

**ANTONIO GONÇALVES DO CURRAL**

**AVALIAÇÃO DE IMPACTO AMBIENTAL PRODUZIDO POR USINAS  
TERMELETRICAS COM ENFOQUE NA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA  
ESTUDO DE CASO**

**Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São  
Paulo para obtenção do Título de  
Mestre em Engenharia.**

**São Paulo  
2003**

**ANTONIO GONÇALVES DO CURRAL**

**AVALIAÇÃO DE IMPACTO AMBIENTAL PRODUZIDO POR USINAS  
TERMELÉTRICAS COM ENFOQUE NA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA  
ESTUDO DE CASO**

**Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São  
Paulo para obtenção do Título de  
Mestre em Engenharia.**

**Área de Concentração  
Engenharia Mecânica**

**Orientador:  
Prof. Doutor  
Jayme Pinto Ortiz**

**São Paulo  
2003**

“O conhecimento amplia a vida dos seres humanos.  
Conhecer é viver uma realidade que a ignorância  
impede desfrutar”.

A meus pais, esposa e filhos pela compreensão da  
privação de minha presença, em momentos  
importantes, durante a fase de busca destes novos  
conhecimentos.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, Prof. Dr. Jayme Pinto Ortiz, por propor um tema tão importante e oportuno; pela sua dedicação, presteza e incentivo.

Ao Prof. Dr. João Vicente de Assunção, pela atenção, apoio e valiosa colaboração no desenvolvimento do trabalho.

À Eng.<sup>a</sup> Lígia, da CETESB, pelas sugestões, críticas e informações fornecidas.

À minha esposa, Ana Maria, pela atenção e importante apoio na formatação final desta Dissertação.

A todos aqueles, que de alguma forma contribuíram para a conclusão deste trabalho.



## RESUMO

O presente trabalho avalia a poluição ambiental produzida por usinas termelétricas, com enfoque na poluição atmosférica, sendo desenvolvido através do Estudo de Caso de uma usina operando em ciclo combinado. A modelagem para a estimativa da qualidade do ar é efetuada com o modelo gaussiano ISC-ST – “Industrial Source Complex - Short Term” – versão 3, referendado pela “Environmental Protection Agency” dos Estados Unidos - USEPA. São feitas estimativas de taxas de emissão de poluentes, a partir dos fatores de emissão constantes no “Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume 1- Stationary Point and Areas Sources. Publication No. AP-42 da USEPA”. A caracterização do relevo da região de influência é efetuada através de arquivo topográfico, no formato ASCII, gerado a partir de plantas topográficas, divididas em quadriculas contendo as coordenadas cartesianas e a máxima altitude. Como dados meteorológicos, utilizam-se arquivos, no formato ASC II, obtidos de dados da estação meteorológica do Aeroporto de Congonhas (número 83780, da rede mundial de meteorologia), relativos aos anos de 1997 e 1998, compatíveis com os dados utilizados por empresa Consultora, em estudo de dispersão efetuado anteriormente. Da análise das curvas de isoconcentração para os diversos poluentes estudados são identificadas as regiões mais críticas, quanto à alteração da qualidade do ar. São analisadas as concentrações nos mesmos receptores discretos analisados pela Consultora. O trabalho é concluído através de uma análise crítica dos resultados, objetivando contribuir com a área acadêmica e com os órgãos ambientais.

