JEAN CESARE NEGRI

**MODELO PREDITIVO DA EMISSÃO E DISPERSÃO DO NO_x GERADO EM
USINAS TERMOELÉTRICAS COMO INSTRUMENTO DE ANÁLISE DE
INSERÇÃO E CAPACIDADE DE SUPORTE REGIONAL DA QUALIDADE
DO AR.**

**Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do Título de Doutor em Engenharia**

São Paulo

2002

JEAN CESARE NEGRI

**MODELO PREDITIVO DA EMISSÃO E DISPERSÃO DO NO_x GERADO EM
USINAS TERMOELÉTRICAS COMO INSTRUMENTO DE ANÁLISE DE
INSERÇÃO E CAPACIDADE DE SUPORTE REGIONAL DA QUALIDADE
DO AR.**

**Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do Título de Doutor em Engenharia**

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador:
Prof. Dr. Clemente Greco

Co-Orientador:
Prof. Dr. Silvio de Oliveira Júnior.

**São Paulo
2002**

FICHA CATALOGRÁFICA

Negri, Jean Cesare

Modelo Preditivo da Emissão e Dispersão do NO_x Gerado em Usinas Termoeletricas como Instrumento de Análise de Inserção e Capacidade de Suporte Regional da Qualidade do Ar. São Paulo, 2002.

p.234

Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Planejamento Ambiental 2. Usinas Termoeletricas 3. Emissão e Dispersão de NO_x I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica Departamento de Engenharia Mecânica II. t.

Um bem material possui metodologias objetivas de avaliação de valor, podendo serem estabelecidos padrões de comparação. Uma conquista ou bem intelectual ou profissional possui uma avaliação dependente de uma análise subjetiva, envolvendo sobretudo a percepção de cada indivíduo na avaliação de valores.

À Família, esposa e 2 filhos, pela compreensão e privação desta empreitada.

AGRADECIMENTOS

Ao orientador Prof. Dr. Clemente Greco pelo apoio e incentivo permanente.

Ao co-orientador Prof. Dr. Silvio de Oliveira Jr. pelo esforço e colaboração na fase conclusiva do trabalho.

Ao meteorologista e consultor em meio ambiente MSc. Silvio de Oliveira pelas sugestões e informações fornecidas.

Aos profissionais da CETESB, Meteorologista Carlos Ibsen Vianna Lacava, Administradora Silmara Regina da Silva e MSc. Claudio Darwin Alonso pela análise crítica e informações fornecidas.

Ao técnico Valter Nei Ribeiro pelo incansável trabalho de digitação e editoração.

A todos que de alguma forma colaboraram na execução deste trabalho.

RESUMO

O presente trabalho procura sistematizar de forma metodológica a análise de inserção de uma Usina Termoelétrica, no contexto de planejamento, no âmbito regional, sob o ponto de vista de impacto ambiental atmosférico.

Devido à carência de instrumentos de diagnóstico ambiental adequados, o planejamento setorial elétrico tem tido dificuldade na implementação do programa de expansão térmica.

Utilizando critérios internacionais de identificação e seleção de locais para implantação de Usinas Termoelétricas, aliados à experiência do Estado de São Paulo na análise desses empreendimentos, é introduzido um método preditivo de análise em alternativa ao método convencional de medição.

Baseado em informações disponíveis em banco de dados e uma análise preliminar da região de influência do empreendimento, é estimada a carga de poluentes atmosféricos, de origem industrial, móvel (veicular) e agrícola. Esta carga inicial é designada como poluição de fundo previamente existente.

As taxas de emissão por fonte são obtidas através de fatores de emissão, enquanto que a qualidade do ar é obtida por modelo de dispersão.

Com o modelo disponível, o impacto do novo empreendimento é incluído para avaliação do acréscimo.

O modelo foi aplicado na análise de emissão e dispersão do NO_x , poluente precursor da formação do ozônio.

Em alternativa ao uso singelo das taxas de emissão de projeto, é introduzido, para a nova fonte termoelétrica, um modelo global de formação de NO_x em turbinas a gás. O modelo é baseado no princípio do sistema de cálculo de emissão preditiva (PEMS) em substituição à medição direta (CEMS).

Para comparação com resultados obtidos, o modelo de formação de NO_x é aplicado numa turbina a gás com dados disponíveis (Siemens – V84.2).

Quanto ao método preditivo de emissão e dispersão, é feita uma aplicação para um estudo de caso no município de Paulínia.

Os métodos preditivo e de medição se complementam. A medição fornece dados fundamentais da situação vigente (“status quo”) e necessários para a calibração e validação do modelo preditivo, enquanto que o modelo preditivo amplia a análise para cenários de planejamento na solução de compromisso balanceada de desenvolvimento versus impacto.

ABSTRACT

This thesis intends to introduce a methodology to analyze the insertion of a Thermal Power Plant (TPP) within a planning environmental phase from the viewpoint of air pollution impact, focusing the regional ambiance.

The thermal expansion plan was not developed satisfactorily due to the lack of adequate tools of environmental diagnosis. In this way, the prediction methodology stated in this work is an alternative to the monitoring conventional one, taking into account the international criteria to identify and select a new site to settle a TPP; moreover, the experiences concerning the State of São Paulo are considered too.

The emission of air pollutants from industrial, mobile (vehicular) and agricultural sources are estimated on available data basis information and preliminary analysis of the region affected by the TPP. This initial emission is called background pollution.

The source emission rates are calculated via emission factors while the air quality is obtained by using a dispersion model. The impact of the new TPP is added to the model to evaluate the emission growth.

It is important to point out that the model was applied to analyze the nitrogen oxides (NO_x) emission and dispersion, precursor of ozone synthesis .

The new TPP considers a global model of NO_x formation related to gas turbines, in lieu of using the single project emission rate of NO_x . This model is based on predictive emission monitoring system (PEMS) that is an option of the continuous emission monitoring system (CEMS).

In order to compare the results obtained from the predictive calculation, the model is applied to a tested gas turbine (Siemens –model V84.2).

The synthesized predictive and dispersion models are applied in a case study that considers Paulínia region.

The predictive and monitoring methods are complementary. The monitoring system data gives the actual situation (“status quo”) and is the necessary information to

calibrate and validate the predictive method. Otherwise, the predictive method enlarges the analysis of planning scenarios in the trade off between development and impact.

PREÂMBULO

Nas regiões metropolitanas no Estado de São Paulo tem havido concentração no desenvolvimento econômico e crescimento demográfico. Podem ser destacadas, além da Região Metropolitana da Grande São Paulo (RMSP), as Regiões Metropolitanas de Campinas, Santos-Cubatão, Sorocaba e São José dos Campos. Baseada sobretudo numa infra-estrutura industrial, estas regiões têm mantido esta vocação atraindo empreendimentos novos.

Com uma infraestrutura desenvolvida para acesso a insumos básicos, o setor elétrico no segmento de geração enxerga nestes locais um importante potencial para a implementação de Usinas Termoeletricas. A conjugação de insumo-consumo torna estas regiões de alto interesse em vista do potencial benefício econômico. Esta constatação é refletida nas condições atuais, nas quais pelo menos um projeto de usina vem sendo desenvolvido em cada uma destas regiões.

Por outro lado, a expansão continuada gera um apelo ambiental, através de uma preocupação geral e legítima da sociedade civil e das instituições de controle ambiental, para um crescimento sustentável da região. A questão passa por uma solução de compromisso, envolvendo desenvolvimento que traz recursos para a região e a qualidade ambiental, que possui uma capacidade de suporte finita.

Com o intuito de evitar degradação ambiental adicional, o órgão de licenciamento tem orientado os empreendedores no sentido de manter o nível de emissão, isto é acréscimo zero. Isto redundaria necessariamente numa retirada de fontes existentes e numa análise de compatibilização dos poluentes envolvidos.

Neste sentido, *a motivação deste trabalho está na concepção de um instrumento para o diagnóstico preditivo da qualidade do ar*, que pode surgir como uma importante ferramenta de planejamento e análise, além de agilizar o licenciamento de empreendimentos termoeletricos.

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

PREÂMBULO

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>1. INTRODUÇÃO.....</i>	<i>1</i>
<i>2. OBJETIVO.....</i>	<i>6</i>
<i>3. METODOLOGIA – CONCEPÇÃO DA ANÁLISE.....</i>	<i>9</i>
3.1 Região de Estudo	11
3.2 Área de Concentração das Fontes Poluidoras.....	12
3.3 Área de Influência.....	13
3.4 Taxas de Emissão.....	14
3.5 Modelo de Previsão de NO _x	17
3.6 Estudo de Dispersão	17
3.7 Estudo de Reações Secundárias de Origem Fotoquímica.....	20
3.8 Limitações e Implementação do Conceito Preditivo	22
3.9 Capacidade de Suporte e Sustentabilidade	25
<i>4. ESTADO DA ARTE – PLANEJAMENTO DO SETOR ELÉTRICO E</i>	
<i>EMISSÃO DE NO_x.....</i>	<i>27</i>
4.1 Experiência	27
4.2 Impacto do Programa Prioritário Termoeletrico (PPT)	29

4.3 Interação Entre o Planejamento Elétrico e Ambiental.....	32
5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	38
5.1 Legislação Principal - Envolvória	38
5.2 Poluente NO _x	41
5.2.1 Mecanismo de Formação.....	41
5.2.1.1 NO térmico.....	42
5.2.1.2 NO combustível.....	44
5.2.1.3 NO ativo ou "prompt"	46
5.2.2 Técnicas de Controle de Formação e Emissão de NO _x	46
5.2.2.1 Remoção prévia	47
5.2.2.2 Redução durante a combustão	47
5.2.2.3 Processo de tratamento de gases efluentes	49
5.2.3 Fatores de Emissões	51
5.2.3.1 Fontes industriais	54
5.2.3.2 Fontes móveis - veículos	55
5.2.3.3 Fontes agrícolas – queimada de cana	55
5.2.4 Efeito NO _x na Atmosfera.....	56
5.2.5 Modelos de Previsão	58
5.3 Modelo de Dispersão	65
5.3.1 Introdução.....	65
5.3.2 Modelos Usuais de Dispersão	66
6. MODELO DE PREVISÃO DE NO_x.....	70
6.1 Objetivo.....	70
6.2 Estruturação do Cálculo.....	71
6.3 Estudo de Caso.....	76
7. MODELO DE DISPERSÃO – ESTUDO DE CASO DE PAULÍNIA	93
7.1 Características do Município.....	93
7.2 Base de Dados	95
7.3 Fontes e Emissões Consideradas.....	102
7.3.1 Fontes Fixas (Industriais).....	102
7.3.2 Fontes Móveis Veiculares	105
7.3.3 Fonte Agrícola	108
7.4 Resultados de Dispersão Obtidos Pelo Modelo Screen.....	110

7.5 Resultados de Dispersão – Modelo ISCST	115
7.6 Integração dos Modelos de Formação e Dispersão de NO _x	121
8. CONCLUSÃO.....	124
ANEXO A – MODELO DE DISPERSÃO DE PLUMA	127
A.1 Introdução.....	127
A.2 Histórico.....	127
A.3 Objetivo.....	127
A.4 Modelo de Pluma.....	129
A.4.1 Descrição.....	129
A.4.2 Distribuição Normal Gaussiana	129
A.4.3 Equação de Dispersão para Fontes Elevadas	133
A.4.4 Coeficientes de Dispersão (vide Apêndice B).....	137
A.4.5 Cálculo da Altura de Elevação de Pluma (Δh).....	140
A.4.6 Influência de Parâmetros e Limitações	141
A.5 Exemplos de Cálculo	142
9. BIBLIOGRAFIA.....	144
<i>APÊNDICE A - JATOS VERTICAIS TURBULENTOS ENVOLVENDO EMPUXO: ANÁLISE DE PLUMA</i>	
<i>APÊNDICE B – CARACTERÍSTICAS E ESTABILIDADE ATMOSFÉRICA..</i>	
<i>APÊNDICE C – EXEMPLO DE APLICAÇÃO DE CÁLCULO</i>	
<i>APÊNDICE D – USO DE NOMOGRAMAS</i>	
<i>APÊNDICE E – LISTAGEM DO CÁLCULO DO MODELO DE PREVISÃO DE NO_x</i>	
<i>APÊNDICE F – REGISTRO METEOROLÓGICO</i>	
<i>APÊNDICE G – ARQUIVOS DE ENTRADA E SAÍDA DO MODELO SCREEN</i>	
<i>APÊNDICE H – ARQUIVOS DE ENTRADA DO MODELO ISCST</i>	

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma Sintético do Processo de Análise.....	10
Figura 2 – Representação Esquemática das Áreas de Estudo, de Fontes e de Influência	14
Figura 3 – Fluxograma de Trabalho para Elaboração de um Diagnóstico Ambiental Completo	25
Figura 4 – Projeção Atual e Futura para o Brasil de Emissão de NO_x Proveniente da Queima de Gás Natural e de Outros Combustíveis (4)	32
Figura 5 – Processo de Seleção de Áreas.....	36
Figura 6 – Perfil de Concentração de Espécies Envolvidas no Ciclo do Ozônio Obtido pela Variação de Intensidade da Luz do Dia, num Sistema (27).....	57
Figura 7 – Modelo de Formação de NO_x.....	63
Figura 8 – Representação do Turbo – Compressor - Gerador	73
Figura 9 – Resultado de Modelo de Cálculo – Regressão da Vazão de Combustível e Cálculo da Vazão de Ar com a Potência	78
Figura 10 – Concentração de Emissão de NO_x Real em Turbina Siemens V84.2 (38)	79
Figura 11 – Comparação do Modelo de Cálculo de NO_x.....	81
Figura 12 – Comparação do Modelo de Cálculo de NO_x com Injeção de Água .	83
Figura 13 – Temperatura de Chama Adiabática em Função da Temperatura do Ar	85
Figura 14 – Variação de NO_x com a Temperatura do Ar – Zona I – Difusão....	87
Figura 15 – Variação de NO_x com a Temperatura do Ar – Zona II – Pré- Mistura	88
Figura 16 – Composição de O₂ dos Gases com a Carga	89
Figura 17 – Temperatura de Chama Adiabática com a Carga.....	90
Figura 18 – Variação de NO_x com a Carga - Zona I - Difusão	91
Figura 19 – Variação de NO_x com Carga – Zona II – Pré-Mistura	92
Figura 20 – Localização das Fontes de Emissão – Caso Base Paulínia	98
Figura 21 – Registro de Frequência da Direção do Vento – Viracopos/1997	99
Figura 22 – Registro Acumulado da Direção do Vento – Viracopos/1997	100

Figura 23 – Registro de Frequência da Direção do Vento – Comparação de Fontes.....	101
Figura 24 – Mapa de Uso e Ocupação de Solo do Município de Paulínia.....	109
Figura 25 – Resultado com Todas Fontes Fixas num Único Ponto – Modelo Screen.....	111
Figura 26 – Resultados com Todas Fontes Fixas num Único Ponto Incluindo Demais Fontes Uniformemente Distribuídas – Modelo Screen.....	113
Figura 27 – Avaliação das Fontes Fixas Para Receptor Paulínia	114
Figura 28 – Resultados de Concentração NO + NO₂ – CETESB	116
Figura 29 – Concentração Média Horária de NO_x – Resultados Medidos e Previstos.....	120
Figura 30 - Taxa de Emissão e Concentração de NO_x com a Carga da Turbina	122
Figura 31 - Taxa de Emissão e Concentração de NO_x com a Temperatura do Ar	123
Figura 32 – Esquema e Terminologia de Controle de Poluição do Ar Utilizada como Base para Modelagem (49)	128
Figura 33 – Sistema de Coordenadas Indicando Distribuição Gaussiana na Direção Horizontal e Vertical (49)	131
Figura 34 – Curva Normal Gaussiana (49)	132
Figura 35– Balanço de Massa Sobre a Seção da Pluma (49)	134
Figura 36 – Imagem da Fonte para Pluma Refletida (49).....	136
Figura 37 – Coeficiente de Dispersão Horizontal como Função da Distância na Direção do Vento Após a Fonte (49)	138
Figura 38 – Coeficiente de Dispersão Vertical como Função da Distância na Direção do Vento Após a Fonte (49)	139
Figura A.1 – Jatos com Empuxo em Condições de Meio Uniforme	143
Figura A.2 - Jato com Empuxo em Meio com Estratificação Estável.....	144
Figura A.3 – Representação do Decaimento para Densidade e Velocidade no Eixo Central de Jatos Axisimétricos com Empuxo (45)	150
Figura A.4 – Desenvolvimento do Escoamento (45).....	152
Figura A.5 - Perfis de Velocidade e Densidade para Pluma Plana (45)	156

Figura A.6 – Perfis de Similaridade de Grandezas Turbulentas para Plumas Planas (45)	158
Figura B.1 – Transformação Adiabática de uma Massa de Ar das Condições Existentes no Nível (1) às Condições Existentes no Nível (2).....	164
Figura B.2 – Esquema para Verificar a Estabilidade de uma Massa de Ar.....	164
Figura B.3 – Superposição do Gráfico de Distribuição Real das Temperaturas com Distribuições Adiabáticas para Visualização das Regiões de Equilíbrio Estável, Instável e Indiferente	165
Figura B.4 – Distribuição de Temperatura no Caso de Resfriamento do Solo nos Instantes t_0, t_1, t_2, t_3 e t_4	166
Figura B.5 – Distribuição de Temperatura no Caso de Aquecimento do Solo nos Instantes t_0, t_1,.....t_7.....	167
Figura B.6– Situações Típicas de Equilíbrio Atmosférico e Perfil de Plumas (51)	168
Figura D.1 – Exemplo de Nomograma para Estimar a Altura da Camada de Mistura em Condições Típicas de Dia do Reino Unido (48)	172
Figura D.2 – Exemplo de Nomograma para Estimar as Concentrações de SO_x para uma Usina Termoelétrica em Londres (média de 24h) (48)	173

LISTA DE TABELAS

Tabela I – Emissão Prevista do PPT	30
Tabela II – Projeção Atual e Futura para o Brasil de Emissão de NO_x	
Proveniente da Queima de Gás Natural e de Outros Combustíveis (4)	31
Tabela III - Reações do Mecanismo de Zeldovich (6 e 13)	42
Tabela IV – Abatimento de NO_x – valores em %	50
Tabela V – Padrão de Qualidade de Ar do NO₂ (Conama 003/1990 - Brasil) –	
valores em mg/m³	51
Tabela VI – Padrões de Emissão do NO_x (6)	51
Tabela VII – Constantes de Conversão de Taxas de Emissão de NO e NO₂	52
Tabela VIII – Fatores de Emissão de NO_x para Fontes Industriais	54
Tabela IX – Consumo de Combustíveis de Paulínia e Região (1997)	103
Tabela X – Dados das Fontes Industriais	105
Tabela XI – Frota Municipal de Paulínia (1997 – estimada)	106
Tabela XII – Emissão de NO_x da Frota de Veículos de Paulínia	107
Tabela XIII – Estimativa de Concentração para Receptor em Paulínia	112
Tabela XIV – Resultados de Concentração de NO_x para Paulínia	
(receptor – (o): - 3000; - 2500)	118

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANP – Agência Nacional de Petróleo

CCPE – Comitê Coordenador de Planejamento do Sistema Elétrico

CEMS – Continuous Emission Monitoring System

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental

COMASE – Comitê Coordenador de Atividades de Meio Ambiente do Setor Elétrico

CTSA - Comitê Técnico Sócio-Ambiental

DNC – Departamento Nacional de Combustível

DLN – Queimador de Baixa Emissão de NO_x (“dry low NO_x”)

EES – Engineering Equation Solver

EEUU – Estados Unidos da América

EIA – Estudo de Impacto Ambiental

EPRI - Electric Power Research Institute

FIESP – Federação das Indústrias do Estado de São Paulo

GIS – Geographic Information System

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ISCST – Industrial Source Complex Short Term

MMA – Ministério de Meio Ambiente

MME – Ministério de Minas e Energia

MF – Ministério da Fazenda

PAN – Peroxiacetil-nitrato

PEMS – Predictive Emission Monitoring System

PPT – Programa Prioritário Termoelétrico

RAC – Região Administrativa de Campinas

RIMA – Relatório de Impacto Ambiental

RMSP – Região Metropolitana de São Paulo

SAEGET – Sistema de Análise da Expansão da Geração Termoelétrica

SCR – Redução Catalítica Seletiva

SCREEN – Modelo de Dispersão Simplificado da USEPA

SMA – Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo

SNCR – Redução Não Catalítica Seletiva

UHE('s) – Usina(s) Hidroelétrica(s)

USEPA – United States Environmental Protection Agency

UTE('s) – Usina(s) Termoelétrica(s)

UTN – Usina Termoelétrica Nuclear

LISTA DE SÍMBOLOS

A_{ativo} – termo constante da equação de formação do NO ativo (18): $1,2 \cdot 10^7$ (1/s)

$A_{\text{comb, d}}$ – termo constante de destruição da equação de formação de NO combustível (17): $3 \cdot 10^{12}$ (1/s)

$A_{\text{comb, f}}$ – termo constante de formação da equação de formação de NO combustível (17): 10^{10} (1/s)

A_1 – parâmetro para produção de NO_x ($\text{m}^2 \text{N}^{0,5} / \text{kg} \cdot \text{s}$)

B_c, B_u – parâmetros experimentais

C – concentração média; função da concentração de poluentes

C^* – adimensional de concentração média

C_p – calor específico a pressão constante (J/kg-K)

C_v – calor específico a volume constante (J/kg-K)

D – largura de jato plano ou diâmetro de jato axissimétrico na fonte

$f(\phi)$ – função empírica de razão de equivalência para estimativa $X_{\text{NO}_{x,a}}$

F – número de Froude:
$$\frac{U_0^2}{gD(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_0) / \mathbf{r}_0}$$

F_1 – parâmetro definido (eq. 46)

– força sobre massa de ar (peso)

F_2 – força sobre massa de ar (empuxo)

g – aceleração da gravidade considerada como valor positivo

g_1 – adimensional de força de empuxo

G – número de Grashof:
$$\frac{g(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_0)D^3}{\mathbf{r}_0 \mu^2}$$

h – altura da chaminé; constante de Planck

h_l – altitude local (m)

H – altura efetiva

H_{ar} – entalpia específica do ar (kJ/kg)

H_{comb} – entalpia específica do combustível (kJ/kg)

H_e – máxima altura de elevação da pluma

H_{gases} – entalpia específica dos gases (kJ/kg)

$H_{\text{vapor/água}}$ – entalpia específica do vapor ou água (kJ/kg)

$H_n C_m$ – hidrocarbonetos não queimados

j – 0 para jatos planos e 1 para jatos axissimétricos

J – nº chaminés

k – constante de equilíbrio

k_i – constantes de velocidades das reações diretas i

k_{-i} – constantes de velocidades das reações inversas i

k_{eq} – coeficiente de taxa de reação química

k_{NO_x} = energia de ativação cinética total, obtido da literatura (J/kgmol)

k_u, k_c – parâmetros experimentais (eq. A.11 e A.12)

k_t – energia cinética turbulenta

k_{vk} – constante de Von Karman

kk – constante de proporcionalidade (eq. 40)

K – fator de equivalência de chaminés

ℓ - comprimento característico da turbulência

L – grandeza de estabilidade atmosférica

m_{ar} – vazão de ar (kg/s)

m_{ar}^* - vazão de ar tentativa (kg/s)

m_{comb} – vazão de combustível (kg/s)

m_i – fração molar da espécie i (eq. 5)

m_ℓ - massa característica

$m_{\text{vapor/água}}$ – vazão de vapor ou água (kg/s)

M – fluxo da quantidade de movimento do jato: $2 \int_0^\infty \mathbf{r} U^2(\mathbf{p})^j dy$

M_i – massa molecular da espécie i (eq. 5) ((kg/kgmol)

M_{MIX} – massa molecular dos gases (mistura) (kg/kgmol)

M_{rz} - massa molecular dos produtos na zona de reação do combustor, calculada (kg/kgmol)

MM – componentes químicos

n – relação dos calores específicos (C_p/C_v); coeficiente politrópico

$[N_2]_{eq}$ – fração molar de N_2 equivalente (moles/cm³)

NO – óxido de nitrogênio

NO₂ – dióxido de nitrogênio

NO_x – óxidos de nitrogênio, incluindo óxido nítrico (NO) e dióxido de nitrogênio (NO₂)

$\frac{d(NO)}{dt}$ - taxa de formação de NO (eq.3 e 4) (moles/s-m³)

$[O_2]_{eq}$ – fração molar de O₂ equivalente (moles/cm³)

Q – fluxo de calor

Q_e – taxa de emissão de poluentes

Q_v – taxa de vazão volumétrica dos gases

p - pressão no combustor, calculada (kPa)

p_{ar} – pressão do ar ambiente (Pa)

p_N – pressão parcial de N (Pa)

p_{sc} – pressão de saída do compressor (Pa)

Pot_{comp} – potência consumida no compressor (MW)

Pot_{el} – potência elétrica líquida (MW)

Pot_{total} – potência total (MW)

r_i – constante de conversão

r_p – razão de pressão

R – constante universal dos gases (J/kgmol-K)

R_1 – R/g

R_c – adimensional da energia (eq. A.18)

Re – número de Reynolds: $\frac{U_0 D}{\nu}$

R_f – número de fluxo de Richardson: $\frac{g}{T_a} \frac{\overline{u \cdot T}}{\overline{u \cdot v} \cdot \partial V / dz}$

R_m – adimensional da quantidade de movimento (eq. A.17)

R_u - constante universal dos gases dos produtos de combustão, constante física (J/kg-K)

S – parâmetro de estratificação (eq. 51, 52 e A.4)

S_k – produção de energia turbulenta

S_{NO} – termo de produção de NO térmico (eq. 5) (kg/s/m^3)

$S_{NO, \text{ativo}}$ – termo de produção de NO ativo (eq. 18) (kg/s/m^3)

$S_{NO, \text{comb}}$ – termo de produção de NO combustível (eq. 16 e 17) (kg/s/m^3)

SO_x – óxidos de enxofre (SO_2 e SO_3)

t - tempo de residência no combustor, calculado (s)

T – temperatura média

T_{ar} – temperatura do ar ambiente (K)

T, T_{ch} – temperatura de chama (K)

T_{comb} – temperatura do combustível (K)

T_{eq} – temperatura equivalente (K)

T_{gases} – temperatura dos gases (K)

T_{sc} – temperatura de saída do compressor (K)

T_{st} – temperatura de saída da turbina (K)

T' - termo de flutuação da temperatura

u, u_v – velocidade do vento

u' - termo de flutuação de velocidade na direção z

U, V – velocidade média

U_o - velocidade do vento a 10m de altura.

U_η - velocidade de vento corrigida (eq. B.8)

U_1 – adimensional de velocidade

v' - termo de flutuação de velocidade na direção y

x - variável

x_f – parâmetro definido (eq. 47 e 48)

X_i – fração molar da espécie i (moles de i/ moles do gás)

X_{N_2} - fração molar de N_2 , calculada (moles de N_2 /moles do gás)

$X_{NO_{x,t,a}}$ - fração molar de NO_x (moles de NO_x /moles do gás)

- t: térmico a: ativo

X_{O_2} - fração molar de O_2 , calculada (moles de O_2 /moles do gás)

VOC – componentes organo-voláteis

w – fator de excesso de ar

W – diferença da força gravitacional: $2 \int_0^\infty (\mathbf{r}_a - \mathbf{r}) U(\mathbf{p}y)^j dy$

$y_{.5u}$; $y_{.5c}$ – valores de y onde a velocidade (U) e temperatura (T) ou concentração (C) são respectivamente metade dos valores da linha de centro

$Y_{.5u}$; $Y_{.5c}$ – taxas de espalhamento de velocidade e temperatura ou concentração: $Y_{.5u} = dy_{.5u}/dz$; $Y_{.5c} = dy_{.5c}/dz$

z_l – adimensional de comprimento

z^* - largura característica da função normal

Z_m – ponto de altura máxima

Símbolos gregos

α_t – difusividade turbulenta de calor

β - coeficiente de compressibilidade $\equiv -\frac{1}{r} \frac{\partial r}{\partial T}$

β' - coeficiente de compressibilidade $\equiv -\frac{1}{r} \frac{\partial r}{\partial m_\ell}$

δ - largura característica do jato

Δh – elevação do jato de gases

Δh_f - elevação máxima ou final

Δh_{f1} - elevação máxima calculada (eq. 55)

Δh_{f2} - elevação máxima calculada (eq. 56)

$\Delta T - (T - T_a)$

η - adimensional de distância; índice de turbulência

λ - gradiente atmosférico vertical de temperatura

μ - média da distribuição normal

μ_t – difusividade turbulenta da quantidade de movimento

ν - viscosidade cinemática; frequência da luz

ρ - densidade (kg/m^3)

σ - desvio padrão

$S_{h,eff}$ – número de Prandtl térmico

$S_{\ell,eff}$ - número de Prandtl massa

S_t - número de Prandtl turbulento

S_y, S_q - desvio padrão ou coeficiente de dispersão na direção y (horizontal)

S_z - desvio padrão ou coeficiente de dispersão na direção z (vertical)

subscrito

0 - condição de saída ou iniciais

a – ambiente

d - destruição

f – formação

ζ - linha de centro

m – máximo

1. INTRODUÇÃO

Uma UTE apresenta 3 tipos de efluentes subdivididos de acordo com a fase, em sólidos, líquidos e gasosos.

Os efluentes de origem sólida normalmente presentes são provenientes de atividades de escritório, cozinha e de oficina, absorvidos em geral pelo serviço de coleta existente. No caso de UTE's a carvão e algumas a óleo combustível, pode haver rejeito de processo derivados do sistema de abatimento de gases efluentes, destacando, por exemplo, a formação de gesso oriundo do processo de dessulfurização.

Entre os efluentes líquidos destaca-se o sanitário, tratado através de sistema de fossa séptica. O principal efluente líquido de processo é proveniente da purga do sistema de resfriamento e das caldeiras. Este efluente é rico em sais e produtos químicos, necessitando tratamento via decantação antes do descarte. O sistema de resfriamento tipo circulação aberta, no qual o condensador recebe água diretamente do manancial local, provoca a emissão de uma carga térmica. Em geral, o condensador é projetado para uma elevação de temperatura da corrente circulante de 12K, enquanto que a elevação no corpo de água está limitada em 3K.

Os efluentes gasosos, em geral inerentes e responsáveis pelo principal impacto de uma UTE, são: o dióxido de carbono (CO_2), os hidrocarbonetos não queimados (H_nC_m) incluindo os compostos organo-voláteis (VOC), o material particulado (MP), o monóxido de carbono (CO), os óxidos de enxofre (SO_x) e os óxidos de nitrogênio (NO_x).

No caso de modernas UTE's com turbina a gás em ciclo combinado utilizando gás natural, a principal atenção é o sobre o NO_x , que na atmosfera com a presença de luz pode reagir com hidrocarbonetos formando ozônio (O_3), danoso à saúde pública.

Em geral, o empreendedor nos seus estudos ambientais trata do seu empreendimento de forma isolada, avaliando as emissões gasosas e valores de qualidade do ar com as

referências normatizadas. As condições pré-existent na área de influência⁽¹⁾ são na grande maioria desconhecidas, devido à falta de uma rede de monitoramento. Como a informação da concentração da poluição de fundo pré-existente (“background”)⁽²⁾ caberia ao órgão de controle ambiental local, que em geral não a possui, considerando também que a sociedade requisita a avaliação integralizada para garantir a qualidade ambiental da região e que o órgão licenciador sente falta desta informação para um julgamento adequado, fica estabelecido o impasse.

A proposta de solução para esta questão da necessidade de uma avaliação integrada, legítima por sinal, é o estabelecimento de uma metodologia de análise da capacidade de suporte da região. A idéia é a criação de uma espécie de “guarda-chuva”, estabelecendo condições de sustentabilidade, sendo que o espaço sob o “guarda-chuva” seria preenchido por empreendimentos até o limite da capacidade disponível. A identificação do espaço existente ou remanescente é de fundamental importância.

A forma tradicional indicada é a elaboração de um diagnóstico real físico e sócio-econômico, indicando um método de análise para cenários futuros de qualidade de ar. Este diagnóstico envolve medições em todas as fontes de emissão e monitoramento da qualidade do ar em alguns locais da região. Além de envolver uma massa considerável de recursos, este trabalho consome um tempo significativo de aproximadamente 2 anos. Com o conjunto de dados levantados, é aferido e validado um modelo de dispersão representativo da região, incluindo de forma agregada as fontes estacionárias (industriais), móveis (veículos) e agrícolas, provenientes de queimadas. Este modelo é o instrumento de análise para indicar a inclusão de novos empreendimentos, limitados à capacidade de suporte estabelecida.

Alternativamente, pode ser proposto um método mais expedito, compreendendo um diagnóstico preditivo da qualidade do ar da região, com o objetivo de fornecer a primeira avaliação sobre as condições ambientais da região de estudo.

⁽¹⁾ área de influência: área onde o impacto do empreendimento está presente de forma direta ou indireta (será exemplificado adiante).

⁽²⁾ poluição de fundo neste trabalho é entendida como aquela proveniente das fontes existentes no local de origem industrial, veicular e agrícola, a qual deve ser incidida a poluição inerente do local, para fornecer a poluição total pré-existente

Antecipando a implementação de um sistema de medição de emissão e de uma rede de monitoramento do ar, a idéia principal é utilizar a mesma cadeia de modelos de dispersão, alimentada com dados de emissão estimados a partir do consumo de combustível por tipo de fonte da região.

Em síntese o que se pretende é, uma vez definidas as áreas de influência e as fontes poluidoras, estimar as taxas de emissões, com base em inventário e consultas às indústrias da região (instaladas e acessantes). Tais emissões estimadas podem ser inseridas num modelo de dispersão do ar para a obtenção da qualidade do ar, numa região de entorno definida.

Os métodos acima se complementam. O modelo preditivo proposto poderá estabelecer as condições orientativas da região em termos de qualidade do ar. A segunda fase, compreendendo medição de campo, fornecerá dados reais para uma pequena série, contudo de fundamental importância para aferir, calibrar e validar o modelo. A terceira fase, concluindo o processo, é a aplicação do modelo para extrapolar as condições de contorno da medição e estabelecer cenários futuros, contemplando a capacidade de suporte da região.

Por outro lado, a experiência do setor elétrico no Brasil é maior no desenvolvimento e implantação de Usinas Hidroelétricas – UHE's, representando mais de 90% de participação no parque gerador existente. O setor possui experiência restrita no tratamento para viabilização ambiental de Usinas Termoelétricas – UTE's.

O próprio documento guia de abertura do setor elétrico brasileiro – RE-SEB (54), tratou a questão ambiental dos empreendimentos de geração de forma marginal. Recentemente (2000), o Ministério de Minas e Energia – MME, estruturou um grupo de trabalho no sentido de complementar este documento guia. A força tarefa da questão ambiental sugeriu 2 pontos básicos, visando criar mecanismos facilitadores:

- Adequação da Política Ambiental da Legislação e do Licenciamento Ambiental para o Setor Elétrico;
- Estabelecimento e Adoção de Critérios Ambientais para os Agentes.

Revisões de procedimentos legais derivadas do racionamento de energia elétrica, visando tornar o licenciamento mais expedito, tiveram origem nestas sugestões.

Contudo, há questões delicadas e cruzadas envolvidas, a saber: legislação para procedimentos simplificados, a falta de informação regional e local adequada e Lei dos Crimes Ambientais supervisionada pelo Ministério Público.

A convergência entre o MME e Ministério de Meio Ambiente – MMA, na busca de soluções adequadas e comprometidas, é uma linha de ação necessária.

Um terceiro aspecto do problema é a alteração a médio prazo da matriz energética, com a introdução do gás natural de origem nacional e importada de países vizinhos. As características do gás impõem o desenvolvimento de mercado de forma lenta e gradativa. As UTE's a gás preenchem 2 aspectos importantes. A UTE operando em complementação ao sistema hidroelétrico otimiza economicamente o despacho para atendimento da carga e funciona como um seguro para cobrir déficits hídricos. A tecnologia atual é de ponta com o alcance de elevadas eficiências utilizando turbina a gás em ciclo combinado, aliado a um menor impacto ambiental em comparação com outras tecnologias e combustíveis. As UTE's apresentam elevado consumo de gás, cerca de 1 milhão de m³/dia para cada 250 MW instalados em ciclo combinado, funcionando desta forma como uma âncora num mercado jovem de gás, possibilitando desenvolvimento de clientes e companhias vinculadas ao processo.

Um quarto aspecto a ser salientado é com relação aos órgãos de licenciamento ambiental que, familiarizados com processos industriais, têm nestes empreendimentos preocupação com a emissão de NO_x e com a demanda e consumo de água para o sistema de resfriamento. O NO_x é um poluente inerente na combustão de turbinas a gás e na atmosfera, com a presença de hidrocarbonetos não queimados e luz, sofre reações fotoquímicas secundárias, provocando o surgimento de compostos agressivos, isto é, ozônio e PAN (peroxiacetil-nitrato). A previsão de formação de ozônio é bastante complexa com modelagem limitada a situações particulares.

