da Redução Seletiva Catalítica ou Selective Catalytic Reduction (SCR) foi desenvolvida inicialmente no Japão, na década de 70, e permanece sendo mundialmente utilizada até os dias atuais, apesar das variações químicas do processo serem tema de constantes estudos e discussões (BUSCA, 1998).

O princípio desse sistema é a aplicação de amônia (NH₃) para converter os NO_x em vapor de água e nitrogênio. De acordo com HECK (1995), os reagentes, amônia ou ureia, são injetados em fluxo descendente que se misturam com as emissões atmosféricas da combustão e, através de um sistema de grade, o fluxo de gases quentes atravessa o leito catalítico onde ocorrem as reações de redução dos NO_x. O reagente, de acordo com EPA [200-], na presença do catalisador e de oxigênio, reage de forma seletiva apenas com os NO_x, de acordo com as reações:



A Figura 4.5, a seguir, apresenta um desenho esquemático de um sistema SCR.

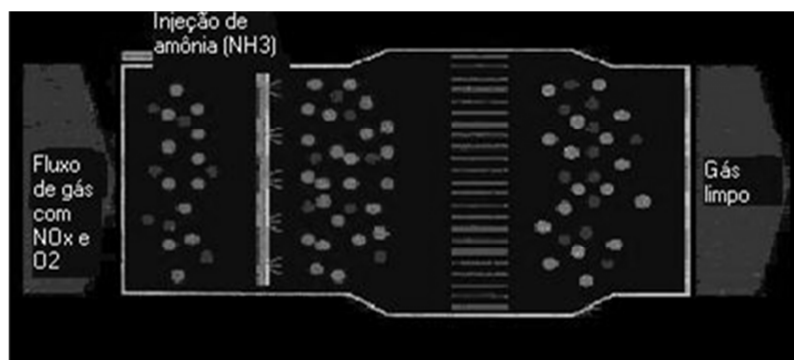


FIGURA 4.5: Desenho esquemático do tratamento SCR

Fonte: SALOMON, 2003.

Existem diversos locais da unidade de combustão onde o sistema SCR pode ser instalado, geralmente, instala-se após os sistemas de remoção de enxofre e despoejamento, visando a aumentar a vida útil e eficiência do catalisador. Porém, nesse caso pode ser necessário o reaquecimento do gás para retornar à temperatura ideal de redução, o que gera um aumento significativo nos custos de operação [EPA, 200-].

Os principais fatores que interferem na eficiência desse tipo de tratamento são: temperatura, desenho da grade de injeção, quantidade de reagente e atividade do catalisador (taxa de redução de NO_x) (HECK, 1995).

Com relação à escolha do reagente, sistemas baseados na utilização de ureia têm algumas vantagens em relação aos sistemas que utilizam amônia. Dentre essas vantagens, pode-se destacar a não toxicidade da ureia, além de ser um líquido de baixa volatilidade que pode ser armazenado e manuseado de forma mais segura. Porém, cita-se como importante desvantagem o custo da ureia, que é mais elevado que o da amônia [EPA, 200-].

O catalisador é composto por uma estrutura com elevada superfície de contato (altamente porosa) composta de cerâmica ou metais ativos. Algumas configurações de catalisadores são em formato de colmeias ou chapas dobradas em zig-zag. As características do equipamento, como o desempenho, quantidade de catalisadores e custo são afetados tanto pela composição do catalisador quanto pelo seu tipo e/ou propriedades físicas [EPA, 200-].

A atividade do catalisador é medida de acordo com a taxa de redução do NO_x. Quando a atividade do catalisador começa a reduzir, geralmente, essa redução está associada à colmatagem dos sítios ativos por sais de amônia e/ou material particulado e à corrosão devido

à alta velocidade dos gases [EPA, 200-]. À medida que a atividade do catalisador diminui, há um aumento da fuga de amônia e quando se atinge os limites de emissão desse poluente, deve-se substituir o catalisador.

