

ESTUDO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA DOS ÓXIDOS DE NITROGÊNIO (NO_x) EMITIDOS DURANTE A QUEIMA DE BAGAÇO EM UMA USINA DE AÇÚCAR¹

Evaluation of the Atmospheric Dispersion of the Nitrogen Oxides (NO_x) Released During Bagasse Burning in a Sugar Mill

Kristiane Ramos Primo², Karina Ribeiro Salomon², Flávio Neves Teixeira³ e
Electo Silva Lora⁴

Resumo: As principais fontes de emissões de poluentes atmosféricos das unidades sucro-alcooleiras são as caldeiras a vapor que utilizam bagaço de cana como combustível e emitem, como resultado da combustão, óxidos de carbono (CO e CO_2), óxidos de nitrogênio (NO_x) e material particulado. Com este artigo objetivou-se determinar os efeitos da emissão de óxidos de nitrogênio de uma usina de açúcar e álcool na qualidade do ar da região circundante, através do estudo de dispersão de poluentes atmosféricos. Estudou-se o caso de uma usina de grande porte localizada no Estado de São Paulo, Brasil. Na base de medições das concentrações de NO_x nos produtos de combustão, avaliaram-se os mecanismos de formação e controle. O estudo de dispersão atmosférica foi realizado com o uso do modelo de dispersão ISCST3 – *Industrial Source Complex Short Term version 3*, recomendado pela USEPA – *United States Environmental Protection Agency*, com base em dados meteorológicos horários do local no período de 2002 a 2004. Foram feitos dois tipos de análise da quantidade de NO_2 presente na atmosfera. Primeiro, considerando que há conversão total do NO_x em NO_2 , como a maioria das agências recomenda, sendo, neste caso, necessária a aplicação de tecnologias de prevenção e controle da emissão de NO_x . Em outra análise considerou-se o fator de Janssen, que descreve a conversão do NO_x em NO_2 e NO , considerando as características atmosféricas locais e a concentração de ozônio (O_3). Os resultados do estudo de dispersão são apresentados como curvas de isoconcentração de NO_x , e com base nessas curvas conclui-se sobre a adequação das tecnologias de prevenção e controle.

Palavras-chave: Caldeira para bagaço, emissão de NO_x e estudo de dispersão.

Abstract: The major sources of atmospheric polluting emissions of sugar/alcohol units are steam boilers using sugar cane bagasse as fuel. As a result of the combustion, carbon oxides, (CO and CO_2), nitrogen oxides (NO_x) and particulate matter are released. By using an atmospheric polluting dispersion study, this paper aims to determine the impact of the emission of nitrogen oxides released by a sugar and alcohol plant on the quality of the air in the surrounding area. The case of a large plant located in the state of São Paulo, Brazil, was studied. The formation and control mechanisms were assessed based on the measurements of the NO_x concentrations in the combustion products. The atmospheric dispersion study was carried out by using the ISCST3 dispersion model – *Industrial Source Complex Short Term version 3*, recommended by USEPA – *United States Environmental Protection Agency*, based on hour meteorological data of the place from 2002 to 2004. Two types of analyses regarding the quantity of

¹ Recebido para publicação em 8.2.2006 e aceito em 3.3.2006.

² Mestre em Ciências da Engenharia da Energia, Doutoranda em Engenharia Mecânica, Núcleo de Excelência em Geração Térmica e Distribuída – NEST, Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Av. BPS 1303, Pinheirinho, 37500-903 Itajubá-MG, Caixa Postal 50, <kristiane@unifei.edu.br>, <karinas@unifei.edu.br>; ³ Professor da Universidade Federal de São João Del Rei – UFSJ, Departamento de Ciências Térmicas e Fluídos – DCTE, Campus Santo Antônio, 36300-088 São João del Rei-MG, <flavio@ufs.ju.edu.br>. ⁴ Prof. Dr. em Ciências Técnicas pela Universidade Técnica de São Petersburgo, Rússia, Coordenador do NEST, <electo@unifei.edu.br>.

NO₂ present in the atmosphere was shown. The first one considers the total conversion of NO_x into NO₂ as recommended by most agencies. In this case, the use of technologies aiming at the control and prevention of NO_x emissions is necessary. The second analysis addresses the Janssen Factor, which describe the conversion of NO_x into NO₂ and NO, considering the local atmospheric characteristics and ozone concentration (O₃). The dispersion study results are presented as NO_x iso-concentration curves, based on which the conclusions on the appropriate control and prevention technologies were drawn.

Keywords: Bagasse boiler, emission of NO_x, dispersion study.

1 INTRODUÇÃO

O potencial de geração de eletricidade das usinas de açúcar e álcool brasileiras vem de encontro a uma necessidade atual de ampliar o parque nacional de geração de eletricidade, em decorrência do aumento pela demanda de energia elétrica e dos riscos de deplecionamento dos reservatórios das hidrelétricas. Segundo o último BEN - Balanço Energético Nacional (BRASIL, 2005), a cana-de-açúcar já é uma das principais fontes energéticas do País, contribuindo com cerca de 10% da oferta interna de energia.

Uma das vantagens ambientais da queima do bagaço de cana nas caldeiras é que este combustível pode ser considerado limpo e renovável, pois as emissões dos gases estufa como o CO₂ (dióxido de carbono) são reduzidas como consequência do balanço quase fechado de emissão e seqüestro de CO₂ no ciclo, desde o plantio da cana até a queima do bagaço.