## ABSTRACTS

The present work evaluates the environmental pollution produced by power plants, with focus in the atmospheric pollution, being developed through the Study of Case of a power plant operating in combined cycle. The simulation for the estimate of the air quality is performed with the gaussian model ISC-ST - " Industrial Source Complex " - " Short Term " - version 3, referenced by " Environmental Protection Agency " of the United States - USEPA. Estimates are done for the rates of pollutants emission, starting from the constant emission factors in the " Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume 1-Stationary Point and Areas Sources. Publication No. AP-42 of USEPA ". The relief's characterization of the influence area is made through topographical file, in the format ASCII, generated through topographical plants, divided in squares contends the Cartesians coordinates and the maximum altitude. Like meteorological data, files are used, in the format ASC II, obtained of data of the meteorological station in the Congonhas's Airport (number 83780, of the world net of meteorology), relative to the years of 1997 and 1998, compatible with the data used by the Consultant. Of the analysis of the same concentration curves for the several studied pollutants are identified the most critical areas, with relationship to the alteration of the air quality. The concentrations are analyzed in the same discreet receivers analyzed by the Consultant. The work is concluded through a critical analysis of the results; objectiving to contribute with the academic area and with the environment organs.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO DA LITERATURA .....	5
2.1. Matriz Energética .....	5
2.1.1. Conceitos Básicos .....	6
2.1.2. Matrizes Energéticas - Nacional e Mundial .....	8
2.2. Setor Elétrico – Panorama até 2004 .....	12
2.2.1. Investimentos .....	13
2.2.2. Oferta de Energia .....	14
2.2.3. Importação de Energia .....	15
2.2.4. Hidrelétricas .....	15
2.2.5. Termelétricas .....	16
2.2.5.1. Programa Prioritário de Termelétricidade – PPT .....	16
2.2.6. Competitividade das Usinas Termelétricas .....	20
2.3. Principais Configurações de Usinas Termelétricas .....	23
2.3.1. Turbinas a Gás Natural em Ciclo Simples ou Aberto .....	24
2.3.2. Turbinas a Gás Natural e a Vapor em Ciclo Combinado .....	25
2.3.2.1. Principais Características do Ciclo Combinado .....	27
2.3.2.2. Parâmetros Básicos das Usinas Termelétricas em Ciclo Combinado .....	29
2.3.3. Turbinas a Gás Natural e a Vapor em Ciclo Combinado com Cogeração .....	33
2.3.4. Combustível Alternativo ou de Emergência .....	37
2.4. Impactos Ambientais Produzidos por Usinas Termelétricas .....	38
2.4.1. Custos Sócio – Ambientais .....	39
2.4.2. Poluição do Ar .....	44
2.4.2.1. Padrões de Qualidade do Ar .....	46
2.4.2.2. Principais Poluentes do Ar Gerados por Usinas Termelétricas .....	50
2.4.2.3. Tecnologias de Controle das Emissões Atmosféricas das Usinas Termelétricas .....	62
2.4.3. Poluição das Águas .....	67

2.4.3.1. Principais Efluentes Líquidos Gerados por Usinas	
Termelétricas .....	68
2.4.4. Poluição do Solo – Resíduos Sólidos .....	71
2.4.4.1. Caracterização dos Resíduos Sólidos gerados nas	
Termelétricas .....	71
2.4.4.2. Disposição Final dos Resíduos Sólidos .....	72
2.4.5. Poluição Sonora – Ruído .....	74
2.4.5.1. Limites de Ruído .....	79
2.4.5.2. Principais Efeitos Causados pela Poluição Sonora .....	76
2.5. Legislação e Licenciamento Ambiental .....	77
2.5.1. Legislação .....	77
2.5.1.1. Poluição do Ar .....	79
2.5.1.2. Poluição das Águas .....	80
2.5.1.3. Poluição do Solo - Resíduos Sólidos .....	80
2.5.1.4. Poluição Sonora – Ruído .....	81
2.5.2. Licenciamento Ambiental .....	81
2.5.2.1. Licença Prévia – LP .....	84
2.5.2.2. Licença de Instalação – LI .....	87
2.5.2.3. Licença de Operação – LO .....	88
2.5.3. Aspectos Legais sobre a Proporção de NO <sub>2</sub> no NO <sub>x</sub> .....	89
2.6. Considerações sobre a Dispersão Atmosférica .....	92
2.6.1. Gradiente Vertical Adiabático de Temperatura .....	92
2.6.2. Regimes de Estabilidade Atmosférica .....	99
2.6.3. Classes de Estabilidade de Pasquill .....	102
2.6.4. Camada de Mistura .....	104
2.6.5. Formato da Pluma em Função da Estabilidade Atmosférica .....	107
2.6.6. Poluição de Fundo – Background .....	112
2.7. Modelagem de Processos de Dispersão Atmosférica .....	113
2.7.1. Classificação dos Modelos – EPA .....	116
2.7.1.1. Modelos Preferidos .....	116
2.7.1.2. Modelos Alternativos .....	117
2.7.2. Modelo “Industrial Source Complex – ISC” .....	117
2.7.2.1. Dados de Entrada .....	119