Portanto, este conjunto de 4 aspectos, resumindo: **falta de experiência do setor elétrico na implantação destas UTE`s, falta de legislação específica e banco de dados para análise ambiental, alteração da matriz energética com a introdução do gás natural e o potencial impacto do NO_x foi a força motivadora deste trabalho.**

A idéia principal é criar um processo preditivo de análise. A primeira etapa é a captação de informações básicas disponíveis. A partir desses dados, serão estimados dados secundários necessários para alimentar modelos existentes de emissão e dispersão de NO_x. O resultado é a previsão local de NO_x, incluindo o empreendimento sob análise e a concentração da poluição de fundo pré-existente (“background”).

Além da sistematização da metodologia de análise, é elaborado um programa de cálculo que, a partir de dados operacionais, estima a formação de NO_x para turbinas a gás com base nos procedimentos PEMS - “Predictive Emission Monitoring System”, agregando em seguida esta emissão a de fundo estimada, via procedimento, nos modelos de dispersão da USEPA (SCREEN e ISCST – “Industrial Source Complex Short Term”). Esta seqüência é aplicada para fins de comparação num caso base na região de Paulínia, que possui dados disponíveis de monitoramento do ar.

2. OBJETIVO

O objetivo e a principal contribuição do trabalho é a concepção em termos regionais de um modelo preditivo de qualidade do ar no tocante ao poluente NO_x . É sobre o NO_x que estão as maiores preocupações dos órgãos de licenciamento ambiental para UTE's a gás natural nas configurações com turbina a gás em ciclo simples e combinado. Além da reação secundária para a formação de ozônio e PAN, o NO_x pode provocar na atmosfera a formação de ácidos nítricos, um dos responsáveis pelo conhecido fenômeno de chuva ácida.

Para estabelecer a concentração da poluição de fundo pré-existente (“background”) de emissão de NO_x para uma determinada região, é definida uma região de fontes de emissão, com o empreendimento UTE circunscrito. As emissões de NO_x das fontes existentes são estimadas através de fatores de emissão, segundo a origem: industrial, veicular e agrícola. Para as fontes veiculares e agrícolas, numa primeira aproximação, são distribuídas sobre a área de estudo. As fontes estacionárias ou industriais são incorporadas como emissões pontuais no modelo de dispersão.

Para a UTE sob análise é desenvolvido um modelo de previsão de emissão de NO_x que é acoplado a modelos de dispersão existentes (SCREEN/ISCST – “Industrial Source Complex Short Term”) (55). Os modelos SCREEN e ISCST estão em domínio público com distribuição gratuita pela USEPA através da Internet.

Como resultado final, ao longo da grade da área de influência, são obtidos valores de NO_x devido à UTE e às fontes estacionárias existentes, adicionadas à concentração da poluição de fundo pré-existente (“background”) obtida para veículos e fontes agrícolas. Este produto pode ser denominado o primeiro instrumento preditivo de capacidade de suporte da região. A validação e aferição final são obtidas através de uma massa significativa de dados de medição da qualidade do ar através de estações de monitoramento e de medição das diversas fontes envolvidas através de medições *in loco* da emissão das fontes industriais (chaminés), trabalho este que envolve recursos consideráveis e período não inferior a 2 anos.

O modelo de previsão e formação de NO_x na turbina a gás é desenvolvido através de um método global, baseado em balanços de massa e de energia e cinética de formação de NO_x , similar ao procedimento utilizado no PEMS (37). O método de equacionamento global atende às necessidades de previsão de taxa global de emissão de NO_x (g/s) para alimentar o modelo de dispersão. O modelo de previsão no conceito global é desenvolvido no sistema, EES – Engineering Equation Solver (56).

Para a integração dos 2 modelos, previsão e dispersão de NO_x , é montado um caso base para a região de Paulínia. Há dados disponíveis suficientes sobre consumo de combustíveis, frota de veículos e uso e ocupação do solo, referenciados a 1997. Dados adicionais, tais como, tipo de uso de combustíveis, tipo de fonte de combustão, número de veículos em trânsito por estradas, são estimados ou assumidos.

Vale ressaltar que acima de uma busca de precisão de resultados, que depende de informações nem sempre disponíveis ou acessíveis, o trabalho apresenta e sugere a filosofia de integração dos modelos de previsão e dispersão de NO_x contemplando a concentração da poluição de fundo pré-existente (“background”).

A análise de inserção de uma UTE ou qualquer empreendimento industrial passa pela elaboração e aprovação de instrumentos legais de licenciamento, destacando-se o EIA/RIMA. Nestes documentos são detalhados estudos relativos a caracterização e impacto do empreendimento seguido de medidas de mitigação e programas de monitoramento.

Em áreas industriais e com importante comprometimento ou passivo ambiental tem sido implementado monitoramento como instrumento de controle, conformidade e inclusão de novos empreendimentos.

Neste caso, em geral o novo empreendimento só é aprovado se utilizar a última tecnologia de controle ambiental e não houver incremento no impacto, conseguido apenas com a retirada ou substituição de fontes existentes.

Para outras áreas em desenvolvimento não existe disponível um instrumento de planejamento ambiental.

Órgãos Ambientais têm incrementado o conceito de sustentabilidade e capacidade de suporte através de inicialmente a elaboração de um diagnóstico inicial, estabelecendo condições para prognósticos futuros. Neste contexto, a Secretaria de Meio Ambiente – SMA tem um trabalho pioneiro nesta área para a região de Paulínia. Este é um trabalho longo e demorado, envolvendo áreas de medição, modelagem e monitoramento.

Por outro lado, é sentida a falta de um instrumento de avaliação mais expedito, sem a complexidade de um trabalho real de campo, anterior à elaboração dos documentos finais EIA/RIMA. É neste hiato que o presente trabalho procura estabelecer sua contribuição, utilizando procedimentos existentes de análise de localização de usinas e modelos de previsão globais simplificados.

3. METODOLOGIA – CONCEPÇÃO DA ANÁLISE

O processo de análise e síntese do modelo de previsão é iniciado buscando informações que alimentem os modelos de formação e dispersão de NO_x .

A primeira base de dados consultada é a da região de estudo, compreendendo informações concernentes às indústrias existentes, à frota de veículos, à área agrícola e ao consumo de combustíveis. Com relação às indústrias são identificados o tipo de equipamento e o combustível utilizado, que são obtidos através de entidade de classe ou órgão ambiental local. A frota veicular é subdividida em local incluída na área da região de estudo, obtida através do órgão de controle de trânsito, e rodoviária obtida de bancos estatísticos do órgão de controle da estrada. A área agrícola, que contribui na emissão através da queima de cana, é obtida através de mapas de uso e ocupação do solo da região.

O consumo de combustíveis é obtido da Agência Reguladora de Petróleo – ANP, que mantém através de controle fiscal o volume de combustível por tipo utilizado na região.

Essas informações sobre tipo e consumo de combustível são alocadas na área de concentração das fontes poluidoras e na região de estudo.

Utilizando a técnica dos fatores de emissão por tipo de fonte e combustível, é obtida a carga poluente existente (emissão de fundo) na região de estudo.

A segunda base de dados utilizada é a de informações meteorológicas, incluindo necessariamente as variáveis: temperatura, pressão, umidade e altura de camada de mistura. Estes dados são obtidos da estação meteorológica mais próxima.

A terceira base de dados refere-se a nova UTE a ser inserida na região. São obtidas características do equipamento, combustível utilizado e curvas de desempenho e eficiência.

As informações da base de dados meteorológicos e da UTE alimentam o modelo de cálculo, por meio do qual são obtidas as grandezas do ciclo e a previsão de formação de NO_x .

Na etapa final a carga de poluição existente na região de estudo juntamente com a previsão de NO_x da nova UTE alimentam um modelo de dispersão que como resultado apresenta estimativas de concentração de NO_x na atmosfera da região de estudo.

Na figura 1 é apresentado um fluxograma do processo de análise proposto neste trabalho.

Figura 1 – Fluxograma Sintético do Processo de Análise

As principais atividades indicadas no processo de análise são detalhadas a seguir:

- definição da região de estudo

- definição da área de concentração das fontes poluidoras;
- definição da área de influência;
- taxas de emissão das fontes existentes;
- modelo de previsão da taxa de emissão da UTE;
- modelo de dispersão;
- estudo de reações secundárias.

3.1 Região de Estudo

Para a região de estudo a princípio não há rigor sobre os limites contíguos da área, definidos a partir da nova fonte UTE.

A área pode coincidir com os limites geo-políticos de um município ou pode coincidir com a área definida pelos mapas cartográficos usuais de escala 1:50.000, contemplado neste caso mais de um município, ou pode ser definida por outro critério em regiões, por exemplo, com informações digitalizadas disponíveis via GIS. A área também pode ser indicada via uma figura geométrica regular, um círculo ou quadrado, posicionando de forma concêntrica à UTE sob análise.

Os mapas do IBGE (1:50.000) são estabelecidos com dimensão de 15' de latitude e longitude, com a lateral variando de 25 a 30 km. Algumas regiões já possuem mapas com base de informação digitalizada.

Por outro lado, as informações necessárias para o levantamento de emissões, tais como, consumo de combustível, frota de veículos, indústrias existentes estão em geral cadastradas em base municipal.

Neste sentido, é sugerido que a região coincida com os limites dos municípios.

Entretanto, não há rigor nesta seleção de área podendo haver circunstâncias restritivas físicas e técnicas que impeçam a coincidência com o município. A escolha por municípios aplicada no caso base deste trabalho visa facilitar a busca de informações necessárias. Diferentes áreas podem ser estabelecidas, desde que seja garantida a correlação com as informações de emissões.

É sabido que os poluentes aéreos podem percorrer vários quilômetros na sua trajetória na atmosfera. Na escolha da região de estudo devem ser minimizados os efeitos de transporte externo de poluentes provenientes de fontes de emissão próximos aos limites da área.

Em suma, no domínio da região de estudo devem estar incluídos os efeitos de emissão gerados na própria região e os efeitos decorrentes do transporte de poluentes provenientes de regiões vizinhas.

Na prática, procura-se escolher a área visando desprezar o efeito de influências externas de poluição.

3.2 Área de Concentração das Fontes Poluidoras

A partir da região de estudo selecionada, é efetuada a identificação das fontes poluidoras estabelecidas nesta região.

As fontes podem ser divididas em pontuais, tais como chaminés de indústrias; áreas, tais como queima de cana ou emissão de componentes voláteis de tanques de combustíveis; e volumétricas, tais como provenientes de queima de uma pilha de armazenamento de carvão.

As emissões industriais são consideradas como pontuais, enquanto que para efeito deste estudo as fontes móveis veiculares e a queima de cana são modeladas como fonte área, sendo estabelecido para cada emissão o índice correspondente em g/s-m².

No tocante às fontes industriais o levantamento pode ser efetuado no órgão de saneamento ambiental, identificando as indústrias com alto e médio grau de prioridade. Alternativamente, a partir da análise de uma planta de uso e ocupação do solo podem ser indicadas as áreas com indústrias implantadas.

A área urbana e suburbana do município responde pela emissão das fontes veiculares provenientes da frota local.

A emissão proveniente de estradas presentes na região é nos modelos de dispersão modelada como fonte linha, porém no presente estudo será modelada como fonte área ao longo de sua trajetória. A USEPA possui programa específico para este tipo de fonte.

A fonte agrícola e a área correspondente são identificadas por meio de mapa de uso e ocupação do solo.

Considerando que as fontes externas à região de estudo não têm influência na sua concentração de poluição de fundo pré-existente, é importante uma averiguação nas áreas vizinhas à região de estudo.

3.3 Área de Influência

Esta é a área que recebe diretamente o impacto dos poluentes emitidos pelas fontes de emissão. Esta área contém a área das fontes, podendo ser não coincidente com a área da região de estudo. Condições meteorológicas podem conduzir o efeito das fontes de emissão estabelecidas para áreas além da fronteira da região de estudo.

A área de influência é a área onde há contribuição de poluição pela UTE contemplando os efeitos da fonte de emissão sob análise, isto é, onde a pluma atinge o solo e recebe o impacto de poluição das outras fontes. As chaminés para turbinas a gás em ciclo combinado são baixas, entre 35 a 40 m, sendo que o efeito deve estar confinado na área selecionada.

A área escolhida deve confinar os efeitos da poluição oriunda das fontes poluidoras selecionadas. Em geral a definição da área de influência deriva dos resultados obtidos do modelo de dispersão, sendo o contorno estabelecido onde os valores de concentração de poluente analisado é desprezível.

Na figura 2 abaixo, é apresentado um croqui didático de representação das áreas de estudo, de fontes de emissão e de influência.

Figura 2 – Representação Esquemática das Áreas de Estudo, de Fontes e de Influência

3.4 Taxas de Emissão

Devem ser consideradas, *a priori*, as seguintes fontes: móveis (veiculares), estacionárias (basicamente, combustão em equipamentos industriais) e agrícolas (basicamente, queima na colheita de cana de açúcar), e de forma global estão envolvidos os seguintes poluentes atmosféricos: óxidos de enxofre (SO_x), óxidos de nitrogênio (NO_x), material particulado (MP), monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos não queimados, em particular os orgânicos voláteis (VOC).

As taxas de emissão referentes às fontes móveis e agrícolas são as globais da região de estudo considerada, enquanto que as referentes às fontes industriais são individualizadas, ou seja, ter-se-á um conjunto de taxas para cada uma das indústrias consideradas, as quais podem ser agregadas em fontes equivalentes.

Para as fontes veiculares (veículos a álcool, diesel e gasolina) são identificadas inicialmente as condições de tráfego da região. A frota circulante no município, obtida através de estimativa do Departamento local ou estadual de trânsito com base em licenciamentos, responde pela emissão urbana e suburbana no município. Os Departamentos de Controle de estradas rodoviárias possuem informações estatísticas de fluxo de veículos que estabelece a correspondente emissão. As taxas de emissão são estimadas com base nos chamados fatores de emissão. Tais fatores são números que relacionam a emissão dos vários poluentes com alguma variável operacional da fonte. Neste caso, para cada tipo de veículo, a massa emitida de cada poluente é associada com a distância percorrida pelo veículo. A unidade usual é gramas de determinado poluente por quilômetro rodado. Os dados podem ser obtidos em publicações da Cetesb (Proconve – Programa de Controle Veicular), de Laboratórios de Motores de Institutos de Pesquisas e da USEPA, selecionando o conjunto de fatores que se julgar mais adequado e representativo.

Para as fontes agrícolas, pode ser considerada unicamente a queima na colheita da cana de açúcar. A informação básica necessária é a área de plantio, dentro da região considerada, onde a colheita é ainda manual. A consulta neste caso é efetuada junto a empresas do setor sucro-alcooleiro, Embrapa e Copersucar. Na estimativa das taxas de emissão de poluentes derivadas de queima na colheita da cana, a fase inicial é buscar nas publicações da USEPA os fatores de emissão estabelecidos para os diferentes poluentes.

O tratamento ou modelagem da contribuição total do NO_x para as fontes agrícolas e móveis pode ser de 2 tipos. O primeiro, simplificado, é distribuir a emissão de forma homogênea e uniforme ao longo de uma área típica de influência que pode ser da própria fonte ou da região de estudo. Neste caso, a emissão é distribuída por um volume de atmosfera, dado pela altura de mistura. Este valor é entendido como uma poluição uniforme de fundo pré-existente na área. O segundo tipo é o tratamento da emissão como fonte área.

Para as fontes estacionárias, deverão ser considerados principalmente os equipamentos industriais de combustão. Fundamentalmente, é preciso saber para as diversas fontes, tipo e quantidade de combustível queimado, e características gerais

do equipamento de combustão. Tais informações podem ser disponibilizadas pelas indústrias, as quais podem ser obtidas através de visitas em reuniões com as suas equipes de operação e de meio ambiente. No caso de futuros empreendimentos, os dados mínimos necessários são os de projeto. Quanto às fontes industriais de combustão, a utilização de fatores de emissão encontrados em literatura, mesmo nas publicações da USEPA, nem sempre é válida dada a singularidade de alguns dos combustíveis brasileiros. Por exemplo, a natureza dos óleos combustíveis utilizados no Brasil é substancialmente diferente dos utilizados na Europa e nos Estados Unidos. São óleos significativamente mais viscosos e com maiores teores de impurezas, fatores que elevam as taxas de emissão da maioria dos poluentes. Neste caso, portanto, na predição das taxas de emissão deverão ser consideradas as informações gerais da fonte e do combustível, e os resultados dos vários trabalhos realizados com medições efetivas e disponíveis. Para uma aplicação prática de maior interesse, a responsabilidade das emissões das fontes estacionárias pode ser buscada ou ficar a cargo de um instituto com experiência nos assuntos de combustão e emissão, podendo ser complementada por medição direta real em casos singulares.

Para o presente trabalho os dados para as fontes industriais são obtidos de fontes bibliográficas (4, 44 e 71).

Inicialmente o consumo de combustível industrial, em geral o óleo combustível, é obtido na base de dados da Agência Reguladora de Petróleo, que mantém o registro de consumo de combustíveis por município. A este consumo é aplicado um fator de emissão adequado para o NO_x .

Em geral cada indústria possui no mínimo uma chaminé. A ausência da informação sobre a localização desta fonte individual conduz a uma necessidade de agregação de fontes localizadas numa mesma área ou parque industrial. Esta é uma metodologia usual em outros países, como se vê em (64):

“New sources which emit the same pollutant from several different stacks in close proximity to one another, may be “analyzed” by treating the emissions as coming from a single representative stack”.

A concentração da chaminé equivalente (C) é dada por:

$$C(J) = C(1) J^{0,8} \quad (1)$$

sendo J o número de chaminés.

É também definido um fator K:

$$K = \frac{hQ_v T}{Q_e} \quad (2)$$

A chaminé que apresentar o menor fator K é utilizada como equivalente, agregando a somatória das taxas de emissão das demais chaminés.

3.5 Modelo de Previsão de NO_x

Para a fonte UTE sob análise, a emissão de NO_x é obtida de um modelo global específico baseado no conceito de PEMS – “Predictive Emission Monitoring System”. No item 5.2.5 são apresentados detalhes deste modelo.

As equações básicas representativas na forma global consideradas são:

- balanço de energia
- reação química de combustão
- cinética de formação de NO_x

A plataforma utilizada é o EES (56), sistema *in natura*, no qual todo o equacionamento é fornecido permitindo controle maior do processo físico e cálculo numérico. A cinética de formação de NO_x é incluída através de modelo.

3.6 Estudo de Dispersão

A partir de uma série confiável e representativa de dados meteorológicos, o estudo de dispersão atmosférica é por si só um trabalho complexo, principalmente quando

incorporadas fontes de naturezas distintas. Neste tipo de estudo a idéia principal é responder à seguinte pergunta: dadas as condições meteorológicas, e as características das fontes emissoras, qual será a concentração de poluentes a uma determinada distância da fonte?

Um método para obtenção da resposta é a simulação através da aplicação de modelo matemático de dispersão atmosférica. No presente caso a variedade de fontes emissoras é grande, onde estão envolvidas as fontes do tipo pontual e área.

Os modelos de dispersão escolhidos são o ISCST (55 e 59) e o SCREEN (58).

O modelo ISCST (55 e 59) permite associar cenários climáticos próximos da realidade física, sendo utilizado tanto pela comunidade acadêmica como pelas agências nacionais e internacionais de controle ambiental. O cálculo de concentração de poluentes permite a obtenção de resultados nas escalas espacial e temporal, os quais são comparados posteriormente aos padrões vigentes no país (Resolução CONAMA N° 003/90). O modelo aceita dados de entrada de mais de 500 fontes simultâneas tipo pontual e área e gera cerca de mais de 1.500 receptores na superfície. Os receptores são distribuídos dentro de uma grade cartesiana, cujas quadriculas aceitam áreas variáveis.

Esse modelo permite incorporação das fontes pontuais equivalentes e as fontes áreas estabelecidas para as fontes móveis (veiculares) e agrícolas (queima de cana).

O modelo SCREEN foi desenvolvido para se obter a concentração no nível do solo em regiões onde não existam dados meteorológicos disponíveis. Portanto, é de grande utilidade para a estimativa da concentração em regiões carentes de informações. Apresenta resultados de concentração superestimados, vinculados à classe de estabilidade atmosférica mais crítica. Contudo, no caso de disponibilidade de dados meteorológicos locais, o modelo SCREEN possibilita diretamente a entrada dessas informações. Tem como principal limitação a incorporação de apenas uma fonte pontual, não tendo a representação de fontes tipo área. Neste caso, as fontes móveis e agrícolas devem ser distribuídas na área típica. O documento básico do seu

desenvolvimento foi o “Screening Procedures for Estimating The Air Quality Impact of Stationary Sources (US-EPA 1995)” (58).

Alternativamente, podem ser utilizados, dependendo da disponibilidade de dados, a cadeia completa de programas da USEPA, para melhorar a representação das fontes móveis (linha). Podem ser utilizados modelos específicos e comprovadamente reconhecidos de análise de dispersão segundo as 3 fontes - móveis, agrícolas e pontuais (industriais) de forma agregada, integrando os poluentes das diversas origens, além do NO_x . Destacam-se os seguintes modelos (42, 55, 58 e 59):

- Fonte Área - SCREEN - “Screening Procedures for Estimating The Air Quality Impact of Stationary Sources (USEPA 1995)” (58);
- Fonte pontual e área - ISCST – “Industrial Source Complex Short Term – version 3 (USEPA 1995)” (59);
- Modelo CALMET (“California Micrometeorological Model”) (42 e 55);
- Modelo USEPA CALINE4 (“California Line Source Dispersion Model”) (42 e 55);

O CALMET (“California Micrometeorological Model”) é um modelo desenvolvido para gerar o campo micrometeorológico que vai subsidiar a simulação da concentração resultante das emissões das fontes móveis. Os resultados obtidos são os dados de entrada necessários para alimentar o modelo de dispersão USEPA-CALINE4 (42 e 55).

A USEPA-CALINE4 (“California Line Source Dispersion Model”) é um modelo desenvolvido para estimar a concentração emitida por fontes móveis ao longo de uma rodovia. É calculada a concentração média dos poluentes tradicionalmente emitidos pela frota de veículos de acordo com o tipo e o tamanho da frota circulante. O modelo é alimentado pelas informações meteorológicas geradas pelo CALMET.

Há múltiplas formas de apresentação dos resultados. Resumidamente, os resultados são apresentados de forma prática, através de isopletras de concentração no plano horizontal, possibilitando visualizar o quadro da distribuição da qualidade do ar. Podem ser elaboradas tabelas comparativas da seguinte forma:

- a concentração integrada gerada pelas fontes industriais estacionárias;
- a concentração individual e integrada gerada pelas fontes áreas;
- a concentração gerada pelas fontes móveis dentro da área de influência;
- a integração das fontes operando simultaneamente, de tal modo que permita identificar o grau de saturação da qualidade do ar dentro da área de influência de todas as fontes.

Pode ser desenvolvida uma classificação percentual de contribuição de poluentes de cada fonte e tipo sobre a concentração total, de tal modo que seja possível obter uma referência sobre qual o principal poluente dominante na área.

A partir do resultado global, é possível estimar qual será a contribuição de uma nova fonte ou a ampliação de fonte já existente na região e qual será a capacidade de absorção de mais poluentes pela atmosfera local.

3.7 Estudo de Reações Secundárias de Origem Fotoquímica

Considerando que os modelos de dispersão mantêm os poluentes *in natura* ao longo da trajetória de diluição na atmosfera e que as reações entre os hidrocarbonetos não queimados e os óxidos de nitrogênio na presença de luz formam o ozônio, nesta atividade pode ser avaliado o mecanismo de formação do ozônio segundo este princípio, com base na carga de poluentes presentes na área de influência e o respectivo potencial de síntese de ozônio. Esta atividade não faz parte do escopo do presente trabalho, porém foi incorporado neste capítulo para manter a idéia do conjunto de integração.

O “smog” fotoquímico é afetado por um grande número de fatores complexos variáveis no espaço e no tempo, envolvendo um grande número de poluentes primários e secundários, de forma não linear e ainda não bem conhecida em todos os

seus detalhes. As escalas temporais das variações de concentrações tipicamente observadas durante a ocorrência do “smog” fotoquímico são da ordem de poucas horas, sendo estas variações bastante significativas dentro do período de um dia.

Existe uma variedade de modelos matemáticos para simulação de aspectos do “smog” fotoquímico os quais diferem em aspectos relacionados à fluidodinâmica, meteorologia e mecanismos de geração e de destruição das substâncias participantes.

O modelo RPM-IV (“Reactive Plume Model IV”) (42 e 55) apresenta as características desejáveis para uma análise do problema em questão (USEPA, 1992). O modelo RPM-IV é um modelo numérico de pluma que simula as complexas interações existentes entre a dispersão e fenômenos fotoquímicos envolvidos. Esse modelo pode ser utilizado para a simulação de efluentes gerados em uma única fonte pontual, fontes superficiais e, em alguns casos, várias fontes pontuais, contudo devem estar alinhadas no eixo de direção do vento. Esse modelo tem sido aplicado em uma série de estudos, tendo também sido rigorosamente testado comparando-se seus resultados com amostras atmosféricas coletadas por aviões para o caso de plumas emitidas pela “*Labadie Power Plant*”, localizada perto de St. Louis. Como conclusão desses estudos (42 e 55) considerou-se que o modelo RPM-IV foi bem sucedido na simulação das concentrações de ozônio e de óxidos de nitrogênio decorrentes de emissões pontuais, embora os autores do estudo tenham recomendado a execução de testes adicionais. O modelo RPM-IV tem sido empregado de forma incipiente na avaliação de situações similares ao caso em questão.

Inicialmente pode ser elaborado um modelo de representação computacional de um protótipo. Através desta representação serão considerados os aspectos mais relevantes do problema e eventuais adaptações de situações reais para que sejam aceitas pelo modelo matemático. Por exemplo, o modelo aceita múltiplas fontes emissoras desde que estas estejam alinhadas com a direção do vento, o que não corresponde à realidade. Conseqüentemente, a descrição geométrica das fontes emissoras deverá ser modificada para cada direção de vento a ser considerada. Assim, devido especialmente a esse problema, essa atividade deverá ser elaborada de forma cuidadosa e deverá constituir objeto de esforço considerável.

Por outro lado, em função das limitações do modelo de representação dos efeitos fotoquímicos, avaliações atuais e usuais do fenômeno não prevêm modelagem, tendo em vista a complexidade dos fenômenos envolvidos e as incertezas das reações de

formação de ozônio. Essas avaliações se limitam a estudos globais de potencial de formação com base nas cargas de NO_x e hidrocarbonetos presentes na atmosfera.

3.8 Limitações e Implementação do Conceito Preditivo

Como qualquer trabalho de estimativa e modelagem, os resultados de caráter preditivo são aproximados, necessitando de posterior calibração e aferição para a respectiva validação. Menores erros são obtidos quanto mais precisa for a representação dos fenômenos envolvidos. A precisão de análise preditiva pode ser subdividida em 3 níveis:

- informativa - fornecendo uma informação apenas de caráter geral, informando a direção do fenômeno;
- orientativa - orientando de forma mais direta sobre os resultados de determinado processo; e
- indicativa - de caráter praticamente determinativo, fornecendo resultados com margem de erro admissível aos processos usuais de engenharia.

No processo de análise proposto existem 3 limitações principais e fontes de possíveis imprecisões:

- estimativa das taxas de emissões
- modelagem da dispersão
- taxa de formação de ozônio

A primeira medida para diminuir a imprecisão é a busca de capacitação e qualidade nas estimativas, indicando fontes confiáveis com conhecimento técnico comprovado no assunto, acumulando trabalhos empíricos na área e base científica para a descrição do fenômeno.

As taxas de emissões por fonte podem ser apresentadas por faixas de mínimo e máximo, com a proposta de um valor mais provável. Com um grau de certeza bastante alto, pode ser afirmado que o valor real estará na faixa prevista. A simulação

com o valor proposto deverá apontar para a situação mais provável, enquanto que o valor máximo implicará uma estimativa de teto máximo. A estimativa da taxa de emissão da nova fonte é baseada no modelo global, cujo erro pode ser minimizado e conhecido por meio da análise de consistência CEMS e PEMS.

Para a modelagem de dispersão são utilizados modelos desenvolvidos pela USEPA e aceitos por órgãos de controle ambiental. Os resultados dependem sobremaneira da base de dados meteorológicos utilizada. A simulação com inversão térmica é a condição mais crítica para efeito de concentração de poluentes no nível do solo.

A complexidade das reações de formação de ozônio dificulta a representação e a modelagem do fenômeno, induzindo o problema a um caráter exploratório, com precisão em termos informativo. Entretanto, a estimativa da concentração de poluentes não reativos, obtidos da estimativa inicial das taxas de emissão e simulados através de modelos de dispersão, apresenta resultados com precisão orientativa. O nível indicativo é obtido com simulações dos valores máximos sob condições críticas de dispersão, implicando num limite de exposição.

É importante a colaboração das indústrias implantadas e novas, acessantes a região, delimitadas na área de concentração de fontes poluidoras, no sentido de fornecer as informações básicas destas fontes - equipamento e combustível. A utilização alternativa de bancos de dados para estimativa de consumo das fontes consideradas, conforme proposto no item 3.4 e adotada neste estudo, é uma simplificação bastante representativa das condições locais. Os cenários simulados, segundo as taxas de emissão mais prováveis e máximas, são o da situação atual e o da situação futura, se metas de redução foram estabelecidas pelo órgão ambiental com as indústrias. A estes 2 cenários será incorporado o novo projeto acessante.

Obviamente que este trabalho não pretende substituir o diagnóstico ambiental real via medição e monitoramento. Esse diagnóstico real envolve medições em todas as fontes de emissão e monitoramento da qualidade do ar em alguns locais da região. Além de envolver uma massa considerável de recursos, o trabalho de diagnóstico real consome um tempo significativo de aproximadamente 2 anos. As medições são

realizadas em tempo real, o monitoramento é vinculado a condições meteorológicas e uma baixa série de dados limita a representabilidade dos resultados.

Os dois trabalhos se complementam. O modelo preditivo proposto poderá estabelecer as condições orientativas da região em termos de qualidade do ar. A medição de campo fornecerá dados reais para uma pequena série, contudo de fundamental importância para aferir, calibrar e validar o modelo. E, a terceira fase concluindo o processo é a aplicação do modelo para extrapolar as condições de contorno da medição e estabelecer cenários futuros, contemplando a capacidade de suporte da região.

Vale ressaltar que para a aplicação real da metodologia proposta é necessária uma avaliação com as equipes do órgão licenciador, visando a verificação e aceitação dos critérios a serem aplicados.

A contribuição deste trabalho está na obtenção de um primeiro diagnóstico preditivo regional, que pode ser realizado num prazo de 2 a 3 meses.

O trabalho pretende colaborar com planejamento ambiental oferecendo informações que deverão balizar as revisões atuais e aprovações de novos projetos. A premissa é pelo envolvimento de excelência nas diversas fases deste trabalho por parte do órgão de licenciamento. O esquema abaixo, figura 3, apresenta o fluxograma proposto de atividades do trabalho.

O encadeamento do método preditivo poderia seguir o esquema da figura 3. As informações sobre fontes, combustíveis e níveis de emissão fluem a partir das indústrias existentes e novas acessantes à região. O relacionamento coordenado fica a cargo do órgão de classe, no caso FIESP – Federação das Indústrias do Estado de São Paulo. Defendendo interesses gerais da classe, a FIESP estabelece uma linha de tratativas com a Promotoria Pública, que atua judicialmente na questão ambiental, e com a SMA – Secretaria de Meio Ambiente. A SMA, como órgão regulador e licenciador, responde pela coordenação geral, analisando e atestando procedimentos e resultados do programa. A Engenharia Consultiva, recebendo informações técnicas das indústrias e orientação da SMA, propõe procedimentos e executa propriamente

os trabalhos, emitindo relatórios técnicos sobre os temas: taxas de emissão, concentração de poluentes e reatividade fotoquímica.

Figura 3 – Fluxograma de Trabalho para Elaboração de um Diagnóstico Ambiental Completo

Os recursos financeiros de suporte do trabalho deveriam vir na maior parcela das indústrias e FIESP, que têm o maior interesse em estabelecer condições ambientais de operação adequadas na região, complementados eventualmente por algum programa de repasse supervisionado pela SMA.

O presente estudo pretende colaborar nesse trabalho maior, na indicação de metodologia de previsão de emissão e dispersão de NO_x .

3.9 Capacidade de Suporte e Sustentabilidade

O planejamento ambiental definido como o procedimento técnico, político, dinâmico, contínuo e participativo, que a partir do conhecimento de determinada

região indicará as ações de preservação e recuperação ambiental, para se atingir uma qualidade de vida adequada para as gerações atuais e futuras. A capacidade de suporte definida como a capacidade do meio físico de receber os remanescentes das emissões das fontes poluidoras de forma a serem atendidos os padrões ambientais e os diversos usos dos recursos naturais. Estes são conceitos cada vez mais aceitos e difundidos. São conceitos acima de tudo coerentes que a médio prazo deverão estar incorporados de forma efetiva na avaliação de projetos.

É freqüente se ouvir a seguinte argumentação durante o processo de licenciamento de uma UTE (44): *“Devem ser abordados, sem rodeios, aquelas possibilidades mais preocupantes ou ameaçadoras, pois é a somatória da poluição que deve ser o alvo da análise e não este ou aquele empreendimento, isoladamente”*. Os dois conceitos atendem a esse requisito. O método preditivo, objeto deste trabalho, pode fornecer o primeiro instrumento de avaliação nesta linha de ação.

O desenvolvimento sustentado é um conceito que também deriva da análise econômica, reportando-se a um sistema de contabilização aplicado a recursos naturais, fazendo-se analogia à renda que, em economia, é definida como: *“A quantidade máxima que um receptor pode consumir num determinado período de tempo, sem prejudicar a quantia a ser potencialmente consumida num determinado período de tempo futuro”*.

4. ESTADO DA ARTE – PLANEJAMENTO DO SETOR ELÉTRICO E EMISSÃO DE NO_x

Este capítulo é dedicado a uma síntese da dificuldade de implementação da variável ambiental nos projetos de geração e a uma estimativa de emissão global de poluentes provenientes do PPT – Programa Prioritário Termoelétrico.

4.1 Experiência

A questão ambiental, principalmente para Usinas Hidroelétricas – UHE's, começou a ser incorporada no planejamento do setor elétrico em 1986, com a edição de um Plano Diretor específico. Na época o Comitê Coordenador de Atividades de Meio Ambiente do Setor Elétrico – COMASE, coordenava, com a colaboração de empresas concessionárias do setor, estudos e avaliações ambientais.

O Plano de Expansão de Longo Prazo (Plano 2015) editado em 1993, buscava abordar a integração energética com a ambiental, avaliando os sobrecustos de origem ambiental e a tentativa de classificação de empreendimentos.

Em 1994, o COMASE publica o guia para a elaboração de orçamentos, introduzindo custos ambientais. A Resolução Conama 002/96 indica a aplicação no mínimo de 0,5% do valor da obra em unidades de conservação. Os custos ambientais podem ser classificados por 2 métodos:

- custo de degradação – valor econômico dos danos diretos
- custo de controle – valor econômico através de medidas e controles

Os custos de controle podem ser subdivididos em 4 tipos: mitigação, compensação, monitoramento e institucionais.

Os Planos Decenais de Expansão desde o ciclo 1994-2003 vêm incluindo avaliações ambientais e tentativas de classificação de empreendimentos, apesar do critério

principal de mínimo custo de geração. O último Plano editado em 2000 já apresenta capítulo específico sobre o assunto.

Atualmente avaliações ambientais estão sendo conduzidas pelo Comitê Coordenador de Planejamento do Sistema Elétrico – CCPE, através do Comitê Técnico Sócio-Ambiental – CTSA. O grupo de estudos está buscando incorporar a dimensão ambiental nos projetos de expansão do setor. Este é um conceito ainda não efetivamente incorporado na cadeia de decisões. Há dificuldades na análise de projetos com enfoque local e em envolvê-los numa avaliação comparativa em escala nacional. Apesar de existirem desenvolvidos métodos e procedimentos para UHE's em termos de estudos de inventário e viabilidade, ainda não existe metodologia contemplando critérios ambientais que incorporem a dimensão ambiental nos projetos em expansão, procurando estender e integrar esta variável no processo de caráter formal e sistêmico.

A experiência internacional no setor, de acordo com Pires et al. (2), não apresenta um modelo adequado de integração entre a avaliação energética e ambiental. Os projetos mencionados em (2) buscam aperfeiçoar conceitos e procedimentos para análise de políticas, planos e programas (PPP), enquanto que avaliações ambientais visam apenas a minimização dos impactos. Podem ser destacados os modelos: Bonneville Power Administration – BPA – EEUU, Ontario Hydro – OH – Canadá e Interconexion Electrica S.A. – ISA – Colômbia (2 e 3).