Os principais poluentes lançados à atmosfera devido à queima do bagaço são os materiais particulados e os óxidos de nitrogênio - NO_x (óxido nítrico - NO e dióxido de nitrogênio - NO₂). Os danos à saúde humana devido à exposição a este último poluente podem ser irritação nos olhos, no nariz, na garganta e nos pulmões. Os óxidos de nitrogênio também contribuem para a deposição ácida, que danifica a vegetação e os ecossistemas aquáticos.

A dispersão dos gases poluentes na atmosfera é influenciada pelas condições atmosféricas locais, que incide sobre a movimentação de massas de ar em direção vertical e acabam diferenciando a intensidade da poluição do ar. Quando a atmosfera tem pouca movimentação pela vertical não há movimentação entre as camadas da mesma e por isso é denominada estável, caso contrário é chamada instável. Os episódios de poluição atmosférica são caracterizados por apresentar uma atmosfera estável com baixa movimentação da pluma (Lora, 2002).

Mesmo mantidas as emissões dos gases, a qualidade do ar pode mudar em função das condições meteorológicas, que determinam a maior ou menor diluição dos poluentes. Por isso, torna-se fundamental um estudo de dispersão de poluentes, neste caso o NO_x, no entorno da Usina.

Nos Estados Unidos, a agência responsável pelo controle e monitoramento da qualidade do ar é a EPA (*Environmental Protection Agency*), que desenvolveu diversos modelos para estudar a difusão e as reações fotoquímicas dos poluentes na atmosfera, como o ISCST-3, que é operacionalizado em ambiente Windows pelo *Software* da empresa *Lakes Environmental*. Este modelo é baseado no método de Gauss e é recomendado para fontes industriais, para determinação de impactos ou contribuições na qualidade do ar, permitindo a visualização da dispersão de diversos gases poluentes através de linhas de isoconcentração distribuídas sobre a planta topográfica.

O padrão Primário de Qualidade do Ar no Brasil, segundo o CONAMA (1990), estabelece que o nível máximo de concentração horária de dióxido de nitrogênio não deve ultrapassar $320 \mu\text{g m}^{-3}$, e para as concentrações com base anual o máximo permitido é de $100 \mu\text{g m}^{-3}$. Segundo a OMS (2000), o nível máximo de concentração horária de dióxido de nitrogênio não deve ultrapassar $200 \mu\text{g m}^{-3}$.

A partir dos resultados das simulações é possível avaliar a eficiência das tecnologias de redução e controle da emissão de NO_x e verificar se a concentração de NO_x no ar ambiente na base dos mapas de isolinhas obtidos cumpre com os padrões de qualidade do ar.

2 RELAÇÃO ENTRE NO_2 E NO_x

Segundo Webb e Hunter (1998), somente uma fração dos óxidos de nitrogênio formados durante a queima de combustíveis fósseis é emitida na atmosfera como dióxido de nitrogênio (NO_2). De acordo com Janssen et al. (1988),

essa quantidade é menor que 5% do total, considerando que o restante do NO_x apresenta-se na forma de NO.

Para Teixeira e Lora (2003), a importância dos diferentes mecanismos de formação dos NO_x depende dos seguintes parâmetros: temperatura da chama, nitrogênio do combustível e parâmetros da fornalha (coeficiente de excesso de ar).

Após a emissão da fonte, o NO transforma-se em NO_2 , através da oxidação com o ozônio atmosférico - O_3 (Figura 1). A taxa de oxidação do NO na atmosfera depende da cinética química, isto é, da velocidade de reação e da física do processo (processos de dispersão e mistura da pluma com o ar do ambiente). A cinética química e a física dependem das condições meteorológicas como a velocidade do vento e a radiação solar, como também da concentração de reagentes.

O conhecimento da concentração de O_3 permite estimar a concentração de NO_2 no nível do solo a partir a concentração de NO_x decorrente da emissão das chaminés.

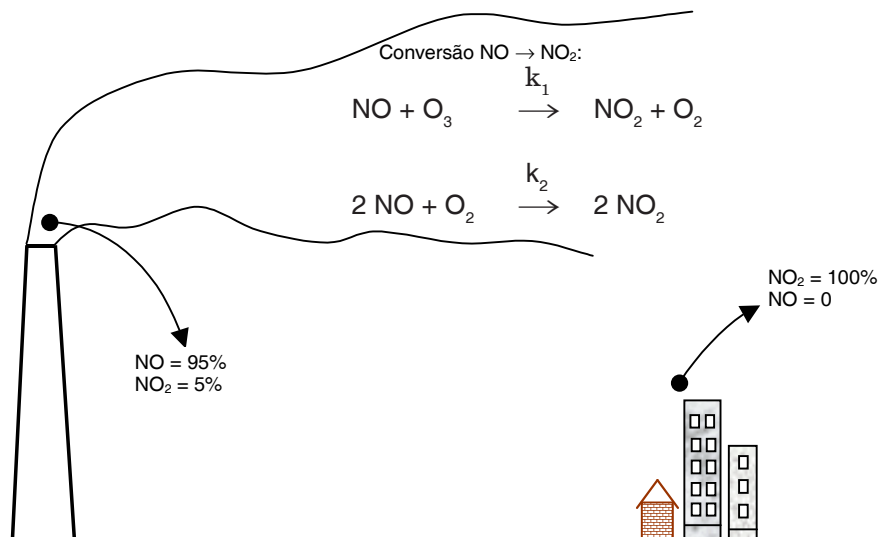
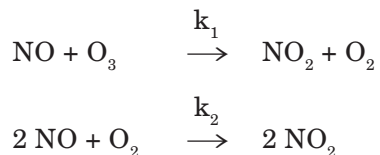


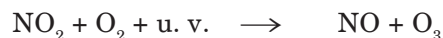
Figura 1 – Conversão do NO em NO_2 no ar ambiente.
Figure 1 – Conversion of NO into NO_2 in ambient air.