2.7.2.2. Dados de Saída .....	120
2.7.3. Equação Básica da Dispersão .....	121
2.7.4. Dispersão Gaussiana .....	126
2.7.4.1. Premissas no Estudo da Dispersão Gaussiana .....	126
2.7.4.2. Equação de Dispersão Gaussiana .....	127
2.7.4.3. Parâmetros da Equação Gaussiana .....	131
2.7.4.4. Elevação da Pluma .....	139
2.7.4.5. Variação da Concentração com o Período de Amostragem ..	142
3. ESTUDO DE CASO .....	145
3.1. Modelagem da Consultora .....	145
3.1.1. Inputs Usados na Simulação .....	146
3.1.1.1. Dados da Fonte .....	146
3.1.1.2. Receptores .....	147
3.1.1.3. Dados Meteorológicos .....	148
3.1.1.4. Relevo .....	149
3.1.2. Resultados da Consultora .....	149
3.2. Modelagem do Estudo de Caso .....	151
3.2.1. Inputs Usados na Simulação .....	151
3.2.1.1. Dados da Fonte .....	151
3.2.1.2. Receptores .....	152
3.2.1.3. Dados Meteorológicos .....	153
3.2.1.4. Relevo .....	154
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	156
4.1. Análise dos Resultados da Modelagem .....	168
4.1.1. Comparação Entre os Resultados da Consultora e do Estudo de Caso .....	168
4.1.1.1. Modelagem com Arquivo Meteorológico e “Dia Mais Crítico	169
4.1.1.2. Modelagem com terreno Plano e com Relevo Natural .....	170
4.1.2. Resultados das Simulações Comparativamente ao PNQA .....	173
4.1.3. Análise Comparativa dos Resultados das Modelagens Efetuadas com os Arquivos Meteorológicos de 1997 E 1998.....	176

4.1.4. Período de Ocorrência das Maiores Concentrações .....	177
4.1.5. Análise das Áreas mais Atingidas .....	180
4.1.6. Análise das Alturas de Mistura .....	183
4.2. Comentários ao Modelo – ISCST-3 .....	184
4.2.1. Hipóteses Estabelecidas no Equacionamento da Pluma	
Gaussiana .....	184
4.2.2. Precisão e Incertezas Envolvidas na Modelagem .....	186
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	190
6. ANEXOS .....	192
ANEXO -I Relação de Termelétricas Prioritárias e Emergenciais .....	192
ANEXO -II Cálculo das Taxas de Emissão com base no EPA –AP 42 ....	195
ANEXO -III Resultados das Simulações .....	204
7. LISTA DE REFERÊNCIAS .....	212

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Centros de transformação de energia primária em secundária.....	8
Figura 2 - Consumo Mundial de Energia Primária em Toneladas de Óleo Equivalente - (1998).....	9
Figura 3 - Consumo Nacional de Energia Primária em Toneladas de Óleo Equivalente - (1998).....	10
Figura 4 - Gráfico comparativo do consumo mundial e nacional de Energia Primária em Toneladas de Óleo Equivalente - TOE (1998).....	11
Figura 5 - Distribuição das Termelétricas Prioritárias por Estado.....	19
Figura 6 - Distribuição das Termelétricas Emergenciais por Estado.....	19
Figura 7 - Esquema básico de uma turbina a gás operando em ciclo simples ou aberto.....	25
Figura 8 - Esquema típico de um Ciclo Combinado.....	26
Figura 9 - Esquema típico de um Ciclo Combinado com Sistema de Cogeração.....	35
Figura 10 - Esquema para valoração monetária dos impactos ambientais.....	42
Figura 11 - Atividades de Licenciamento Ambiental – Fatores condicionantes.....	84
Figura 12 - Etapas do Estudo de Impacto Ambiental – EIA.....	85
Figura 13 - Camadas e estratificação térmica da atmosfera.....	95
Figura 14 - Esquema de “parcela” de ar ascendente.....	96
Figura 15 - Fundamentação do critério de estabilidade atmosférica.....	100
Figura 16 - Representação do gradiente adiabático e do gradiente atmosférico.....	101
Figura 17 - Relação entre o gradiente de temperatura da atmosfera e sua estabilidade.....	101