Uma consideração a ser colocada sobre a incorporação da variável ambiental no planejamento do setor é que, apesar de planos e estratégias de expansão terem enfoque global, em termos de país, levando em conta a análise de fontes renováveis e não renováveis, a interligação entre sistemas (o Sul pode estar consumindo energia proveniente de geração do Norte), com custo de geração diretamente comparáveis em termos de unidade, independente do tipo de projeto e local de implantação, a avaliação ambiental passa pelo enfoque regional, vinculada a especificidades e características locais. A questão ambiental apresenta um pensamento global com ação local.

4.2 Impacto do Programa Prioritário Termoelétrico (PPT)

A experiência do setor elétrico é no desenvolvimento de projetos hidroelétricos. A experiência em UTE's é restrita a projetos a carvão no Sul (Jorge Lacerda/Candiota/Jacuí), nuclear (Angra) e a óleo. Contudo, são projetos que, com exceção de Jacuí, foram implementados em época anterior à consciência e legislação ambiental, que data do final dos anos 80 e década de 1990. Em relação às UHE's, os impactos sócio-ambientais diferem na forma, intensidade e temporalidade.

O PPT, estabelecido pela Portaria Interministerial MME/MF (Ministério da Fazenda) nº 43 em fevereiro de 2000, inclui a implantação de 49 UTE's, perfazendo um total de 17.105 MW de capacidade instalada. Estão contemplados 18 Estados. Só no Estado de São Paulo estão previstos 7.700 MW. A distribuição segundo o tipo de combustível é:

- gás natural: 15.319 MW – 89,6%
- carvão mineral: 1.100 MW – 6,4%
- resíduo de petróleo: 616 MW – 3,6%
- xisto: 70 MW – 0,4%

Considerando apenas as UTE's a gás natural, assumindo configuração em ciclo combinado, operando com fator de capacidade de 70%, redundando num consumo de cerca de 42,9 milhões de m³/dia, as emissões globais previstas são apresentadas na tabela I.

A emissão brasileira anual de CO₂ estimada (1997) é de 300 milhões de t, ou cerca de 2 t de CO₂/hab. A emissão destas UTE's representa cerca de um incremento de 10% na emissão já existente, ou 0,5% em termos mundiais, cuja emissão é de cerca de 6 bilhões de t CO₂/ano. As emissões de CO₂ projetadas para 2000 são de 441,6 milhões de t (4), sendo 12,37 milhões provenientes da queima de gás natural (2,8%). O PPT deverá contribuir com 31,1 milhões de t CO₂/ano, ou seja 150% a mais da contribuição atual do gás natural, ou 7% do total emitido.

Tabela I – Emissão Prevista do PPT

Poluente	Fator de Emissão	Emissão (t/d)	Emissão (10 ³ t/ano)
CO ₂	2,71 kg/kg gás	85.204	31.099,5
CO	5,5 g/s ⁽¹⁾	20,38	7,44
NO _x	20 g/s ⁽¹⁾	74,12	27,05
SO _x	2,85 g/s ⁽¹⁾	10,56	3,85
H _n C _m	1,64 g/s ⁽¹⁾	6,08	2,22
Particulados	1,14 g/s ⁽¹⁾	4,22	1,54

⁽¹⁾ Valores calculados para um módulo típico de ciclo combinado de 250 MW, consumindo 1 milhão m³/dia de gás natural

Com relação ao NO_x a tabela II apresenta a projeção atual e futura proveniente do gás natural e de outros combustíveis realizada pelo Ministério de Ciência e Tecnologia com a colaboração do Ministério de Minas e Energia - MME (4). Na figura 4 são apresentados os mesmos dados em forma gráfica, destacando a contribuição de cada elemento.

O gás natural é a 3^a fonte de emissão de NO_x, com 8,5 % de participação, atrás do óleo diesel com 38,6% e da gasolina com 19,5%. Juntos, estes 3 combustíveis representam 2/3 da emissão de NO_x. A participação do gás natural nesta emissão é crescente, passando para 15% em 2010 e 18,6% em 2020. O PPT representa 14,8% da emissão atual do gás natural ou 1,26% do total.

Em termos mundiais é estimada em 50 milhões de t/ano a emissão de NO_x, sendo entre 11 e 12 milhões provenientes de fontes estacionárias. Os EEUU contribuem com 20 milhões de t/ano, sendo 40% de fontes móveis.

Tabela II – Projeção Atual e Futura para o Brasil de Emissão de NO_x Proveniente da Queima de Gás Natural e de Outros Combustíveis
(4)

Emissões Projetadas de NO_x (Gg/ano)					
	2000	2005	2010	2015	2020
GÁS NATURAL	183,07	308,77	460,17	621,61	833,87
CARVÃO VAPOR	6,39	28,98	40,91	42,28	40,80
CARVÃO METALÚRGICO	34,52	27,58	32,40	42,15	52,22
LENHA	62,64	58,50	53,34	48,45	44,81
PRODUTOS DE CANA	48,28	48,42	52,65	56,78	61,04
OUTRAS FONTES PRIMÁRIAS	20,57	21,59	23,13	25,05	26,56
ÓLEO DIESEL	829,19	956,14	1103,92	1281,54	1561,65
ÓLEO COMBUSTÍVEL	173,18	206,17	255,06	302,22	369,74
GASOLINA	419,19	507,34	607,67	725,61	921,28
GLP	40,03	37,24	42,84	52,06	63,18
NAFTA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
QUEROSENE	38,57	44,36	52,85	64,25	81,23
GÁS (OUTROS)	49,14	70,36	87,55	96,55	104,05
COQUE DE CARVÃO MINERAL	9,00	11,29	12,82	13,43	13,60
ELETRICIDADE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CARVÃO VEGETAL	17,0	17,7	18,4	19,6	21,9
ÁLCOOL ETÍLICO	103,8	93,1	102,7	114,9	140,7
ÓLEO SECUNDÁRIO DE PETRÓLEO	110,0	96,9	111,2	126,9	143,6
ALCATRÃO	1,8	3,8	4,6	4,8	4,7
TOTAL	2.146	2.538	3.062	3.638	4.485

Figura 4 – Projeção Atual e Futura para o Brasil de Emissão de NO_x Proveniente da Queima de Gás Natural e de Outros Combustíveis (4)

4.3 Interação Entre o Planejamento Elétrico e Ambiental

As UTE's de porte que entraram em operação nos últimos 15 anos foram a UTE Jorge Lacerda IV de 350 MW a carvão (1998) e a UTN Angra II de 1.300 MW nuclear (2001).

Apesar de todo o incentivo para a implantação de UTE's a gás natural a partir de 1998, apenas 4 UTE's representativas foram incorporadas no parque gerador, a saber: UTE Cuiabá (450 MW); UTE Uruguaiana (600 MW); UTE Eletrobrás (450 MW) e UTE Macaé (870 MW).

Diferentemente do restante do mundo, em particular os Estados Unidos e a Inglaterra, onde vários projetos de UTE's a gás foram implantados nos últimos anos,

no Brasil fatores diversos têm dificultado a implementação do programa de UTE's a gás natural.

Um dos fatores de inibição e retração é o processo ambiental destes empreendimentos, que no Estado de São Paulo tem provocado sucessivos atrasos e suspensão de projetos.

É observado que o processo ambiental de implantação converge diretamente no documento de licenciamento ambiental, isto é: EIA – Estudo de Impacto Ambiental e RIMA – Relatório de Impacto Ambiental.

As fases preliminares, sobretudo de seleção do local, são discutidas no documento final de análise. A seleção inadequada de um local gera questões de dúvida e conflito entre o empreendedor e o órgão licenciador, demandando diversos estudos complementares muitas vezes associados a alteração de configuração de projeto. Esta disputa poderia ser evitada se houvesse um critério de análise inicial visando um enquadramento e um acompanhamento do projeto dentro da região em que estiver inserido.

Neste caso, um critério e procedimento prévio de análise estabelecido pelo órgão licenciador, a ser aplicado pelo empreendedor, poderia indicar o enquadramento do projeto nas regiões de interesse.

Cumprida esta etapa, o EIA/RIMA estaria focado nas questões diretamente relacionadas ao empreendimento sem a preocupação da inserção regional, tendo em vista que no enquadramento prévio o empreendimento atendeu as necessidades de capacidade de suporte.

Existem metodologias incipientes desenvolvidas para o Estado de São Paulo, bem como de critérios e procedimentos internacionais (por exemplo, Canadá), que podem tratar da questão de seleção do local de implantação incluindo a variável ambiental.

Diferentemente de uma Usina Hidroelétrica, na qual o local é definido pela queda, havendo apenas pequenas variações e definições do eixo da barragem, altura de queda e capacidade instalada, uma Usina Termoeletrica apresenta elevado grau de

liberdade em termos de localização. De forma similar a um empreendimento industrial, as variáveis de primeira ordem que têm maior influência na definição do local são o custo do suprimento da matéria prima e do fornecimento do produto aos clientes. No caso de uma Usina Termoelétrica a matéria prima é o combustível e o custo do fornecimento do produto energia elétrica é dado pelo custo de conexão e perdas de transmissão entre a usina e o consumo. Fatores adicionais têm influência no processo de decisão, a saber: infra estrutura e incentivos do local, emissões de poluentes, impacto ambiental, tipo de tecnologia e combustível, entre outros. A construção de uma Usina Termoelétrica é uma ação irreversível, demandando uma análise criteriosa do local, tecnologia e combustível, a fim de melhor subsidiar a decisão.

Neste contexto, com o objetivo de oferecer ferramentas para identificar e definir potenciais e prioridades na geração termoelétrica no Estado de São Paulo, foi desenvolvido um modelo para a elaboração de uma proposta de inventário termoelétrico para o Estado de São Paulo, denominado SAEGET – Sistema de Análise da Expansão da Geração Termoelétrica (66).

A partir de uma sinalização da expansão da geração necessária, o programa produz uma hierarquização de usinas termoelétricas, especificando por empreendimento a localização e detalhes técnicos, econômicos e ambientais.

Após a seleção de alternativas de geração em função dos requisitos selecionados pelo usuário, é feita uma ordenação das opções em cotejo, utilizando técnica de multi-critérios, envolvendo a combinação de objetivos de diferentes naturezas, muitas vezes conflitantes.

Nestas condições, são identificadas e locadas usinas que apresentem, por exemplo, como critério: menor custo de geração, melhor eficiência, menor impacto ambiental, uso de um determinado combustível, locais com disponibilidade de água de forma independente ou combinada.

O enfoque da seleção desse sistema envolve variáveis quantitativas de ordem principalmente econômica. A variável ambiental está incorporada, contudo a

informação disponível é globalizada, incluindo taxa de emissão para a tecnologia e combustível e valor global de concentração de poluentes no local de implantação, possibilitando uma análise meramente qualitativa.

O método proposto neste trabalho pode ser implementado no SAEGET, permitindo um equacionamento ambiental quantitativo do local analisado.

Por outro lado, existem no Canadá (64) critérios e procedimentos de seleção de locais para implantação de UTE's que utilizam ferramentas similares ao sistema de análise e ao método proposto neste trabalho. O procedimento envolvido inclui a elaboração de uma série de documentos considerando técnicas de proteção ao meio ambiente ao longo das várias fases do projeto de implementação de unidades de geração termoelétrica. Além das UTE's a carvão, óleo e gás natural são contempladas as UTN's. O procedimento ainda não tem uma aplicação legal, porém as agências de regulação e licenciamento podem utilizá-lo como documento guia de referência.

A avaliação aborda três grandes setores: água, ar e deposição de sólidos e é subdividida em três fases, de acordo com o afunilamento e convergência da análise.

A fase I identifica áreas potenciais, a fase II indica áreas preferenciais candidatas e a fase III especifica áreas recomendadas.

O processo é iniciado com a definição da região de estudo ou interesse. Nessa região, é pesquisada a infra-estrutura necessária para o resfriamento de água, acesso à fonte de combustível, etc. É realizada uma inspeção em mapas, em geral na escala 1:50.000, confrontando interesses, limitações e restrições existentes. Na análise, são sobrepostos mapas, incluindo áreas em uso ou já pré-destinadas ou reservadas, áreas de conflito, áreas de proteção ambiental, áreas ocupadas e desenvolvidas, áreas de comprometimento da qualidade do ar, rede de infra-estrutura de transporte e recursos hídricos, restrições de engenharia (falhas geográficas, topografia desfavorável, pântanos, etc.). A composição dessas informações forma o mapa de estudo da área. O resultado dessa fase I é a identificação de áreas potenciais.

Na fase II, as áreas identificadas são submetidas a uma qualificação através de conceitos ou notas, baseada na vocação de cada área em termos de meio ambiente, engenharia e do ponto de vista sócio-econômico. É utilizada a técnica de pesos ponderados nos temas a serem julgados. É efetuada uma primeira avaliação da interação da UTE com o local, estimando o impacto ambiental das emissões aéreas do empreendimento. O resultado é a identificação de um menor número de áreas candidatas.

Na fase III de afinamento da seleção, são utilizadas técnicas de análise mais precisas, podendo incluir inspeção dos locais, redundando num pequeno conjunto de locais recomendados para o empreendimento.

Na avaliação do impacto da UTE no ar é sugerida a utilização dos programas da USEPA, SCREEN na fase II e ISCST na fase III.

O processo segue o esquema da figura 5.

Figura 5 – Processo de Seleção de Áreas

É compreendido a partir dos procedimentos de seleção, que são utilizadas informações disponíveis genéricas para a identificação e seleção de áreas específicas. A análise não envolve apenas fatores ambientais, sendo que outros temas, como técnicos, econômicos e sociais devem ser considerados. Além disso, após a seleção da área, deve ser realizada uma análise ambiental mais aprofundada, nas fases de implementação da UTE, isto é, durante o projeto, construção, comissionamento e operação.

É indicado o uso desse procedimento pelas Agências Ambientais, como ferramenta para identificar critérios e requisitos regionais, visando estabelecer uma proposta de localização e implementação de empreendimentos. Essas Agências poderiam utilizar e aplicar essa técnica para desenvolver e refinar estratégias e objetivos regionais. A Agência pode oferecer *a priori* ao empreendedor uma posição e recomendação sobre a área. A Agência tem condição de estabelecer as vantagens e desvantagens ambientais de áreas alternativas. Essa técnica pode ser útil e aplicada em outros tipos de empreendimentos de infra-estrutura, tais como portos, terminais, refinarias, unidades químicas, indústrias de processo, etc.

5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica foi estruturada de tal forma a apresentar inicialmente um compêndio da legislação ambiental pertinente. Em seguida são abordados os mecanismos de formação de NO_x e as formas de controle e mitigação. Concluindo, é apresentado um detalhamento dos modelos de previsão, destacando o uso atual crescente do PEMS – “Predictive Emission Monitoring System” e dos modelos de dispersão, sendo que a representação de jatos verticais e a modelagem de cálculo propriamente dita são incorporados no final do estudo, nos Apêndice A e Anexo A, respectivamente.

5.1 Legislação Principal - Envolvória

É apresentado a seguir de forma expedita e sistêmica, seguindo uma ordem de legislação federal para estadual, indicando o principal objetivo do regulamento, um compêndio da legislação ambiental da qualidade do ar, que inclui e trata de empreendimentos termoeletrônicos.

Até 1990, o meio ambiente era tratado como questão lateral e secundária no desenvolvimento de projetos.

1. Lei Federal 6803/80 – Estabelece diretrizes sobre zoneamento ambiental.
2. Lei Federal 6938/81 – Estabelece a Política Nacional de Meio Ambiente e cria entidades de regulação e controle: SISNAMA – Sistema Nacional de Meio Ambiente, CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente e IBAMA – Instituto Brasileiro de Meio Ambiente. O artigo 14, item IV, parágrafo 1 cita: “*O Ministério Público da União e dos Estados terá legitimidade para propor ação de responsabilidade civil e criminal por danos causados ao meio ambiente*” (sujeito ao mesmo crime do poluidor a autoridade competente que deixar de tomar medidas).

3. Constituição Federal 1998 – Capítulo IV – Meio Ambiente – Artigo 225. Indica o direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado. Estabelece a competência da União, Estados e Municípios de *“proteger o meio ambiente e combater a poluição em qualquer de suas formas”*.
4. Lei Federal 9605/98 e Medida Provisória 1710/98. Conhecida como lei dos crimes ambientais, estabelece procedimentos de enquadramento e penalizações. Ressalta-se que o artigo 5 inciso XXXV estabelece que *“a lei não excluirá da apreciação do Poder Judiciário lesão ou ameaça de direito”*.
5. Resolução Conama 001/86. Estabelece a definição de impacto ambiental e procedimentos para elaboração do EIA/RIMA – Estudo e Relatório de Impacto Ambiental. O artigo 1º indica a definição de impacto ambiental:
“Qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante de atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam:
 - I. a saúde, a segurança e o bem-estar da população*
 - II. as atividades sociais e econômicas*
 - III. a biota*
 - IV. as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente*
 - V. a qualidade dos recursos ambientais”*.

No artigo 2º são classificadas as atividades modificadoras:

- *Linhas de Transmissão com tensão acima de 230 kV*
 - *Usinas de geração de eletricidade, qualquer que seja a fonte de energia primária acima de 10 MW*
 - *Obras hidráulicas – barragens para fins hidroelétricos acima de 10 MW”*.
6. Resolução Conama 005/87. Estabelece o programa nacional de controle da poluição do ar.
 7. Resolução Conama 006/87. Estabelece procedimentos e regulamentos específicos para o setor elétrico.

8. Resolução Conama 003/90. Estabelece padrões de qualidade do ar. Para o NO_x os padrões primário e secundário para amostras de 1 h são 320 e 190 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, e para a média aritmética anual é 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, para os 2 padrões.
9. Resolução Conama 008/90. Estabelece padrões de emissão para fontes fixas. Há omissão para o padrão de NO_x . Os Estados Unidos e a Comunidade Econômica Européia – CEE estabelecem para empreendimentos acima de 70 MW os valores de 544 e 505 $\text{g}/10^6\text{kcal}$, respectivamente. No Brasil as licenças para empreendimentos termoeletricos têm vinculado índices para a melhor tecnologia disponível, isto é, valores não superiores a 25 ppm, que equivale para o NO_2 a 58 $\text{g}/10^6\text{kcal}$ (3% O_2).
10. Resolução Conama 237/97. Estabelece procedimentos administrativos sobre licenciamento, no tocante a órgão competente, prazos, etc.
11. Resolução Conama 279/01. Estabelece procedimentos de licenciamento ambiental simplificados para empreendimentos elétricos com pequeno potencial de impacto ambiental. Cria o Relatório Ambiental Simplificado – RAS.
12. Constituição Estadual de São Paulo 1989 – Capítulo IV. Estabelece tratamento às questões de meio ambiente, recursos naturais e saneamento.
13. Lei Estadual 9509/87. Estabelece a Política Nacional do Meio Ambiente.
14. Lei Estadual 997/76 e Decreto de Aprovação 8468/76. Estabelece no artigo 41 que fontes de poluição devem adotar a implantação da melhor tecnologia prática disponível. O artigo 42 estabelece que em regiões críticas, saturadas, novas fontes devem ter incremento zero na poluição.
15. Resolução Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo – SMA 42/94. Estabelece procedimento de tramitação do EIA/RIMA e cria a elaboração de documentos adicionais, Relatório Ambiental Preliminar – RAP e Termo de Referência – TR.

16. Resolução SMA 13/99. Dentro da filosofia de planejamento ambiental integrada, cria o grupo de trabalho para identificar a capacidade de suporte ao ar e da água para a região de Paulínia.
17. Resolução SMA 14/01. Estabelece procedimentos para licenciamento ambiental de empreendimentos elétricos com significativo impacto ambiental.
18. Banco Mundial (26). Estabelece procedimentos e requisitos para concentração do ar e efluentes em função do tipo de unidade industrial que servem de guia de análise para orientar financiamento de projetos.

5.2 Poluente NO_x

5.2.1 Mecanismo de Formação

Os óxidos de nitrogênio, representados genericamente por NO_x, compreendem fundamentalmente óxido nítrico (NO) e dióxido de nitrogênio (NO₂). São formados durante a combustão devido à reação química do oxigênio com o nitrogênio do próprio ar ou presente no combustível.

O NO pode ser formado segundo 3 mecanismos:

- NO térmico: É a fonte dominante, sendo formado devido à decomposição de N₂ atmosférico com a presença de O₂ em chamas com altas temperaturas.
- NO combustível: Há a combinação do N presente no combustível com o oxigênio do ar em temperaturas moderadas.
- NO ativo ou "prompt": Formado a partir de mecanismos diferentes dos 2 anteriores, a partir de reações de radicais derivados de hidrocarbonetos presentes na chama de combustíveis.

A presença de NO₂ nos gases de combustão é baixa comparada com as concentrações de NO que variam de 90 a 95%. NO₂ depende das concentrações e taxa de formação de NO ativo, bem como produtos intermediários da reação de combustão (HO₂ e H). NO₂ é formado a partir de NO. Entretanto, em turbinas a gás há registros de concentrações significativas de NO₂ na exaustão. Na referência (17) estão apresentadas pelo menos 53 reações e seus mecanismos, envolvendo N e componentes presentes na combustão.

5.2.1.1 NO térmico

É o principal mecanismo de formação de NO. A elevada temperatura presente na chama provoca dissociação do oxigênio do ar em átomos reativos, que combinam com as moléculas de nitrogênio presentes no ar. Esta reação ar-combustível, importante em temperaturas acima de 1.700 °C, é classicamente representada pelo mecanismo estendido de Zeldovich, segundo 4 reações, apresentadas na tabela III.

Tabela III - Reações do Mecanismo de Zeldovich (6 e 13)

Reação	Taxa – Constante (cm ³ /mol-s)	Intervalo de Temperatura (K)
$N_2 + O \rightleftharpoons NO + N$	$7,6 \times 10^{13} \exp[-38.000/T]$	2.000 - 5.000
$N + O_2 \rightleftharpoons NO + O$	$6,4 \times 10^9 T \exp [-3.150/T]$	300 – 3000
$N + OH \rightleftharpoons NO + H$	1×10^{14}	300 – 2.500
$O_2 \rightleftharpoons 2O$	$3,6 \times 10^3 \exp [-31.090/T]^{(1)}$	

⁽¹⁾ [atm]^{1/2}

A velocidade do processo é definida pela primeira equação ($N_2 + O \rightleftharpoons NO + N$), sendo que a taxa de formação de NO é dada por (6 e 13):

$$\frac{d(NO)}{dt} = 2k_1[O][N_2] \frac{1 - [NO]^2}{1 + k_{-1}[NO]} \frac{k[O_2][N_2]}{(k_2[O_2] + k_3[OH])} \quad (3)$$

sendo:

k_1 , k_2 e k_3 – constantes de velocidade de reações diretas

k_{-1} e k_{-2} – constantes de velocidade de reações inversas

k – constante de equilíbrio para a reação $(N_2 + O \rightleftharpoons NO + N)$ $k = k_1/k_{-1} * k_2/k_{-2}$

Considerando que a taxa de formação de NO é muito menor que a velocidade da maioria das reações de combustão, sendo formado após a chama, podendo ser desacoplada da reação de combustão, o cálculo pode ser simplificado através das taxas de reação. A equação de taxa de formação de NO de forma simplificada, do tipo exponencial de Arrhenius, substituindo as constantes de equilíbrio e a energia de ativação, é dada por (6 e 13):

$$\frac{d(NO)}{dt} = 6,04 * 10^{16} (T_{eq})^{-0,5} \exp(-69.090 / T_{eq}) [O_2]_{eq}^{0,5} [N_2]_{eq} \quad [moles / cm^3 - s] \quad (4)$$

O NO térmico responde pela reação predominante no gás natural em turbinas a gás. O gás natural é um combustível com isenção de nitrogênio na composição. O aumento de eficiência nas turbinas a gás (ciclo Brayton) está diretamente relacionado ao aumento na temperatura de entrada na turbina, limitado pela condição dos materiais no 1º estágio de expansão. Atualmente, temperaturas de entrada dos gases de combustão ultrapassam levemente os 1300°C. O NO térmico aumenta com a carga do equipamento, visto que o aumento de potência térmica gerada implica maiores temperaturas.

A referência (35) apresenta o seguinte equacionamento para a reação de produção de NO térmico, incluindo como sofisticação do modelo a reação inversa:

$$S_{NO} = 2k_1 k_{eq} \frac{m_{n_2}}{M_{N_2}} \left(\frac{m_{O_2}}{M_{O_2}} \right)^{1/2} M_{NO} \mathbf{r}^{3/2} - \frac{2k_1 k_{eq}}{k_{NO} \left(\frac{m_{O_2}}{M_{O_2}} \right)^{1/2}} \frac{m_{NO}^2}{M_{NO}} \mathbf{r}^{3/2} \quad (5)$$

$$k_1 = 1,82 * 10^{11} \exp\left(\frac{-38.370}{T}\right) \quad (6)$$

$$k_{NO} = 2,37 * 10^2 (T)^{-0,3} \exp\left(\frac{-22.030}{T}\right) \quad (7)$$

$$k_{eq} = \frac{3,6 * 10^3}{(RT)^2} \exp\left(\frac{-31.090}{T}\right) (p_N)^{1/2} \quad (8)$$

5.2.1.2 NO combustível

O nitrogênio ligado através de compostos orgânicos presentes nos combustíveis é submetido inicialmente a uma decomposição térmica na zona de pré-aquecimento, formando compostos de menor peso molecular; em seguida as oxidações ocorrem na mesma taxa das reações de combustão.

É um mecanismo que ocorre em temperaturas relativamente baixas e que é diretamente dependente do excesso de ar. Portanto, o NO combustível aumenta com a quantidade de N presente no combustível e com excesso de ar.

O conjunto de reações foi modelado por Fenimore (1972) e De Soete (1975) apud Souza (6) e Bowman (13), os quais dividiram o mecanismo em 2 fases. A primeira formando compostos intermediários seguida pela síntese de NO. As reações presentes são:

É um mecanismo importante em combustíveis líquidos e sólidos. A quantidade de N em destilados leves é cerca de 0,2% em massa, enquanto que em óleos residuais pode chegar a 2%. Em carvões minerais o valor oscila entre 1 e 2%. É baixa a formação de NO combustível na queima de gás natural e óleo destilado.

A referência (35) apresenta o seguinte equacionamento para a reação de NO combustível:

$$S_{NO,comb,f} = A_{comb,f} \mathbf{r} M_{NO} \frac{m_{HCN}}{M_{HCN}} \left(\frac{m_{O_2} M_{Mix}}{M_{O_2}} \right)^b \exp \left(\frac{-33.716}{T} \right) \quad (16)$$

$$S_{NO,comb,d} = -A_{comb,d} \mathbf{r} \frac{m_{HCN}}{M_{HCN}} m_{NO} M_{Mix} \exp \left(\frac{-30.194}{T} \right) \quad (17)$$

sendo:

$b = 1$ para $X_{O_2} < 2.500 ppm$ e $b = 0$ para $X_{O_2} > 18000 ppm$

5.2.1.3 NO ativo ou "prompt"

É o NO não atribuído aos outros 2 mecanismos anteriores. A sua presença foi observada na frente de chama, onde ocorre a maior parte das reações de combustão. A formação está limitada ao estágio inicial da chama, sendo gerado pela combinação do N molecular com os radicais hidrocarbônicos.

Segundo Fenimore e De Soete apud Souza (6) e Bowman (13), o NO ativo é formado em 2 estágios a partir inicialmente da reação de hidrocarbonetos leves com o nitrogênio, formando HCN e CN, e em seguida a correspondente oxidação em NO.

Alguns experimentos comprovam algumas características do NO ativo, isto é: depende da presença de hidrocarbonetos, independentemente de forma relativa da temperatura, tipo de combustível, taxa da mistura e tempo de residência.

A referência (35) apresenta o seguinte equacionamento para a reação de NO ativo:

$$S_{NO,ativo} = A_{ativo} \cdot M_{NO} \frac{m_{N_2} M_{Mix}}{M_{N_2}} \frac{m_{C_n H_m}}{M_{C_n H_m}} \left(\frac{m_{O_2} M_{Mix}}{M_{O_2}} \right)^b \exp \left(\frac{-30.194}{T} \right) \quad (18)$$

5.2.2 Técnicas de Controle de Formação e Emissão de NO_x

Em princípio as técnicas de controle podem ser subdivididas em 3 tipos:

- Remoção prévia do N no combustível
- Redução da formação durante a combustão
- Remoção física ou química nos gases de combustão

5.2.2.1 Remoção prévia

Diferentemente do SO_x que depende apenas da presença de S no combustível, a formação do NO_x tem 2 mecanismos inerentes à combustão, NO térmico e NO ativo.

Portanto, a remoção de N do combustível só teria efeito sobre o NO combustível. É uma técnica em geral dispendiosa, não estabelecida na prática. O uso de fontes primárias, tais como petróleo com pequenas quantidades de N é mais indicada.

5.2.2.2 Redução durante a combustão

As técnicas de redução de formação de NO_x durante a combustão buscam reduzir os teores de nitrogênio e oxigênio na zona de temperatura máxima, além de reduzir esta temperatura e o tempo de residência na zona de combustão. Neste contexto, podem ser citadas as seguintes técnicas usuais:

a) combustão com baixo excesso de ar

Enquanto a redução do excesso de ar inibe a formação de NO térmico e NO combustível, provoca aumento na formação de CO e fuligem.

Experiências indicam reduções de NO_x na faixa de 17 a 38% sem comprometer a emissão de CO e fuligem (6).

b) combustão estagiada

Esta técnica é baseada em combustão por etapas, em que na 1ª etapa é criada uma zona com falta de ar, com cerca de 70% do estequiométrico, reduzindo a presença de O_2 e a temperatura de chama. A combustão é completada nas etapas seguintes com injeção de ar secundário e terciário.

Esta técnica é utilizada para combustíveis, principalmente líquidos e sólidos, podendo ser alcançadas reduções de até 90%.

Experiência com estagiamento de combustível líquido ao invés de ar tem apresentado melhor resultado na redução do NO_x . Na prática em caldeiras com queimadores frontais, níveis de queimadores podem ser desligados.

c) recirculação de gases

A recirculação ou re-injeção na zona de combustão de gases de exaustão provoca redução de NO_x em função da diminuição da temperatura de chama e dispersão do O_2 em excesso.

É uma técnica sobretudo utilizada para o gás natural e óleos com baixo N, reduzindo principalmente o NO térmico.

d) redução da temperatura do pré aquecimento do ar

Técnica que pode comprometer a eficiência da combustão e visa reduzir a temperatura de combustão, reduzindo a formação de NO térmico.

e) outras técnicas de redução da temperatura de chama

- diminuição da temperatura da superfície envolvente
- injeção de água ou vapor: esta é uma técnica bastante usada e difundida em queimadores de turbinas a gás, porém provoca queda na eficiência, cerca de 10% em caldeiras e 1% em turbinas a gás
- combustão em leito fluidizado

f) diminuição do índice de rotação do queimador

A idéia é desuniformizar o teor de O_2 , reduzindo a possibilidade de formação de NO térmico.

g) uso de aditivos

Há indícios que partículas sólidas funcionam como catalisadores da redução de NO_x em N_2 . A reação esperada é: $2\text{NO} + \text{C} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{N}_2$. (19)

h) uso de queimadores de baixa emissão (“low NO_x burners –DLN”)

Trata-se de encontrar uma solução de compromisso, mantendo uma relação ar-combustível e tempo de residência baixos suficientes para atingir baixo NO_x , com aceitáveis níveis de ruído de combustão, estabilidade em carga parcial e tempo de residência suficiente para eliminar o CO.

As turbinas a gás empregam 3 tipos de queimadores: anular; cilíndrico-anular (“can-anular”) e silo. A instalação pode seguir 4 configurações de ciclo: simples, regenerativo, cogeração e combinado com Rankine. No Brasil a geração termoelétrica em implementação tem predominância dos 2 últimos ciclos. O controle de NO_x usual em turbinas é a injeção de água/vapor e uso de DLN. A combinação de técnicas de controle pode superar os 90% de redução. Hoje na prática já são garantidos níveis de emissão de 15 ppm de NO_x (29).

Importante fabricante de turbinas a gás industriais, a Hitachi (19) garante a seguinte configuração e níveis de emissão de NO_x na queima de gás natural:

- queimador comum: 188 ppm
- queimador comum com injeção de vapor ($1,45 \text{ kg}_{\text{vapor}}/\text{kg}_{\text{comb}}$): 53 ppm
- queimador comum com injeção de água ($1,45 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{comb}}$): 45 ppm
- queimador comum com SCR (“Selective Catalytic Reduction”): 19 ppm
- queimador comum com injeção de vapor e SCR: 5 ppm
- queimador DLN: 25 ppm
- queimador DLN com SCR (“Selective Catalytic Reduction”): 2,5 ppm

Além disso, novas técnicas estão sendo desenvolvidas, o “DLN ultra low NO_x ”, o queimador modular-híbrido, no qual a meta é atingir 9 ppm, e combustão catalítica com meta de 3 ppm (29).

5.2.2.3 Processo de tratamento de gases efluentes

Os processos de remoção de NO_x existentes e aplicados comercialmente são divididos em seco e úmido, podendo ser combinados com a remoção de SO_x .

Os processos tipo seco operam em temperaturas mais elevadas, de 350 a 400 °C e são integrados com o processo de combustão. A temperatura deve estar nessa faixa. Caso seja superior, a amônia age como combustível com nitrogênio e NO_x é formado ao invés de ser destruído. Se a temperatura for inferior, a amônia não reage e é emitida.

São economicamente mais competitivos que o tipo úmido, além de apresentar maior eficiência de remoção (>90%). Os mais usuais envolvem a reação com amônia (NH_3), utilizando ou não catalisador - SCR (“Selective Catalytic Reduction”) e SNCR (“Selective Non Catalytic Reduction”). A redução e os custos envolvidos são (26 e 65):

- SCR – 70 a 95% de redução de NO_x com investimento de 40 a 80 US\$/kW (alto custo de operação e manutenção – O&M, estimado em 2,25 a 3 US\$/MWh de operação e 2 US\$/MWh de manutenção)
- SNCR – 30 a 70% de redução de NO_x com investimento de 20 a 40 US\$/kW, com menor aplicação em turbinas a gás.

Os processos tipo úmido são mais aplicados para retirada combinada de NO_x e SO_x em gases contaminados com material particulado.

Nos EEUU estão aplicados 72 sistemas SCR em turbinas a gás com garantia de 10 ppm de NO_x (26).

A referência (26) apresenta um resumo por técnica do abatimento de NO_x , apresentado na tabela IV a seguir.

Tabela IV – Abatimento de NO_x – valores em %

Técnica	Carvão	Óleo	Gás natural
Alteração da Combustão			
Baixo excesso de ar	10 – 30	10 – 30	10 – 30
Combustão estagiada	20 – 50	20 – 50	20 – 50
Recirculação de gases	Nd	20 – 50	20 – 50
Injeção água/vapor	Nd	10 – 50	Nd
DLN	30 – 40	30 – 40	30 – 40
Tratamento de Gases			
SCR	60 – 90	60 – 90	60 – 90
SNCR	Nd	30 – 70	30 – 70

Nd – não disponível

5.2.3 Fatores de Emissões

Nas tabela V e VI a seguir são apresentados para o NO_x os padrões de qualidade de ar para o Brasil e padrões de emissão para alguns países.

Tabela V – Padrão de Qualidade de Ar do NO₂ (Conama 003/1990 - Brasil) – valores em mg/m³

Método	Padrão Primário	Padrão Secundário
1h ⁽¹⁾	320	190
MAA ⁽²⁾	100	100

⁽¹⁾ não deve ser excedido mais que 1 vez por ano

⁽²⁾ média aritmética anual

Tabela VI – Padrões de Emissão do NO_x (6)

País	NO _x como NO ₂	
	Conforme Legislação	Valores em g/10 ⁶ kcal ⁽¹⁾
CCE (1998)	450 mg/Nm ³ (3% O ₂)	459
Alemanha (1989)	150 mg/Nm ³ (3% O ₂)	206 ⁽²⁾
Japão (1990)	150 mg/Nm ³ (4% O ₂)	217 ⁽²⁾
EEUU (1991)	130 ng/J	544
Suécia (1993)	0,05 – 0,10 g/MJ	209 – 419
França (1990)	450 mg/Nm ³ (3% O ₂)	459
Banco Mundial	320 mg/Nm ³ (gás natural)	- - -

⁽¹⁾ conversão fonte Souza (6), baseada em PCS = 9.800 kcal/kg e 10 Nm³_{gases}/kg óleo

⁽²⁾ valor original corrigido

Cabe neste ponto um parênteses sobre as unidades normalmente utilizadas para referenciar taxas de emissão.

As unidades comumente utilizadas são: ppm vol (ml/Nm³ ou 10⁻⁶ Nm³/Nm³)

mg/Nm³

g/10⁶ kcal

g/kWh

Na bibliografia, quando é mencionado ppm, a referência é para a base volumétrica.

A conversão entre as diversas unidades depende do componente, da relação volume de gases de exaustão/massa de combustível, do poder calorífico superior e do consumo específico do equipamento.