As reações químicas envolvidas nesse processo são:



A oxidação do NO pelo oxigênio molecular é muito lenta para resultar em alta concentração de NO₂ nas plumas de chaminés, porém as concentrações podem ser altas durante episódios prolongados de poluição urbana.

Além da conversão do NO em NO₂, durante o dia pode haver fotodissociação do NO₂, pela absorção da radiação ultravioleta para formação do NO e O₃, como mostra a reação:



Com isso, a concentração de NO_x encontrada em um ponto qualquer, por exemplo em um núcleo urbano, não corresponde totalmente ao NO₂, pois deve-se levar em conta que também há formação de NO a partir do NO₂. A relação das concentrações NO₂/NO_x pode ser calculada pela equação (1).

$$\text{NO}_2/\text{NO}_x \sim \frac{[\text{NO}][\text{O}_3]}{[\text{NO}] + [\text{NO}_2]} \sim [\text{O}_3] \quad (\text{eq. 1})$$

O cálculo da concentração de NO₂ na atmosfera num instante de tempo t é uma função complexa da condição meteorológica, da taxa de emissão dos NO_x de todas as fontes, da hora do dia, da estação do ano e, finalmente, da concentração de vários outros compostos como o ozônio e os hidrocarbonetos reativos.

Em um estudo realizado por Janssen et al. (1988) foi proposta a relação NO₂/NO_x no ar ambiente, devido à emissão das chaminés, pela equação (2). De acordo com Janssen (1986), esta relação se eleva com o aumento da velocidade do vento. A e α são chamados parâmetros do ozônio e do vento.

$$\text{NO}_2/\text{NO}_x = A (1 - \exp(-\alpha x)) \quad (\text{eq. 2})$$

3 CARACTERÍSTICAS DO LOCAL

3.1 Emissões das chaminés

As características das emissões das caldeiras a bagaço de cana, no caso da usina estudada, estão no Quadro 1, que inclui

Quadro 1 – Emissões de NO_x pelas chaminés das três caldeiras (CAL) da usina em estudo
Table 1 – NO_x emissions through the chimneys of the three boilers (BOL) in the mill studied

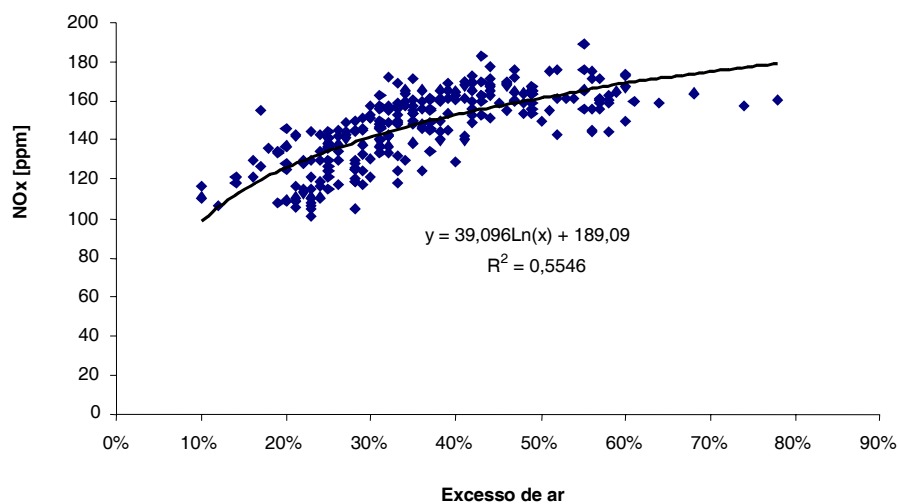
CAL	Emissão de NO _x			V (m s ⁻¹)	Q (Nm ³ h ⁻¹)	T (°C)	D (m)	H (m)
		(ppm)	(g Nm ⁻³)					
CAL 01	Média	136,92	0,274	12,3	156.423	110	3	45
	Máxima	177,50	0,355					
	Mínima	93,50	0,187					
CAL 02	Média	155,12	0,310	12,3	156.423	110	3	45
	Máxima	176,00	0,352					
	Mínima	117,50	0,235					
CAL 03	Média	150,00	0,300	12,5	152.490	129	3	45
	Máxima	178,00	0,356					
	Mínima	107,00	0,214					

também as características dimensionais das três chaminés da usina. Neste quadro fica claro que o padrão de emissão citado está sendo cumprido.