Figura 18 - Classe de estabilidade NEUTRA (D).....	104
Figura 19 - Perfis de temperatura da atmosfera e respectivos formatos da pluma emitida por uma chaminé. ....	111
Figura 20 - Fluxograma de metodologia de análise de instalação de uma nova usina termelétrica considerando a poluição de fundo.....	113
Figura 21 - Macro estrutura de um Modelo de Dispersão.....	114
Figura 22 - Sistema de coordenadas da pluma de dispersão.....	128
Figura 23 - Perfil vertical da pluma de dispersão.....	129
Figura 24 - Efeitos da dispersão na ocorrência de inversão térmica.....	131
Figura 25 - Coeficiente de Dispersão Horizontal “ $\sigma_y$ ” em Função da Distância à Fonte.....	135
Figura 26 - Coeficiente de Dispersão Vertical “ $\sigma_z$ ” em Função da Distância à Fonte. ....	136
Figura 27 - Resultados da modelagem do NO <sub>x</sub> nos receptores genéricos, comparativamente ao PNQA – “1º Maior Valor – 1 hora”.....	158
Figura 28 - Resultados da modelagem do NO <sub>x</sub> nos receptores genéricos, comparativamente ao PNQA – “Média de 24 horas”.....	158
Figura 29 - Resultados da modelagem do NO <sub>x</sub> nos receptores genéricos, comparativamente ao PNQA – “Média Anual”.....	159
Figura 30 - Resultados da modelagem do CO nos receptores genéricos, comparativamente ao PNQA – “1º Maior Valor – 1 hora”.....	159
Figura 31 - Resultados da modelagem do SO <sub>2</sub> nos receptores genéricos, comparativamente ao PNQA – “Média de 24 horas”.....	160
Figura 32 - Resultados da modelagem do PTS nos receptores genéricos, comparativamente ao PNQA – “Média de 24 horas”.....	160



Figura 33 - Resultados da modelagem do VOC nos receptores genéricos, comparativamente ao PNQA – “1º Maior Valor – 1 hora)”.....	161
Figura 34 - Resultados da modelagem do TOC nos receptores genéricos, comparativamente ao PNQA – “Média de 24 horas”.....	161
Figura 35 - Resultados da modelagem do NOx nos receptores discretos, comparativamente ao PNQA – “1º Maior Valor – 1 hora”.....	162
Figura 36 - Resultados da modelagem do CO nos receptores discretos, comparativamente ao PNQA – “1º Maior Valor – 1 hora”.....	162
Figura 37 - Resultados da modelagem do SO <sub>2</sub> nos receptores discretos, comparativamente ao PNQA – “Média de 24 horas”.....	163
Figura 38 - Resultados da modelagem do PTS nos receptores discretos, comparativamente ao PNQA – “Média de 24 horas”.....	163
Figura 39 - Resultados da modelagem do VOC nos receptores discretos, comparativamente ao PNQA – “1º Maior Valor – 1 hora”.....	164
Figura 40 - Resultados da modelagem do TOC nos receptores discretos, comparativamente ao PNQA – “1º Maior Valor – 3 horas”.....	164
Figura 41 - Resultado de todos os poluentes no receptor SESC Interlagos .....	165
Figura 42 - Curvas de Iso-concentração para o NOx, relevo plano, arq. met.1997....	166
Figura 43 - NOx: Plotagem de curvas de iso-concentração sobre mapa topográfico, relevo natural, arq. met. 1997.....	167
Figura 44 - Resultado das simulações do Estudo de Caso, para NOx em topografia plana, arq.met.1997 e corresp. Resultados utilizando-se relevo, num mesmo receptor.....	171
Figura 45 - Resultado das simulações do Estudo de Caso, para NOx em topografia com relevo, arq.met.1997 e corresp. Resultados utilizando-se relevo, num mesmo receptor.....	171