As formulações a seguir estabelecem correlações, considerando, gás natural da Bolívia e usina em ciclo combinado (65).

$$\text{mg/Nm}^3 = r_1 * \text{ppm}_{\text{vol}} \quad (20)$$

$$\text{g/10}^6 \text{ kcal} = 10^3 * r_1 * r_2 * 1/r_4 * \text{ppm}_{\text{vol}} \quad (21)$$

$$\text{g/kWh} = 10^{-3} * r_1 * r_2 * r_3 * \text{ppm}_{\text{vol}} \quad (22)$$

As constantes de conversão r_i são dadas na tabela VII a seguir.

Tabela VII – Constantes de Conversão de Taxas de Emissão de NO e NO₂

Constante	Designação	Unidade	NO	NO ₂
r_1 (0°C; 1013m bar)	massa específica	kg/m ³	1,34	2,05
r_1 (25°C; 1013m bar)	massa específica	kg/m ³	1,23	1,88
r_2	vazão produtos/vazão combustível	Nm ³ gás seco / kg comb. úmido	11,55	
r_3	consumo específico	kg/kWh	0,129	
r_4	poder calorífico superior	kJ/kg	53.594	

Outra referência comumente utilizada é o teor de oxigênio contido nos gases de exaustão, sendo usualmente aplicados padrões de 1% e 3% de oxigênio em base molar, para caldeiras e 15% para turbinas a gás.

A conversão para uma medida numa certa base de oxigênio, qualquer que seja a unidade aplicada é dada por:

$$X_{\text{(corrigido)}} = X_{\text{(medido)}} \times \frac{20,95 - [O_2]_{\text{referência}}}{20,95 - [O_2]_{\text{medido}}} \quad (23)$$

5.2.3.1 Fontes industriais

Foram consultadas várias referências com o objetivo de se obter fatores de emissão para NO_x em caldeiras. O resultado está sintetizado na tabela VIII a seguir.

Tabela VIII – Fatores de Emissão de NO_x para Fontes Industriais

Referência	Equipamento	Combustível	Valor
(6) e (33) ⁽¹⁾	Caldeira frontal – 60 t/h	OC 7A/8A/9A	842,5 a 1327 g/10 ⁶ kcal
(10)	Caldeira tangencial 170 a 517MW	Carvão	0,47 a 0,62 lb/10 ⁶ Btu - original 0,37 a 0,39 lb/10 ⁶ Btu - após modificação
(11)	Caldeira tangencial – 265MW (862 t/h)	Carvão	0,56 a 0,66 lb/10 ⁶ Btu – original 0,31 a 0,41 lb/10 ⁶ Btu – após modificação
(32) ⁽²⁾	Câmara de Testes - Mitsubishi	RASF	400 a 420 ppm
(34)			200 mg/Nm ³ com 10% excesso ar
(36)	Laboratório – fornalha cilíndrica	Óleo Pesado	77 a 221 ppm

⁽¹⁾ Resultados de ensaios de campo variando excesso de ar e teor de N no combustível, sendo sintetizadas expressões para $\text{NO}_x = f(\text{O}_2)$, por exemplo, para carga nominal:

$$\text{NO}_x = 187,97 \text{ O}_2 + 710,16 \text{ [g/10}^6\text{kcal]} \quad (24)$$

⁽²⁾ Resultados de ensaios em laboratório com Resíduo Asfáltico – RASF brasileiro, testes com 2 a 3% O_2 nos gases. Avaliação de formação de NO_x combustível em função do teor de N no combustível com os resultados:

$$0\% \text{ N} \rightarrow 120 \text{ ppm (4\% O}_2\text{)}$$

$$1,05\% \text{ N} \rightarrow 420 \text{ ppm (4\% O}_2\text{)}$$

5.2.3.2 Fontes móveis - veículos

A metodologia utilizada pela Cetesb (30) é similar à da USEPA, que considera emissão total de um determinado período, efetuando a respectiva somatória sobre a frota circulante. Em geral o período considerado é anual. Os veículos são agrupados por ano-modelo, levando em conta a idade da frota. É aplicado o fator de deterioração que considera a idade e uso médio (quilometragem) anual. O fator de deterioração foi considerado 1,00, pois, diferentemente do CO e HC, o NO_x com o tempo de uso tende a diminuir devido ao desgaste do conjunto camisa-pistão-anéis, implicando menores pressões e temperaturas na câmara de combustão. Por outro lado, veículos de nova geração, equipados com catalisadores no sistema de escape, podem ter uma elevação do NO_x com o tempo, devido a degradação desse equipamento.

A contribuição do NO_x é somente devido aos gases de escape. Não há emissão por evaporação (combustível e respiro do cárter) ou proveniente de desgaste de pneus.

5.2.3.3 Fontes agrícolas – queimada de cana

A referência (43), relacionada a um documento sobre fatores de emissão da USEPA indica para queima de cana os seguintes fatores de emissão:

- Particulado: 2,3 a 3,5 kg/t
- CO: 30 a 41 kg/t
- Total de compostos orgânicos (metano): 0,6 a 2 kg/t
- Total de compostos orgânicos (não metano): 2 a 6 kg/t
- Material combustível: 8 a 46 t/ha

Observa-se que não consta a emissão de NO_x nesse tipo de combustão.

5.2.4 Efeito NO_x na Atmosfera

O óxido nitroso N₂O é extremamente estável na atmosfera não sendo considerado poluente. A meia vida na troposfera é estimada em 100 anos. Em contrapartida, o NO_x é oxidado na atmosfera produzindo ácido nítrico, um dos componentes da chuva ácida. A meia vida de NO_x na atmosfera é de 6 a 10 dias, com grandes variações de concentração.

Por outro lado, se houver NO_x na atmosfera e hidrocarbonetos não reativos (não metanos) com a presença de luz solar poderão se formar compostos fotoquímicos, em particular o ozônio.

Apesar da complexidade das reações de oxidação de hidrocarbonetos, o processo básico de formação do “smog” é relativamente simples, conhecido como cadeia de Ford-Elbow (7). O principal agente desta cadeia de reação é a produção de átomos de oxigênio pela fotólise do NO₂.

Duas reações adicionais mais rápidas ocorrem:

Caso não haja hidrocarbonetos reativos, há uma lenta redução de NO₂ em NO via reação:

Com a presença de hidrocarbonetos reativos na atmosfera há uma mudança drástica. O oxigênio ativo reage com tais hidrocarbonetos formando peróxidos reativos. Tais peróxidos reagem com NO reduzindo sua concentração. Isto provoca aumento de O₃ e NO₂ para manter equilíbrio da reação:

Na RMSP - Região Metropolitana de São Paulo, o ozônio é o poluente atual com o maior número de ultrapassagens do padrão. Na figura 6 a seguir para um sistema, pode ser verificado o comportamento das espécies de formação do ozônio em função da intensidade da luz.

Figura 6 – Perfil de Concentração de Espécies Envolvidas no Ciclo do Ozônio Obtido pela Variação de Intensidade da Luz do Dia, num Sistema (27)

Cidades americanas como Los Angeles, Denver e Phoenix têm tido problemas com tais reações fotoquímicas. A única forma de solução é reduzir a emissão de NO_x e de hidrocarbonetos. O NO_x pode viajar longas distâncias, contribuindo para a formação de ozônio e depósitos ácidos longe do ponto de origem da emissão.

Na Suécia (72) há um encargo desde 01/01/1992 para emissores de NO_x com o pagamento de 4,80 US\$/kg. Na verdade não é uma taxa. Visando não perder

competitividade o valor arrecadado é distribuído entre os agentes na proporção da produção de energia. Como resultado, unidades que produzem mais energia frente à emissão total têm benefício, enquanto que as unidades com baixa relação energia/emissão têm prejuízo.

5.2.5 Modelos de Previsão

Até meados da década de 1990, o monitoramento das emissões era exclusivamente realizado por sistemas de medição específicos conhecidos como CEMS – “Continuous Emission Monitoring System”. O sistema é composto de sensores, analisadores e processadores para indicação e controle operacional sequencial das taxas de emissão de poluentes como NO_x , SO_x , CO e MP (material particulado).

A partir da primeira metade da década de 1990 começou a ser desenvolvido um sistema alternativo, conhecido como ACEMS – “Alternative Continuous Monitoring System”, baseado em medições indiretas, acoplado a um modelo de cálculo preditivo das emissões. Um dos principais sistemas concebidos e em desenvolvimento é o PEMS – “Predictive Emission Monitoring System”.

Dentro do programa de controle de chuva ácida, o órgão ambiental americano USEPA vem orientando os responsáveis pelas principais fontes de emissão, em particular de NO_x , a implantar sistema de monitoramento e controle de emissões. Nos Estados Unidos, com referência a geradores termoeletrônicos, são 2.245 unidades sujeitas a este procedimento (40).

O CEMS é um sistema aceito pela USEPA. No tocante ao PEMS, a USEPA criou um procedimento de homologação, definido no documento 40 CFR 75- subparte E (37). O PEMS é um sistema relativamente novo com algumas unidades aceitas e em operação. Uma vez homologado, pode ser utilizado no lugar dos sistemas com analisadores. A principal força motivadora para aplicação do PEMS frente ao CEMS é econômica. Há uma redução de cerca da metade no investimento e entre 1/3 e 1/4 nos custos de operação e manutenção. O investimento inicial do CEMS é de 200 a

450 mil US\$, enquanto o PEMS é de 100 a 200 mil US\$. O PEMS utiliza sensores e equipamentos já existentes para a operação, evitando novo “hardware” de monitoramento e modificações no local da unidade (“site”). O controle de emissão é realizado por controle de combustão sem uso de controles/sensores de fim de processo (“end of pipe”).

O PEMS usa uma combinação de “hardware” e “software” para prever taxa de emissão de poluentes, em particular o NO_x, baseando-se em dados de medição de sensores da operação. Os sensores usados no PEMS são coincidentes com os sensores críticos da operação que têm redundância dupla ou mesmo tripla.

Em termos de filosofia de projeto existem três tipos de modelos para PEMS:

a) modelos de inteligência artificial

Combina conceitos da rede neural utilizando lógica *fuzzy*.

É um sistema que vai aprendendo as complexas interações das variáveis do processo conforme os dados são disponibilizados.

b) regressão linear

Utilizando base de dados reais são desenvolvidas equações e curvas de comportamento.

A referência (41) expõe o desenvolvimento de um sistema (1984) com base nesse princípio, cujo objetivo na ocasião era diminuir o tempo de resposta para redução de NO_x.

Através de 12 índices ou parâmetros operacionais foi desenvolvido um sistema para UTE de 175 MW com ciclo Rankine convencional.

A regressão simples obtida para a unidade foi:

$$\bullet \text{ NO}_x \text{ (ppm)} = -67,8 + 0,00133 (\text{Pot}_{\text{el}})^2 \quad (30)$$

$$\bullet \eta \text{ (\%)} = 35,6 + 0,0165 (\text{Pot}_{\text{el}}) \quad (31)$$

sendo Pot_{el} em MW.

O tempo de resposta de controle de NO_x foi reduzido para 4 min.

A principal dificuldade desse modelo é estabelecer uma relação não conhecida e testada entre parâmetros.

c) termodinâmico

Modelo baseado em equações de conservação de energia, reação de combustão e sub-modelo de formação de NO_x .

É função das características da câmara de combustão e queimadores. Há um modelo para cada classe de equipamento. E, tem necessidade de dados empíricos para calibração.

O modelo (c), foco deste trabalho para a previsão de NO_x , apresentado com maiores detalhes no capítulo 6, necessita de parâmetros operacionais de entrada para o processamento.

Foi visto anteriormente que a temperatura de chama (pico) é fundamental para formação do NO_x térmico (modelo Zeldovich). Entretanto, este não é um parâmetro operacional usual. Portanto, o modelo deve ter concepção para calcular este parâmetro através de parâmetros operacionais disponíveis. Um modelo para PEMS desenvolvido para uma UTE com turbina a gás GE Frame 7B/E de 57MW em ciclo combinado, sem queima suplementar, utilizando gás natural requer apenas 4 parâmetros (39) :

- potência no gerador;
- temperatura de descarga do compressor;
- pressão de descarga do compressor;
- modo de operação da combustão, p. ex., tipo difusão ou pré-mistura e em alguns casos, em função da carga, há variação no volume de anéis da zona de reação.

Este é um modelo desenvolvido para unidade antiga com recursos limitados na instrumentação. É conhecido como Simplex PEMS. Em turbinas a gás mais modernas (V 84.2 Siemens e LM 6000 GE) alguns parâmetros adicionais são incorporados no modelo, por exemplo, fluxo de combustível, temperatura de exaustão, temperatura e umidade do ar.

Em contrapartida, uma UTE de 592 MW, ciclo Rankine, com caldeira super crítica, de uma passagem (“once-through”), com reaquecimento e recirculação de gases, utiliza 6 parâmetros.

Para ser aplicado, o PEMS deve ser validado seguindo o critério da USEPA, definidos no RATA- “Relative Accuracy Test Audit” (39). Fundamentalmente são 3 testes, nos quais são comparadas as saídas CEMS e PEMS:

a) F-teste

A relação de variâncias das medidas PEMS e CEMS deve estar abaixo de um valor crítico no intervalo de validade.

b) R-teste

É uma análise de correlação que avalia a linearidade entre os dados previstos e medidos, cujo coeficiente de correlação deve estar acima de um valor crítico (0,80).

c) T- teste

Verifica se há erro sistemático, isto é, se há tendência nos dados previstos. O módulo da diferença entre dados PEMS e CEMS deve ser inferior a um determinado valor.

Portanto, em síntese, o PMES não é um sistema complexo, envolve modelo matemático simples para prever emissões (NO_x), baseado em relações conhecidas ou derivadas das emissões em função de um seletivo grupo de parâmetros operacionais.

O PEMS pode ser aplicado em qualquer unidade (caldeira, motor, turbina a gás) utilizando gás natural ou óleo combustível.

O EPRI- “Electric Power Research Institute” testou e recomenda o uso do PEMS (37).

O Canadá está permitindo o uso de PEMS em turbinas a gás, porém nega para outras fontes e combustíveis sólidos (38). O argumento para a combinação turbina a gás com combustível gás natural ou óleo destilado está nos baixos níveis de emissão

observados, já que são combustíveis com características conhecidas e repetitivas, com modelo de cálculo consistente e próximo ao real.

Alguns estados americanos estão permitindo monitorar por meio de PEMS, além do NO_x , a temperatura dos gases e a taxa de injeção de amônia ao invés da medição direta do NH_3 não reagido na exaustão (“ NH_3 slip”). Uma vez disponível o sistema PEMS, pode ser invertido para otimizar variáveis de operação.

Há uma previsão de que o PEMS possibilita uma redução de NO_x de 20 a 60 % em unidades sem sistema de controle e de 5 a 25% em unidades com DLN.

O PEMS tem resposta mais rápida, de 1 minuto, em relação ao CEMS, de 3 a 5 minutos.

Na operação alguns alertas são destacados.

- O PEMS não deve ser aplicado em processo que necessita de medição direta para controle da operação.
- O PEMS deve ser adaptado em unidade após a manutenção geral (“overhaul”), sobretudo se houve atualizações.
- Como o PEMS está ligado aos parâmetros operacionais, o CEMS pode detectar problemas não observados no PEMS através de medidas de emissão, sobretudo na sensibilidade dada pelo CO.

A seguir é apresentado o modelo de formação de NO_x utilizado.

Estudos da década de 1980 (62 e 63) sobre previsão de NO_x em turbinas a gás, anteriores ao advento dos modelos computacionais numéricos, procuravam através de um entendimento físico do fenômeno e das variáveis envolvidas no processo sintetizar um modelo representativo, simplificado, utilizando variáveis na forma global com previsões aceitáveis dentro do domínio de validade concebido.

Este conceito atende a modelagem e apreciação pretendida neste estudo.

A equação (31a), mencionada como ferramenta na utilização do PEMS na referência (37), oriunda do trabalho da referência (62), foi concebida a partir de um algoritmo baseado no modelo de reator de mistura.

$$XNO_{x,t} = A_1 t(p)^{0,5} \frac{M_{rz}}{(R_u T_{ch})} \exp\left[\frac{-k_{NO_x}}{(R_u T_{ch})}\right] XN_2 (XO_2)^{0,5} \quad (31a)$$

A formação de NO_x térmico é modelada segundo o mecanismo de Zeldovich, conforme apresentada no item 5.2.1.1. Segundo Touchton (62), um modelo de formação de NO_x em um processo pode ser representado por 3 reatores de mistura perfeita CSTR – “Continuous Stirred Tank Reactor” em série, conforme figura 7 a seguir.

Figura 7 – Modelo de Formação de NO_x

É assumido que o tempo de reação para formação do NO_x térmico é muito superior ao tempo da combustão, podendo ser desacoplado da combustão.

As reações de formação do NO_x ocorreriam no 2º reator num tempo de residência característico (t), muito maior que o tempo da reação de combustão.

Todo o NO_x formado segundo este princípio é do tipo térmico e na forma de NO.

A formação do NO_2 é importante em baixas cargas e em geral não ultrapassa 5% do NO_x total.

A partir do modelo teórico de formação do NO_x apresentado na equação (3), representada em termos simplificados e globais na equação (4), obtém-se a equação (31a).

O parâmetro A_1 é limitado às condições para as quais o modelo tem validade.

A formação do NO ativo de acordo com a bibliografia e as referências (62 e 63) ocorre na frente de chama durante a combustão, em condições próximas à estequiométrica, com valores significativamente inferiores ao NO térmico, na combustão de gás natural.

Nestas condições, o NO ativo ocorreria no primeiro reator durante os primeiros estágios da combustão.

A equação (31b) é obtida em (63) de acordo com estas hipóteses, sendo que para o gás natural em condições estequiométricas a função empírica $f(\phi)$ tem pouca influência, apresentando valor de 0,016.

$$X_{\text{NO}_{x,a}} = f(\phi) (p)^{0,5} X_{\text{NO}_{x,\text{total}}} \quad (31b)$$

No último reator do modelo, os produtos são diluídos instantaneamente.

Este é, portanto, um modelo mais robusto que uma simples e singela representação de regressão de NO_x como função da potência como, por exemplo, a equação (30).

O entendimento físico representado no equacionamento por meio da energia de ativação global ($k\text{NO}_x$), tempo de residência (t), composição de O_2 e N_2 e temperatura de chama permite extrapolação no domínio das hipóteses assumidas, limitadas à obtenção do parâmetro A_1 . O parâmetro A_1 depende do tipo de turbina e da forma de combustão.

5.3 Modelo de Dispersão

5.3.1 Introdução

A legislação ambiental sobre poluição atmosférica tem imposto gradativamente ao longo dos últimos anos limites de emissões cada vez restritivos. A autorização para instalação e operação de um empreendimento industrial estabelece atividades de previsão e controle da emissão e dispersão dos poluentes na atmosfera.

O processo de saída de gases pela chaminé de instalações estacionárias é complexo, envolvendo inicialmente aumento e crescimento induzido da pluma devido ao seu momento ascendente e empuxo, seguindo de uma ação dispersiva natural na atmosfera. A turbulência tem papel fundamental na caracterização e desenvolvimento desses fenômenos.

Uma revisão do assunto sobre jatos turbulentos, incluindo os tipos pluma pura, jato puro e jato com empuxo é apresentada no Apêndice A. No texto é reforçada a dependência ao comportamento tipo Gaussiano para os perfis de velocidade e temperatura.

Fenômenos envolvendo a turbulência da pluma e a turbulência do ar atmosférico e a ação de interação entre ambos com trocas de quantidades físicas são de difícil representação analítica. Neste contexto, então, a análise e previsão são efetuadas através de métodos estatísticos com manipulação através de hipóteses simplificadoras.

No Anexo A é apresentada uma descrição do método Gaussiano de dispersão de pluma, utilizado nos modelos de dispersão da USEPA.

5.3.2 Modelos Usuais de Dispersão

A USEPA é a grande agência mundial de pesquisa da qualidade do ar e desenvolvimento de modelagem meteorológica de análise. Desenvolveu cerca de 10 modelos para aplicações regulatórias e mais 20 adicionais, desenvolvidos por terceiros, para inclusão na regulação. Os modelos de análise são amplamente difundidos e aplicados por agências de controle ambiental fora dos Estados Unidos. Este é, por exemplo, o caso brasileiro.

Não existe um modelo de dispersão com aplicabilidade universal, como um manual. Há diferenças de topografia, clima e fontes de operação que alteram os resultados. As medidas de grandezas locais complementam o uso de modelos.

Os modelos são divididos em 4 classes:

a) Gaussiano

Baseado no decaimento da função de Gauss, são os modelos mais utilizados para estimar impactos de poluentes não reativos.

b) Numéricos

Método alternativo ao Gaussiano é utilizado para área urbana, envolvendo poluentes reativos, requerendo maiores informações de entrada, redundando em aplicações limitadas.

c) Estatísticos e empíricos

São utilizados nos casos em que há baixo entendimento físico.

d) Físico

Técnicas de Dinâmica de Fluidos Computacional (“Computational Fluid Dynamics” – *CFD*) são utilizadas para problemas específicos, por exemplo, impacto da pluma em prédios, impacto da pluma em terrenos elevados (“downwash”).

Em termos de precisão ou sofisticação dos resultados existem 2 níveis:

- a) orientativos (“screening”) que induzem a uma avaliação mais geral e conservativa sem detalhamento meteorológico, sendo utilizadas 5 técnicas de avaliação das concentrações, dependendo sobretudo da localização e tipo do terreno e período de análise.
- b) técnicas analíticas que envolvem tratamentos mais detalhados dos fenômenos.

Em geral a aplicação é iniciada por modelos tipo orientativos (“screening”), seguida da aplicação de modelo mais sofisticado.

Os modelos estão organizados em 8 categorias: rural; urbano; industrial complexo (chaminé em nível baixo); poluentes reativos; fontes móveis; terreno mais alto que a fonte; visibilidade e transporte de longa distância.

A aplicação do modelo visa verificar atendimento de padrões da qualidade do ar e se há causa e contribuição para degradação do ar maior que a especificada.

Os modelos incluem algumas características:

- receptores - definição adequada da área de influência
- coeficientes de dispersão: rural/urbana
- categoria de estabilidade
- estimativa de elevação da pluma
- transformação química
- classificação do terreno urbano/rural, baseado em ocupação do solo e densidade populacional
- pulverização (“fumigation”)
- estagnação com elevada concentração no nível do solo

Os dados de entrada do modelo incluem:

- a) caracterização da fonte
 - Inclui classificação(ponto/linha/área/volume)

- Local e características físicas da emissão junto a chaminé: diâmetro; altura; temperatura dos gases; vazão do poluente em 3 condições de carga (100; 75 e 50%)

b) concentração da poluição de fundo pré-existente, quando disponível

c) dados meteorológicos

Envolvendo registro histórico de pelo menos 5 anos na base espacial e temporal.

Os modelos de dispersão tentam estimar concentrações para locais específicos que representam a média do conjunto de repetidas medições do mesmo evento. Pode implicar variações de 50%. Erros de 5 a 10% na direção do vento podem provocar erros na concentração de 20 a 70%. Estimativas de longo prazo são mais confiáveis que de curto prazo.

Em termos de aplicação regulatória a USEPA defende o uso preferencial de modelagem para determinar limites de emissão para fontes existentes e novas. Monitoramento não é aceito como única base para limite de emissão em terrenos planos.

A especificação de limite de emissão conhecido como valor de projeto de ou concentração de projeto é a soma da contribuição da fonte e a concentração da poluição de fundo pré-existente.

Os critérios de violação para NO_x , por exemplo, é o maior valor e o segundo maior valor. Outros critérios, como maior média anual, podem ser utilizados.

A USEPA subdivide modelos em 2 classes - preferenciais e alternativos.

O ISCST – “Industrial Source Complex Short Term” é classificado como preferencial. Entre as principais características podem ser destacadas:

- modelo pluma Gaussiana em regime permanente
- aceita fontes tipo área, linha e volume

- avaliações de curto e longo prazo
- pulverização (“fumigation”) não é tratada
- transformação química pode ser tratada usando decaimento exponencial

O modelo Caline 4 (42 e 55), também enquadrado na classe preferencial, do tipo pluma Gaussiana, é utilizado para modelar concentrações de poluentes não reativos em estradas.

Como modelo alternativo destaca-se o RPM IV – “Reactive Plume Model” (42 e 55) que possibilita estimar reações secundárias ao longo da pluma, por ex., a transformação de NO e hidrocarbonetos em ozônio.

6. MODELO DE PREVISÃO DE NO_x

6.1 Objetivo

Dentro da proposta deste trabalho de sintetizar um método preditivo de avaliação da concentração de NO_x no ar numa região de estudo, é proposto o acoplamento do modelo de dispersão (SCREEN e ISCST) com um modelo de previsão de formação de NO_x para a UTE sob análise (fonte nova).

Como anteriormente mencionado, para as fontes existentes que compõem a poluição de fundo pré-existente, são utilizados para avaliação das taxas de emissão informações em bancos de dados disponíveis.

Com a aplicação de fatores de emissão e manipulação adequada são obtidas as taxas de emissão por fonte (industrial, móvel e agrícola).

No caso da fonte nova, isto é UTE com turbina a gás, pretende-se ampliar a previsão de emissão de NO_x, além do simples valor estabelecido pelo projeto.

O objetivo é estabelecer uma função representativa de formação de NO_x geral, desvinculada das condições de referência ISO⁽²⁾.

A função de formação de NO_x inclui variações de potências, condições variáveis de temperatura do ar, altitude e injeção de vapor e/ou água para elevação de potência ou abatimento da emissão de NO_x.

Portanto, a síntese de um modelo de previsão de NO_x permite estabelecer variações nas condições de emissão e conseqüentemente na dispersão da nova fonte, criando um vínculo mais fiel às condições locais da região em estudo.

⁽²⁾ ISO é a condição de referência para avaliação de desempenho de turbinas a gás relacionadas às condições ambientais de 15,5°C (60°F), 1013 mbar e 60% umidade relativa do ar.

Além disso, o modelo de previsão devidamente testado e aferido, na fase de operação da usina, pode servir como ferramenta de controle operacional da turbina segundo o sistema PEMS, através do processo termodinâmico. Na verdade, a concepção do modelo foi baseada no princípio do PEMS.

A utilização estendida do modelo de previsão como indicador de taxa de emissão do NO_x no método de planejamento ambiental é a inovação do presente trabalho.

6.2 Estruturação do Cálculo

Atualmente empresas de geração de energia americanas estão implementando nova metodologia de medição operacional de poluentes. A medição operacional contínua (CEMS – “Continuous Emission Monitoring System”) está sendo substituída pela preditiva (PEMS – “Predictive Emission Monitoring System”). O PEMS, indicado também para alguns empreendimentos em desenvolvimento no Brasil, é baseado num modelo global de balanço de energia e cinética de formação de poluentes. O PEMS, uma vez aferido via CEMS, fornece resultados operacionais com qualidade de precisão num custo bem inferior. Na prática é efetuado um tratamento estatístico das diferenças entre os resultados dos 2 métodos e em alguns casos está se pensando no uso de ferramentas por meio de rede neurais para aperfeiçoar a previsão.

Para o modelo de representação de previsão de NO_x desenvolvido, inspirado no conceito PEMS, são utilizadas as seguintes equações globais representativas:

a) balanço de energia para volume de controle conforme figura 8:

$$m_{ar}H_{ar} + m_{comb}(H_{comb}) + m_{vapor / \acute{a}gua}H_{vapor / \acute{a}gua} = Pot_{el} + (m_{ar} + m_{comb} + m_{vapor / \acute{a}gua})H_{gases} \quad (32)$$

As incógnitas são a vazão de ar (m_{ar}) e a entalpia dos gases de exaustão (H_{gases}) que são obtidas de forma iterativa.

b) equação de combustão completa:

Esta equação fornece a composição dos gases de exaustão, em particular O_2 e N_2 , excedentes na reação. Como simplificação foi assumido combustível gás natural como metano (CH_4).

c) cinética de formação de NO_x (62 e 63):

- NO térmico (62):

$$XNO_{x,t} = A_1 t (p)^{0,5} \frac{M_{rz}}{(R_u T_{ch})} \exp\left[\frac{-k_{NO_x}}{(R_u T_{ch})}\right] XN_2 (XO_2)^{0,5} \quad (34)$$

- NO ativo:

$$XNO_{x,a} = f(\phi) (p)^{0,5} XNO_{x,total} \quad (35)$$

- NO total:

$$XNO_{x,total} = XNO_{x,t} + XNO_{x,a} \quad (36)$$

A origem das equações e as etapas para o processamento são descritas abaixo.

A equação (32) representa o balanço de energia em regime permanente num volume de controle englobando compressor – turbina – gerador. A figura 8 a seguir exemplifica esta condição.

Figura 8 – Representação do Turbo – Compressor - Gerador

No caso de aplicação prática do PEMS, são conhecidas por meio da medição das seguintes grandezas:

- H_{ar} – entalpia específica do ar por meio da medida de temperatura do ar
- m_{comb} – consumo de combustível
- H_{comb} – entalpia específica do combustível
- $m_{vapor/água}$ – fluxo de vapor ou água na câmara de combustão
- $H_{vapor/água}$ – entalpia específica do vapor ou água por meio das propriedades termodinâmicas conhecidas (p , T)
- Pot_{el} – potência produzida

As grandezas, m_{ar} – vazão de ar no compressor, e H_{gases} – entalpia específica do gases, não são em geral medidas pelo sistema de controle e supervisão da operação. O processo usual de obtenção destas grandezas envolve a solução simultânea das equações (32) e (33).

No presente estudo, o modelo termodinâmico trabalha com o mesmo conjunto de equações de forma similar. Os passos para o cálculo são apresentados a seguir.

1º passo: Dados Operacionais da Turbina

A partir das curvas de desempenho e eficiência de uma determinada turbina obtém-se os dados de:

- Potência
- Vazão de ar
- Vazão de combustível
- Temperatura de exaustão
- Vazão de água/vapor

As seguintes funções de regressão são obtidas:

- Potência = $f(\text{temperatura do ar; altitude; vazão água/vapor})$
- Vazão de combustível = $f(\text{temperatura do ar; altitude; potência; vazão água/vapor})$
- Temperatura de exaustão = $f(\text{temperatura do ar; altitude; potência; vazão água/vapor; vazão de combustível})$

Vale ressaltar que em condições operacionais estes dados são disponíveis por meio da medição.

No presente estudo para estabelecer o modelo termodinâmico, foram obtidas funções de regressão a partir das curvas de operação da turbina, para criar um cenário de dados para simulação.

Os dados de entrada efetivos do modelo são:

- Temperatura do ar
- Altitude
- Vazão água/vapor

2º Passo: Cálculo da Vazão do Ar (m_{ar}) (processo iterativo)

- É assumido um valor de m_{ar} e através da equação (33) calcula-se a composição dos gases de exaustão.

- Com a composição e temperatura dos gases obtém-se a entalpia específica dos gases (H_{gases})
- Substitui-se H_{gases} na equação (32) e obtém-se m_{ar}^* .
- Se $m_{\text{ar}} = m_{\text{ar}}^*$, o processo é encerrado

3º Passo: Cálculo dos Parâmetros do Ciclo

- Assumindo uma eficiência do compressor entre 0,83 e 0,90 (68), conhecida a razão de pressão (r_p), é calculada a condição do ar após o compressor.
- Calcula-se a temperatura de chama adiabática na condição real com excesso de ar.
- Obtém-se as grandezas o ciclo:
 - Temperatura de exaustão calculada
 - Potência produzida na turbina
 - Potência consumida no compressor
 - Outras

4º Passo: Estimativa de NO

O modelo de formação de NO, descrito em 5.2.5, é baseado no conjunto de equações (34), (35) e (36). A equação (34) fornece a estimativa de NO térmico, enquanto que a equação (35) estima o valor de NO ativo.

Nota-se que as equações (35) e (36) estão relacionadas através da previsão de NO_x total- $\text{XNO}_{x, \text{total}}$, que é soma da contribuição térmico e ativo.

No modelo de cálculo desenvolvido, as variáveis necessárias para a estimativa do NO térmico e ativo são incorporadas, compondo o último passo do processo de cálculo.

No apêndice E é apresentada a listagem do programa.

6.3 Estudo de Caso

O modelo de cálculo sintetizado no EES foi alimentado com dados da turbina V84.2 da Siemens (38).

Este equipamento foi utilizado na análise, visto que existe disponível em bibliografia (38) resultado de PEMS com esta turbina na configuração ciclo combinado, com caldeira de recuperação sem queima suplementar. A turbina V84.2 tem como principais características:

- Potência nominal ISO: 109 MW
- “heat rate”: 10.586 kJ/kWh
- relação de pressão: 11:1
- vazão de ar: 356,5 kg/s
- rotação: 3.600 rpm
- temperatura de saída dos gases: 817 K

O dados de entrada invariantes nas simulações foram:

- umidade relativa do ar: 60% (0,00976 kg água/kg ar seco)
- combustível: metano (CH_4)
- volume hipotético da câmara da reação de NO_x para cálculo do tempo de residência: 6,5 m³

A massa principal de dados de trabalho foi gerada sem injeção de água ou vapor na câmara de combustão. A variação de altitude assumida foi de 0 m – nível do mar (101,3 mbar) a 750 m (92,38 mbar), enquanto que a temperatura do ar variou de 15 a 35°C.

Os cálculos foram discretizados para 4 condições de carga: 25%, 50%, 75% e 100%.

Na figura 9, são apresentados resultados comparando dados reais com os calculados nos 1º e 2º passos do processo de cálculo. A vazão de combustível calculada representa a função de dependência das variáveis potências, temperatura de ar e altitude, apresentando boa correlação com os dados reais.

A vazão de ar, entretanto, é obtida através do processo de cálculo de balanço da 1ª Lei, apresentando valores cerca de 2% superiores aos reais.

A curva real de concentração de emissão de NO_x para valores instantâneos (38) está apresentada na figura 10.

São observadas 2 zonas características. Entre 20 e 46 MW, uma zona denominada tipo I, difusão, com elevação crescente de NO_x com a carga. Entre 46 e 100 MW, uma zona II, pré mistura, é verificada uma queda significativa nos valores absolutos da taxa de NO_x . Ao longo da faixa observa-se também um ligeiro decréscimo da emissão com a carga.

Não há menção na referência sobre o tipo de controle de emissão aplicado.

Figura 9 – Resultado de Modelo de Cálculo – Regressão da Vazão de Combustível e Cálculo da Vazão de Ar com a Potência

Figura 10 – Concentração de Emissão de NO_x Real em Turbina Siemens V84.2 (38)

Para subdivisão entre NO térmico e ativo, foi assumida a mesma proposta das equações representativas (34) e (35), ou seja, 5,3% do NO_x total é NO_x ativo.

A partir destes resultados reais foi feita uma tentativa de calibração do parâmetro A_1 da equação (34). Devido à elevada energia de ativação da formação de NO_x térmico, o resultado da previsão é significativamente sensível à temperatura da câmara. Neste contexto, os valores calculados pela equação (34) coincidiram com os resultados reais apenas na zona I difusão, com valores extrapolados entre 75 e 100% de carga.

Na figura 11 estão representados os valores de emissão de NO_x reais e calculados. A temperatura de chama também está representada. A curva de difusão real-previsto foi obtida a partir dos dados de difusão reais 20 e 46 MW, extrapolados para a faixa de 46 a 106 MW.

Para valores de carga inferior a 46 MW a queda de temperatura na câmara é significativa. Com 25% de carga, a temperatura da câmara é de 1040 K com fator de excesso de ar de 5,57.

Figura 11 – Comparação do Modelo de Cálculo de NO_x

Face à esta correlação difusa entre os resultados reais e valores calculados e desconhecimento sobre o controle de emissão aplicado nos testes da turbina, procurou-se explorar através da injeção de água na câmara o efeito na temperatura e na previsão da emissão de NO_x . A injeção de água, similar a outros procedimentos, tem efeito significativo na redução da emissão de NO_x .

Assim, estudou-se a injeção de água na câmara, com relação vazão de água/vazão de combustível variando de 0 a 1,8, sendo esta faixa a usualmente empregada.

Na figura 12 estão apresentados os resultados. Para o modo de zona I – difusão, cujos resultados a partir de 46 MW foram extrapolados a partir dos obtidos no teste, sendo rotulados na figura como real-previsto, é possível obter pelo modelo valores calculados de emissão próximos. A mesma constatação se aplica ao modo pré-mistura para carga acima de 50%.

Observa-se sobre a mesma figura que esta correlação foi obtida pelo efeito de controle na temperatura de chama. No modo de difusão – zona I, a temperatura máxima é de 1.246 K. Na zona II – pré-mistura, a temperatura é mantida praticamente constante em 1.246 K, enquanto sem injeção de água a valor máximo é de 1.321 K.