A Figura 2 apresenta a variação na concentração de NO_x com relação ao excesso de ar nos gases para a usina. Como esperado,

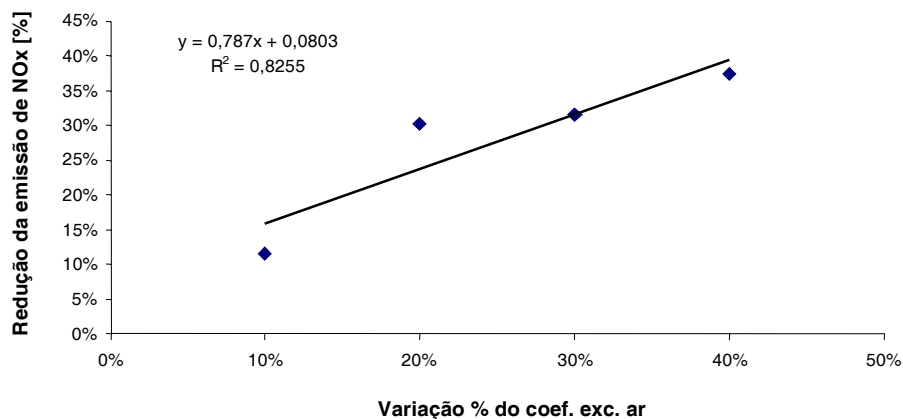
para uma temperatura típica entre 1.000 e 1.200 °C, a emissão de NO_x aumenta com o excesso de ar, apresentando um comportamento quase linear.

Na Figura 3, pode-se avaliar qual a redução na formação de NO_x quando o excesso de ar na fornalha, diminui. Por



Fonte: Teixeira (2005)

Figura 2 – Comportamento da concentração de NO_x nos gases de combustão com relação ao excesso de ar.
Figure 2 – Behavior of the NO_x concentration in the combustion gases in relation to excess air.



Fonte: Teixeira (2005)

Figura 3 – Relação entre a variação de excesso de ar e a variação na formação de NO_x .
Figure 3 – Relation between air excess variation and NO_x formation variation.

exemplo, para redução de 20% no excesso de ar, uma redução de 30% de NO_x é alcançada. No caso extremo, a redução de 40% no excesso de ar leva à diminuição de cerca de 38% na formação de NO_x . Além disso, nesse gráfico fica evidente que a redução de excesso de ar nas caldeiras a bagaço leva à redução significativa na formação de NO_x . Esses resultados permitem dar um subsídio da operação da caldeira quanto ao controle da emissão de NO_x .

No entanto, precisa-se, a partir dos dados disponíveis de operação, analisar a variação da eficiência de combustão e da eficiência da caldeira na faixa de excesso de ar discutida, pois de acordo com os dados medidos a redução do excesso de ar leva à diminuição da concentração de NO_x , porém associada ao aumento no teor de monóxido de carbono (CO).

3.2 Prédios próximos às chaminés

As chaminés das caldeiras recebem os efeitos de *down-wash* dos sete edifícios próximos a elas, decorrentes da turbulência dos ventos na passagem pelos prédios, efeito este que reduz a altura efetiva da pluma. No estudo foram considerados os aspectos dimensionais dos sete prédios e, ou, equipamentos: prédio de picadores: P01, prédio da moenda; P02, prédio fabricação de açúcar; P03, prédio destilaria; e P04, caldeira 01, caldeira 02 e caldeira 03.

As coordenadas dos prédios e das chaminés das caldeiras a bagaço de cana foram processadas no computador, utilizando o *Software BPIP – “Building Input Profile Program”* da *Lakes Environmental*, visando gerar a altura e largura equivalentes dos prédios, para posterior utilização no modelo ISCST3.

3.3 Área de influência

A área de influência foi determinada de acordo com uma avaliação preliminar das concentrações ao longo da distância, em

relação à chaminé da unidade industrial. Esta abrange 53 por 28 km, divididos em grades para determinação dos receptores: 1.000 por 1.000 m e 500 por 500 m.

O total de receptores na área de influência é de 1.484 pontos na grade principal e 441 na grade secundária, representados nas coordenadas x, y e altitude z. As coordenadas e as altitudes foram levantadas, utilizando-se cartas topográficas do IBGE (1979), e posteriormente alimentadas no modelo de dispersão ISCST3.

3.4 Meteorologia

Os dados meteorológicos utilizados neste estudo foram fornecidos pela estação mais próxima à planta, localizada a uma distância de aproximadamente 43 km a noroeste da usina. Estes dados horários foram adquiridos em formato *Excel* e transformados no formato de arquivo reconhecido pelo modelo de dispersão ISCST3 da EPA, neste caso o formato *Samsom*. O período considerado neste estudo foi o ano de 2002.

Os ventos que atuam na região de estudo possuem as características apresentadas no Quadro 2 e são representados pela Rosa dos Ventos da Figura 4, baseada nos dados meteorológicos horários anuais no período de 2002 a 2004.