De acordo com EPA [200-], as principais vantagens do sistema SCR quando comparado com o sistema SNCR são:

- Maior eficiência das taxas de reduções de NO_x ;
- Tecnologia aplicável a baixas concentrações de NO_x ;
- As reações ocorrem em temperaturas mais baixas com variações maiores;
- Não requer modificações na unidade de combustão.

Apesar do exposto, o sistema SCR apresenta algumas desvantagens, a citar o maior custo operacional, maior volume requerido de reagente e possível presença de amônia no gás de saída, o que pode ocasionar problemas de visibilidade [EPA, 200-].

4.3.2 Redução Seletiva Não Catalítica (SNCR)

O sistema Redução Seletiva Não Catalítica ou Selective Non Catalytic Reduction (SNCR) opera de forma semelhante ao sistema SCR, reduzindo os óxidos de nitrogênio em vapor d'água e nitrogênio, sendo que um agente redutor, como a amônia ou a ureia, é injetado no gás de pós-combustão.

No sistema SNCR a unidade de combustão age como uma câmara de reação. O reagente é injetado diretamente dentro do aquecedor ou reaquecedor em zonas de convecção, e a temperatura dos gases de combustão está dentro da faixa ideal (870°C a 1150°C). O sistema de injeção é projetado para promover uma mistura do reagente com o gás, sendo que o número e local dos pontos de injeção são determinados de acordo com os padrões de fluxo e temperatura dentro da unidade de combustão [EPA, 200-].

As melhores aplicações do sistema SNCR estão relacionadas aos projetos de unidades de combustão que possuem: a) uma temperatura de saída do forno ideal; b) tempo de residência maior do que um segundo; c) altos níveis de NO_x não controlados [EPA, 200-]. A Figura 4.6 apresenta um desenho esquemático do sistema SNCR.

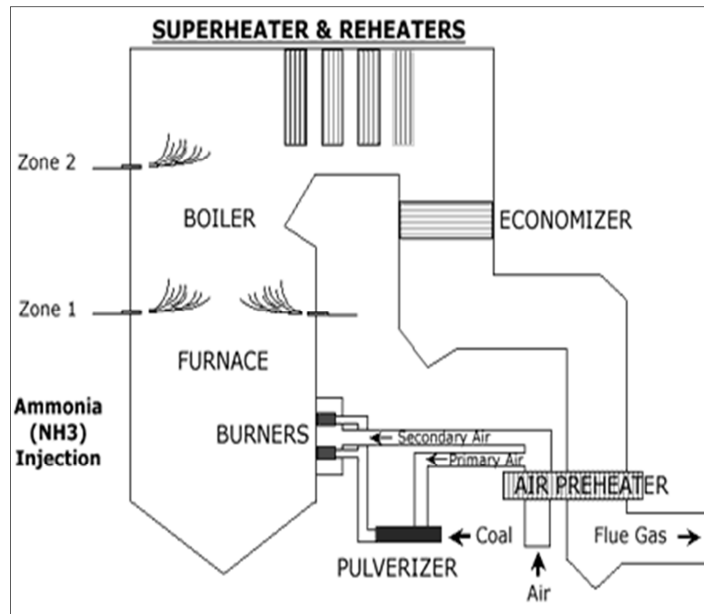


FIGURA 4.6: Desenho esquemático do tratamento SNCR

Fonte: HAMON, 2011.

De acordo com [EPA, 200-], as principais vantagens de utilização do sistema de tratamento SNCR são:

- Os custos de implantação e operação estão entre os mais baratos de todos os métodos de redução de NO_x ;
- Gases com altas concentrações de MP são aceitáveis;

Dentre as principais desvantagens da utilização do SNCR destaca-se: a) faixa de temperatura ideal deve ser respeitada; b) não é aplicável em fontes com baixa emissão de NO_x como turbinas a gás; c) Redução de NO_x menor do que SCR; d) Presença de amônia no gás de saída [EPA, 200-].

A seguir, a Tabela 4.7 apresenta os principais itens comparativos dos sistemas de tratamento SCR e SNCR.