Figura 12 – Comparação do Modelo de Cálculo de NO_x com Injeção de Água

Considerando, então, o estudo para um comportamento real, sem prévio controle de NO_x , foram utilizados nos cálculos as correlações de A_1 obtidas da figura 11 redundando nos seguintes valores:

Zona I – difusão

$$A_1 = 2,78 \times 10^{28} \frac{m^2 N^{0,5}}{kg-s} ppmvol$$

Zona II – pré-mistura

$$A_1 = 3,32 \times 10^{27} \frac{m^2 N^{0,5}}{kg-s} ppmvol$$

Foram produzidos 2 conjuntos de resultados. O primeiro mantendo a altitude variando-se a temperatura do ar, e vice-versa.

Na figura 13 é apresentada a temperatura de chama adiabática em função da temperatura do ar. Observam-se diferenças de temperatura de chama de apenas 2 a 3 K em relação a outros modelos de previsão (61).

Figura 13 – Temperatura de Chama Adiabática em Função da Temperatura do Ar

Nas figuras 14 e 15 são apresentados valores de NO_x incluindo a contribuição do NO_x térmico e NO_x ativo em função da temperatura do ar. Para cargas baixas, inferiores a 50%, o modelo não capta o efeito. Variações de 15°C na temperatura do ar provocam sensíveis alterações na previsão de NO_x , praticamente, dobrando os valores.

Na figura 16 é indicada a variação da fração molar de O_2 com a temperatura do ar e carga. Observa-se pouca variação de valores com a temperatura, sendo que a variação com a carga é devido a diferentes excessos de ar. Mesmo para valores relativos mais elevados do O_2 para baixa carga (25%), o seu efeito sobre a formação de NO_x é dominada pela baixa temperatura de chama.

Por outro lado, nas figuras 17, 18 e 19 não são observadas variações de temperatura de chama adiabática e emissão de NO_x com a altitude.

Figura 14 – Variação de NO_x com a Temperatura do Ar – Zona I – Difusão

Figura 15 – Variação de NO_x com a Temperatura do Ar – Zona II – Pré-Mistura

Figura 16 – Composição de O₂ dos Gases com a Carga

Figura 17 – Temperatura de Chama Adiabática com a Carga

Figura 18 – Variação de NO_x com a Carga - Zona I - Difusão

Figura 19 – Variação de NO_x com Carga – Zona II – Pré-Mistura

7. MODELO DE DISPERSÃO – ESTUDO DE CASO DE PAULÍNIA

Apesar da aplicabilidade global para qualquer região de estudo do método proposto de diagnóstico preditivo, dentro da precisão requerida dos estudos de planejamento (elétrico-ambiental), é fundamental uma comparação e aferição dos valores previstos com os resultados reais obtidos.

A região escolhida para esta avaliação foi Paulínia.

7.1 Características do Município

O município de Paulínia faz parte da Região Administrativa de Campinas (RAC), composta de 20 municípios: Americana, Artur Nogueira, Campinas, Cosmópolis, Engenheiro Coelho, Estiva Gerbi, Indaiaituba, Itapira, Jagariúna, Mogi Guaçu, Mogi Mirim, Monte Mor, Nova Odessa, Paulínia, Pedreira, Santa Bárbara do Oeste, Santo Antonio da Posse, Sumaré, Valinhos e Vinhedo.

Paulínia, na condição de município desde 1964, possui uma área de 140 km² e uma população de 51.326 habitantes em 2000 (44.000 habitantes em 1997).

A principal atividade de Paulínia é a produção de derivados de petróleo e petroquímica, vinculada à Refinaria de Paulínia (Replan) inaugurada em 1972, localizada a cerca de 5 km da sede do município. A Replan foi responsável por um papel indutor na implantação de indústrias petroquímicas junto às suas fronteiras.

Somente na área do entorno da refinaria existem cerca de 9 indústrias identificadas pela Cetesb com alto e médio grau de prioridade em termos de impacto atmosférico. Este conjunto, incluindo a refinaria, possui 57 fontes pontuais de emissão (chaminés).

As fontes móveis veiculares presentes podem ser subdivididas em frota municipal e trânsito rodoviário pela rodovia Campinas - Paulínia – Cosmópolis. Essa rodovia

apresenta trânsito bastante pesado sendo a principal rota de escoamento da produção de derivados de petróleo e petroquímicos do município.

Além disso, a área rural possui uma ocupação relevante de cultura anual de cana, que apresenta emissões devido às queimadas por ocasião da colheita.

As atividades acima reportadas criam um quadro situacional de emissões denso para o município. A condição local não é de estabilidade, visto que a presença da refinaria continua favorecendo e induzindo a implantação de indústrias na região.

Nos últimos anos, com a chegada do gás da Bolívia, novas indústrias têm solicitado permissão para instalação no município, incluindo alguns projetos de UTE's de pequeno e grande porte. A análise ambiental da introdução desses novos projetos torna-se mais complexa, tendo em vista a falta de um diagnóstico ambiental da região.

Neste sentido, e preocupada com a saturação atmosférica, a Secretaria Estadual de Meio Ambiente promulgou a Resolução SMA 13 de 19/03/99, visando estabelecer um processo de planejamento ambiental para a região. A resolução estabelece a atuação de um grupo de trabalho com o objetivo de elaborar um diagnóstico físico e sócio-econômico e indicar uma metodologia para cenários futuros de qualidade de ar e água. As etapas a serem cumpridas envolvem: definição da área; caracterização da situação ambiental; inventário das ações em andamento; identificação de situações críticas; elaboração de cenários; estabelecimentos de padrões de emissão, de procedimentos de licenciamento e de programa de prevenção. Este planejamento subsidiará a capacidade de suporte do meio ambiente para 3 ações fundamentais: licenciamento de novos empreendimentos; implementação de medidas de redução das desconformidades existentes e atuação para um desenvolvimento sustentável.

Entretanto, diversas dificuldades de ordem prática, envolvendo desde a captação de recursos até a capacitação de entidades técnicas para o serviço, têm retardado esse trabalho.

É um trabalho de vulto envolvendo medição de emissão nas fontes, implantação de monitoramento automático, aplicação de modelo de dispersão com subsequente

calibração e aferição. Com três anos passados, o trabalho continua no âmbito exclusivo da Secretaria, com atividades ainda na fase de diagnóstico, isto é, levantamento real do quadro regional de emissões.

7.2 Base de Dados

A região de estudo escolhida é a do município de Paulínia. Neste sentido, é criada uma compatibilidade automática com a base de dados municipal disponível.

Visando isolar o efeito da recente penetração do gás natural com a respectiva alteração da emissão ainda não bem conhecida, foi escolhida como base o ano de 1997.

Para os valores não disponíveis no ano base 1997 foram feitas projeções devidamente indicadas.

Na figura 20 é apresentado um mapa esquemático da região, sendo destacados os seguintes pontos e áreas características:

- a - fonte pontual, nova UTE;
- b – fonte pontual, REPLAN;
- c – fonte industrial, com emissão equivalente de 60% da carga poluidora industrial de Paulínia;
- d - fonte industrial, com emissão equivalente de 40% da carga poluidora industrial de Paulínia;
- e-f – área de emissão do 1º trecho rodoviário;
- f-g – área de emissão do 2º trecho rodoviário;
- g-h – área de emissão do 3º trecho rodoviário;
- i-i₁-i₂-i₃ – área de emissão da frota veicular urbana;
- j-j₃ – área de emissão da fonte agrícola;
- l-l₁ – área de emissão da fonte agrícola;
- m-m₁-m₂-m₃ – área de emissão da fonte agrícola;

- $n-n_1-n_2-n_3$ – área de emissão da fonte agrícola;
- o – ponto receptor no centro de Paulínia;
- p – ponto receptor no centro de Cosmópolis;
- q – ponto receptor no bairro João Aranha em Paulínia;
- r – ponto receptor da Vila Lutécia em Paulínia;
- s-t-u-v – área de emissão da frota veicular suburbana.

O banco de dados meteorológico utilizado foi o da estação de monitoramento de Viracopos. No apêndice F são apresentados os dados disponíveis utilizados no processamento do modelo ISCST para um dia típico (12/06/97 - dia calculado como de maior concentração para a sede de Paulínia).

Nas figuras 21 e 22 é representado o registro da direção do vento em termos de frequência e porcentagem do tempo acumulado. A referência de 0° é vento na direção norte proveniente do sul, seguindo nos ângulos subsequentes no sentido horário. Observa-se que o vento predominante na região é o do quadrante Oeste-Norte, representando um acumulado acima de 50% do tempo. As maiores frequências observadas são:

- Noroeste: 44%
- Sul: 12%
- Norte: 10%

Na figura 23 é apresentado um registro de frequência de direção de ventos comparativo entre fontes de dados.

Com respeito às medições de concentração de NO_x registradas, foram obtidos através da CETESB os valores de NO_x em ppb e $\text{NO} - \text{NO}_2$ em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para os meses de junho-julho-agosto/1998 (71).

Infelizmente, não foram validados os dados coletados do ano de 1997. Neste sentido, foram utilizados estes dados de 1998 para comparar com os calculados em 1997. Isto implica em teoria que os dados calculados com base em 1997 devem apresentar

valores inferiores aos registrados em 1998, já que não incorporam o crescimento de consumo do ano.

Os resultados da Cetesb obtidos na ocasião através da estação móvel de monitoramento são referenciados para comparar com os calculados ao ponto do receptor (o) da figura 20.

A massa de dados foi obtida no período mais crítico durante o inverno, entre os dias 03/06/98 a 14/08/98, totalizando 73 dias, sendo que os registros completos são para apenas 35 dias.

Figura 20 – Localização das Fontes de Emissão – Caso Base Paulínia

Figura 21 – Registro de Frequência da Direção do Vento – Viracopos/1997

Figura 22 – Registro Acumulado da Direção do Vento – Viracopos/1997

Figura 23 – Registro de Frequência da Direção do Vento – Comparação de Fontes

7.3 Fontes e Emissões Consideradas

7.3.1 Fontes Fixas (Industriais)

A seqüência de cálculo para a estimativa da emissão estabelece inicialmente o levantamento de consumo de combustível por fonte, sendo aplicado em função do tipo de equipamento e da qualidade do combustível. Como resultado é obtido por fonte o valor da taxa de emissão de NO_x em (g/s).

Melhores precisões na estimativa são obtidas através de um levantamento individualizado por fonte. O cuidado necessário é na interpretação e manipulação dos dados. A simples utilização do consumo a partir de valores de placa dos equipamentos pode conduzir a sobre estimativas de taxas de emissões e de valores de concentração do NO_x .

A referência (69) apresenta, para a mesma região sob análise, valores de consumo e de concentração de NO_x bem superiores aos observados. O trabalho (69) se concentrou na emissão industrial, modelando 34 fontes em Paulínia. O consumo de combustível industrial considerado foi de 159,2 t/h, baseado provavelmente na capacidade instalada dos equipamentos. A concentração de NO_x média horária obtida, utilizando o modelo ISCST, foi de 1.032,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ contra o valor medido da Cetesb de 152 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sendo que o valor da Cetesb inclui todas as fontes de emissão.

Para a estimativa de consumo foi adotado o valor de consumo anual de combustível industrial, disponível para o município de Paulínia a partir de controle efetuado pela Agência Reguladora de Petróleo (ANP).

Na tabela IX estes valores são discriminados por tipo de combustível para Paulínia e região.

Tabela IX – Consumo de Combustíveis de Paulínia e Região (1997)

Tipo ⁽¹⁾	Paulínia	% Paulínia	RAC
Álcool hidratado (l/a)	6.695.814	2,19	318.377.192
Gasolina A (l/a)	3.979	12,44	31.979
Gasolina B (l/a)	406.100	3,32	12.238.830
Gasolina C (l/a)	12.702.960	2,33	545.335.404
Óleo Combustível 1A (kg/a)	54.733.890	27,68	197.767.632
Óleo Combustível 1B (kg/a)	6.095.698	31,19	19.543.841
Óleo Combustível 2A (kg/a)	24.360.862	11	221.488.412
Óleo Combustível 3A (kg/a)	7.341.877	8,99	81.656.387
Óleo Combustível 4A (kg/a)	146.020	0,32	46.141.750
Óleo Combustível 5A (kg/a)	54.300	100	54.300
Óleo Combustível 6A (kg/a)	6.445.500	100	6.445.500
Óleo Combustível 7A (kg/a)	42.097.870	68,14	61.781.740
Óleo Combustível 8A (kg/a)	42.757.200	100	42.754.200
Óleo Combustível 9A (kg/a)	41.064.200	100	41.064.200
Total Óleo Combustível (kg/a)	225.094.417	31,16	722.395.726
Óleo Diesel (l/a)	94.479.543	16,59	569.376.917
Querosene Aviação (l/a)	2.574.300	5,09	50.549.929
Querosene Iluminante (l/a)	437.950	8,57	5.108.720

⁽¹⁾ unidades: l/a – litros/ano; kg/a – kg/ano

Estes dados são provenientes do banco de dados do antigo DNC – Departamento Nacional de Combustíveis ligado ao MME, que obtinha as informações a partir de um controle fiscal junto às Distribuidoras de combustíveis.

O total anual de combustível industrial consumido por Paulínia foi de 225.094 t. Este valor foi uniformemente distribuído no ano. A rigor deve existir uma modulação diária e uma sazonalidade mensal.

O consumo total corresponde a uma taxa térmica de 298.787 kW.

Para as fontes pontuais, industriais, os fatores de emissão obtidos de bibliografia estão sintetizados na tabela VIII. Para as fontes em Paulínia, foi adotado o fator de emissão de $1100 \text{ g}/10^6 \text{ kcal}$. Este valor representa um valor intermediário médio típico obtido pelo IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas nos trabalhos (6, 31 e 33), em ensaios com caldeiras industriais com capacidade de produção de vapor de 50 e 60 t/h, utilizando óleos ultraviscosos nacionais (OC 7A, 8A e 9A). Tais combustíveis representam mais que 50% do óleo consumido em Paulínia.

Nessas condições, a taxa equivalente industrial de emissão de NO_x é de 78,51 g/s.

Uma análise do mapa apresentado na figura 20 indica concentração industrial na fronteira sul da Replan e uma segunda concentração mais ao sul próxima ao limite do município.

Foram, então, estabelecidas 2 chaminés equivalentes, sendo 60% no limite junto à Replan (fonte c) e 40% na concentração ao sul (fonte d).

Vale ressaltar que o consumo da Replan não está registrado no banco de dados da DNC, já que não há emissão de nota fiscal, pois trata-se de um consumo interno.

A Replan possui uma central de óleo combustível de 90 t/h, super-dimensionada. A estimativa para 1997 foi de um consumo de óleo para processo de cerca de 25 t/h. A este valor deve ser incorporado a queima de resíduo de tratamento catalítico, equivalente a cerca de 40 t/h de óleo. O consumo total atribuído à refinaria é de 65 t/h.

A taxa térmica equivalente é de 755.814 kW, correspondendo a uma taxa de emissão de NO_x de 198,61 g/s. Na figura 20 a representação desta emissão é dada pela fonte (b).

Para a UTE, a nova fonte, foi assumido o resultado do modelo de previsão de formação para tipo pré-mistura de emissão de 88 ppmvol. Isto corresponde a uma taxa de 32,82 g/s, vinculada a fonte (a) origem da referência, da figura 20.

A tabela X resume os valores adotados para cada fonte.

Tabela X – Dados das Fontes Industriais

Item	Unidade	Fontes			
		a	b	c	d
Taxa de NO _x	g/s	32,82	198,6	47,11	31,41
Altura Chaminé	m	38,1	40	35	30
Diâmetro Chaminé	m	4,72	6,66	3,25	3,24
Velocidade Gases	m/s	20	10	10	7
Temperatura Gases	K	370	423	423	443

7.3.2 Fontes Móveis Veiculares

Como já foi mencionado anteriormente, as fontes móveis foram subdivididas em 2 tipos – frota municipal e trânsito na rodovia Campinas – Paulínia – Cosmópolis.

A frota de veículos local do município foi obtida aplicando a proporção de 0,001873 sobre a frota total do interior do Estado, disponível com base na informação do Departamento Trânsito – DETRAN de 1997. Este fator corresponde a relação entre a população de Paulínia de 44.440 habitantes e a população total do interior do estado de 23.723.088 habitantes na época. Na tabela XI é apresentada a frota por tipo de veículo.

Tabela XI – Frota Municipal de Paulínia (1997 – estimada)

Tipo	Paulínia
Autos	7.520
Ônibus	119
Caminhões	609
Camionetas	1.019
Motos	1.294
Outros ⁽¹⁾	8
Total	10.569

⁽¹⁾ inclui máquinas agrícolas e ambulâncias

Para a síntese dos fatores de emissão correspondentes, de acordo com a metodologia da referência (30), resumida no item 5.2.3.2, e da informação global da frota de Paulínia foi assumido:

- 20% da frota de autos é a álcool
- mesmo perfil de idade da RMSP(92) para Paulínia
- mesmos fatores de emissão por tipo de veículo atualizados pela referência (70) – Relatório de Qualidade do Ar do Estado de São Paulo

A tabela XII a seguir resume o perfil da frota, o uso anual e emissão de NO_x por tipo de veículo.

Tabela XII – Emissão de NO_x da Frota de Veículos de Paulínia

Tipo de Veículo	Nº Unidades	Uso (km/ano)	Fator de emissão (gNO_x/km)	Emissão (tNO_x/ano)	Participação (%)
Gasolina ⁽¹⁾	6.831	11.858	0,2	16,20	4,1%
Álcool	1.504	14.002	0,2	4,21	1,1%
Diesel ⁽²⁾	940	80.000	5	376	94,7%
Motos	1.294	5.200	0,1	0,67	0,1
Total	10.569			397,08 (12,59 g/s)	100%

⁽¹⁾ Gasolina inclui 80% de camionetas

⁽²⁾ Diesel inclui ônibus; caminhões; camionetes (20%) e máquinas agrícolas

Para a frota de Paulínia o valor da grandeza Σ (nº de veículos*uso anual) é de 183.989.806 [nº de veículos*km/ano]. Dividindo o valor global de emissão (397,08 t/ano) por esta grandeza obtém-se o fator de emissão médio de 2,15 gNO_x/km.

Para estimar a taxa de emissão local foi assumida a fonte como distribuída uniformemente nas áreas urbana e rural do município.

Tais áreas assumidas estão representadas na figura 20. A área urbana, por hipótese, responde por 70% da emissão total, sendo distribuída em 4 km² (área i – i₁ – i₂ – i₃), corresponde à taxa de emissão de NO_x de $2,21 \times 10^{-6}$ g/s-m². A área rural responde pelos 30% restantes da emissão, sendo distribuída em 70 km² (s – t – u – v), correspondendo a taxa de emissão de NO_x de $5,4 \times 10^{-8}$ g/s-m².

No tocante ao trânsito rodoviário, foi assumido na ausência de outra informação, o valor de 19 veículos/minuto (9.986.400 veículos/ano) como o trânsito bidirecional da rodovia Campinas-Paulínia-Cosmópolis, que cruza Paulínia, sendo o principal acesso ao município. Esse valor foi obtido a partir de estatística disponível do DER de 1990 (73), indicando o valor de 13,6 veículo/minuto, sendo aplicado um fator de 5% ao ano para projetar o valor até 1997.

O trajeto desta estrada na região de estudo do município foi subdividido em 3 trechos retílineos, conforme mapa da figura 20:

e – f: 7,6 km

f – g: 2,8 km

g – h: 3,6 km

Para essa emissão foi assumida fonte tipo área, com comprimento do próprio trecho e largura de 350 m. Os fatores de emissão em estrada devido à condição operacional estabilizada são inferiores à condição urbana. Para veículos leves e motos foi assumido o mesmo índice urbano, 0,2 e 0,1 gNO_x/km, respectivamente. Entretanto, para veículos Diesel o fator foi reduzido pela metade, isto é 2,5 gNO_x/km. Os dados estatísticos da estrada indicam o seguinte perfil de uso por tipo de veículo:

- Leves: 15 veículos/min
- Diesel: 4 veículos/min

Aplicando os respectivos fatores de emissão para os trechos indicados obtém-se uma taxa de emissão total de 3,04 g/s.

A taxa equivalente para a área correspondente é de $6,1 \times 10^{-7}$ g/s-m²

7.3.3 Fonte Agrícola

Com base em análise efetuada em mapa de uso e ocupação de solo do município, apresentado na figura 24, foram identificadas 4 áreas representativas de plantio de cana, indicadas na figura 20.

- Área j-j₃: 16km²
- Área l – l₁: 16 km²
- Área m – m₁ – m₂ – m₃: 16 km²
- Área n – n₁ – n₂ – n₃: 4 km²

A área total considerada é de 52 km².

Figura 24 – Mapa de Uso e Ocupação de Solo do Município de Paulínia

Considerando o fator de emissão assumido de 3 kg de NO_x/t, similar à da queima de rejeitos urbanos, obtido da referência (43), e considerando os seguintes fatores agrícolas:

- 1 t de cana produz 260 kg de bagaço e 260 kg de pontas e folhas que é parte queimada no campo
- produtividade de 80 t de cana/ha
- colheita 8 meses por ano apenas durante o dia – 12h

Obtém-se uma taxa de emissão de 30,86 g/s ou distribuída diretamente na área correspondente de: $5,94 \times 10^{-7}$ g/s-m². A taxa é obtida através da seguinte expressão:

$$5.200ha * 80 \frac{t_{cana}}{ha} * 0,26 \frac{t_{pontas+folhas}}{t_{cana}} * 3 \frac{kgNO_x}{t_{pontas+folhas}} * \frac{1}{8} \frac{ano}{meses} * \frac{1}{730} \frac{mês}{h} * 2 \frac{diurno}{noturno} * \frac{1}{3.600} \frac{h}{s} * 1.000 \frac{g}{kg} \quad (36a)$$

7.4 Resultados de Dispersão Obtidos Pelo Modelo Screen

O modelo Screen simula apenas 1 fonte fixa e não necessita de banco de dados meteorológico, possuindo internamente dados meteorológicos e de classe de estabilidade. Os resultados de concentração são obtidos na direção radial da fonte, visto que não há especificação da direção do vento.

As fontes fixas discriminados no item 7.3.1 foram simuladas separadamente. Supondo teoricamente todas as fontes fixas num único ponto, o resultado é apresentado na figura 25. Para as outras fontes, veicular e agrícola, foi admitida uma dispersão uniforme pelo volume atmosférico compreendido pela área do município e a altura de mistura mínima rural (55,70 m).

Nestas condições a concentração média ao longo do município por fonte é:

- fonte móvel – veículos Paulínia: 5,81 µg/m³
- fonte móvel – veículos estrada: 1,40 µg/m³
- fonte cana: 7,13 µg/m³

Figura 25 – Resultado com Todas Fontes Fixas num Único Ponto – Modelo Screen.

O resultado global supondo todas as fontes fixas concentradas num mesmo ponto, incluindo as contribuições uniformes das demais fontes é apresentado na figura 26. A partir da posição indicada na figura 20 para as 4 fontes fixas (a-b-c-d) em relação ao ponto receptor em Paulínia (o) nas coordenadas (-3000; - 2500), foi avaliado individualmente por fonte a respectiva contribuição em função da distância. Na figura 27 é exemplificado o processo. Considerando que as 4 fontes não estão alinhadas com o receptor (o), dificilmente haverá uma condição atmosférica que implique estas 4 contribuições simultâneas. Para as fontes veiculares devido à influência direta junto ao receptor foi efetuada a dispersão ao longo apenas da área de emissão, sendo que no caso da frota da cidade a altura de mistura urbana correspondente é de 379,4 m.

Na tabela XIII são apresentados os valores referentes a presente análise. Na coluna distância, é informada a distância entre a fonte considerada até o ponto receptor “o” em Paulínia. Na coluna concentração, é informado o valor correspondente da contribuição de cada fonte. No apêndice G é apresentado o arquivo de entrada e saída do modelo Screen para a fonte fixa (b).

Tabela XIII – Estimativa de Concentração para Receptor em Paulínia

Fonte	Distância (m)	Área x Altura de Diluição km² x m	Concentração mg/m³
Fonte Industrial – b	6.960	-----	67,4
Fonte Industrial – c	4.560	----	54,15
Fonte Industrial – d	7.920	----	58,88
Veículos – Cidade	----	4 x 379,4	29,87
Veículos – Estrada	----	4,92 ⁽¹⁾ x 55,7	39,96
Cana	----	140 x 55,7	7,13 ⁽²⁾
Subtotal			257,39
Fonte UTE - a	5.760	----	16,52
Total com Fonte UTE			273,91

⁽¹⁾ área dos 3 trechos: 14.050 m x 350 m

⁽²⁾ assumida metade da emissão da área de cana 15,43 g/s retida na área do município.

Figura 26 – Resultados com Todas Fontes Fixas num Único Ponto Incluindo Demais Fontes Uniformemente Distribuídas – Modelo Screen

a, b, c, d, - fontes industriais

o - receptor centro Paulínia

Figura 27 – Avaliação das Fontes Fixas Para Receptor Paulínia

7.5 Resultados de Dispersão – Modelo ISCST

O modelo ISCST possibilita a entrada de todas as fontes de forma separada e simultânea, conforme especificadas no item 7.3. O banco de dados meteorológico foi o de Viracopos para o ano de 1997.

Em relação ao modelo Screen, o ISCST apresenta maior precisão dos resultados, contudo requer maior detalhamento na entrada.

No apêndice H é apresentado o arquivo de entrada completo incluindo todas as fontes.

A manipulação dos dados da CETESB, eliminando os dados inválidos e indisponíveis, permitiu a montagem de um banco consistente em termos de NO_x total na base volumétrica (ppb) e NO-NO_2 separados na base mássica ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Separando dados com registros completos diários foi possível verificar a variação ao longo do dia da concentração de NO_x . Na figura 28 é apresentado o comportamento diário. Verificam-se picos diários no período da manhã e noite, às 9 e 23 h, provavelmente associados ao maior uso veicular.

Figura 28 – Resultados de Concentração NO + NO₂ – CETESB

Na modelagem foram consideradas como região de estudo a área do município, a área de fontes, conforme especificado na figura 20, e área de influência uma área quadrada de 24.000 m x 24.000 m sendo o centro na nova fonte UTE (a).

A solução de concentração de NO_x foi obtida ao longo de uma grade cartesiana de (-12.000 m a 12.000 m) nas direções x-y a partir da origem – fonte (a), subdividida a cada 1.000 m.

Os resultados do modelo, para base horária e anual, para a série de simulações efetuadas, são sintetizados na tabela XIV.

Os dados representam o maior valor global obtido para o receptor (o) que corresponde aproximadamente à posição da estação de medição da CETESB.

O dia e hora da concentração máxima global prevista para Paulínia correspondem a uma 5ª feira– 12/06/97 – 163º dia do ano, às 22 h.

**Tabela XIV – Resultados de Concentração de NO_x para Paulínia
(receptor – (o): - 3000; - 2500)**

Fonte	Concentração (µg/m³)		Dia/Local máx.
	Paulínia	Máx. da fonte	
Fontes fixas (b-c-d)	0	74,89 ⁽¹⁾	1/2/97-18h
Veículos-Urbano	414,47	415,49	18/01/97-4h
Veículos-Rural	15,63	18,22	02/04/97-4h
Veículos-Estrada	9,58	24,81	01/01/97-1h
Cana	43,22	53,06	25/01/97-6h
Total Calculado sem Fonte Nova (a)	482,90	⁽³⁾	
CETESB – Resultados de Monitoramento	372,26 (07/07/98 - 3 ^a feira - 23h)	464,67 (26/06/98 – 6 ^a feira - 22h)	
Fonte Nova (a)	0,01	15,54 ⁽²⁾	19/07/-16h
Total Calculado com Fonte Nova	482,91	⁽³⁾	
Total Screen Calculado sem Fonte Nova	257,39	439,54	1000 m
Total Screen Calculado com Fonte Nova	273,91	479,89	1000m
Valor Anual Calculado sem Fonte Nova	62,30	62,55	(-2000; -2500)
Valor Anual Calculado com Fonte Nova	62,42	62,79	(-2000; -2500)

⁽¹⁾ valor máximo: 175,39 µg/m³ em 25/08/97 – 4h (-1500; 2000)

⁽²⁾ valor máximo: 31,42 µg/m³ em 25/08/97 – 14h (-1000; 500)

⁽³⁾ valor máximo: 620,79 µg/m³ em 31/05/97 – 6h (-2500; -1500)

Na figura 29 os dados são colocados ao longo do dia juntamente com os resultados reais do monitoramento.

Dois pontos merecem destaque. O primeiro é sobre a limitação do modelo ISCST que não considera a variação de carga (modulação e sazonalidade na emissão), mantendo constante o valor de emissão informado. Na prática o resultado medido é variável captando variações das cargas das fontes. Neste sentido, a comparação deve ser efetuada nos valores máximos. O segundo ponto é a curva de máximo (fator) CETESB de 26/06/98 que tem o resultado válido apenas na base volumétrica. Para a obtenção do correspondente valor na base mássica foi utilizado o fator de conversão observado para valores acima de $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$, que é de 1,35, implicando que o composto principal é o NO, portanto com fontes de emissão próximas.

A previsão obtida indica uma razoável concordância: $482,90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ calculado (previsto) versus $464,67 \mu\text{g}/\text{m}^3$ medido (real), potencializando a qualidade e o uso da metodologia proposta.

Por outro lado, este valor supera o padrão primário de concentração de NO_2 ($320 \mu\text{g}/\text{m}^3$), indicando alerta na aprovação de novos projetos. Além disso, o valor máximo das fontes industriais ($175,39 - \mu\text{g}/\text{m}^3$) está próximo do padrão secundário de NO_2 ($190 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Os valores obtidos confirmam a saturação da qualidade do ar para a região de Paulínia, requerendo uma análise de suportabilidade ambiental para inclusão de novas fontes.

Figura 29 – Concentração Média Horária de NO_x – Resultados Medidos e Previstos

7.6 Integração dos Modelos de Formação e Dispersão de NO_x

Com a síntese e a disponibilidade dos resultados dos modelos de formação e dispersão de NO_x , procurou-se integrar e verificar a influência das variáveis de formação na dispersão atmosférica.

No modelo de formação de NO_x foi constatada a influência direta da emissão do NO_x com a carga da turbina e com a temperatura ambiente. A altitude tem efeito insignificante na formação do NO_x .

Na figura 30 é apresentada para temperatura do ar e altitude fixas a emissão, no modo pré-mistura, e a concentração do NO_x em função da carga da turbina.

Na figura 31 é apresentada para plena carga a variação da emissão, no modo pré-mistura, e a concentração do NO_x em função da temperatura do ar.

Pode ser observado a partir das figuras um comportamento similar entre a taxa de emissão e a concentração de NO_x . Para a temperatura do ar variando de 15 a 35 °C a concentração de NO_x praticamente dobra.

É constatado que a metodologia integrando os 2 modelos, de formação e dispersão, amplia o cenário de entendimento e análise. Com esta ferramenta é possível conduzir a operação da UTE em função das condições meteorológicas para atender de forma dinâmica a condição de concentração de NO_x . Isto significa que em dias mais frios e condições de dispersão adequadas, a emissão e concentração de NO_x tende a ser mais baixa, possibilitando a utilização mais intensiva da UTE. Este pode vir a ser mais um indicador de despacho, como a vazão de água é para as UHE's.

Figura 30 - Taxa de Emissão e Concentração de NO_x com a Carga da Turbina

Figura 31 - Taxa de Emissão e Concentração de NO_x com a Temperatura do Ar

8. CONCLUSÃO

O modelo de formação de NO_x , desenvolvido na plataforma EES utilizando dados disponíveis baseados em curvas de desempenho e eficiência do fabricante de turbina a gás, apresenta resultados termodinâmicos do ciclo consistentes e coincidentes com os resultados operacionais.

As grandezas termodinâmicas calculadas são os dados de entrada no cálculo da taxa de emissão de NO_x . No tocante à representação propriamente dita da formação de NO_x , o equacionamento inclui entendimento físico do fenômeno, sendo baseado no modelo de Zeldovich utilizando energia global de ativação. A principal variável de controle é a temperatura de chama. A aplicação deste modelo depende da aferição de um parâmetro (A_1) que é função do tipo de equipamento, das características e controle da combustão. A disponibilidade de resultados experimentais da turbina V84.2 da Siemens possibilitou a aplicação preditiva deste modelo. Como o modelo foi baseado no princípio do PEMS, os cálculos preditivos podem ser utilizados para fins de controle operacional da unidade além do enfoque de planejamento dado neste trabalho.

O modelo de dispersão para cálculo da concentração de NO_x na atmosfera foi baseado na plataforma de modelos existentes e consolidados da USEPA. O modelo ISCST utilizado é aceito pelos órgãos ambientais, apresentando resultados confiáveis e representativos. Os documentos de licenciamento EIA/RIMA, por exemplo, utilizam as saídas dos modelos ISCST para avaliar e discutir o impacto da UTE. O modelo ISCST é suficientemente robusto, permitindo especificação de vários tipos de fontes de emissão com multiplicidade de unidades e pontos de recepção.

A proposta de utilização de informação baseada em bancos de dados disponíveis na base municipal, coincidente com a região de estudo para o estabelecimento da carga de poluentes através de fatores de emissão, foi testada e aferida nos modelos de dispersão SCREEN e ISCST, para o caso de Paulínia. A previsão obtida foi bastante próxima dos resultados de monitoramento disponíveis.

A integração dos modelos de formação e dispersão de NO_x possibilita estabelecer uma conexão entre as condições operacionais da UTE, as condições meteorológicas, a emissão de NO_x prevista e a concentração do NO_x no ar. Este encadeamento pode permitir uma operação real da UTE com base em questões ambientais. A UTE poderia ter um registro ambiental para operação até um determinado valor de potência, podendo ser denominada potência assegurada em termos ambientais. Valores de potência maiores poderiam ser permitidos em função das condições ambientais. Este conceito é similar ao do setor elétrico para UHE's. Cada UHE tem um dado de placa denominada energia assegurada, porém em função das condições hidrológicas há flutuação da geração em relação a esse valor, para cima ou para baixo. Ampliando um pouco este conceito, poderia ser estabelecido entre UTE's, em locais diferentes, operação em “pool”, criando um seguro (“*hedge*”), no qual uma usina pode cobrir a outra em função de restrições ambientais.

A metodologia proposta cria mecanismos para um diagnóstico ambiental, projetando condições para o estabelecimento de um planejamento ambiental. O método pode se tornar um instrumento de planejamento energético-ambiental, disponibilizando ao órgão licenciador e de controle condições iniciais de análise e oferecendo ao empreendedor da UTE informações dos potenciais locais na busca de uma solução de compromisso para implantação da UTE. O processo permite uma exploração do local da nova UTE (ponto “a” da figura 20), considerando restrições e limitações ambientais.

Os resultados obtidos evidenciam a conveniência e amplitude desta metodologia. Utilizando ferramentas disponíveis, agregando-as adequadamente, fornecem importantes e rápidas informações sobre o diagnóstico e a capacidade de suporte de uma região.

O estado de São Paulo possui cerca de 636 municípios. A rede de amostragem automática da CETESB é composta por 29 estações fixas e 2 móveis. As estações fixas estão distribuídas em 23 na Região Metropolitana de São Paulo, 1 em Paulínia, 1 em Sorocaba, 2 em Cubatão, 1 em Campinas e 1 em São José dos Campos. Portanto, um instrumento representativo de diagnóstico e planejamento ambiental tem potencial enorme de aplicação em regiões onde não há monitoramento. Mesmo

em regiões com controle estabelecido, metodologia de análise devidamente aferida e validada pode ser um importante instrumento complementar à medição para avaliação de cenários de desenvolvimento futuro.

A análise focada no NO_x foi sustentada devido à importância deste poluente na poluição do uso de gás natural em UTE's modernas de ciclo combinado, aliado à potencial formação fotoquímica de ozônio na atmosfera. Entretanto, esta metodologia pode ser ampliada para análise de outros poluentes. Existe experiência sobre o uso de PEMS para hidrocarbonetos não queimados (H_nC_m), CO e material particulado (MP). Portanto, a mesma metodologia e tratamento aplicado ao NO_x pode ser dado a estes poluentes.

Outro aspecto visando aperfeiçoamento e melhoria na precisão é a busca da aferição das informações proveniente dos bancos de dados junto à região de estudo, conforme exposto no item 3.8.

ANEXO A – MODELO DE DISPERSÃO DE PLUMA

A.1 Introdução

Este Anexo apresenta uma descrição do método Guassiano de dispersão de pluma, para cálculo de concentração de poluentes, incluindo as etapas de construção do modelo. Alguns tópicos de relevante importância para o entendimento de alguns fenômenos, a saber, estrutura de jato com empuxo, estabilidade atmosférica, e estimativa de concentrações via nomogramas, serão abordados.

A.2 Histórico

O estudo sistemático de misturas verticais em camadas baixas de atmosfera foi efetivamente iniciado por G. I. Taylor em 1915, que examinou o fluxo de calor em correntes sobre o oceano. Taylor (1927) apud Pasquill (48) também foi responsável pelas primeiras medidas de velocidade turbulenta, seguido de Scarse (1930) e Best (1935) apud Pasquill (48) que estabeleceram a sua dependência na estratificação de um amplo espectro de frequências.