Figura 46 - Resultado das simulações do Estudo de Caso, para NOx em topografia plana, arq.met.1998 e corresp. Resultados utilizando-se relevo, num mesmo receptor.....	172
Figura 47 - Resultado das simulações do Estudo de Caso, para NOx em topografia com relevo, arq.met.1998 e corresp. Resultados utilizando-se relevo, num mesmo receptor.....	172
Figura 48 - Distribuição geográfica dos pontos de amostragem – “1º Maior Valor – 1 hora” do poluente NOx, para todas as modelagens efetuadas pela Consultora e Estudo de Caso.....	181

## LISTA DE TABELAS

Tabela I	Consumo Mundial de Energia Primária em Toneladas de Óleo Equivalente - (1998).....	9
Tabela II	Consumo Nacional de Energia Primária em Toneladas de Óleo Equivalente - (1998).....	10
Tabela III	Previsão de Investimentos no setor elétrico no período 2001 - 2004.....	13
Tabela IV	Oferta de energia elétrica prevista para o período 2001 - 2004.....	14
Tabela V	Evolução da potência instalada, no período 2001 - 2004.....	14
Tabela VI	Necessidades de importação de energia no período 2001 - 2004.....	15
Tabela VII	Usinas hidroelétricas constantes do Programa Estratégico de Aumento da Oferta de Energia Elétrica , período 2001-2004.....	16
Tabela VIII	Valores normativos para as fontes de geração de energia elétrica disponíveis no país.....	21
Tabela IX	Comparação de investimentos para diferentes alternativas de geração elétrica.....	22
Tabela X	Tipos, conceitos e exemplos de custos sócio-ambientais das termelétricas.....	43
Tabela XI	Padrões Nacionais de Qualidade do Ar - Resolução CONAMA N° 3, de 28/06/90.....	49
Tabela XII	Critérios para episódios agudos de poluição do Ar - Resolução CONAMA N° 3, de 28/06/90.....	50
Tabela XIII	Padrões Nacionais de Qualidade do Ar dos USA.....	51

Tabela XIV	Porcentagem de abatimento de NO <sub>x</sub> para diversas técnicas de redução.....	66
Tabela XV	Limites de ruído para ambientes externos estabelecidos pela NBR 10151.....	75
Tabela XVI	Limites de ruído para ambientes de trabalho das termelétricas.....	75
Tabela XVII	Valores de Concentrações horárias de NO <sub>x</sub> e NO <sub>2</sub> ; e correspondentes valores de $\alpha$ , nos locais de amostragem da CETESB.....	93
Tabela XVIII	Valores de $\alpha$ médios dos municípios e média geral dos municípios, nos locais de amostragem da CETESB.....	94
Tabela XIX	Classes de estabilidade de Pasquill.....	103
Tabela XX	Inter-relacionamento, de Pasquill & Turner, entre os parâmetros determinantes da classe de estabilidade atmosférica.....	103
Tabela XXI	Valores do expoente "p" do perfil de velocidades do vento, função da categoria de estabilidade atmosférica.....	133
Tabela XXII	Parâmetros utilizados para o cálculo de " $\sigma_y$ " - Zona Rural.....	134
Tabela XXIII	Equações de Briggs McElroy/Pooler, para o cálculo de " $\sigma_y$ " - Zona Urbana.....	137
Tabela XXIV	Equações de Briggs - McElroy/Pooler, para o cálculo de " $\sigma_z$ " - Zona Urbana.....	137
Tabela XXV	Parâmetros utilizados para o cálculo de " $\sigma_z$ " - Zona Rural.....	138
Tabela XXVI	Variação da concentração do poluente com o tempo de amostragem.....	143
Tabela XXVII	Relações de Hino entre a máxima concentração em diferentes períodos de amostragem com a máxima concentração ocorrida em uma hora.....	143