Quadro 2 – Características dos ventos na região de estudo

Table 2 – Wind characteristics in the studied region

Período	V (m s ⁻¹)	Cal- maria (%)	Ventos Predominantes (%)		
			L	L-SE	SE
Anual (2002 a 2003)	2,71	3,42	11,3	17,6	16,2
Mai a setembro de 2002	2,53	2,60	14,2	18,0	13,0
Outubro (2002) a abril (2003)	2,85	2,32	9,7	16,0	16,6
Mai a setembro de 2003	2,55	4,5	11,1	20,0	14,7

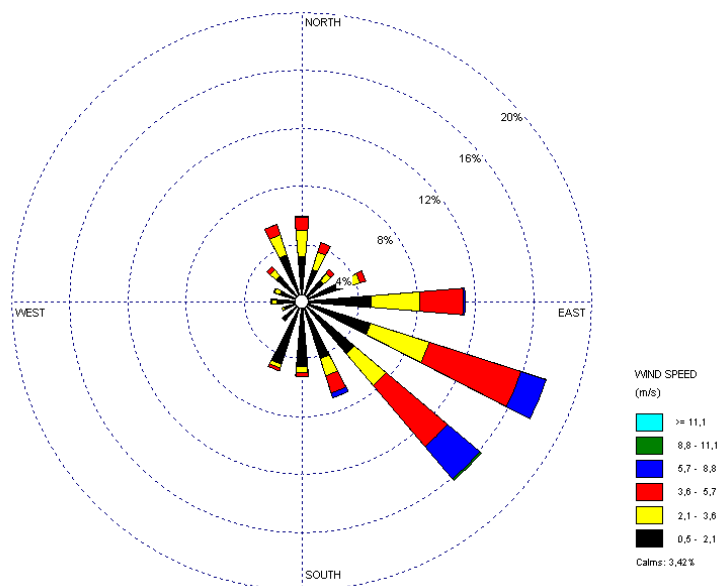


Figura 4 – Rosa dos Ventos – Média anual no período de 2002 a 2004.
Figure 4 – Wind rose – annual average 2002 to 2004.

4 MODELO DE DISPERSÃO ISCST3

O modelo ISCST3 da EPA apresenta as seguintes configurações técnicas, segundo a Lakes... (2002):

- modelo de referência do USEPA para fontes industriais;
- pode ser utilizado para modelagem de poluentes primários (convencionais) e poluentes tóxicos;
- pode considerar vários tipos de fontes, como chaminés, áreas e volumes;
- receptores da área de influência podem ser representados por um sistema de coordenadas cartesianas (x, y, z) ou coordenadas polares, com opção de considerar a elevação de cada ponto do receptor da coordenada em relação ao nível do mar; e
- resultados das concentrações de poluentes para períodos de 1, 8 e 24 horas, mensais ou anuais.

4.1 Resultados do modelo de dispersão ISCST3

As opções utilizadas na modelagem consideraram a área como sendo rural e de topografia complexa.

O cenário de estudo de dispersão foi simulado para os períodos de amostragem de 1 hora e para média anual, considerando as três caldeiras a bagaço de cana, operando em conjunto.

Os resultados da modelagem, considerando o ponto crítico como sendo a máxima concentração de NO_x , estão na Figura (5). É importante observar que a usina localiza-se próximo a uma rodovia de grande movimento, representada por uma linha vermelha no mapa.

A concentração máxima horária, considerando a grade da área de influência, obteve um valor de $1.447,8 \text{ } (\mu\text{g m}^{-3})$, ou seja, maior do que os padrões de qualidade do ar

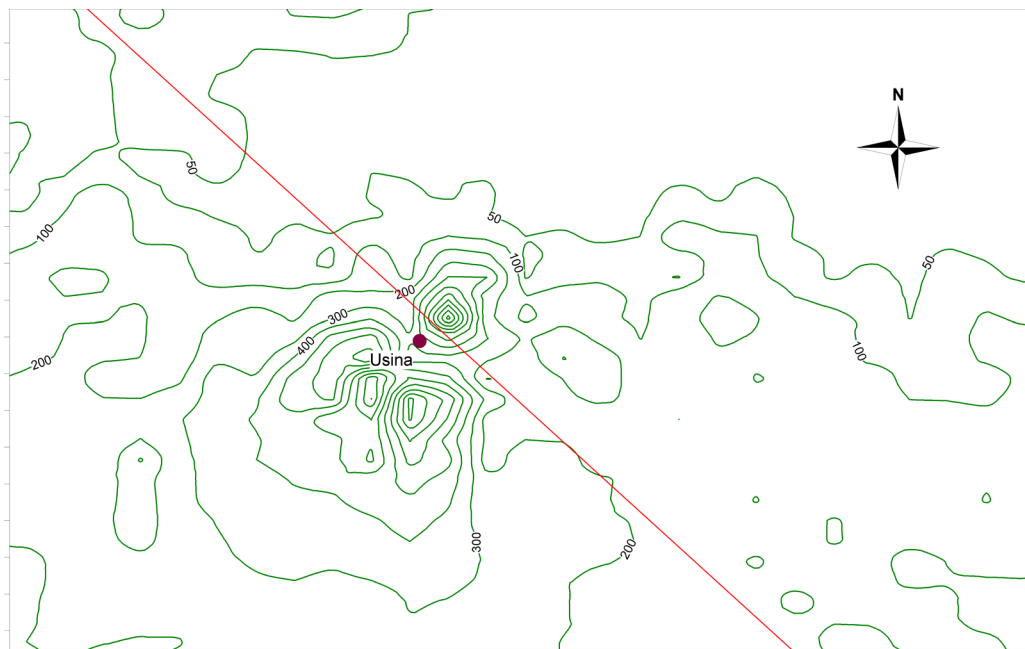


Figura 5 – Concentrações máximas horárias de NO_x devido à emissão das três caldeiras em operação conjunta – Curvas: 50, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1.000 (mg m^{-3}).