A.3 Objetivo

A modelagem de poluição atmosférica de fontes individuais estacionárias atende dois objetivos. O primeiro e mais usual é o cálculo de concentração de poluentes $C(x, y, z)$ da fonte de poluição para um dado ponto (x, y, z) a jusante, na direção do vento. O segundo, utilizando basicamente a mesma metodologia, é o cálculo de altura de chaminé, para atender padrões da legislação.

Na figura 32, é apresentado um esquema, onde é identificada a zona de influência de uma fonte de emissão por estimativa de concentração.

Os valores de concentração de poluentes estimados no modelo são comparados com os padrões de qualidade do ar da região, que estabelecem os limites legais para níveis de poluentes no meio ambiente, em função de um determinado tempo de medição. Estes padrões são classificados em dois tipos, a saber: primários, destinados à proteção da saúde pública, e secundários, destinados ao bem-estar público.

É importante não confundir padrão de qualidade do ar, cuja unidade de dimensão é normalmente dada em $[\mu\text{g}/\text{m}^3]$, com padrão de emissão, geralmente referenciado em $[\text{g}/10^6 \text{ kcal}]$, que determina a máxima quantidade permissível de poluentes que pode ser emitida por uma determinada fonte.

Figura 32 – Esquema e Terminologia de Controle de Poluição do Ar Utilizada como Base para Modelagem (49)

O modelo de cálculo dos campos de concentração pode ser montado segundo duas abordagens. A primeira é a resolução de um sistema de equações diferenciais fundamentais (conservação de massa, quantidade de movimento, energia e espécies),

em que potencialmente é obtida a solução pontual no espaço. A segunda é baseada na observação experimental, na qual a difusão em camadas livres turbulentas apresenta um perfil aproximado pela distribuição normal ou Gaussiana. Para cálculos de engenharia, pela menor complexidade e razoável precisão, é utilizado o modelo Gaussiano, o qual será a seguir detalhado.

A.4 Modelo de Pluma

A.4.1 Descrição

Na figura 33 é representada a emissão de uma pluma proveniente de uma chaminé. O sistema de coordenadas tem sua origem no centro da chaminé em sua base. Os eixos x , y , z são orientados na direção do vento, na direção transversal e direção vertical a partir do solo, respectivamente. A chaminé tem uma altura h , sendo que o jato de gases é elevado em função da sua quantidade de movimento inicial e empuxo de uma quantidade Δh , implicando uma altura efetiva de chaminé H , definida como $h + \Delta h$.

Após alcançar a altura máxima, a pluma segue a trajetória na direção do vento, sendo que durante o percurso o ar ambiente é arrastado para o seu interior pela ação de vórtices turbulentos irregulares. Desta forma, ao longo do percurso há um espalhamento e diluição de pluma, conhecido como dispersão ou difusão. Pode ser facilmente verificada a dependência da concentração de poluentes (C) com as coordenadas transversais y e z , ou seja, nas condições de contorno tomadas na lateral da pluma a concentração tende a zero e no centro em x adquire seu valor máximo.

A.4.2 Distribuição Normal Gaussiana

A distribuição normal de uma única variável z é apresentada na figura 34. A distribuição depende de dois parâmetros, isto é, a média (μ), que indica a posição

central e o desvio padrão (σ), que especifica a largura da distribuição. A equação que representa a distribuição normal é dada por:

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}s} \exp \{-0,5[(z - m)/s]^2\} \quad (37)$$

É observado que a área sob a curva depende da largura em z considerada, sendo que ao longo de todo intervalo a área é igual a 1,0, ou seja:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(z)dz = 1,0 \quad (38)$$

No caso de modelos de dispersão é usualmente utilizada a largura (z^*) que corresponde a uma queda de 10% do valor central de pico. Neste caso: $2z^* = 4,30 s$.

Estendendo o conceito para distribuição Gaussiana com duas variáveis independentes (y, z), a função $f(y, z)$ é dada por:

$$f(y, z) = \frac{1}{2\pi s_y s_z} \exp \{-0,5[(y - m_y)/s_y]^2\} \exp \{-0,5[(z - m_z)/s_z]^2\} \quad (39)$$

Figura 33 – Sistema de Coordenadas Indicando Distribuição Gaussiana na Direção Horizontal e Vertical (49)

Figura 34 – Curva Normal Gaussiana (49)

A.4.3 Equação de Dispersão para Fontes Elevadas

Considerando a pluma conforme representada na figura 33, o estabelecimento do modelo de dispersão Gaussiano envolve a adoção de algumas hipóteses:

- a) os perfis de concentração na pluma são Gaussianos, em ambas as direções y e z ;
- b) a velocidade do vento u é constante com direção invariável;
- c) a taxa de emissão de poluentes (Q_e) é contínua e permanente;
- d) a difusão na direção x é desprezada em relação ao transporte convectivo do poluente através da velocidade do vento;
- e) o poluente é um gás estável quimicamente, não sofrendo reação no trajeto;
- f) o poluente quando atinge o solo é refletido, não sendo absorvido ou adsorvido.

A equação de dispersão Gaussiana para fontes elevadas é obtida assumindo que o perfil de concentração de poluente na direção x tem a forma da equação 39. Assim,

$$C(x, y, z) = \left[\frac{kk}{2ps_y s_z} \right] \exp \left[-0,5(y/s_y)^2 \right] \exp \left\{ -0,5[(z-H)/s_z]^2 \right\} \quad (40)$$

sendo kk uma constante de proporcionalidade. Na equação foram substituídos os valores $y = 0$ e $z = H$, visto que a distribuição é centralizada no eixo da pluma, com $y = 0$ e $z = H$.

A constante kk é determinada através do balanço de massa de poluentes ao longo da pluma. Com auxílio da figura 35, pode ser observado que a taxa de emissão de poluentes (Q_e) da chaminé é igual à taxa que atravessa uma seção da pluma. Em termos matemáticos:

$$Q_e = \int_A uC(x, y, z)dA = ukk \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\frac{1}{2ps_y s_z} \right] \exp \left[-0,5(y/s_y)^2 \right] \exp \left\{ -0,5[(z-H)/s_z]^2 \right\} dz dy \quad (41)$$

$$\text{Mas } Q_e = ukk \rightarrow kk = Q_e/u \quad (42)$$

Figura 35– Balanço de Massa Sobre a Seção da Pluma (49)

Substituindo na equação 40 obtém-se:

$$C(x, y, z) = \left[\frac{Q_e}{2\mu s_y s_z} \right] \exp \left[-0,5(y/s_y)^2 \right] \exp \left\{ -0,5[(z-H)/s_z]^2 \right\} \quad (43)$$

Esta equação é válida para pluma até a intersecção com o solo. De acordo com a hipótese de reflexão pura assumida, o efeito é um aumento da concentração de poluente na região de reflexão. Este aumento pode ser representado como se houvesse uma geração fictícia de pluma proveniente numa fonte imagem, colocada na posição da chaminé a uma altura H abaixo do solo. Na figura 36 é exemplificado o mecanismo. A equação da pluma imagem é obtida substituindo $-H$ por H na equação 43. Desta forma, o resultado final de concentração é dado por:

$$C(x, y, z) = \left[\frac{Q_e}{2\mu s_y s_z} \right] \exp \left[-0,5\left(\frac{y}{s_y}\right)^2 \right] \left\{ \exp \left[-0,5[(z-H)/s_z]^2 \right] + \exp \left[-0,5[(z+H)/s_z]^2 \right] \right\} \quad (44)$$

O cálculo de concentração de poluente é efetuado em geral no nível do solo ($z = 0$) e no valor de máximo, que ocorre na linha central abaixo da pluma ($y = 0$). Neste caso, a equação é simplificada para:

$$C(x, 0, 0) = \frac{Q_e}{\mu s_z s_z} \exp \left[-0,5(H/s_z)^2 \right] \quad (45)$$

Figura 36 – Imagem da Fonte para Pluma Refletida (49)

A.4.4 Coeficientes de Dispersão (vide Apêndice B)

Os valores de desvio padrão (σ_y , σ_z) ou coeficientes de dispersão são baseados em dados experimentais, sendo dependentes do grau de estabilidade da atmosfera, da distância x e do tipo de terreno.

Existem duas formulações para o cálculo destes coeficientes. O primeiro conjunto, denominado coeficiente de Pasquill para área rural, é baseado em levantamentos experimentais em 1950 numa planície no Nebraska. O segundo conjunto, coeficientes de Briggs para área urbana, foi obtido em 1960 na área metropolitana de Saint Louis.

Os coeficientes de dispersão foram parametrizados para seis classes de estabilidade (A a F), representadas na figura B.6 do Apêndice B e explicadas a seguir:

- a) A e B - classes altamente instáveis, ocorrendo em condições de vento fraco e aquecimento solar de moderado para o alto (tarde ensolarada de verão).
- b) C - classe levemente instável, ocorrendo com velocidade de vento de moderada para alta ou com binômio vento e aquecimento leve (pôr do sol de verão).
- c) D - classe neutra ocorrendo com tempo encoberto, na qual o aquecimento solar tem pouca influência.
- d) E e F - classes estáveis, ocorrendo a noite com ventos leves e céu parcialmente encoberto, nas quais o resfriamento devido à radiação inibem a convecção natural de camadas da atmosfera.

Os dois conjuntos de coeficientes de dispersão são apresentados graficamente nas figuras 37 e 38. Os coeficientes correspondem a uma amostragem de 10 minutos, portanto, a respectiva aplicação na equação 45 indica concentrações médias de poluente num período de 10 minutos. Cálculo para períodos maiores é corrigido através de fatores de correção empíricos, aplicados sobre os valores de σ_y , σ_z ou diretamente na concentração.

Figura 37 – Coeficiente de Dispersão Horizontal como Função da Distância na Direção do Vento Após a Fonte (49)

Figura 38 – Coeficiente de Dispersão Vertical como Função da Distância na Direção do Vento Após a Fonte (49)

A.4.5 Cálculo da Altura de Elevação de Pluma (Δh)

A utilização da equação (45) pressupõe o conhecimento de H , que requer o cálculo de elevação da pluma Δh .

O método de Briggs para pluma com empuxo é tradicionalmente utilizado para estimar Δh . O método estabelece que a elevação da pluma é uma função da distância x na região ascendente da pluma e da respectiva elevação final ou total, denominada Δh_f .

A seqüência de cálculo do método é descrita abaixo:

(1) condições instáveis ou neutras

(1.1) Calcular:

$$F_1 = \frac{g}{4} U D^2 \frac{T_o - T_a}{T_a} \quad (46)$$

(1.2) Calcular a distância x_f , onde a pluma atinge o seu valor de elevação máxima.

$$x_f = 49 F_1^{5/8} \quad \text{para } F_1 < 55 \quad (47)$$

$$x_f = 119 F_1^{2/5} \quad \text{para } F_1 \geq 55 \quad (48)$$

(1.3) então:

$$\Delta h = 1,6 F_1^{1/3} x^{2/3} / u_v \quad \text{para } x < x_f \quad (49)$$

$$\Delta h = \Delta h_f = 1,6 F_1^{1/3} x_f^{2/3} / u_v \quad \text{para } x \geq x_f \quad (50)$$

(2) condições estáveis

(2.1) calcular F_1 conforme equação (46)

(2.2) calcular o parâmetro de estratificação S .

$$S = 0,02 \text{ g/T para estabilidade classe E} \quad (51)$$

$$S = 0,035 \text{ g/T para estabilidade classe F} \quad (52)$$

$$(2.3) \text{ calcular: } x_f = 3,14 u_v / S^{1/2} \quad (53)$$

$$(2.4) \text{ calcular: } \Delta h = 1,6 F_1^{1/3} x^{2/3} u_v \quad \text{para } x < x_f \quad (54)$$

(2.5) calcular a elevação final

$$\Delta h_{f1} = 2,4 F_1^{1/3} / (u_v S) \quad (55)$$

$$\Delta h_{f2} = 5 F_1^{1/4} / S^{3/8} \quad (56)$$

Δh_f é o menor destes valores.

A.4.6 Influência de Parâmetros e Limitações

Com o intuito de fornecer uma análise de sensibilidade e crítica do modelo são apresentadas a seguir algumas influências e limitações na aplicação do modelo.

A velocidade do vento (u_v) apresenta dois efeitos opostos. O aumento de u_v provoca aumento da dispersão e diminuição da concentração. Em contrapartida, a elevação de u_v reduz a altura de elevação da pluma tendendo a aumentar a concentração no solo.

O aumento da altura da chaminé (h) desloca para mais longe o ponto de concentração máxima. Como o contato com o ar é maior para chaminés com altura crescente, para mesma distância as concentrações são decrescentes.

Os perfis de dispersão são achatados com a distância, tornando-se mais planos e longos, portanto, os coeficientes de dispersão (σ_y e σ_z) aumentam com a distância.

O processo de reflexão pura dos gases é uma abstração, já que fenômenos de deposição seca, absorção de gases por superfícies de edifícios e vegetação (“wash out”) e diluição dos gases nas gotas de água nas nuvens ou chuvas (“rain out”) estão presentes.

Uma outra simplificação imposta é a estabilidade química dos componentes. É sabido que a presença de dois ou mais componentes induzem a formação de outros componentes, por exemplo, NO_x e hidrocarbonetos não queimados (H_nC_m) na presença de luz provocam o surgimento de ozônio e PAN (peroxiacetil nitrato). Além disso, a oxidação é uma reação comum no meio atmosférico.

Por outro lado, é importante mencionar que um modelo de cálculo de dispersão pode ser considerado intrinsecamente válido e surgir como uma poderosa ferramenta de avaliação, se puder oferecer uma boa representação dos fenômenos de turbulência (jato e atmosfera) e dispersão, além de dispor de dados meteorológicos confiáveis e precisos.

A.5 Exemplos de Cálculo

No Apêndice C é apresentado um exemplo de aplicação de cálculo de concentração utilizando a metodologia apresentada no item anterior.

Um programa de cálculo computacional de concentração permite a integração de valores para períodos longos de até 1 ano, para múltiplas emissões e recepções. Os programas usualmente utilizados são o ISCST – “Industrial Source Complex Short Term” recomendado pela USEPA e TVA/ASME, desenvolvido para as usinas termoeletricas do Vale do Tennessee. A alimentação típica de um programa é subdividida em:

1. entradas da fonte: localização, elevação, taxa de emissão, altura de chaminé, diâmetro interno da chaminé, temperatura dos gases;
2. entradas do receptor: coordenadas, elevação, altura;
3. entradas meteorológicas (dados horários): direção e velocidade do vento, temperatura ambiente, categorias de estabilidade, altura de mistura, expoente do perfil de vento, gradiente de temperatura;

A saída do programa fornece:

1. tabelas de valores de concentração em rede até 106^2 pontos;
2. valores de concentração em até 10 receptores discretos pré – selecionados;
3. os 50 valores de maior concentração em função das coordenadas, hora, dia.

Muitos programas de computador têm sido desenvolvidos, incorporando extensões e refinamentos do modelo básico Gaussiano. Entre os aperfeiçoamentos e evoluções alcançados destacam-se: fontes múltiplas de emissão, terrenos complexos, efeito indutivo do empuxo, reflexão em camada de inversão elevada, plumas com empuxo negativo.

9. BIBLIOGRAFIA

- 1) NEGRI, J. C. Avaliação da Capacidade de Suporte para Implantação de Usinas Termoelétricas. In: XVI SNPTEE – SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, Campinas, 2001.
- 2) PIRES, S.H.M. et al. Avaliação Ambiental no Planejamento da Expansão de Sistemas de Energia Elétrica. In: XV SNPTEE – SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, Foz de Iguaçu, 1999.
- 3) PIRES, S.H.M. et al. Incorporação da Dimensão Ambiental no Planejamento da Expansão de Sistemas de Energia Elétrica. In: VII SEPOPE – SEMINÁRIO DE PLANEJAMENTO DE OPERAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO, [s.L.], 2000.
- 4) ALVIM, C. F. et al. Estudo de Demanda de Energia. Arquivo eletrônico. Estudo contratado pelo MCT – Ministério de Ciência e Tecnologia, 2000.
- 5) NEGRI, J. C.; VIEIRA, S. As Emissões de Poluentes nas Usinas Termoelétricas a Gás Natural - Um Estudo de Caso. In: XV SNPTEE – SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, Foz de Iguaçu, 1999.
- 6) SOUZA, F. D. A. et al. Curso de Combustão – Formação de Poluentes em Processos Industriais. IPT, São Paulo, 1993.
- 7) STREHLOW, A. R. Combustion Fundamentals. 1.ed. New York: McGraw Hill, 1985.
- 8) CHOMIAK, J. Combustion – A Study in Theory, Fact and Application. New York: Abacus Press, 1989.
- 9) KHALIL, E. E. Modeling of Furnaces and Combustion. Tunbridge Wells: Abacus Press, [s.L.], 1982.

- 10) GABRIELSON, E. J. et al. Results of NO_x Retrofit of Kentucky Utilities Ghent 1 Tangentially Fired Unit. In: 1995 JOINT POWER GENERATION CONFERENCE, Volume 1, ASME, Minneapolis, 1995, p61- 68.
- 11) CONN, S. K. et al. Influence of Coal Properties on NO_x Emissions. In: 1995 JOINT POWER GENERATION CONFERENCE, Volume 1, ASME, Minneapolis, 1995, p293- 303.
- 12) CHIGIER, N. A. Pollution Formation and Destruction in Flames - Introduction. Progress Energy and Combustion Science, Vol. 1, 1975, p 3- 15.
- 13) BOWMAN, C. T. Kinetics of Pollutant Formation and Destruction in Combustion. Progress Energy and Combustion Science, Vol. 1, 1975, p 33- 45.
- 14) CARETO, L. S. Mathematical Modeling of Pollutant Formation. Progress Energy and Combustion Science, Vol. 1, 1976, p 47- 71.
- 15) BREEN, B.P.; SOTTER, J. G. Reducing Inefficiency and Emissions of Large Steam Generators in USA. Progress Energy and Combustion Science, Vol 4, 1978, p 201- 220.
- 16) HAYHURST, A.N. et al. Nitric Oxide Formation from N₂ in flames: The Importance of Prompt NO. Progress Energy and Combustion Science, Vol 6, p.35- 51, 1980.
- 17) MILLER, J.A.; BOWMAN, C. T. Mechanism and Modeling of Nitrogen Chemistry in Combustion. Progress Energy and Combustion Science, Vol. 15, 1989, p287- 338.
- 18) USEPA. Summary of NO_x Control Technologies and their Availability and Extent of Application. EPA-450/3-92-004. Research Triangle Park, 1992.
- 19) HITACHI. Apresentação de Turbinas a Gás - Modelos H15 e H25. São Paulo, 2001.

- 20) HURA, H.S.; BREEN, B. P. Chemical Kinetic Simulation of Nitric Oxide Reduction During Natural Gas Reburning in Pulverized Coal Fired Boilers. In: THE 1993 INTERNATIONAL JOINT POWER GENERATION CONFERENCE - Combustion Modeling, Cofiring and NO_x Control, Fact – Vol 17. ASME, Kansas City, 1993, p 51-69.
- 21) LI, B.W. et al. Use of Computer Models for Reburning Cofiring Boiler Performance Evaluations. In: THE 1993 INTERNATIONAL JOINT POWER GENERATION CONFERENCE - Combustion Modeling, Cofiring and NO_x Control, Fact – Vol 17. ASME, Kansas City, 1993, p 87-94.
- 22) POURKASHANIAN, M.P.; MISSAGHI, M.; YAP, T. L. Reduction of NO_x Emissions Using CFD as a Design Tool. In: THE 1993 INTERNATIONAL JOINT POWER GENERATION CONFERENCE - Combustion Modeling, Cofiring and NO_x Control, Fact – Vol17. ASME, Kansas City, 1993, p. 95-109.
- 23) VOLLENWEIDER, I. Emission Control Guideline for Sulzer Diesel Engines. Sulzer Diesel Ltd, Winterthur, 1989.
- 24) MAKANSI, J. Reducing NO_x Emissions. A Special Report, Power, September 1988.
- 25) GOVERNMENT BUDGET. The Nitrogen Oxide Charge on Energy Production in Sweden. Disponível em: <<http://iisd.ca/greenbud/nitro.htm>>. Acesso em: 30 de set. 1999.
- 26) WORLD BANK. Maximun Air Emissions and Effluent Discharge Requirements Contained in the Guidelines. <<http://www.wbln0018.worldbank.org/essd/P...>>. Acesso em 23 de out. 1999.
- 27) CETESB - O OZÔNIO COMO POLUENTE ATMOSFÉRICO - A Questão do Ozônio. CETESB, São Paulo, 2001.
- 28) DAVIS, L.B. Dry Low NO_x Combustion Systems for Heavy Duty Gas Turbines. GE Power Systems, GER-3568F, Schenectady, 1999.

- 29) HOFFMAN, S. Combustion System Overview. In: POWERFUL SOLUTIONS FOR POWERFUL RESULTS - 2001 PRODUCT APPLICATION WORKSHOP. Siemens-Westinghouse, Florida, 2001.
- 30) BRANCO, G. M. et al. Inventário de Emissão Veicular-1992 - Metodologia de Cálculo. São Paulo: CETESB, Jun. 1994.
- 31) NIGRO, F. M. B.; CAMARGO, C. A.; VERGNHANINI, R. F. Estudos das Emissões de Poluentes Atmosféricos da UTE de Mogi Guaçu. IPT-CESP, Relatório n. 31.608/93, São Paulo, Set. 1993.
- 32) CBC –INDÚSTRIA PESADAS S.A. Combustão de Óleos Ultra Viscosos em Caldeiras. Japão, 1993.
- 33) NIGRO, F. M. B.; CAMARGO, C. A.; VERGNHANINI, R. F. Levantamento Experimental da Taxa de Emissão de Óxidos de Nitrogênio (NO_x) na Queima de Óleo Combustível Ultraviscoso. IPT-CESP. Relatório n. 28.973, São Paulo, Jan. 1990.
- 34) HEIN, K.R.; JAGER, G. Results of Combustion Modification for Reduction of NO_x – Emission. THE 1990 INTERNATIONAL JOINT POWER GENERATION CONFERENCE. Combustion Modeling and Bruner Replacement Strategies, Fact Vol 10. ASME, Boston, 1990.
- 35) KJÄLDMAN, L. Numerical Simulation of Combustion and Nitrogen Pollutants in Furnace. VTT - Publication 159, ESPOO, 1993.
- 36) COSTA, M.; COSTEN, P.; LOCKWOOD, F. C. Detailed Measurements in a Heavy Fuel Oil - Fired Large Scale Furnace. Combustion Science and Technology, Vol 77, 1991, p 1-26.
- 37) CLAPSADDLE, C.A.; ROMBERG, P. M.; QUENTIN, G. H. The First-Principle-Based: EPRI Turbine PEMS.
- 38) GINGHER, R.G.; EBERHARDT, W. H. Predictive Emissions Monitoring of Gas Turbine Power Plants. EPRI CEMS User Group, Denver, 1997.

- 39) FURSTENWERTH, I.D. et al. NO_x Predictive Emissions Monitoring System for Natural Gas-Fired Units Demonstration Test Program Results.
- 40) JOHNSON, M.L. Neural Network Technology as a Pollution Prevention Tool in the Electric Utility Industry. The Lower Colorado River Authority, Austin.
- 41) ITO, F. et al. A Combustion Monitoring and Evaluation System for Large Utility Boilers. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS - 103, n 5, May 1984.
- 42) USEPA. 40 CFRI Ch.I Edição 1-7-99, Appendix W to part 51 - Guideline on Air Quality Models.
- 43) USEPA. Doc AP 42 - Fatores de Emissão. <[http:// www. epa. gov/ ttnchie1/ ap42/ch02/final/c02S05.pdf](http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch02/final/c02S05.pdf)>. Acesso em: 1º de Fev. 2002.
- 44) JAAKO PÖYRY. Estudo e Relatório de Impacto Ambiental – TPP – Termoelétrica do Planalto Paulista. 13-011-Ejpe-1800, São Paulo, 1999.
- 45) CHEN, C.J.; RODI, W. Vertical Turbulent Buoyant Jets – Review of Experimental Data. London: Pergamon Press, 1980.
- 46) TENNEKES, H.; LUMLEY, J.L. A First Course of Turbulence. Massachusetts: The MIT Press, 1972.
- 47) SPALDING, B. Turbulence Models – A Lecture Course – CFD/82/4. Imperial College, London, 1982.
- 48) PASQUILL, F.; Smith, F.B. Atmospheric Diffusion. 3.ed. London: John Wiley & Sons, 1983.
- 49) FINCH, R. N.; SERTH, R. W. Model Air Emissions Better. Hydrocarbon Processing, January 1990, p 75-80.
- 50) VIEIRA, R. C. C. Atlas de Mecânica dos Fluidos – Estática. São Paulo: Edgard Blucher, 1971.

- 51) ENERCONSULT. Usina Termoelétrica de Paulínia – Estudo de Viabilidade Técnico – Econômica. ENERCONSULT-CESP, São Paulo, 1989.
- 52) ELC-ELETROCONSULT. Sistema de Usinas Termoelétricas a Lixo para a Cidade de São Paulo. ELC-CESP, São Paulo, 1981.
- 53) TERRA. Usina Termoelétrica de Paulínia – Estudo de Impacto Ambiental. TERRA-CESP, São Paulo, 1989.
- 54) MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – SECRETARIA DE ENERGIA. RESEB – Projeto de Reestruturação do Setor Elétrico Brasileiro. Relatórios. 1 CD-Rom, Brasília, 2000.
- 55) USEPA. Modelos – SCREEN3, ISCST3, CALMET, CALINE4, RPM IV. <<http://www.epa.gov>>. Acesso em: Jan. 2002.
- 56) F-CHART Software. EES – Engineering Equation Solver – Commercial and Professional Versions. <<http://www.fchart.com>>. Acesso em Jan. 2002.
- 57) TECWARE. Manuais Técnicos IPSEpro. São Paulo, 2001.
- 58) USEPA. SCREEN3 – Model User's Guide. EPA-454/B-95-004. Research Triangle Park, 1995.
- 59) USEPA. User's Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models – Vol I – User Instructions. Research Triangle Park, 1995.
- 60) GLINSKY, W. Power Plant Calculation – SICUS 1.25 – WesPEP 4.0. Siemens Power Generation. 1 CD-Rom, Erlangen, 1998.
- 61) GRECO, C. CG Comb 2.0 – Programa de Cálculo de Combustão. São Paulo, 2001.
- 62) TOUCHTON, G. L. An Experimentally Verified NO_x Prediction Algorithm Incorporating the Effects of Steam Injection. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power – ASME. October 1984, Vol. 106, p 833-840.

- 63) TOFF, J.L. A Model for the Prediction of Thermal Prompt and Fuel NO_x Emissions from Combustion Turbines. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power – ASME. April 1986, Vol. 108, p340-347.
- 64) Minister of Supply and Services Canada. Environmental Codes of Practice for Steam Electric Power Generation Siting Phase – Report EPS 1/PG/2. Beauregard Press Ltd., 1987.
- 65) NEGRI, J.C.; VIEIRA, S. Formação de Base de Dados e Avaliação Técnica – Econômica de Sistemas de Controle Ambiental para Usinas Termoeletricas. Informe Técnico CESP – EPEG – 004/1997, São Paulo, 1997.
- 66) NETO, A.J.S. et al. Modelo de Análise para Seleção e Localização de Usinas Termoeletricas – SAEGET. In: XIV SNPTEE – SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, Belém, 1997.
- 67) OLIVEIRA, S. Notas Técnicas e Banco de Dados Meteorológico de Viracopos de 1997. São Paulo, 2002.
- 68) KOSTYUK, A.; FROLOU, V. Steam and Gas Turbines. Mir Publisher Moscou, 1988.
- 69) CLEMENTE, D.A. Estudo do Impacto Ambiental das Fontes Industriais de Poluição do Ar no Município de Paulínia – S.P. - Empregando o Modelo ISCST3. Dissertação de Mestrado Apresentada à Faculdade de Engenharia Química da Unicamp. Campinas, 2000.
- 70) CETESB. Relatório de Qualidade do Ar do Estado de São Paulo – 2000. São Paulo, 2001.
- 71) SILVA, S.R. Registro de Concentração de NO_x para Paulínia – 1998. Mensagem Recebida por: negrijec@usp.br de: eqqi@cetesb.sp.gov.br em 13/05/2002 e 23/05/2002.
- 72) GOVERNMENT BUDGETS. The Nitrogen Oxide Charge on Energy production in Sweden. Disponível em: < www.iisd.ca/greenbud/nitro.htm > em 30/9/1999.

73) DER – DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM. Estatística de Trânsito – SP 332 – Trecho Campinas – Paulínia – Posto 326 – km 120. São Paulo, 1990.

APÊNDICE A - JATOS VERTICAIS TURBULENTOS ENVOLVENDO EMPUXO: ANÁLISE DE PLUMA

1.1 Introdução

O intuito deste Apêndice é apresentar uma revisão no assunto de jatos turbulentos, incluindo resultados experimentais e métodos de previsão, com ênfase nos do tipo axissimétricos envolvendo empuxo. Como sequência básica é adotada a referência (45) complementando com informações relevantes das demais referências.

1.2 Tipos de jatos e parâmetros fundamentais

1.2.1 Escoamento

O escoamento considerado no estudo engloba jatos provenientes de uma única fonte, em regime permanente com baixo número de Mach, sendo o respectivo eixo paralelo ao vetor gravidade e densidade diferente do meio circundante, submetendo o aparecimento de forças de empuxo.

Os jatos em meio homogêneo são normalmente classificados segundo quatro configurações, apresentados na figura A.1. O jato puro (a) tem a mesma densidade do meio com ausência, portanto, de forças de empuxo. A pluma pura (b) tem momento inicial nulo, podendo ser gerada por uma fonte de calor. O jato envolvendo empuxo (c), também denominado pluma forçada, apresenta momento inicial e fluido com densidade inferior ao meio. O jato com empuxo negativo (d) é obtido quando o fluido injetado apresenta densidade superior ao do meio.

O jato de pluma forçada representa, por exemplo, descargas de torres de resfriamento, de chaminé e de queimadores. Nas primeiras camadas a força dominante é proveniente da quantidade de movimento inicial, a qual com a evolução do jato vai diminuindo de intensidade, passando por uma zona intermediária,

atingindo uma região final onde o jato tem comportamento de pluma. Na sequência há uma redução contínua na densidade do jato até atingir o equilíbrio com a atmosfera, sendo este ponto indicado como a máxima altura de elevação da pluma (He). A partir deste ponto a força de empuxo torna-se negativa e o jato apresenta comportamento similar a jato com empuxo negativo. Na figura A.2 é representado tal fenômeno em meio com estabilidade estratificada.

Figura A.2 - Jato com Empuxo em Meio com Estratificação Estável

1.2.2 Parâmetros

As forças consideradas no escoamento de jato são as do tipo inercial, viscosa e de empuxo. As relações entre estas forças que quantificam um efeito sobre o outro são representadas pelos adimensionais:

1. número de Reynolds:
$$\text{Re} = \frac{U_0 D}{\nu} \quad (\text{A.1})$$

2. número de Grashof:
$$G = \frac{g(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_0)D^3}{\nu^2} \quad (\text{A.2})$$

3. número de Froude:
$$F = \frac{U_0^2}{gD(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_0)/r_0} \quad (\text{A.3})$$

Os jatos turbulentos e plumas, objeto de estudo de maior interesse, apresentam altos números de Reynolds e Grashof, indicando que a força viscosa pode ser desprezada. Neste caso o número de Froude é o parâmetro mais importante, podendo ser interpretado como a relação entre momento e empuxo inicial. Desta forma, o escoamento é independente dos números de Reynolds e Grashof que têm importância apenas como indicativos de condição de turbulência.

No Apêndice A da referência (45) são apresentadas as equações fundamentais simplificadas para escoamento médio de jatos verticais envolvendo empuxo. As equações são obtidas a partir de uma análise de ordem de magnitude dos termos das equações diferenciais primárias, eliminando os termos de ordem superior, complementado com uma relação entre o termo de pressão e empuxo na equação de momento, na região fora do jato. Detalhes desta manipulação podem ser encontrados na referência (46), item 4.6. Uma aproximação importante também utilizada é a de Boussinesq, na qual é estabelecida uma relação na força de empuxo entre as componentes flutuante e média da densidade com as temperaturas. As equações na forma integrada apresentadas no apêndice citado acima permitem identificar duas características:

- O fluxo local de momento $\mathbf{M}$ para jatos sem força de empuxo é independente da distância vertical z , conforme equação A6 da referência (45).
- O fluxo de calor Q é independente de z quando a temperatura ambiente (T_a) é uniforme conforme equação A7 da referência (45).

Para meios estratificados, como é o caso da atmosfera, é definido um parâmetro S que descreve a estratificação.

$$\begin{aligned}
 S > 0 & \quad \text{Estratificação estável} \\
 S = 0 & \quad \text{Estratificação neutra} \\
 S < 0 & \quad \text{Estratificação instável}
 \end{aligned}
 \tag{A.4}$$

As condições de estabilidade da atmosfera e turbulência podem ser relacionadas com o número de fluxo de Richardson (R_f), dado pela razão entre os termos de produção de empuxo e produção de tensão da energia cinética turbulenta.

$$R_f \equiv \frac{g}{T_a} \frac{\overline{u'T'}}{\overline{u'v'} \partial V / dz}
 \tag{A.5}$$

Para troca de calor na direção ascendente $\overline{u'T'} > 0$ então $R_f < 0$ ($\overline{u'v'} < 0$ se $\frac{\partial V}{\partial z} > 0$) e $S < 0 \rightarrow$ instável.

Para troca de calor na direção descendente $\overline{u'T'} < 0$ então $R_f > 0$ e $S > 0 \rightarrow$ estável.

Valores positivos e elevados de R_f conduzem a extinção da turbulência.

1.3 Métodos de Cálculos

1.3.1 Correlação de Dados Experimentais

Utilizando considerações teóricas simplificadas, podem ser obtidas formulações para fenômenos através de correlação de dados experimentais, tal como é feito na análise dimensional.

1.3.2 Métodos Integrais

Os métodos integrais são baseadas nas equações diferenciais de conservação, conforme Apêndice A da referência (45), as quais são integradas sobre a seção transversal do jato utilizando perfis empíricos, em geral do tipo Gaussiano, para velocidade, temperatura e concentração.

Desta forma, são obtidas equações diferenciais ordinárias descrevendo a variação axial. Para completar o sistema de equações é assumida hipótese para o arraste do meio provocado pelo jato.

1.3.3 Métodos Diferenciais

Os métodos diferenciais são mais poderosos que os integrais, pois possibilitam para configurações mais complexas a determinação dos campos de velocidade, temperatura e concentração em cada ponto do escoamento, através da resolução direta das equações diferenciais fundamentais, conforme Apêndice A da referência (45). O modelo turbulento, necessário para completar o sistema de equações devido aos termos flutuantes, fornecendo informações sobre o estado de turbulência do escoamento, é potencialmente mais geral que as hipóteses de perfil e arrastes assumidos nos métodos integrais.

A maioria dos modelos de turbulência foi desenvolvida e testada para escoamento sem efeito de empuxo. Para jatos verticais com empuxo são destacadas as referências (47) e (48).

1.4 Similaridade e Funções Típicas

É observado que jatos envolvendo ou não empuxo têm tendência a terem auto-similaridade em algumas regiões do escoamento. Uma região é considerada auto-similar quando uma velocidade, uma temperatura (ou concentração) e uma escala de comprimento são suficientes para tornar as respectivas quantidades de média temporal como funções adimensionais de apenas uma variável.

Estabelecendo as relações de similaridade para as grandezas:

$$U = U_{\varphi} f(\mathbf{h}); V = U_{\varphi} g(\mathbf{h}); \overline{u'v'} = U_{\varphi}^2 h(\mathbf{h}) \quad (\text{A.6})$$

$$T - T_a = \Delta T_{\varphi} q(\mathbf{h}); \overline{v'T} = \Delta T_{\varphi} U_{\varphi} x(\mathbf{h}); \quad \mathbf{h} = y/d$$

E, substituindo nas equações diferenciais fundamentais, são obtidas duas formas distintas de auto-similaridade, segundo a predominância ou não do empuxo no escoamento. Portanto, a região intermediária especificada para jatos com empuxo (figura A.1-c) não apresenta auto-similaridade, visto que as constantes para as relações das duas regiões adjacentes são diferentes.