TABELA 4.7. Comparação entre os sistemas de tratamento SCR e SNCR

VARIÁVEIS	SCR	SNCR
Redução dos níveis de NO _x	70 a 90%, reduções maiores são possíveis porém o custo benefício não é compensável	30 a 50%, porém se medidas de pré-combustão forem implementadas, pode chegar a 75%
Temperatura para a reação	250 a 427 ° C	870 a 1.150 °C
Concentração do poluente que o sistema não trata	Acima de 150 ppm	200 a 400 ppm
Custo de implantação e operação	Alto	Baixo
Emissão de Amônia	Sim	Sim
Necessidade de Pré-tratamento	Pode ser necessário o aquecimento do gás para otimizar a reação. Pode ser necessária a remoção de enxofre e material particulado para reduzir a desativação catalítica.	Nenhuma

Fonte: adaptado EPA, [200-].

Conforme pode ser verificado na Tabela 4.7, a eficiência de redução do NO_x pelo tratamento SCR pode ser maior quando comparada ao sistema SNCR, entretanto os custos de implantação e operação dos sistema SCR são superiores. Em ambos os sistemas verifica-se que dependendo das condições operacionais pode ocorrer emissões em excesso de amônia.

A aplicação desses sistemas é variável, sendo que em turbinas a gás o sistema SCR é o mais indicado [EPA, 200-]. Nas indústrias, a definição do tipo de sistema a ser implantado deve ser baseada nas características de cada processo e nos equipamentos a serem utilizados na queima do combustível (EPA, 2007).

5 CONCLUSÕES

Os usuários do gás natural como alternativa de combustível devem se atentar para a necessidade de implementação de medidas de controle quanto ao parâmetro óxidos de nitrogênio (NO_x). Dentre esses usuários, as centrais termoelétricas e as indústrias se destacam, uma vez que correspondem aos setores que mais consomem gás natural no Brasil e os que mais emitem NO_x no mundo. Mesmo emitindo concentrações reduzidas de material particulado, óxidos de enxofre (SO_x) e de monóxido de carbono (CO), a queima do gás natural pode emitir de taxas significativas de NO_x .

O aumento das concentrações de ozônio na troposfera ocorre devido ao acréscimo das concentrações dos seus precursores, sendo um deles, os NO_x . Tanto os NO_x quanto o ozônio causam danos à saúde humana, dessa forma ressalta-se a importância de se controlar essas emissões nas saídas das fontes estacionárias de indústrias e termoelétricas.

O presente trabalho objetivou apresentar a realidade nacional quanto às previsões de aumento no consumo do gás natural. As considerações relatadas quanto às emissões de NO_x sinalizam a necessidade de elaboração de mais estudos que quantifiquem essas emissões de acordo com a tipologia industrial, levando-se em conta também a composição do gás natural. Tecnologias de tratamento já difundidas (SCR e SNCR) devem, portanto, ser alvo de estudos visando avaliar a sua aplicabilidade nos setores que consomem o gás natural.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. [200-] Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/09-Gas_Natural\(2\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/09-Gas_Natural(2).pdf)>. Acesso em: 23 set. 2011.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO - ANP. *O gás natural liquefeito no Brasil: experiência da ANP na implantação dos projetos de importação de GNL*. Séries Temáticas ANP, nº4. Rio de Janeiro, 2010. 78 p.

ATKINSON, R. Atmospheric chemistry of VOC_s and NO_x. *Atmospheric Environment*. p.2063–2101, 2000.

BAIRD, C. *Química Ambiental*. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2002. 622 p.

BAKONYI, S. M. C.; OLIVEIRA, I. M. D; MARTINS, L. C.; BRAGA, A. L. F. Poluição atmosférica e doenças respiratórias em crianças na cidade de Curitiba, PR. *Revista saúde pública*. 2004.

BRASIL. CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE - CONAMA. Resolução nº 03, de 28 de junho de 1996. Brasília, 1996.