Figure 5 – Maximum hourly concentrations of NO_x due to the emissions of the three boilers operating at the same time – iso-concentration curves: 50, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000 (mg m^{-3}).

estabelecidos pela legislação vigente. No caso das concentrações máximas anuais, obteve-se o valor de $13,1 (\mu\text{g m}^{-3})$, que se encontra na faixa prevista nos padrões.

No Quadro 3 estão os resultados das simulações, assumindo a conversão total de NO em NO_2 , como recomendado pela maioria das agências ambientais, segundo Oliveira et al. (2003).

Quadro 3 – Resultado da simulação considerando $\text{NO}_x = \text{NO}_2$

Table 3 – Simulation result considering $\text{NO}_x = \text{NO}_2$

Emissão da Chaminé	Concentração – Base Horária de NO_x	Concentração - Base Anual de NO_x
	$(\mu\text{g m}^{-3})$	
Média	1212,8	10,8
Máxima	1447,8	13,1
Mínima	879,6	7,7

5 ESTUDO COMBINADO DA DISPERSÃO DE NO_x COM APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE PREVENÇÃO E CONTROLE

A adoção de alternativas de prevenção e controle de NO_x é uma solução que deve levar em conta os padrões de emissão e qualidade do ar, o valor das taxas de emissão sem controle para um determinado poluente e o desempenho de cada sistema de controle. No Quadro 4 estão os valores de eficiência de remoção de NO_x através de diferentes tecnologias e segundo diferentes autores. Em casos específicos, em que o requerimento de controle é bastante rígido, pode-se combinar mais de duas tecnologias, visando maior eficiência de remoção de NO_x , pois essas têm um caráter aditivo.

Admitindo que as concentrações de NO_x na atmosfera ultrapassam os valores das normas vigentes, no caso em que se assume

Quadro 4 – Tecnologias de controle da emissão de NO_x e eficiências indicadas por diferentes autores
Table 4 – Prevention and control technologies for NO_x and efficiencies indicated in different publications

Tecnologia	Eficiência				
	WORLD BANK GOUP (1998)	<i>Innovative Clean Air Technology Grant Report</i>	Nussbaumer (2003)	Agrawal & Wood	EPA-456/F-99-006R (1999)*
Redução do Excesso de ar	10 – 30%, ou 19% para uma redução de 15 a 30% do excesso de ar.	-	-	0 – 15%	50 – 65%
Recirculação de gases	20 – 50% (para óleo e gás)	-	-	50 – 80%	50 – 65%
Combustão por etapas	20 - 50%	-	50% (biomassa) 80% (bio-combustíveis)	-	50 – 65%
Injeção de ozônio	-	90 – 98%	-	-	60 – 80%
Redução seletiva catalítica (RSC)	60 – 90% (carvão e comb. gasosos)	60 – 95%	> 95% (gases a temp. entre 250 e 450 °C)	70 – 90%	35 – 80%
Redução seletiva não- catalítica (RSNC)	30 – 70% (combustíveis gasosos)	40 – 70%	Acima de 90% (gases a temp. entre 820 e 940 °C)	25 – 50%	35 – 80%

* Para: carvão, comb. líquidos ou gasosos e caldeiras com queimadores localizados na parede da fornalha.

que todo NO_x se apresenta na forma de NO₂, foram simuladas para os dados da usina todas as tecnologias de controle citadas anteriormente. As eficiências utilizadas foram de 19% para a redução do excesso de ar, 45% para a recirculação de gases, 50% para combustão por etapas, 90% para injeção de ozônio, 95% para a RSC e 90% para a RSNC.

No total de 18 simulações, as tecnologias que alcançaram os padrões vigentes de qualidade do ar foram: injeção de ozônio, redução seletiva catalítica (RSC) e redução seletiva não-catalítica (RSNC). Foram feitas seis simulações, e constatou-se que quando a altura da chaminé é aumentada em até 15 m acima do normal (45 m) os resultados não se enquadraram nos padrões.

6 ESTUDO DA DISPERSÃO DE NO_x CONSIDERANDO A CONVERSÃO DE NO_x EM NO₂ DE ACORDO COM O FATOR DE JANSSEN

Segundo Oliveira et al. (2003), pelo coeficiente de Janssen tem-se que somente uma porcentagem determinada dos NO_x encontrados na atmosfera corresponde a NO₂. Vale ressaltar que os padrões de qualidade do ar do CONAMA referem-se especificamente ao NO₂.

De acordo com Janssen et al. (1988), a taxa de concentração depende da distância da fonte e é fortemente influenciada pela quantidade de ozônio no ambiente. Considerando que no caso de estudo a região é cortada

por uma estrada muito movimentada, as concentrações de ozônio devem fazer com que o coeficiente A da equação (2), que varia com a concentração de O_3 , tome valores na faixa 0,8 – 0,9.

Para o cálculo da relação NO_2/NO_x da equação (2), foi considerado o valor médio da concentração de O_3 em um local próximo à região de estudo (concentração de $O_3 = 39,15$ ppb).