Tabela XXVIII	Parâmetros de escoamento dos gases e dimensões físicas das chaminés.....	146
Tabela XXIX	Taxas de emissão dos poluentes, sem sistema de controle.....	147
Tabela XXX	Dados Meteorológicos utilizados pela Consultora para compor o “dia mais crítico” para a dispersão atmosférica em sua modelagem.....	148
Tabela XXXI	Resultados das concentrações de NO <sub>x</sub> , para receptores genéricos.....	149
Tabela XXXII	Resultados das concentrações de NO <sub>x</sub> nos receptores discretos.....	149
Tabela XXXIII	Resultados das concentrações de CO nos receptores genéricos.....	150
Tabela XXXIV	Resultados das concentrações de CO nos receptores discretos.....	150
Tabela XXXV	Resultados das concentrações dos Hidrocarbonetos (TOC) nos receptores genéricos.....	150
Tabela XXXVI	Resultados das concentrações de Hidrocarbonetos (TOC) nos receptores discretos.....	150
Tabela XXXVII	Taxas de emissão utilizadas na modelagem do Estudo de Caso.....	152
Tabela XXXVIII	Coordenadas dos receptores discretos.....	153
Tabela XXXIX	Primeiras 24 horas do arquivo meteorológico do ano de 1997 - Congonhas.....	153
Tabela XL	Resultados das modelagens do Estudo de Caso.....	157
Tabela XLI	Resultados comparativos de simulações com dados meteorológicos do “dia mais crítico” e com arq.met.97/98.....	170
Tabela XLII	Distribuição percentual dos resultados dos arq. met. 1997 e 1998 em função dos períodos de amostragem.....	176

Tabela XLIII	Distribuição percentual dos resultados de NOx ref. aos arq. met. 1997 e 1998 em função do período de amostragem.....	177
Tabela XLIV	Período do ano (data e horário) em que ocorreram os “1 <sup>os</sup> Maiores Valores – 1 hora” para o NOx e CO.....	179
Tabela XLV	Período do ano (data e horário) em que ocorreram os “1 <sup>a</sup> Maior Média – 8 horas” para o CO e “1 <sup>a</sup> maior média – 3 horas” para o TOC.....	180
Tabela XLVI	Locais atingidos pelas maiores concentrações de NOx, para as amostragens de “1 <sup>o</sup> Maior Valor – 1 hora”.....	182
Tabela XLVII	Quadro comparativo de parâmetros meteorológicos.....	183

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	– Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	– Agência Nacional de Energia Elétrica
AP-42	– Compilation of Air Pollutant Emission Factors
BNDES	– Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CETESB	– Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CNPE	– Conselho Nacional de Política Energética
CO	– Monóxido de Carbono
COMGÁS	– Companhia de Gás de São Paulo
CONAMA	– Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONSEMA	– Conselho Estadual do Meio Ambiente
EEUU	– Estados Unidos da América
EIA	– Estudo de Impacto Ambiental
EPA	– United States Environmental Protection Agency
GASBOL	– Gasoduto Bolívia - Brasil
GCE	– Câmara de Gestão da Crise de Energia
IBAMA	– Instituto Brasileiro do Meio Ambiente
ISC3	– Industrial Source Complex – Versão 3
ISC-ST	– Industrial Source Complex – Short Term
LP	– Licença Prévia
LI	– Licença de Instalação
LO	– Licença de Operação
MCE	– Memorial de Caracterização do Empreendimento
MME	– Ministério das Minas e Energia
MP	– Material Particulado
NO <sub>x</sub>	– Óxidos de Nitrogênio
PAE	– Plano de Ação de Emergência
PBA	– Projeto Básico Ambiental
PGR	– Plano de Gerenciamento de Riscos
PNQA	– Padrões Nacionais de Qualidade do Ar
ppm	– Partes por milhão