Nestas regiões, o espalhamento do jato é linear ($\delta(z) \propto z$), porém a taxa de espalhamento (dy_{5a} / dz) pode ser diferente. As variações axiais de U_{φ} e ΔT_{φ} são diferentes, sendo que para jato turbulento com empuxo ou na região de empuxo (figura A.1-c) as funções obtidas são do tipo:

$$U_{\varphi} \mathbf{a} z^{-j/3} \quad \text{e} \quad \Delta T_{\varphi} \mathbf{a} z^{-[(2/3)j+1]} \quad (\text{A.7})$$

Por outro lado, o escoamento na região de similaridade sem empuxo depende do fluxo da quantidade de movimento (M_0) e da densidade do meio (ρ_a), enquanto que

na região de pluma o escoamento é uma função da diferença de força (W_o). Na função típica para escoamento geral, com a presença de empuxo, estas três grandezas são parâmetros dependentes e através de uma análise dimensional conveniente são obtidas as seguintes funções:

$$z = DF^{2/(3+j)} \left(\frac{\mathbf{r}_0}{\mathbf{r}_a} \right)^{1/(3+j)} z_1 \mathbf{p}^{j/4} \quad (\text{A.8})$$

$$U = U_0 F^{-(1+j)/(3+j)} \left(\frac{\mathbf{r}_0}{\mathbf{r}_a} \right)^{1/(3+j)} U_1 \mathbf{p}^{j/4} \quad (\text{A.9})$$

$$g(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_0) = g(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_0) F^{-(1+j)/(3+j)} \left(\frac{\mathbf{r}_0}{\mathbf{r}_a} \right)^{-(2+j)/(3+j)} g_1 \mathbf{p}^{j/4} \quad (\text{A.10})$$

Nas quais z_1 , U_1 e g_1 são adimensionais dependentes de comprimento, velocidade e força de empuxo, respectivamente.

As funções de U_1 e g_1 são do tipo $A_i (\rho_0 / \rho_a)^n z_1^m$, sendo que A_i é obtido experimentalmente, enquanto que os coeficientes n e m resultam da análise de similaridade.

Estas funções, pelo caráter geral, são válidas nas regiões de jato e pluma do escoamento para regimes laminar e turbulento.

A partir desse equacionamento são obtidas representações para taxa de espalhamento e decaimento dos perfis de velocidade, temperatura e concentração. Algumas destas funções são apresentadas no item a seguir.

1.5 Resultados em Meio Uniforme

Como visto acima, no jato vertical com empuxo, são identificadas três regiões típicas (figura A.1 - c), a saber: região de jato puro onde o número de Froude é alto, região intermediária sem característica de similaridade cuja localização depende do número de Froude inicial, e região de pluma plena com baixo número de Froude.

As funções obtidas para as regiões externas com características de similaridades podem ser correlacionadas com resultados experimentais. Na figura A.3 são apresentados para jatos axissimétricos os dados de g referenciados à linha de centro em função de z_1 . As equações U_z / U_0 para as várias regiões estão também representadas. Vale ressaltar que os expoentes obtidos para as equações na região intermediária são empíricos, enquanto que para as outras regiões são obtidos por similaridade.

Pode ser observado que a região intermediária independente do número de Froude, tem uma altura cerca de 10 vezes maior que a de jato puro. Como não há variações abruptas entre as regiões, na prática elas se confundem, desta forma são em geral analisadas com uma única entidade.

Figura A.3 – Representação do Decaimento para Densidade e Velocidade no Eixo Central de Jatos Axisimétricos com Empuxo (45)

1.5.1 Regiões de Jato Puro e Intermediário

A característica principal desta zona é a ausência ou uma pequena influência relativa das forças de empuxo. O caso em análise é restringido a jatos turbulentos com escoamento plenamente desenvolvido, isto é, a forma dos perfis de velocidade e temperatura não varia com a distância vertical. O escoamento atinge esta configuração quando desaparece o cone central do jato formado na saída da fonte emissora. O comprimento deste escoamento inicial depende da intensidade de turbulência e do tipo de jato, variando de 10 a 15 vezes em relação ao diâmetro da fonte emissora. A evolução inicial do escoamento é representada na figura A.4.

Figura A.4 – Desenvolvimento do Escoamento (45)

O escoamento em jato é normalmente turbulento, a não ser que o número de Reynolds baseado nas condições de saída do jato seja bastante baixo. O número de Reynolds limite para condição laminar depende sobretudo das condições de saída do jato.

Resultados experimentais indicam que os perfis laterais de velocidade e temperatura seguem um comportamento tipo Gaussiano:

$$\frac{U}{U_{\infty}} = \exp(-K_u h^2) \text{ onde } K_u = \frac{\ln 2}{(Y_{.5u})^2} \text{ e } h = \frac{y}{d} \quad (\text{A.11})$$

$$\frac{T - T_a}{T_{\infty} - T_a} = \exp(-K_c h^2) \text{ onde } K_c = \frac{\ln 2}{(Y_{.5c})^2} \quad (\text{A.12})$$

Os valores de K_u e K_c são obtidos experimentalmente, sendo dependentes do tipo de jato, número de Froude e ρ_a/ρ_0 .

A variação axial de $Y_{.5u}$, $Y_{.5c}$, U_{∞} e T_{∞} é estabelecida pelas funções obtidas da análise de similaridade com espalhamento linear do jato.

Para escoamento onde ρ_a/ρ_0 é diferente da unidade as constantes das variações axial (A_i) tornam-se funções de ρ_a/ρ_0 .

Alguns métodos de cálculo empregam o conceito de número de Prandtl turbulento S_t , dado por:

$$S_t = \frac{\overline{m}}{a_t} \quad (\text{A.13})$$

Onde:

$$\mu_t - \text{difusividade de quantidade de movimento turbulento} \quad \equiv - \frac{\overline{ru'v'}}{\partial U / \partial y} \quad (\text{A.14})$$

$$\alpha_t - \text{difusividade de calor turbulento} \quad \equiv - \frac{\overline{r v' T'}}{\partial T / \partial y} \quad (\text{A.15})$$

Os valores de μ_t e α_t podem a princípio serem obtidos experimentalmente, através de medições de $\overline{u'v'}$, $\overline{v'T'}$ e dos perfis de U e T. Para jatos foi constatado que S_t não varia ao longo do escoamento, podendo ser relacionado com $Y_{.5c} / Y_{.5u}$ através de expressão:

$$S_t = \frac{1}{(Y_{.5c} / Y_{.5u})^2} \quad (\text{A.16})$$

Sendo: $S_t = 0,7$ p/ jatos axissimétricos

Em termos de propriedades turbulentas algumas medidas são reportadas na literatura. As intensidades relativas axiais ($\sqrt{u'^2} / U_\alpha$ e $\sqrt{T'^2} / \Delta T_\alpha$) de acordo com a similaridade deveriam ser independentes de z. Este comportamento é alcançado para z/D acima de 25 a 30. O valor assintótico para a intensidade relativa de velocidade é 0,21 e 0,28 para jatos planos e axissimétricos, respectivamente. Para temperatura, há um espalhamento maior de valores, devido à dificuldade de medições precisas das flutuações. O valor assintótico esperado está na faixa de 0,21 e 0,27. Vale ressaltar que valores de intensidade superiores são obtidos quando é incorporado o efeito de empuxo.

Quando as propriedades de turbulência são adimensionalizadas em relação ao valor central, os perfis ($\sqrt{u'^2}$; $\overline{u'v'}$; $\overline{u'T'}$ e $\overline{v'T'}$) têm forma similar. Medições experimentais indicam certas variações nos perfis, contudo mantendo o formato geral semelhante. Uma experiência típica de medição de $\overline{v'T'}$ deve ser ressaltada, já que os valores medidos são cerca de 2 vezes inferiores ao valor calculado pela equação diferencial de energia (temperatura), utilizando dados do escoamento médio medidos. Esta constatação reforça a dificuldade de medição de T'.

Como observação final para jatos ou região de jatos puros, é observada uma falta de entendimento da influência de ρ_a / ρ_0 sobre as grandezas de turbulência.

1.5.2 Regiões de Pluma

Ao contrário de jatos puros, o escoamento na região de pluma pode na prática permanecer laminar por uma maior distância. O escoamento é caracterizado por um baixo número de Froude, sendo que os números de Grashof e Reynolds determinam a transição do escoamento para turbulento.

Medições experimentais na região laminar para jatos planos indicam que a diferença de temperatura central ΔT_c decai com $z^{3/5}$, enquanto a largura do jato ($y_{.5c}$) cresce com $z^{2/5}$, então o número de Grashof local $g\Delta T (y_{.5u})^3 / (T_a v^2)$ aumenta com $z^{3/5}$, significando que a turbulência deve ocorrer mesmo para um número de Grashof inicial baixo. Resultados similares foram obtidos para jatos axissimétricos onde o número de Grashof varia com $z^{1/2}$

As medições experimentais para escoamento turbulento confirmam as funções obtidas da análise de similaridade. As medidas dos perfis de velocidade e temperatura têm um comportamento típico Gaussiano, conforme apresentado na figura A.5 a seguir.

Figura A.5 - Perfis de Velocidade e Densidade para Pluma Plana (45)

As medições experimentais das distribuições de temperatura e velocidade do campo médio em plumas turbulentas podem ser parametrizados em dois adimensionais (R_m e R_c), para verificar a validade dos dados. Os adimensionais (R_m e R_c) são obtidos pela integração das equações de quantidade de movimento e energia, utilizando os perfis $U_{\varphi}(x)$ e $\Delta T_{\varphi}(x)$, obtidos da análise de sensibilidade e das funções Gaussianas para os perfis laterais. Nestas condições obtém-se:

- conservação da quantidade de movimento:

$$R_m \equiv \left(\frac{3}{4} \right)^j \frac{B_c}{B_u^2} \left(\frac{2K_u}{K_c} \right)^{(j+1)/2} = 1 \quad (\text{A.17})$$

- conservação de energia: $R_c \equiv B_u B_c \left(\frac{P}{K_u + K_c} \right)^{(j+i)/2} = 1 \quad (\text{A.18})$

Quando R_m e R_c são idênticos a unidade, o momento $(\overline{u'^2} - \overline{v'^2})$ e o fluxo de calor $(\overline{u'T'})$ turbulentos são desprezados em relação ao campo médio (U^2 e $U\Delta T$). Para $R_m > 1$ e $R_c < 1$, estas quantidades turbulentas são consideradas.

Grandezas turbulentas medidas na forma adimensionalizadas para plumas planas e axissimétricas são apresentadas na figura A.6. Constatação interessante é verificada para o tipo plano, onde as quantidades turbulentas para pluma são consideravelmente maiores que na condição de jato, sobretudo $\overline{(u'T')}/(U_{\varphi}\Delta T_{\varphi})$.

Figura A.6 – Perfis de Similaridade de Grandezas Turbulentas para Plumas Planas (45)

1.6 Tópicos Complementares

1.6.1 Altura Máxima de Pluma

A altura máxima de pluma (Z_m) tem grande interesse prático, face ao fenómeno de dispersão de poluentes na atmosfera. Na figura A.2 estão representadas as condições de elevação da pluma.

A fórmula de Briggs de determinação de Z_m tem aplicação consagrada. É válida para plumas puras, em meio com estratificação linear (S constante). A equação para pluma axissimétrica é dada por:

$$Z_m = 5S^{-3/8} \left(\frac{W_0}{\rho r_0} \right)^{1/4} \quad (\text{A.19})$$

Estudos indicam que a presença de quantidade de movimento inicial pode reduzir Z_m devido a grande mistura próxima a fonte, provocando uma queda mais rápida de W . Em contrapartida, para números de Froude altos a altura de pluma é aumentada pelo momento.

A condição de estratificação não linear, típica de inversões térmicas, não tem representação generalizada, dependendo da situação particular em que ocorre.

1.6.2 Modelo de Energia de Prandtl (47)

O modelo estabelece inicialmente os mecanismos de geração de turbulência com empuxo envolvido:

1. a taxa de aumento da energia turbulenta por unidade de volume é igual à taxa de decréscimo da energia potencial por unidade de volume: volume $(\partial \mathbf{r} / \partial z) g d\mathbf{z}$;
2. a taxa de aumento de energia turbulenta é diretamente proporcional ao fluxo ascendente de material mais leve;

3. a taxa de aumento de energia turbulenta é diretamente proporcional aos gradientes de temperatura e concentração, e na proporção $k_t^{1/2}$ e ℓ .

$$S_k = -g \mathbf{r} k_t^{1/2} \ell \left[\frac{\mathbf{b}}{\mathbf{s}_{h,eff}} \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\mathbf{b}'}{\mathbf{s}_{\ell,eff}} \frac{\partial m_\ell}{\partial z} \right] \quad (\text{A.20})$$

onde $\mathbf{b} = -\frac{1}{\mathbf{r}} \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial T}$ e $\mathbf{b}' = -\frac{1}{\mathbf{r}} \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial m_\ell}$

A equação da energia cinética turbulenta (k_t) é dada por:

$$\mathbf{r} \frac{Dk_t}{Dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mathbf{m}}{\mathbf{s}_{t,k}} \frac{\partial k_t}{\partial z} \right) + \mathbf{m} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 - \frac{g \mathbf{b}}{\mathbf{s}_{h,eff}} \frac{\partial T}{\partial z} - \frac{0,3 k_t}{\ell^2} \right] \quad (\text{A.21})$$

Algumas situações particulares podem ser analisadas:

1. sem empuxo: $\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 = 0,3 \frac{k_t}{\ell^2} \Rightarrow k_t^{1/2} \ell = \frac{1}{0,548} \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \ell^2$ (A.22)

2. com empuxo: $\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 - \frac{g \mathbf{b}}{\mathbf{s}_{h,eff}} \frac{\partial T}{\partial z} = 0,3 \frac{k_t}{\ell^2}$ (A.23)

3. equilíbrio (turbulência nula): $\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \leq \frac{g \mathbf{b}}{\mathbf{s}_{h,eff}} \frac{\partial T}{\partial z}$ (A.24)

4. máxima espessura da camada turbulenta;

$$\partial z_{máx} \approx \frac{(\mathbf{du})^2 \mathbf{s}_{h,eff}}{g \mathbf{b} dT} \text{ onde } \frac{\partial u}{\partial z} \approx \frac{\mathbf{du}}{\mathbf{dz}} \text{ e } \frac{\partial T}{\partial z} \approx \frac{dT}{dz} \quad (\text{A.25})$$

5. exemplo

- vento forte:

$$\mathbf{du} = 5 \text{ m/s}; dT = 10^\circ \text{C}; g = 9,81 \text{ m/s}^2; \mathbf{s}_{h,eff} = 0,7 \text{ e } \mathbf{b} = 1/300 (^\circ \text{C})^{-1}$$

$$dz_{máx} = 53,5 \text{ m}$$

- brisa: $\mathbf{du} = 1 \text{ m/s} \Rightarrow dz_{máx} = 2,14 \text{ m}$

1.7 Considerações Finais

Em termos práticos, as relações apresentadas na figura A.3 e no item 1.6.1 são normalmente utilizadas em cálculos de engenharia.

No tocante ao entendimento, os jatos com a presença de empuxo têm um nível de conhecimento inferior aos jatos puros. A influência do empuxo nas grandezas de turbulência precisa ser mais explorada e pesquisada.

APÊNDICE B – CARACTERÍSTICAS E ESTABILIDADE ATMOSFÉRICA

A corrente contínua ou pluma de um estiramento de efluente de uma chaminé industrial pode ser imaginada como uma sucessão de seções elementares que têm comportamento como “baforadas” individuais de fumaça. As trajetórias de seções sucessivas da pluma não são idênticas, apresentando deslocamento irregular devido à flutuação de grande escala no escoamento. Portanto, a concentração média na direção da pluma de um ponto diminui com a distância da fonte, bem como com o tempo de exposição (“time mean concentration”).

É importante frisar que esta característica de tempo médio da concentração é fundamentalmente uma consequência da existência de movimentos dispersivos numa escala maior que a própria seção transversal da pluma.

É observado também que as propriedades estatísticas da atmosfera dependem sobremaneira da duração da amostragem.

Em atmosferas neutras existem duas importantes fontes de energia turbulenta. A primeira, localizada a poucos dezenas de metros de altura, é devido à instabilidade dos gradientes de velocidade do vento causada pelo arraste sobre a superfície da Terra. A segunda, conhecida como instabilidade de Ekman surge dos movimentos circulares dos ventos com a altura, criando um campo de vórtice deslocando o ar que cruza este nível. Outra importante fonte de movimento está associada às forças de empuxo.

A primeira camada da atmosfera é denominada troposfera, que vai do nível do mar até uma altitude de 8 a 15 km. O meio ambiente para efeito de dispersão é composto por esta camada.

O grau de estabilidade é referenciado ao **grad T** na direção azimutal. Normalmente na troposfera há uma queda da temperatura com a altura, entretanto fatores ligados à turbulência, aquecimento ou resfriamento do solo e frente fria podem alterar esta condição. O grau de turbulência segundo Pasquill (48) estabelece uma relação entre o grad T na direção normal do solo ($\partial T / \partial z$) com a condição de estabilidade. Para a

unidade de [$^{\circ}\text{C} / 100\text{m}$], valores de $\partial T / \partial z$ acima de 4 e abaixo de $-1,9$ indicam condições extremamente estáveis e instáveis, respectivamente.

Pode ser verificado que as parcelas de ar sofrem mudanças de temperatura de forma adiabática devido a uma variação de pressão causada por deslocamento vertical. Definindo o gradiente atmosférico vertical de temperatura: $\Gamma = -dT / dz$ (B.1)

Utilizando a equação de equilíbrio: $dp = -\rho g dz$ (B.2)

e a equação de gases perfeitos: $p = \rho R_1 T$ (B.3), obtém-se:

$$\frac{dp}{p} = \frac{1}{\Gamma R_1} \frac{dT}{T} \quad (\text{B.4})$$

Integrando entre duas cotas: $\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{1/(\Gamma R_1)}$ (B.5)

Introduzindo novamente a equação dos gases perfeitos:

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^n \quad (\text{B.6}) \quad \text{onde} \quad n = \frac{1}{1 - \Gamma R_1}$$

Esta equação representa uma típica transformação politrópica de estado, sendo adiabática quando $n = k$ ($k = C_p / C_v$).

Substituindo na equação o gradiente atmosférico e integrando, obtém-se:

$$z_2 - z_1 = \frac{R_1 n}{n - 1} (T_1 - T_2) \quad (\text{B.7})$$

Portanto, devido a esta característica compressível da atmosfera, a estabilidade térmica pode ser especificada em termos da diferença entre o gradiente vertical real de temperatura e o gradiente de temperatura segundo uma transformação adiabática reversível.

O deslocamento de uma massa de ar em $z_1(p_1, \mathbf{r}_1, T_1)$ em equilíbrio até o nível $z_2(p_2, \mathbf{r}_2, T_2)$ é efetuado através de uma transformação adiabática, sendo que as condições finais em z_2 são $p_2, \mathbf{r}'_2, T'_2$.

Figura B.1 – Transformação Adiabática de uma Massa de Ar das Condições Existentes no Nível (1) às Condições Existentes no Nível (2)

Figura B.2 – Esquema para Verificar a Estabilidade de uma Massa de Ar

Na cota z_2 , a diferença entre o peso próprio da massa (F_1) e o empuxo submetido (F_2) define a condição de equilíbrio.

$$\rho_2 > \rho'_2 \quad F_2 > F_1 \text{ instabilidade}$$

$$\rho_2 = \rho'_2 \quad F_2 = F_1 \text{ indiferença}$$

$$\rho_2 < \rho'_2 \quad F_2 < F_1 \text{ estabilidade}$$

Este processo de análise pode agora ser transferido para um diagrama z (T) para troposfera, onde além da curva real z (T) são traçadas linhas correspondentes a uma transformação adiabática ($n = k$ e $I = I_a$).

Figura B.3 – Superposição do Gráfico de Distribuição Real das Temperaturas com Distribuições Adiabáticas para Visualização das Regiões de Equilíbrio Estável, Instável e Indiferente

No nível z_1 , $I < I_a$, resulta como indicado na figura B.3 que no nível z_2 , $T_2' < T_2$ (transformação adiabática) $< T_2$ (temperatura atmosférica), e como p_2 é o mesmo externa e internamente à massa do fluido considerada, da lei dos gases perfeitos vem $\rho_2' > \rho_2$ e, portanto, equilíbrio estável.

Pode ser observado a partir desta conceituação que o resfriamento do solo provoca estabilidade em camadas cada vez mais superiores, enquanto que no aquecimento ocorre o oposto. As figuras B.4 e B.5 abaixo exemplificam esta observação.

As condições de estabilidade ou inversão durante longos períodos podem provocar elevadas concentrações de poluentes na atmosfera, de tal modo que ocorrendo uma alteração no equilíbrio é possível o deslocamento de massas de ar poluído de cima para baixo com sérias consequências. A história registra tragédias deste tipo, como a do vale do rio Meuse na Bélgica com cerca de 30 mortes em 1930 e, em Londres, com 4.000 mortes em 1952.

Figura B.4 – Distribuição de Temperatura no Caso de Resfriamento do Solo nos Instantes t_0 , t_1 , t_2 , t_3 e t_4

Figura B.5 – Distribuição de Temperatura no Caso de Aquecimento do Solo nos Instantes $t_0, t_1, \dots, t_7$

Na figura B.6 a seguir são expostos os diversos tipos de deslocamento vertical de plumas.

Figura B.6– Situações Típicas de Equilíbrio Atmosférico e Perfil de Plumias (51)

As condições da atmosfera são também referenciadas a um parâmetro de estratificação (S) definido em no Apêndice A – equação A.4.

Nos cálculos, em geral é utilizado o índice de turbulência (η), função do grau de estabilidade, segundo a classificação de Pasquill para corrigir a velocidade do vento:

$$U_h = U_0 \left(\frac{z}{10} \right)^{\frac{h}{2-h}} \quad (\text{B.8})$$

onde U_0 é a velocidade do vento a 10m de altura.

A medição da altura de mistura (67) é sofisticada e complexa, sendo a sua disponibilidade limitada a estação de monitoramento de grandes aeroportos.

A USEPA desenvolveu um método de cálculo a partir de dados usuais provenientes de estações meteorológicas. O método é baseado no princípio da teoria turbulenta de similaridade dinâmica de Monin-Obukov.

A equação representativa do método para avaliação da grandeza de estabilidade atmosférica na baixa atmosfera é:

$$L = - \frac{r C_p T (u)^3}{k_{vk} g (Q)} \quad (\text{B.9})$$

Esta grandeza representa a relação entre o transporte vertical por convecção natural (numerador) pelo transporte por convecção forçada (denominador).

A grandeza L aplicada com a grandeza de rugosidade do solo fornece a altura de mistura para condição rural e urbana.

A USEPA tem um programa – PCRAMMET, que efetua estes cálculos a partir de um banco de dados meteorológicos.

APÊNDICE C – EXEMPLO DE APLICAÇÃO DE CÁLCULO

Uma indústria química, localizada num terreno em forma de platô aberto, emite CO e outros gases através de uma chaminé com 2 m de diâmetro e 50 m de altura. A vazão total dos gases é de 62,83 m³/s a uma temperatura de 200°C, sendo que a taxa de emissão de CO é 10 kg/s. Numa tarde de verão com céu parcialmente nublado, a temperatura ambiente é de 30°C e a velocidade média do vento na altura da chaminé é 3,6 m/s. Pede-se a estimativa da concentração de CO no nível do solo média de 10 minutos, para uma distância de 1,5 km da indústria, na direção jusante do vento.

Solução:

1. Determinação dos Coeficientes de Dispersão.

1.1. A classe de estabilidade B é indicada para tarde de verão parcialmente nublado.

Para terreno aberto são utilizados os coeficientes de Pasquill. No Anexo A, figuras 37 e 38:

$$s_y \cong 220 \text{ m} \text{ e } s_z \cong 170 \text{ m}$$

Cálculo de Elevação da Pluma.

Velocidade dos gases: $V = Q_e/A = 62,83/(\pi D^2 / 4)$

$$V = 20 \text{ m/s}$$

Utilizando a equação 46 do Anexo A:

$$F_1 = \frac{9,8}{4} (20) (2)^2 \frac{473-303}{473} = 70,44$$

Utilizando a equação 48 do Anexo A:

$$x_f = 119[70,44]^{2/5} = 652,6 \text{ m}$$

Como $x = 1,5 \text{ km} > x_f$ é usada a equação 50 do Anexo A

$$\Delta h = 1,6 (70,44)^{1/3} \frac{652,6^{2/3}}{3,6} = 138m$$

Cálculo da Altura Efetiva da Chaminé:

$$H = h + \Delta h = 50 + 138 = 188m$$

Cálculo da Concentração de CO no Nível do Solo, Usando a Equação 45 do Anexo A:

$$\begin{aligned} C(x,0,0) &= \left[\frac{10}{3,14 \times 3,6 \times 220 \times 170} \right] \exp [-0,5(188/170)^2] \\ &= 1,3 \times 10^{-5} \text{ kg} / \text{ m}^3 = 13 \text{ mg} / \text{ m}^3 \end{aligned}$$

APÊNDICE D – USO DE NOMOGRAMAS

O uso de nomogramas, obtidos de medições experimentais e correlações, pode auxiliar na determinação de valores diretos ou indiretos no cálculo de concentração de forma rápida e suficientemente precisa.

A altura da camada de mistura instável pode ser obtida para alimentar um modelo de dispersão através do nomograma apresentado na figura D.1.

Valores estimados de concentração podem ser obtidos de nomogramas como representados na figura D.2. Os dados do nomograma foram sintetizados a partir de correlações e utilizando o método de ajuste de diferenças quadradas entre os valores observados e calculados.

Figura D.1 – Exemplo de Nomograma para Estimar a Altura da Camada de Mistura em Condições Típicas de Dia do Reino Unido (48)

Figura D.2 – Exemplo de Nomograma para Estimar as Concentrações de SO_x para uma Usina Termoeletrica em Londres (média de 24h) (48)

APÊNDICE E – LISTAGEM DO CÁLCULO DO MODELO DE PREVISÃO DE NO_x

{ \$DS, } { TURBINA SIEMENS V84.2 }

{ Validade:

- temperatura ar: 5oC(278K) a 35oC(308K)

- altitude: 0 a 750m

- umidade relativa ar: 60%

- combustível: metano(CH₄)}

{ DADOS ENTRADA }

{ temperatura ar - T[1] - (K) }

{ altitude - AL - (m) }

{ temperatura do combustível - Tcomb - (K) }

T[1]=288,15

AL=0

Tcomb=298,15

{ Cálculo Potência Máxima Local - Potmax - (MW) }

Potmax= 2,274934E+02-1,996685E-01*T[1]-7,701778E-04*T[1]^2-4,392643E-02*AL+8,321780E-07*AL^2+1,083836E-04*T[1]*AL

Pot[1]=Potmax/4

Pot[2]=Potmax/2

Pot[3]=Potmax*3/4

Pot[4]=Potmax

{ atenção: cálculo por etapas - alterar índice para simular potência: 1-25%; 2-50%; 3-75%; 4-100%) }

I=4

{Cálculo Vazão Combustível - mc - (kg/s)}

$$\begin{aligned} mc1 &= 3,074912E+00 - 3,195869E-02 * T[1] + 1,254890E-04 * T[1]^2 - 1,462277E-07 * T[1]^3 - 5,378139E-03 * AL + 5,371090E-06 * AL^2 - 4,165014E-11 * AL^3 + \\ & 2,503799E-01 * Pot[I] - 2,004340E-03 * Pot[I]^2 + 2,171562E-06 * Pot[I]^3 + 3,708059E-05 * T[1] * AL - 3,736784E-08 * T[1] * AL^2 \\ mc2 &= -1,082577E-03 * T[1] * Pot[I] + 9,635992E-06 * T[1] * Pot[I]^2 - 6,378248E-08 * T[1]^2 * AL + 6,514853E-11 * T[1]^2 * AL^2 + 1,698686E-06 * T[1]^2 * Pot[I] - \\ & 1,515393E-08 * T[1]^2 * Pot[I]^2 \\ mc3 &= -6,219323E-06 * AL * Pot[I] + 4,727997E-08 * AL * Pot[I]^2 + 1,195830E-09 * AL^2 * Pot[I] - 9,438494E-12 * AL^2 * Pot[I]^2 \\ mc &= mc1 + mc2 + mc3 \end{aligned}$$

{Cálculo Temperatura Gases Exaustão - T[4]}

$$\begin{aligned} T1 &= 4,348566E+04 - 2,724962E+02 * T[1] + 3,187713E-01 * T[1]^2 + 3,174981E-04 * T[1]^3 - 4,922593E+00 * AL - 1,206434E-04 * AL^2 - 1,219709E-08 * AL^3 + 1,890552E+03 * Pot[I] - 1,193891E+01 * Pot[I]^2 - 1,316299E-01 * Pot[I]^3 - \\ & 4,110733E+04 * mc - 1,492733E+03 * mc^2 + 1,105251E+03 * mc^3 \\ T2 &= 3,141671E-02 * T[1] * AL + 9,050038E-07 * T[1] * AL^2 - 1,324056E+01 * T[1] * Pot[I] + 2,877818E-02 * T[1] * Pot[I]^2 + 2,950700E+02 * T[1] * mc - \\ & 1,130485E+01 * T[1] * mc^2 - 5,388239E-05 * T[1]^2 * AL - 1,638967E-09 * T[1]^2 * AL^2 + 2,188451E-02 * T[1]^2 * Pot[I] - 4,459939E-05 * T[1]^2 * Pot[I]^2 \\ T3 &= -4,894590E-01 * T[1]^2 * mc + 1,790500E-02 * T[1]^2 * mc^2 - 2,641850E-02 * AL * Pot[I] + 2,957618E-06 * AL * Pot[I]^2 + 3,624222E-01 * AL * mc + 2,060091E-02 * AL * mc^2 + 8,694990E-07 * AL^2 * Pot[I] + 3,109582E-08 * AL^2 * Pot[I]^2 + 3,879862E-05 * AL^2 * mc - 1,519079E-05 * AL^2 * mc^2 \\ T4 &= 2,971372E+02 * Pot[I] * mc - 1,605362E+02 * Pot[I] * mc^2 + 7,948436E+00 * Pot[I]^2 * mc - 1,346254E-03 * Pot[I]^2 * mc^2 \\ T[4] &= T1 + T2 + T3 + T4 \end{aligned}$$

{Ponto[2] - Cálculo Propriedades após Compressor - T[2] e P[2]}

$$\{\text{rendimento compressor} - ncp = (T_{\text{iso}} - T[1]) / (T[2] - T[1])\}$$

{relação pressão - rp}

{perdas no compressor - 1kPa}

{kar=Cp/Cv = 1,39 - valor sensível na potência dispendida no compressor}

ncp=0,88

rp=11

perdascp=1

kar=1,39

$P[1]=1,012996E+02 - 1,243540E-02*AL+7,240000E-07*AL^2$

$P[2]=P[1]*rp-perdascp$

$T_{iso}=T[1]*(P[2]/P[1])^{(kar-1)/kar}$

$T[2]=T[1]+(T_{iso}-T[1])/ncp$

{fórmula para ncp - eficiência politrópica}

$\{T[2]=T[1]*(P[2]/P[1])^{(kar-1)/kar/ncp}\}$

{EQUAÇÃO BALANÇO 1a LEI - volume de controle ao redor conjunto turbo-compressor-gerador}

{equação combustão: $1*CH_4 + 2*w*O_2 + 2*w*3,76*N_2 + 2*w*0,0745*H_2O = 1*CO_2 + 2*(w-1)*O_2 + 2*w*3,76*N_2 + 2*(w*0,0745+1)*H_2O$ }

$arest=(2*32+2*3,76*28+2*0,0745*18)/16$

$marest=mc*arest$

{convergência para vazão de ar assumir mart - massa de ar tentativa (kg/s) >marest - estequiométrica - comparar com marc - calculada}

$mart=354,7$

$w=mart/marest$

{cálculo reagentes - ar - neste caso não inclui o combustível somente o AR-índice: r}

{n - número de moles e Fm - fração mássica do componente}

$n_{H_2O_r}=2*w*0,0745$

$n_{O_2_r}=2*w$

$n_{N_2_r}=2*w*3,76$

$$n_{Totr}=n_{H_2Or}+n_{O_2r}+n_{N_2r}$$

$$m_{H_2Or}=18*n_{H_2Or}$$

$$m_{O_2r}=32*n_{O_2r}$$

$$m_{N_2r}=28*n_{N_2r}$$

$$m_{Totr}=m_{H_2Or}+m_{O_2r}+m_{N_2r}$$

$$Fm_{H_2Or}=m_{H_2Or}/m_{Totr}$$

$$Fm_{O_2r}=m_{O_2r}/m_{Totr}$$

$$Fm_{N_2r}=m_{N_2r}/m_{Totr}$$

$$HH_{2Or}=ENTHALPY(H_2O;T=T[1])$$

$$HO_{2r}=ENTHALPY(O_2;T=T[1])$$

$$HN_{2r}=ENTHALPY(N_2;T=T[1])$$

{cálculo combustível}

$$HCH_{4r}=ENTHALPY(CH_4;T=T_{comb})$$

{entalpia do ar a T[1]}

$$HTotHr=Fm_{H_2Or}*HH_{2Or}+Fm_{O_2r}*HO_{2r}+Fm_{N_2r}*HN_{2r}$$

{cálculo produtos combustão-índice: p}

{n - número de moles e Fm - fração mássica do componente}

$$n_{H_2Op}=2*(w*0,0745+1)$$

$$n_{CO_2p}=1$$

$$n_{O_2p}=2*(w-1)$$

$$n_{N_2p}=2*w*3,76$$

$$n_{Totp}=n_{H_2Op}+n_{CO_2p}+n_{O_2p}+n_{N_2p}$$

$$m_{H_2Op}=18*n_{H_2Op}$$

$$m_{CO_2p}=44*n_{CO_2p}$$

$$m_{O_2p}=32*n_{O_2p}$$

$$mN2p=28*nN2p$$

$$mTotp=mH2Op+mCO2p+mO2p+mN2p$$

$$FmH2Op=mH2Op/mTotp$$

$$FmCO2p=mCO2p/mTotp$$

$$FmO2p=mO2p/mTotp$$

$$FmN2p=mN2p/mTotp$$

$$HH2Op=ENTHALPY(H2O;T=T[4])$$

$$HCO2p=ENTHALPY(CO2;T=T[4])$$

$$HN2p=ENTHALPY(N2;T=T[4])$$

$$HO2p=ENTHALPY(O2;T=T[4])$$

{ entalpia dos gases de exaustão a T[4] }

$$HTotHp=FmH2Op*HH2Op+FmCO2p*HCO2p+FmO2p*HO2p+FmN2p*HN2p$$

{ equação balanço: $mar*Har+mcomb*(Hcomb)+mvapor/água*Hvapor/água = Potel+(mar+mcomb+mvapor/água)*Hgases$ }

{ marc - massa de ar calculada via balanço deve ser próxima a mart, isto é delta tende a zero }

$$marc=(mc*(HCH4r)-Pot[I]*1000-mc*HTotHp)/(HTotHp-HTotHr)$$

$$deltavazãoar=marc-mart$$

{ CÁLCULO TEMPERATURA DE CHAMA T3est e T3real }

{ Condição Estequiométrica }

{ w=1,0 }

{ T3est - temperatura de chama adiabática na condição estequiométrica - (K) }

{ Convergir T3est para HTotrest = Htotpest - entalpia reagentes = entalpia produtos }

$$T_{3est}=2488$$

{ reagentes - todos componentes ar + combustível }

{ n - número de moles e Fm - fração mássica do componente }

$$n_{H_2O_{rest}}=2*0,0745$$

$$n_{O_2_{rest}}=2$$

$$n_{N_2_{rest}}=2*3,76$$

$$n_{CH_4_{rest}}=1$$

$$n_{Tot_{rest}}=n_{H_2O_{rest}}+n_{O_2_{rest}}+n_{N_2_{rest}}+n_{CH_4_{rest}}$$

$$m_{H_2O_{rest}}=18*n_{H_2O_{rest}}$$

$$m_{O_2_{rest}}=32*n_{O_2_{rest}}$$

$$m_{N_2_{rest}}=28*n_{N_2_{rest}}$$

$$m_{CH_4_{rest}}=16*n_{CH_4_{rest}}$$

$$m_{Tot_{rest}}=m_{H_2O_{rest}}+m_{O_2_{rest}}+m_{N_2_{rest}}+m_{CH_4_{rest}}$$

$$Fm_{H_2O_{rest}}=m_{H_2O_{rest}}/m_{Tot_{rest}}$$

$$Fm_{O_2_{rest}}=m_{O_2_{rest}}/m_{Tot_{rest}}$$

$$Fm_{N_2_{rest}}=m_{N_2_{rest}}/m_{Tot_{rest}}$$

$$Fm_{CH_4_{rest}}=m_{CH_4_{rest}}/m_{Tot_{rest}}$$

$$Cp_{H_2O_{rest}}=CP(H_2O;T=T[2])$$

$$Cp_{O_2_{rest}}=CP(O_2;T=T[2])$$

$$Cp_{N_2_{rest}}=CP(N_2;T=T[2])$$

$$HCH_{4est}=ENTHALPY(CH_4;T=T_{comb})$$

$$HTot_{rest}=(Fm_{H_2O_{rest}}*Cp_{H_2O_{rest}}+Fm_{O_2_{rest}}*Cp_{O_2_{rest}}+Fm_{N_2_{rest}}*Cp_{N_2_{rest}})*T[2]+Fm_{CH_4_{rest}}*HCH_{4est}$$