De acordo com medidas realizadas por Janssen et al. (1988), os valores do parâmetro do vento estão entre 0,07 e 0,15 km^{-1} . O menor valor corresponde ao período de inverno e o maior valor é correspondente ao verão.

Logo, no presente trabalho foram considerados os seguintes valores médios de A e α a partir dos experimentos realizados por Janssen et al. (1988): $A = 0,8$, $a = 0,12 km^{-1}$. Assim, o valor teórico da equação (2) fica apresentado na equação (3), de acordo com os parâmetros locais. A média entre os valores resultantes desta equação foi de

0,484, ou seja, 48,4% dos NO_x encontrados no ar ambiente são NO_2 .

$$NO_2/NO_x = 0,8 (1 - \exp(-0,12 x)) \quad (\text{eq. 3})$$

Segundo Webb e Hunter (1998), a relação para as plumas derivadas por Janssen et al. (1988) permite alguma variação nesses fatores, porém impõe a dispersão da pluma implícita que não é apropriada para altos percentuais de concentração.

Fazendo as considerações necessárias para o cálculo do fator de Janssen e aplicando a equação (3), constata-se que existem diversas porcentagens de quantidade de NO_2 no total de NO_x . Assim, foi possível verificar que os valores de NO_2 encontram-se dentro dos padrões de qualidade do ar citados, ficando abaixo de $200 \mu g m^{-3}$, como mostra a Figura 6.

Os resultados para todos os cenários abordados, incluindo os automóveis que circulam pela rodovia próxima à usina, estão apresentados na Figura 7.

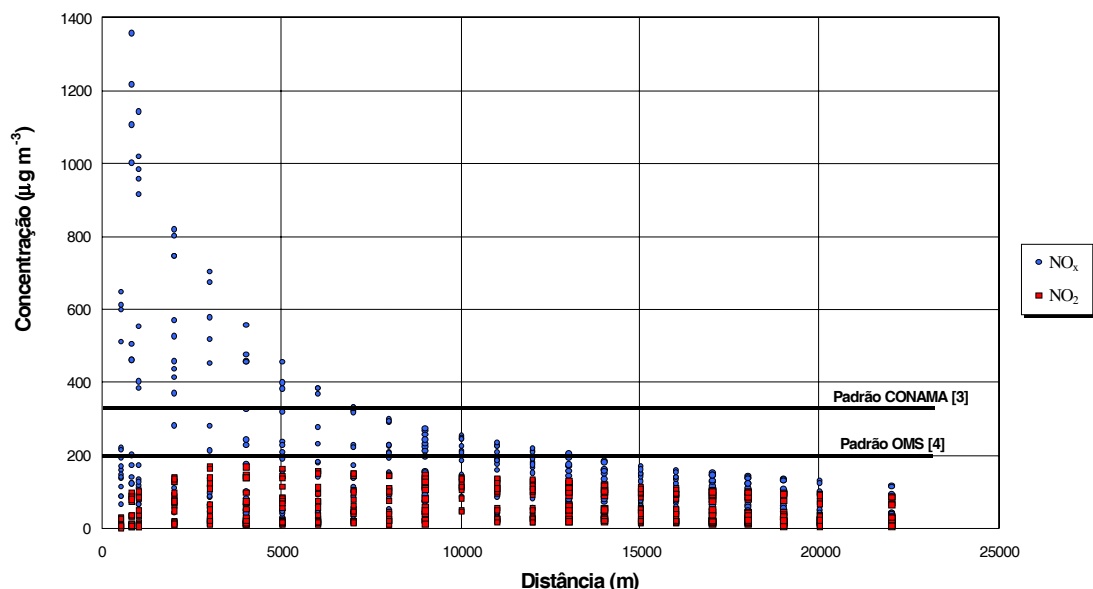


Figura 6 – Relação da concentração de NO_x e NO_2 em relação à distância da fonte.
Figure 6 – Relation between NO_x and NO_2 concentrations and the distance from the source.

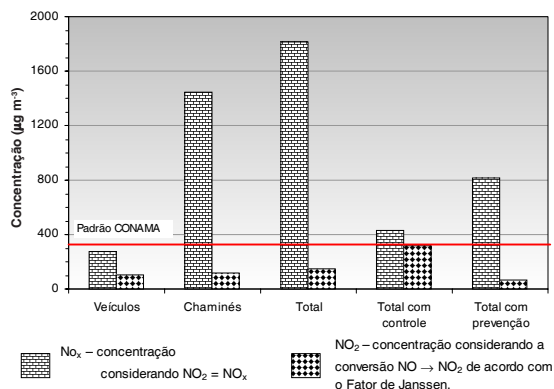


Figura 7 – Concentrações máximas horárias pontuais para todos os cenários considerados.
Figure 7 – Maximum hourly concentrations of nitrogen oxides for all the scenarios considered.

7 CONCLUSÃO

Durante a combustão de bagaço, o nitrogênio contido no combustível é a principal fonte de formação dos NO_x, enquanto o mecanismo térmico e o mecanismo rápido não são relevantes.

No estudo de dispersão das emissões de NO_x provenientes das chaminés da usina avaliada, a concentração máxima com base horária de NO_x na área de influência correspondeu ao valor de 1.447,8 µg m⁻³, que é maior que os valores previstos nos padrões de qualidade do ar.

Para o valor de concentração com base na média anual, a usina está dentro dos padrões de qualidade do ar, mesmo considerando que todo NO_x corresponda ao NO₂.