BRASIL. CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE - CONAMA. Resolução nº 382, de 26 de dezembro de 2006. *Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas*. Brasília, 2006.

BRASSEUR, G. P.; PSZENNY, A. A. P.; PRINN, R.G. *Atmospheric Chemistry in a Changing World: An integration and synthesis of a decade of tropospheric chemistry research*. Berlin, 2003. 300 p.

BRIMBLECOMBE, P. *Air Composition and chemistry*. 2. ed. New York: Cambridge University Press, 1996. 253 p.

BUSCA, G. *et al. Chemical and mechanistic aspects of selective catalytic reduction of NO_x by ammonia over oxides catalytics: A review*. 1998.

CONSUL, J. M. D.; THIELE, D. VESES R. C. BAIBICH, I. M. DALLAGO, R. M. 2004. Decomposição Catalítica de óxidos de Nitrogênio. *Química Nova*. São Paulo, v. 27, p. 432-440, 2004.

CORTES, T. M. P. *Análise dos condicionantes para a introdução de plantas de GNL no setor elétrico brasileiro*. 2010. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

DENMAN K. L.; BRASSEUR G. *Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry*. IPCC, 2007. Disponível em <<http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter7.pdf>> Acesso em: 10 ago. 2011.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. *Air Pollution Control Technology*. United States of America: EPA-CICA Fact Sheet, [200-]. Disponível em <www.epa.gov>. Acesso em: 15 jul. 2011.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. *Alternative Control Techniques Document Update - NOx Emissions from New Cement Kilns*, 2007. Disponível em <http://www.epa.gov/ttn/catc/dir1/cement_updt_1107.pdf>. Acesso em: 10 set. 2011.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. *Coal-fired Power plants: opportunities for better pollutant control*, 2003. Disponível em: <www.engineering.pitt.edu/pcc/2003%20Plenary/Princiotta.pdf> Acesso em: 15 out. 2011.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. *Natural Gas*, 2007. Disponível em: <<http://www.epa.gov/cleanenergy/energy-and-you/affect/natural-gas.html>> Acesso em: 20 ago. 2011.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. *Technical Bulletin – Nitrogen Oxides, Why and How they are Controlled*. November. North Caroline, 1999.

FARIA, L., F. R. *A integração do mercados de gás natural e energia elétrica no Brasil*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Universidade de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

HAMON. 2011. Disponível em: <http://hamon-researchcottrell.com/tech_nox>. Acesso em: 12 set. 2011.

HECK, R.M; FARRAUTO, R. J. *Catalytic Air Pollution Control: Comercial technology*. 3 ed. United States of America: *Wiley*, 2009. 544 p.

JACOBSON, M., Z. *Atmospheric Pollution. History, science and regulation*. 2002. 399p.

JUNIOR, M., F., H. *Potencial de redução de emissão de gases de efeito estufa pelo uso de energia no setor industrial brasileiro*. Tese (Doutorado em Planejamento Energético) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

LAMSAL, N.; MARTIN, R. V.; PADMANABHAN L.A. Application of satellite observations for timely updates to global anthropogenic NO_x emission inventories. United States of America: *Geophysical Research Letters*, 2011.

LORA, E. E. S. *Prevenção e controle da poluição nos setores energético, industrial e de transportes*. Brasília, 2000. 503 p.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME. 2008. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/spg/menu/publicacoes.html>>. Acesso: em 17 out. 2011.

MONTES, P. M. F. *O potencial do consumo do gás natural pelo setor industrial brasileiro*. 2000. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.

MORAES, J. E. *O gás natural e a indústria*. Confederação Nacional das Indústrias. São Paulo, 1989, 1v. 51 p.

NEGRI, J. C. *Modelo preditivo da emissão e dispersão no do NO_x gerado em usinas termoelétricas como instrumento de análise de inserção e capacidade de suporte regional da qualidade do ar*. Tese (Doutorado em engenharia). São Paulo, 2002.

NEVERS, N. *Air Pollution Control Engineering*. 2 ed. United States of America: McGraw Hill, 2000. 608 p.