{ produtos }

{ n - número de moles e Fm - fração mássica do componente }

$$n_{H_2O_{pest}}=2*(0,0745+1)$$

$$n_{CO_2_{pest}}=1$$

$$n_{O_2_{pest}}=0$$

$$n_{N_2_{pest}}=2*3,76$$

$$n_{\text{Totpest}} = n_{\text{H}_2\text{Opest}} + n_{\text{CO}_2\text{pest}} + n_{\text{O}_2\text{pest}} + n_{\text{N}_2\text{pest}}$$

$$m_{\text{H}_2\text{Opest}} = 18 * n_{\text{H}_2\text{Opest}}$$

$$m_{\text{CO}_2\text{pest}} = 44 * n_{\text{CO}_2\text{pest}}$$

$$m_{\text{O}_2\text{pest}} = 32 * n_{\text{O}_2\text{pest}}$$

$$m_{\text{N}_2\text{pest}} = 28 * n_{\text{N}_2\text{pest}}$$

$$m_{\text{Totpest}} = m_{\text{H}_2\text{Opest}} + m_{\text{CO}_2\text{pest}} + m_{\text{O}_2\text{pest}} + m_{\text{N}_2\text{pest}}$$

$$F_{m\text{H}_2\text{Opest}} = m_{\text{H}_2\text{Opest}} / m_{\text{Totpest}}$$

$$F_{m\text{CO}_2\text{pest}} = m_{\text{CO}_2\text{pest}} / m_{\text{Totpest}}$$

$$F_{m\text{O}_2\text{pest}} = m_{\text{O}_2\text{pest}} / m_{\text{Totpest}}$$

$$F_{m\text{N}_2\text{pest}} = m_{\text{N}_2\text{pest}} / m_{\text{Totpest}}$$

$$H_{\text{H}_2\text{Opest}} = \text{ENTHALPY}(\text{H}_2\text{O}; T = T_{3\text{est}})$$

$$C_{p\text{O}_2\text{pest}} = \text{CP}(\text{O}_2; T = T_{3\text{est}})$$

$$C_{p\text{N}_2\text{pest}} = \text{CP}(\text{N}_2; T = T_{3\text{est}})$$

$$H_{\text{CO}_2\text{pest}} = \text{ENTHALPY}(\text{CO}_2; T = T_{3\text{est}})$$

$$H_{\text{Totpest}} = F_{m\text{H}_2\text{Opest}} * H_{\text{H}_2\text{Opest}} + F_{m\text{CO}_2\text{pest}} * H_{\text{CO}_2\text{pest}} + F_{m\text{O}_2\text{pest}} * C_{p\text{O}_2\text{pest}} * T_{3\text{est}} + F_{m\text{N}_2\text{pest}} * C_{p\text{N}_2\text{pest}} * T_{3\text{est}}$$

$$\Delta H_{p\text{Hr}T_{3\text{est}}} = H_{\text{Totrest}} - H_{\text{Totpest}}$$

{Condição Real}

{ $T_{3\text{real}}$ - temperatura de chama adiabática na condição real com excesso de ar - (K)}

{Convergir $T_{3\text{real}}$ para $H_{\text{Totreal}} = H_{\text{totpreal}}$ - entalpia reagentes = entalpia produtos}

$$T_{3\text{real}} = 1321$$

{reagentes - todos componentes ar + combustível}

{ n - número de moles e F_m - fração mássica do componente}

$$n_{\text{H}_2\text{Orreal}} = 2 * w * 0,0745$$

$$n_{O2rreal}=2*w$$

$$n_{N2rreal}=2*w*3,76$$

$$n_{CH4rreal}=1$$

$$n_{Totrreal}=n_{H2Orreal}+n_{O2rreal}+n_{N2rreal}+n_{CH4rreal}$$

$$m_{H2Orreal}=18*n_{H2Orreal}$$

$$m_{O2rreal}=32*n_{O2rreal}$$

$$m_{N2rreal}=28*n_{N2rreal}$$

$$m_{CH4rreal}=16*n_{CH4rreal}$$

$$m_{Totrreal}=m_{H2Orreal}+m_{O2rreal}+m_{N2rreal}+m_{CH4rreal}$$

$$Fm_{H2Orreal}=m_{H2Orreal}/m_{Totrreal}$$

$$Fm_{O2rreal}=m_{O2rreal}/m_{Totrreal}$$

$$Fm_{N2rreal}=m_{N2rreal}/m_{Totrreal}$$

$$Fm_{CH4rreal}=m_{CH4rreal}/m_{Totrreal}$$

$$HH_{2Orreal}=ENTHALPY(H_2O;T=T[2])$$

$$HO_{2rreal}=ENTHALPY(O_2;T=T[2])$$

$$HN_{2rreal}=ENTHALPY(N_2;T=T[2])$$

$$HCH_{4rreal}=ENTHALPY(CH_4;T=T_{comb})$$

$$HT_{otrreal}=Fm_{H2Orreal}*HH_{2Orreal}+Fm_{O2rreal}*HO_{2rreal}+Fm_{N2rreal}*HN_{2rreal}+Fm_{CH4rreal}*HCH_{4rreal}$$

$$\{Cp_{H2Orreal}=CP(H_2O;T=T[2])$$

$$Cp_{O2rreal}=CP(O_2;T=T[2])$$

$$Cp_{N2rreal}=CP(N_2;T=T[2])$$

$$HCH_{4real}=ENTHALPY(CH_4;T=T_{comb})$$

$$HT_{otrreal}=(Fm_{H2Orreal}*Cp_{H2Orreal}+Fm_{O2rreal}*Cp_{O2rreal}+Fm_{N2rreal}*Cp_{N2rreal}+Fm_{CH4rreal}*HCH_{4real})*T[2]$$

{produtos}

{n - número de moles e Fm - fração mássica do componente}

$$n_{H2Opreal}=2*(w*0,0745+1)$$

$$n_{CO2preal}=1$$

$$n_{O2preal}=2*(w-1)$$

$$n_{N2preal}=2*w*3,76$$

$$n_{Totpreal}=n_{H2Opreal}+n_{CO2preal}+n_{O2preal}+n_{N2preal}$$

$$m_{H2Opreal}=18*n_{H2Opreal}$$

$$m_{CO2preal}=44*n_{CO2preal}$$

$$m_{O2preal}=32*n_{O2preal}$$

$$m_{N2preal}=28*n_{N2preal}$$

$$m_{Totpreal}=m_{H2Opreal}+m_{CO2preal}+m_{O2preal}+m_{N2preal}$$

$$Fm_{H2Opreal}=m_{H2Opreal}/m_{Totpreal}$$

$$Fm_{CO2preal}=m_{CO2preal}/m_{Totpreal}$$

$$Fm_{O2preal}=m_{O2preal}/m_{Totpreal}$$

$$Fm_{N2preal}=m_{N2preal}/m_{Totpreal}$$

$$HH_{2Opreal}=ENTHALPY(H_2O;T=T_{3real})$$

$$HCO_{2preal}=ENTHALPY(CO_2;T=T_{3real})$$

$$HN_{2preal}=ENTHALPY(N_2;T=T_{3real})$$

$$HO_{2preal}=ENTHALPY(O_2;T=T_{3real})$$

$$HT_{otpreal}=Fm_{H2Opreal}*HH_{2Opreal}+Fm_{CO2preal}*HCO_{2preal}+Fm_{O2preal}*HO_{2preal}+Fm_{N2preal}*HN_{2preal}$$

$$\{ HH_{2Opreal}=ENTHALPY(H_2O;T=T_{3real})$$

$$Cp_{O2preal}=CP(O_2;T=T_{3real})$$

$$Cp_{N2preal}=CP(N_2;T=T_{3real})$$

$$HCO_{2preal}=ENTHALPY(CO_2;T=T_{3real})$$

$$HT_{otpreal}=Fm_{H2Opreal}*HH_{2Opreal}+Fm_{CO2preal}*HCO_{2preal}+Fm_{O2preal}*Cp_{O2preal}*T_{3real}+Fm_{N2preal}*Cp_{N2preal}*T_{3real}$$

$$\Delta H_{pHrT3real}=HT_{otreal}-HT_{otpreal}$$

{ CÁLCULOS COMPLEMENTARES CICLO - Verificação }

{ trabalho no compressor - W_{cp} }

{ propriedades do ar durante compressão - pontos [1] e [2] }

{ $CP_{1ar} = CP(Air; T=T[1])$

$CP_{2ar} = CP(Air; T=T[2])$

$CP_{ar} = (CP_{1ar} + CP_{2ar})/2$

$CV_{1ar} = CV(Air; T=T[1])$

$CV_{2ar} = CV(Air; T=T[2])$

$CV_{ar} = (CV_{1ar} + CV_{2ar})/2$ }

$Cp_{1O2} = CP(O2; T=T[1])$

$Cp_{1N2} = CP(N2; T=T[1])$

$Cp_{1H2O} = CP(H2O; T=T[1])$

$Cp_{1ar} = Fm_{O2r} * Cp_{1O2} + Fm_{N2r} * Cp_{1N2} + Fm_{H2Or} * Cp_{1H2O}$

$Cp_{2O2} = CP(O2; T=T[1])$

$Cp_{2N2} = CP(N2; T=T[1])$

$Cp_{2H2O} = CP(H2O; T=T[1])$

$Cp_{2ar} = Fm_{O2r} * Cp_{2O2} + Fm_{N2r} * Cp_{2N2} + Fm_{H2Or} * Cp_{2H2O}$

$CP_{ar} = (CP_{1ar} + CP_{2ar})/2$

$Cv_{1O2} = CV(O2; T=T[1])$

$Cv_{1N2} = CV(N2; T=T[1])$

$Cv_{1H2O} = CV(H2O; T=T[1])$

$Cv_{1ar} = Fm_{O2r} * Cv_{1O2} + Fm_{N2r} * Cv_{1N2} + Fm_{H2Or} * Cv_{1H2O}$

$Cv_{2O2} = CV(O2; T=T[1])$

$$Cv2N2=CV(N2;T=T[1])$$

$$Cv2H2O=CV(H2O;T=T[1])$$

$$Cv2ar=FmO2r*Cv2O2+FmN2r*Cv2N2+FmH2Or*Cv2H2O$$

$$CVar=(CV1ar+CV2ar)/2$$

$$kaar=CPar/CVar$$

$$Wcp=marc*CPar*(T[2]-T[1])$$

{propriedades após combustão - ponto [3]}

$$\{T[3]=T3real\}$$

$$P[3]=P[2]$$

{propriedades após turbina - ponto [4]}

{rendimento turbina - ntb}

$$ntb=0,85$$

{cálculo kgas}

$$Cp3H2O=CP(H2O;T=T3real)$$

$$Cp3O2=CP(O2;T=T3real)$$

$$Cp3N2=CP(N2;T=T3real)$$

$$Cp3CO2=CP(CO2;T=T3real)$$

$$CP3gas=FmH2Opreal*Cp3H2O+FmO2preal*Cp3O2+FmN2preal*Cp3N2+FmCO2preal*Cp3CO2$$

$$Cp4H2O=CP(H2O;T=T[4])$$

$$Cp4O2=CP(O2;T=T[4])$$

$$Cp4N2=CP(N2;T=T[4])$$

$$Cp4CO2=CP(CO2;T=T[4])$$

$$CP4gas=FmH2Opreal*Cp4H2O+FmO2preal*Cp4O2+FmN2preal*Cp4N2+FmCO2preal*Cp4CO2$$

$$CP_{gas}=(CP_{3gas}+CP_{4gas})/2$$

$$Cv_3H_2O=CV(H_2O;T=T_{3real})$$

$$Cv_3O_2=CV(O_2;T=T_{3real})$$

$$Cv_3N_2=CV(N_2;T=T_{3real})$$

$$Cv_3CO_2=CV(CO_2;T=T_{3real})$$

$$CV_{3gas}=FmH_2O_{preal}*Cv_3H_2O+FmO_2_{preal}*Cv_3O_2+FmN_2_{preal}*Cv_3N_2+FmCO_2_{preal}*Cv_3CO_2$$

$$Cv_4H_2O=CV(H_2O;T=T[4])$$

$$Cv_4O_2=CV(O_2;T=T[4])$$

$$Cv_4N_2=CV(N_2;T=T[4])$$

$$Cv_4CO_2=CV(CO_2;T=T[4])$$

$$CV_{4gas}=FmH_2O_{preal}*Cv_4H_2O+FmO_2_{preal}*Cv_4O_2+FmN_2_{preal}*Cv_4N_2+FmCO_2_{preal}*Cv_4CO_2$$

$$CV_{gas}=(CV_{3gas}+CV_{4gas})/2$$

$$k_{gas}=CP_{gas}/CV_{gas}$$

$$\{ \text{Cálculo } T_{4tradeoff} \text{ para } W_{líquido} = Pot[I] \}$$

$$T_{4tradeoff}=T[3]-(Pot[I]*1000+W_{cp})/((m_{arc}+m_c)*CP_{gas})$$

$$T[3]=T_{3real}$$

$$\{ \text{perda de calor na câmara } \Delta T_3 \}$$

$$\{ \Delta T_3=T_{3real}-T[3] \}$$

$$\Delta T_4=T_{4tradeoff}-T[4]$$

$$T_{4iso}=T[3]-(T[3]-T_{4tradeoff})/ntb$$

$$P[4]=P[1]$$

$$T_{4c}=T[3]*(P[4]/P[3])^{(k_{gas}-1)/k_{gas}}$$

$$ntb_{real} = -(T[3] - T_{4tradeoff}) / (T_{4c} - T[3])$$

{ fórmula para ntb - eficiência politrópica }

$$\{ T[4] = T[3] * (P[4]/P[3])^{(ntb * (k_{gas}-1)/k_{gas})} \}$$

{ trabalho turbina - W_{tb} }

$$W_{tb} = (m_{arc} + m_c) * C_{p_{gas}} * (T[3] - T_{4tradeoff})$$

$$W_{liquido} = W_{tb} - W_{cp}$$

{ CÁLCULO NO_x }

{ NO_x TÉRMICO }

$$\{ \text{Equação: } X_{NO_t} = A_1 * t * P[2]^{(1/2)} / (R * T_{3real}) * e^{(-k_{NO} / (R_u * T_{3real})) * n_{N_2p} * n_{O_2p}^{(1/2)}} \}$$

{ A_1 - constante - $\text{kJ}/(\text{s} \cdot \text{kPa}^{(1/2)} \cdot \text{kg}$ ou $\text{N}^{(1/2)} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$

t - tempo característico de 0,4 a 0,8 ms - s

$P[2]$ - pressão na câmara - kPa

R - constante dos gases para produtos - $\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$

T_{3est} - temperatura de chama na condição estequiométrica - K

k_{NO} - energia de ativação total Zeldovich - kJ/kgmol

R_u - constante universal dos gases - $8,31767 \text{ kJ}/\text{kgmol} \cdot \text{K}$

n_{N_2p} - fração molar de N_2 nos produtos

n_{O_2p} - fração molar de O_2 nos produtos }

$$\{t=0,0006\}$$

$$\{\text{Cálculo tempo representativo V84.2 - dado por: } tr=(V_c*P_c)/(mgases*R*T_c)\}$$

$$\{V_c - \text{volume da câmara - estimado tipo silo em } 2*3,25m^3$$

$$P_c - \text{pressão na câmara} = P[3]$$

$$mgases = m_{ar} + m_{comb}$$

$$R - \text{constante dos gases}$$

$$T_c - \text{temperatura da câmara} = T_{3real}\}$$

$$V_c=2*3,25$$

$$P_c=P[3]$$

$$mgases=m_c+m_{arc}$$

$$\{T_c=T_{3est}\}$$

$$\{T_c=2/3*T_{3est}+1/3*T_{3real}\}$$

$$T_c=T_{3real}$$

$$tr=(V_c*P_c)/(mgases*R*T_c)$$

$$\{\text{Massa Molecular Produtos}\}$$

$$M_p=F_{mH_2Opreal}*18+F_{mCO_2preal}*44+F_{mO_2preal}*32+F_{mN_2preal}*28$$

$$R_u=8,31767$$

$$R=R_u/M_p$$

$$k_{NO}=574667,13$$

$$\{\text{cálculo fração molar}\}$$

$$F_{nH_2Opreal}=n_{H_2Opreal}/n_{Totpreal}$$

$$F_{nCO_2preal}=n_{CO_2preal}/n_{Totpreal}$$

$$F_{nO_2preal}=n_{O_2preal}/n_{Totpreal}$$

$$F_{nN_2preal}=n_{N_2preal}/n_{Totpreal}$$

{Difusão - sub-escrito d}

{Pré-Mistura - sub-escrito pm}

$$A_{1d}=2,78 \cdot 10^{28}$$

$$A_{1pm}=3,32 \cdot 10^{27}$$

$$XNO_{td}=A_{1d} \cdot tr \cdot P_c^{(1/2)} / (R \cdot T_c) \cdot \exp(- (kNO / (R_u \cdot T_c))) \cdot F_{N2preal} \cdot F_{O2preal}^{(1/2)}$$

$$XNO_{tpm}=A_{1pm} \cdot tr \cdot P_c^{(1/2)} / (R \cdot T_c) \cdot \exp(- (kNO / (R_u \cdot T_c))) \cdot F_{N2preal} \cdot F_{O2preal}^{(1/2)}$$

{avaliação do peso de cada termo}

$$\{A_2=tr \cdot P_c^{(1/2)} / (R \cdot T_c)$$

$$A_3=\exp(- (kNO / (R_u \cdot T_c)))$$

$$A_4=F_{N2preal}$$

$$A_5=F_{O2preal}^{(1/2)}$$

{NOx ATIVO}

$$\{Equação: XNO_a=A_2 \cdot f(g) \cdot P[2]^{(1/2)} \cdot XNO\}$$

$$\{A_2 - \text{constante de conversão unidades} = 1/10,066 \text{ kPa}^{(1/2)} / \text{atm}^{(1/2)} = 0,09934$$

$f(g)$ - função empírica = 0,016 para misturas estquiométricas

$P[2]$ - pressão na câmara - kPa

XNO - fração total NO $XNO_t + XNO_a$

$$XNO_{ad}=(0,09934 \cdot 0,016 \cdot P[2]^{(1/2)} \cdot XNO_{td}) / (1 - 0,09934 \cdot 0,016 \cdot P[2]^{(1/2)})$$

$$XNO_d=XNO_{td}+XNO_{ad}$$

$$XNO_{apm}=(0,09934 \cdot 0,016 \cdot P[2]^{(1/2)} \cdot XNO_{tpm}) / (1 - 0,09934 \cdot 0,016 \cdot P[2]^{(1/2)})$$

$$XNO_{pm}=XNO_{tpm}+XNO_{apm}$$

APÊNDICE F – REGISTRO METEOROLÓGICO

83721	1997	83721	1997
97 612 1	192.0000	6.1800 288.1 4	2126.3 2789.3
97 612 2	198.0000	4.1200 288.1 4	1382.1 1824.6
97 612 3	198.0000	.0000 288.1 5	55.7 379.4
97 612 4	216.0000	4.1200 287.6 4	1381.9 1824.5
97 612 5	222.0000	1.0300 288.1 4	180.6 729.2
97 612 6	224.0000	2.0600 288.1 4	570.7 1039.6
97 612 7	248.0000	5.1500 288.1 4	1756.6 2309.3
97 612 8	220.0000	9.2700 288.1 4	3261.3 4252.3
97 612 9	190.0000	5.1500 288.1 4	1871.5 2401.4
97 61210	204.0000	5.1500 288.1 3	2070.8 2474.2
97 61211	211.0000	10.3000 290.9 3	3677.3 4759.0
97 61212	180.0000	10.3000 292.0 4	3648.9 4739.9
97 61213	153.0000	9.2700 293.1 4	3297.3 4274.6
97 61214	165.0000	4.1200 293.7 3	1985.7 1999.9
97 61215	131.0000	6.1800 295.4 4	2276.1 2905.7
97 61216	132.0000	5.1500 296.5 4	2403.0 2470.0
97 61217	99.0000	6.1800 295.9 4	2267.3 2898.8
97 61218	124.0000	3.0900 294.8 3	1957.1 1534.9
97 61219	124.0000	3.0900 293.1 4	1130.1 1455.4
97 61220	150.0000	3.0900 292.0 4	1776.2 1958.2
97 61221	151.0000	.0000 290.9 5	55.7 379.4
97 61222	236.0000	1.0300 289.8 6	56.6 385.9
97 61223	257.0000	2.0600 288.7 6	80.7 559.6
97 61224	294.0000	1.0300 288.1 6	56.6 385.9

Na primeira linha, o número 83721 representa o código da estação meteorológica, enquanto 1997 refere-se ao ano da medição.

Nas linhas subsequentes são informados 10 registros, que utilizando como exemplo a 2ª linha representam:

- 1° registro: 97 – ano
- 2° registro: 6 – mês
- 3° registro: 12 – dia
- 4° registro: 1 – hora
- 5° registro: 192.00 – ângulo da direção do vento (0° Norte – sentido horário)
- 6° registro: 6.18 – velocidade do vento (m/s)
- 7° registro: 288.1 – temperatura do ar (K)
- 8° registro: 4 – classe de estabilidade atmosférica (A=1,...F=6)
- 9° registro: 2126.3 – altura de mistura rural (m)
- 10° registro: 2789.3 – altura de mistura urbana (m)

APÊNDICE G – ARQUIVOS DE ENTRADA E SAÍDA DO MODELO SCREEN

Paulinia - REPLAN

P

198.600

40.0000

6.66000

10.0000

423.000

294.000

.000000

R

N

N

Y

1

Y

0.000000E+00

10.00,20000.00

N

N

N

N

05/14/02

20:00:08

*** SCREEN3 MODEL RUN ***
*** VERSION DATED 95250 ***

Paulinia - REPLAN

SIMPLE TERRAIN INPUTS:

SOURCE TYPE = POINT
EMISSION RATE (G/S) = 198.600
STACK HEIGHT (M) = 40.0000
STK INSIDE DIAM (M) = 6.6600
STK EXIT VELOCITY (M/S)= 10.0000
STK GAS EXIT TEMP (K) = 423.0000
AMBIENT AIR TEMP (K) = 294.0000
RECEPTOR HEIGHT (M) = .0000
URBAN/RURAL OPTION = RURAL
BUILDING HEIGHT (M) = .0000
MIN HORIZ BLDG DIM (M) = .0000
MAX HORIZ BLDG DIM (M) = .0000

BUOY. FLUX = 331.617 M**4/S**3; MOM. FLUX = 770.718 M**4/S**2.

*** FULL METEOROLOGY ***

*** SCREEN AUTOMATED DISTANCES ***

*** TERRAIN HEIGHT OF 0. M ABOVE STACK BASE USED FOR FOLLOWING DISTANCES ***

DIST	CONC		U10M	USTK	MIX HT	PLUME	SIGMA	SIGMA	
(M)	(UG/M**3)	STAB	(M/S)	(M/S)	(M)	HT (M)	Y (M)	Z (M)	DWASH

10.	.0000	1	1.0	1.1	1184.0	1183.04	13.75	13.42	NO
100.	.4650E-01	5	1.0	1.6	10000.0	215.21	42.41	42.11	NO
200.	1.677	5	1.0	1.6	10000.0	215.21	51.39	50.45	NO
300.	1.843	5	1.0	1.6	10000.0	215.21	52.83	50.81	NO
400.	2.035	5	1.0	1.6	10000.0	215.21	54.68	51.21	NO
500.	2.841	1	3.0	3.3	960.0	421.01	128.12	120.78	NO
600.	33.33	1	3.0	3.3	960.0	421.01	149.31	168.33	NO
700.	88.07	1	3.0	3.3	960.0	421.01	169.98	226.28	NO
800.	123.0	1	3.0	3.3	960.0	421.01	190.21	294.78	NO
900.	163.2	1	2.0	2.2	640.0	611.52	232.56	387.01	NO
1000.	193.1	1	2.0	2.2	640.0	611.52	253.32	476.02	NO
1100.	197.7	1	2.0	2.2	640.0	611.52	273.74	575.99	NO
1200.	189.9	1	2.0	2.2	640.0	611.52	293.84	686.99	NO

1300.	181.4	1	2.0	2.2	640.0	611.52	309.51	807.52	NO
1400.	173.0	1	2.0	2.2	640.0	611.52	324.68	939.44	NO
1500.	165.2	1	2.0	2.2	640.0	611.52	339.94	1082.98	NO
1600.	158.1	1	2.0	2.2	640.0	611.52	355.27	1238.12	NO
1700.	151.6	1	2.0	2.2	640.0	611.52	370.65	1404.86	NO
1800.	145.5	1	2.0	2.2	640.0	611.52	386.06	1583.23	NO
1900.	139.9	1	1.5	1.7	803.0	802.03	426.54	1779.09	NO
2000.	135.3	1	1.5	1.7	803.0	802.03	441.10	1980.22	NO
2100.	131.0	1	1.5	1.7	803.0	802.03	455.71	2193.17	NO
2200.	126.9	1	1.5	1.7	803.0	802.03	470.37	2417.98	NO
2300.	124.8	4	20.0	24.6	6400.0	76.58	145.94	56.79	NO
2400.	122.5	4	20.0	24.6	6400.0	76.58	151.62	58.26	NO
2500.	120.1	4	20.0	24.6	6400.0	76.58	157.27	59.72	NO
2600.	117.7	4	20.0	24.6	6400.0	76.58	162.90	61.16	NO
2700.	115.1	4	20.0	24.6	6400.0	76.58	168.51	62.58	NO
2800.	112.6	4	20.0	24.6	6400.0	76.58	174.10	63.98	NO
2900.	110.1	4	20.0	24.6	6400.0	76.58	179.67	65.36	NO
3000.	107.5	4	20.0	24.6	6400.0	76.58	185.22	66.74	NO
3500.	96.01	2	2.0	2.2	640.0	611.52	496.45	461.86	NO
4000.	94.59	2	2.0	2.2	640.0	611.52	552.02	526.17	NO
4500.	89.83	2	2.0	2.2	640.0	611.52	607.19	592.15	NO
5000.	83.97	2	2.0	2.2	640.0	611.52	661.93	659.48	NO
5500.	79.29	2	1.5	1.7	803.0	802.03	730.54	742.03	NO
6000.	75.20	2	1.5	1.7	803.0	802.03	783.36	810.22	NO
6500.	71.03	2	1.5	1.7	803.0	802.03	835.87	879.43	NO
7000.	67.08	2	1.5	1.7	803.0	802.03	888.04	949.52	NO
7500.	63.47	2	1.5	1.7	803.0	802.03	939.87	1020.39	NO
8000.	63.17	3	2.0	2.3	640.0	588.24	690.35	438.52	NO
8500.	65.11	5	1.5	2.4	10000.0	193.06	354.73	84.96	NO
9000.	67.52	5	1.5	2.4	10000.0	193.06	373.01	86.79	NO
9500.	69.68	5	1.5	2.4	10000.0	193.06	391.19	88.59	NO
10000.	72.08	5	1.0	1.6	10000.0	215.21	409.99	93.59	NO
15000.	84.22	5	1.0	1.6	10000.0	215.21	585.53	107.88	NO
20000.	86.48	5	1.0	1.6	10000.0	215.21	753.98	120.22	NO

MAXIMUM 1-HR CONCENTRATION AT OR BEYOND 10. M:

1073.	198.3	1	2.0	2.2	640.0	611.52	268.06	546.89	NO
-------	-------	---	-----	-----	-------	--------	--------	--------	----

DWASH= MEANS NO CALC MADE (CONC = 0.0)

DWASH=NO MEANS NO BUILDING DOWNWASH USED

DWASH=HS MEANS HUBER-SNYDER DOWNWASH USED

DWASH=SS MEANS SCHULMAN-SCIRE DOWNWASH USED

DWASH=NA MEANS DOWNWASH NOT APPLICABLE, $X < 3 \times LB$

* SUMMARY OF TERRAIN HEIGHTS ENTERED FOR *

* SIMPLE ELEVATED TERRAIN PROCEDURE *

TERRAIN	DISTANCE RANGE (M)
HT (M)	MINIMUM MAXIMUM

0. 10. 20000.

*** SUMMARY OF SCREEN MODEL RESULTS ***

CALCULATION	MAX CONC	DIST TO	TERRAIN
PROCEDURE	(UG/M**3)	MAX (M)	HT (M)
-----	-----	-----	-----
-			
SIMPLE TERRAIN	198.3	1073.	0.

** REMEMBER TO INCLUDE BACKGROUND CONCENTRATIONS **

APÊNDICE H – ARQUIVOS DE ENTRADA DO MODELO ISCST

CO STARTING

TITLEONE ISCST3/Paulinia
MODELOPT RURAL CONC TOXICS
AVERTIME 1
POLLUTID NOx
RUNORNOT RUN
EVENTFIL EVENTEXP.INP
ERRORFIL ERRORS.OUT
** VEGSTATE UNSTRESSED
** GASDEPRF 30.0 5.0 8.0
CO FINISHED

SO STARTING

LOCATION UTE	POINT	0.0	0.0	0.0
LOCATION REP	POINT	-500.0	1500.0	0.0
LOCATION RHO	POINT	0.0	-1500.0	0.0
LOCATION OTH	POINT	500.0	-6500.0	0.0
LOCATION PAUU	AREA	-3500.0	-3500.0	0.0
LOCATION PAUR	AREA	-5500.0	-5500.0	0.0
LOCATION EST1	AREA	-500.0	-6500.0	0.0
LOCATION EST11	AREA	-697.0	-6040.0	0.0
LOCATION EST12	AREA	-894.0	-5581.0	0.0
LOCATION EST13	AREA	-1091.0	-5121.0	0.0
LOCATION EST14	AREA	-1288.0	-4662.0	0.0
LOCATION EST15	AREA	-1485.0	-4202.0	0.0
LOCATION EST16	AREA	-1682.0	-3743.0	0.0
LOCATION EST17	AREA	-1879.0	-3283.0	0.0
LOCATION EST18	AREA	-2076.0	-2823.0	0.0
LOCATION EST19	AREA	-2273.0	-2364.0	0.0
LOCATION EST110	AREA	-2470.0	-1904.0	0.0
LOCATION EST111	AREA	-2667.0	-1445.0	0.0
LOCATION EST112	AREA	-2864.0	-985.0	0.0
LOCATION EST113	AREA	-3061.0	-525.0	0.0
LOCATION EST114	AREA	-3257.0	-66.0	0.0
LOCATION EST115	AREA	-3454.0	394.0	0.0
LOCATION EST2	AREA	-3500.0	500.0	0.0
LOCATION EST21	AREA	-3146.0	854.0	0.0
LOCATION EST22	AREA	-2793.0	1207.0	0.0
LOCATION EST23	AREA	-2439.0	1561.0	0.0
LOCATION EST24	AREA	-2086.0	1914.0	0.0
LOCATION EST25	AREA	-1732.0	2268.0	0.0
LOCATION EST3	AREA	-1500.0	2500.0	0.0
LOCATION EST31	AREA	-1777.0	2916.0	0.0
LOCATION EST32	AREA	-2055.0	3332.0	0.0
LOCATION EST33	AREA	-2332.0	3748.0	0.0
LOCATION EST34	AREA	-2609.0	4164.0	0.0
LOCATION EST35	AREA	-2887.0	4580.0	0.0
LOCATION EST36	AREA	-3164.0	4996.0	0.0

LOCATION	EST37	AREA	-3442.0	5412.0	0.0
LOCATION	CAN1	AREA	4500.0	2500.0	0.0
LOCATION	CAN2	AREA	-9500.0	4500.0	0.0
LOCATION	CAN3	AREA	-10500.0	-5500.0	0.0
LOCATION	CAN4	AREA	1500.0	-4500.0	0.0

** Point Source QS HS TS VS DS

** Parameters: ----- --- --- --- ---

SRCPARAM	UTE	32.82	38.1	370.	20.0	4.72
SRCPARAM	REP	198.61	40.0	423.	10.0	6.66
SRCPARAM	RHO	47.11	35.0	423.	10.0	3.25
SRCPARAM	OTH	31.41	30.0	443.	7.0	3.24

** Area Source QS HS XS YS angS

** Parameters: ----- --- --- --- ---

SRCPARAM	PAUU	0.000002210	0.5	2000.0	2000.0	0.0
SRCPARAM	PAUR	0.0000000540	0.5	7000.0	10000.0	0.0
SRCPARAM	EST1	0.000000061	0.5	250.0	500.0	-23.2
SRCPARAM	EST11	0.000000061	0.5	250.0	500.0	-23.2
SRCPARAM	EST12	0.000000061	0.5	250.0	500.0	-23.2
SRCPARAM	EST13	0.000000061	0.5	250.0	500.0	-23.2
SRCPARAM	EST14	0.000000061	0.5	250.0	500.0	-23.2
SRCPARAM	EST15	0.000000061	0.5	250.0	500.0	-23.2
SRCPARAM	EST16	0.000000061	0.5	250.0	500.0	-23.2
SRCPARAM	EST17	0.000000061	0.5	250.0	500.0	-23.2
SRCPARAM	EST18	0.000000061	0.5	250.0	500.0	-23.2
SRCPARAM	EST19	0.000000061	0.5	250.0	500.0	-23.2
SRCPARAM	EST110	0.000000061	0.5	250.0	500.0	-23.2
SRCPARAM	EST111	0.000000061	0.5	250.0	500.0	-23.2
SRCPARAM	EST112	0.000000061	0.5	250.0	500.0	-23.2
SRCPARAM	EST113	0.000000061	0.5	250.0	500.0	-23.2
SRCPARAM	EST114	0.000000061	0.5	250.0	500.0	-23.2
SRCPARAM	EST115	0.000000061	0.5	250.0	116.0	-23.2
SRCPARAM	EST2	0.000000061	0.5	250.0	500.0	45.0
SRCPARAM	EST21	0.000000061	0.5	250.0	500.0	45.0
SRCPARAM	EST22	0.000000061	0.5	250.0	500.0	45.0
SRCPARAM	EST23	0.000000061	0.5	250.0	500.0	45.0
SRCPARAM	EST24	0.000000061	0.5	250.0	500.0	45.0
SRCPARAM	EST25	0.000000061	0.5	250.0	328.0	45.0
SRCPARAM	EST3	0.000000061	0.5	250.0	500.0	-33.69
SRCPARAM	EST31	0.000000061	0.5	250.0	500.0	-33.69
SRCPARAM	EST32	0.000000061	0.5	250.0	500.0	-33.69
SRCPARAM	EST33	0.000000061	0.5	250.0	500.0	-33.69
SRCPARAM	EST34	0.000000061	0.5	250.0	500.0	-33.69
SRCPARAM	EST35	0.000000061	0.5	250.0	500.0	-33.69
SRCPARAM	EST36	0.000000061	0.5	250.0	500.0	-33.69
SRCPARAM	EST37	0.000000061	0.5	250.0	106.0	-33.69
SRCPARAM	CAN1	0.0000005936	3.0	4000.0	4000.0	0.0
SRCPARAM	CAN2	0.0000005936	3.0	4000.0	4000.0	0.0
SRCPARAM	CAN3	0.0000005936	3.0	4000.0	4000.0	0.0
SRCPARAM	CAN4	0.0000005936	3.0	2000.0	2000.0	0.0

** GASDEPOS STACK1 0.1509 1.00e3 8.0 0.0 4.0e-2
** DEPOUNIT 3.6E9 GRAM/SEC MICROGRAMS/M**2
SRCGROUP ALL
SO FINISHED

RE STARTING

GRIDCART CAR1 STA

XPNTS -12000. -11500. -11000. -10500. -10000. -9500.
XPNTS -9000. -8500. -8000. -7500. -7000. -6500.
XPNTS -6000. -5500. -5000. -4500. -4000. -3500.
XPNTS -3000. -2500. -2000. -1500. -1000. -500.
XPNTS 0. 500. 1000. 1500. 2000. 2500.
XPNTS 3000. 3500. 4000. 4500. 5000. 5500.
XPNTS 6000. 6500. 7000. 7500. 8000. 8500.
XPNTS 9000. 9500. 10000. 10500. 11000. 11500.
XPNTS 12000.
YPNTS 12000. 11500. 11000. 10500. 10000. 9500.
YPNTS 9000. 8500. 8000. 7500. 7000. 6500.
YPNTS 6000. 5500. 5000. 4500. 4000. 3500.
YPNTS 3000. 2500. 2000. 1500. 1000. 500.
YPNTS 0. -500. -1000. -1500. -2000. -2500.
YPNTS -3000. -3500. -4000. -4500. -5000. -5500.
YPNTS -6000. -6500. -7000. -7500. -8000. -8500.
YPNTS -9000. -9500. -10000. -10500. -11000. -11500.
YPNTS -12000.

GRIDCART CAR1 END

DISCCART -3000. -2500.
DISCCART -7000. 11000.
DISCCART -4000. 1000.
DISCCART 2500. -1500.

RE FINISHED

ME STARTING

INPUTFIL GASDPAUL.MET
ANEMHGHT 10 METERS
SURFDATA 83721 1997 PAL
UAIRDATA 83721 1997 PAL

ME FINISHED

OU STARTING

RECTABLE ALLAVE FIRST
MAXTABLE ALLAVE 10
DAYTABLE ALLAVE

OU FINISHED