A aplicação de tecnologias de controle da emissão de NO_x (RSC, a RSNC e a injeção de ozônio) permitiria atender aos padrões da legislação de concentração de NO_x, isto para o caso de NO_x=NO₂. Uma outra opção seria o aumento da altura das chaminés de 45 m para 70 m.

No estudo realizado de dispersão das emissões de NO_x dos veículos que transitam

na rodovia localizada próxima a Usina, verificou-se que o valor da máxima concentração de NO_x encontrada não ultrapassou os padrões de qualidade do ar.

O estudo de dispersão para o caso das emissões veiculares, em conjunto com as emissões das chaminés da usina e a aplicação do fator de Janssen no valor máximo de concentração de NO_x, resultou no enquadramento aos padrões de qualidade do ar referentes ao NO₂, sem a necessidade de implementar tecnologias de prevenção e controle.

A utilização do fator de Janssen constitui uma forma comprovada experimentalmente de considerar a quantidade real de NO e NO₂ na região de influência da fonte emissora.

8 NOMENCLATURAS

k_1 : Constante da reação do NO com o O₃ ($k_1 = 29 \text{ ppm}^{-1} \text{ min}^{-1}$, segundo [Becker e Schurath (1975) apud Janssen (1986)]).

k_2 : Constante da reação do NO com o O₂ ($k_2 = 1,45 \cdot 10^{-9} \text{ ppm}^{-2} \text{ min}^{-1}$, segundo [Becker e Schurath (1975) apud Janssen (1986)]).

x: Distância entre o ponto de avaliação da concentração e a fonte de emissão (km).

a: Constante que considera a velocidade do vento, a concentração de O₃ e a constante k_1 (km⁻¹).

A: Constante que considera a constante k_1 , a constante k_2 e a concentração de O₃ (adimensional).

V: Velocidade média dos gases na saída da chaminé (m s⁻¹).

Q: Vazão média dos gases na saída da chaminé (m³ s⁻¹).

T: Temperatura média dos gases na saída da chaminé (°C).

D: Diâmetro da chaminé (m).

H: Altura da chaminé (m).

8 AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento deste trabalho contou com o apoio do CNPq através de uma bolsa de doutorado, e com o apoio da Fapemig, através de uma bolsa de mestrado.

REFERÊNCIAS

- AGRAWAL, R. K.; WOOD, S. C. An overview of NO_x control technologies with emphasis on cost and an introduction to innovative hybrid solutions for meeting stringent NO_x regulations cost-effectively. In: <http://www.etcinc.net>.
- BECKER, K. H.; SCHURATH, U. Der Einfluss von Stickstoffoxiden auf atmosphärische Oxidationsprozesse. **Staub**, v. 35, p. 156-161, 1975.
- INNOVATIVE Clean Air Technology Grant Report. Low Temperature Oxidation System Demonstration at RSR Quemetco. Inc. California: City of Industry, 2001.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Mapa topográfico, escala 1:50.000. São Paulo: 1973.
- JANSSEN, L. H. J. M. Mixing of Ambiente air in plume and its effects on the oxidation of NO. **Atmospheric Environment**, v. 20, n. 12, p. 2347-2357, 1986.
- JANSSEN, L. H. J. M.; Van WAKEREN J. H. A.; Van DUREN H. A classification of NO oxidation rates in Power Plant plumes base on Atmospheric conditions. **Atmospheric Environment**, v. 22, n. 1, p. 43-53, 1988.
- LAKES ENVIRONMENTAL. User's guide for the industrial source complex (ISC) Aermod. Ontário: 2002.
- LORA, E. S. **Prevenção e controle da poluição nos setores energético, industrial e de transporte**. 2.ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2002. 77 p.
- BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Balanço Energético Nacional – 2004. Brasília: Secretaria de Energia, 2005.
- NITROGEN Oxides (NO_x), Why and How they are controlled, EPA-456/F-99-006R, 1999.
- NUSSBAUMER, T. Combustion and Co-combustion of Biomass: Fundamentals, technologies, and primary measures for emission reduction. **Energy & Fuels**, v. 17, p. 1510-1521, 2003.
- OLIVEIRA, S.; SIMONSEN, R. M. Utilization of a method to estimate NO₂ concentrations from a NO_x simulation for thermal power plants. *Environment in the Balance - A&WMA*, 2003.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA/MMA, Resolução nº 03 de 28 de junho de 1990. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/port/conama>>. Acesso em: 3 mar. 2005.
- TEIXEIRA, F. N.; LORA, E. S. Experimental and analytical evaluation of NO_x emissions in bagasse boilers. **Biomass & Bioenergy**, v. 26, p. 571-577, 2003.
- TEIXEIRA, F. N. **Caracterização e controle das emissões de óxidos de nitrogênio e material particulado em caldeiras para bagaço**. 2005. 259 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2005.
- WEBB, A. H.; HUNTER, G. C. Power-station, contributions to local concentrations of NO₂ at ground level. **Environmental Pollution**, v. 102, p. 283-288, 1998.
- WORLD BANK GOUP. Pollution Prevention and Abatement Handbook, Effective July 1998.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION – WHO. Quality guidelines for air 1999. Geneva: World Health Organization. Cluster of sustainable development and health, 2000.