PANDIS, S. N.; SEINFELD, J. H. *Atmospheric Chemistry and Physics: from air pollution to climate change*. 1 ed. New York, USA. 1998. 1326 p.

PEREIRA, A. O.; PIRES, S. V.; VILAR, S. C. Strategies to promote renewable energy in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, p. 681-688, 2011.

PINHEIRO, P. C. C. *O gás natural e sua utilização em equipamentos térmicos*. In: Seminário para gerenciamento energético da indústria química e petroquímica. Junho de 1996, São Paulo: ABQUIM (Associação Brasileira da Indústria Química e de Produtos Derivados).

PRETTO, A. *O estudo do comportamento dos gases-traço O_3 , NO_x , CO , SO_2 e de COV_s na atmosfera da cidade de São Paulo*. Tese (Doutorado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear) – IPEN, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

RANGEL, L. P.; BUCHLER, P. M. Estudo do nitrogênio na combustão do gás natural. *Química Nova*. São Paulo, v.28, n. 6, 2005.

ROYAL SOCIETY PUBLISHING. *Ground-level ozone in the 21st century: future trends, impacts and policy implications*, 2008. 132 p.

RYERSON, T. B. *et al.* Observations of Ozone Formation in Power Plant Plumes and Implications for Ozone Control Strategies. *Science*. V. 292, 719-723 p, 2001.

SALOMON, K., P. *Avaliação quantitativa do impacto ambiental das emissões gasosas e do uso da água de resfriamento em instalações de geração termelétrica*. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2003.

SCHROEDER, W. H; LANE, D.A. The fate of Toxic Airborne Pollutants. *Environmental Science & Technology*. United States of America, 240-246 p, 1988.

SIGNORETTI, V. T. *Controle das emissões de No_x , SO_x e Metais Pesados Quando se utilizam combustíveis alternativos e de alto teor de enxofre na Indústria de cimento*. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2008.

STANEK, L. W.; BROWN, J. S. GIFT, J., COSTA, D. N. Air Pollution Toxicology—A Brief Review of the Role of the Science in Shaping the Current Understanding of Air Pollution Health Risks. *Toxicological Science*. North Carolina, 2010.

STEVENSON D. S. et al. Multimodel ensemble simulations of present-day and near-future tropospheric ozone. United States of America: *Journal of Geophysical Research*. 111 vol, 23 p, 2006.

TOMALSQUIM, M. T.; GUERREIRO, A.; GORINI, R. Matriz energética brasileira. *Novos Estudos*. Centro Brasileiro de Análise e Planejamento (CEBRAP). pp 47-59, 2007.

TRAINER, M.; PARRISH, D. D.; FEHSENFELD, F. C. Review of observation-based analysis of the regional factors influencing ozone concentrations. v.34, United States of America: *Atmospheric Environment* p 2045-2061, 2000.

TURDERA, E. M. V. *Geração termelétrica a gás natural no Brasil: percalços e perspectivas*. 2006. Disponível em: <<http://www.uems.br/cinam/pdf/mirko/VICLGTEEmirko.pdf>>. Acesso em: 30 out. 2011.

TUSSING, A. R.; TIPEE, B. *The natural gas industry: evolution, structure and economics*. 2 ed. United States: Ballinger Publishing. 1995. 317 p.

VIEIRA, P. L.; GARCIA, C. B.; GUIMARAES, H. B. *Gás natural: benefícios ambientais no Estado de Bahia*. Salvador, 2005. 132p.

WARK. K.; WARNER, C. F.; DAVIS, W. T. *Air Pollution: its origin and control*. 3 ed. United States: Prentice Hall, 1998. 560 p.

WUEBBLES, D. J.; BRASSEUR, G. P.; RODHE, H. *Changes in the Chemical Composition of the Atmosphere and Potential Impacts*. Atmospheric Chemistry in a Changing World - An Integration and Synthesis of a Decade of Tropospheric Chemistry Research. Berlin, Germany, 2003.