PPT	– Programa Prioritário de Termelétricidade
PTS	– Partículas Totais em Suspensão
RIMA	– Relatório de Impacto Ambiental
SCR	– Selective Catalytic Redutction
SNCR	– Selective Non-Catalytic Redutction
SO <sub>2</sub>	– Dióxido de Enxofre
TOC	– Compostos Orgânicos Totais
TOE	– Toneladas de Óleo Equivalente
USEPA	– United States Environmental Protection Agency
VOC	– Compostos Orgânicos Voláteis



## LISTA DE SÍMBOLOS

$C$	– Concentração do poluente do ar, em massa por volume, no ponto $(x,y,z)$
$C_p$	– Calor específico a pressão constante, do gás exausto
$E$	– Emissão de um determinado poluente, por uma determinada fonte de coordenadas $(x,y,z)$ , no tempo "t"
$g$	– Aceleração da gravidade
$h_1$	– Entalpia específica da água de alimentação da caldeira recuperadora
$h_2$	– Entalpia específica do vapor
$H$	– Altura efetiva da chaminé
$K_x$	– Coeficiente de difusividade na direção x
$K_y$	– Coeficiente de difusividade na direção y
$K_z$	– Coeficiente de difusividade na direção z
$K_1$	– Coeficiente de deposição seca
$K_2$	– Coeficiente de deposição úmida
$L$	– Altura da camada de inversão
$M_a$	– Peso Molecular do ar
$m_{exh}$	– Vazão mássica de gás exausto
$m_{HRSG}$	– Vazão mássica de combustível para a caldeira recuperadora de calor (quando houver queima suplementar)
$m_{TG}$	– Vazão mássica de combustível para a turbina a gás
$m_{VAPOR}$	– Vazão mássica de vapor produzido na caldeira recuperadora
$\eta_{CC}$	– Eficiência térmica global da planta de ciclo combinado
$\eta_G$	– Eficiência térmica global do Sistema de Cogeração
$PCI$	– Poder calorífico inferior do combustível (admite-se que o mesmo combustível está sendo fornecido para a turbina a gás e a caldeira recuperadora)
$P_E$	– Potência elétrica gerada
$P_{TG}$	– Potência produzida pelo turbogerador a gás

$P_{TV}$	-	Potência produzida pelo turbogerador a vapor
$Q_c$	-	Energia térmica obtida a partir da queima do combustível
$Q_{HRSG}$	-	Calor injetado na caldeira de recuperação (queima suplementar)
$Q_{TG}$	-	Calor injetado na turbina a gás
$Q$	-	Vazão em massa do poluente, na saída da chaminé
$Q(C_1, C_2, \dots, C_q)$	-	Função que representa os "q" poluentes passíveis de sofrerem reações químicas.
$\sigma_Y$	-	Coefficiente de dispersão na direção (Y) transversal ao deslocamento da pluma
$\sigma_Z$	-	Coefficiente de dispersão na direção (Z), vertical ao deslocamento da pluma
$\rho$	-	Densidade do ar
$R$	-	Constante universal dos gases
$T_a$	-	Temperatura ambiente do ar
$T_1$	-	Temperatura do gás à saída da turbina a gás
$T_2$	-	Temperatura do gás na saída da caldeira (chaminé)
$u$	-	Velocidade instantânea do vento na direção x
$U$	-	Veloc. média do vento, horiz., na altura de lançamento
$X$	-	Distância da fonte ao receptor, na direção do vento
$v$	-	Velocidade instantânea do vento na direção y
$w$	-	Velocidade instantânea do vento na direção z
$\Gamma$	-	Gradiente adiabático de temperatura
$U$	-	Veloc. média do vento, horiz., na altura de lançamento
$H$	-	altura efetiva da chaminé
$\sigma_y$	-	Coefic. de dispersão horizontal (desvio padrão da distrib. da concentração, na direção "y", à distância "x")
$\sigma_z$	-	Coefic. de dispersão vertical (desvio padrão da distrib. da concentração, na direção "z", à distância "x")
$X$	-	Distância da fonte ao receptor, na direção do vento

## 1. INTRODUÇÃO

A indústria do gás natural nasceu com a indústria do petróleo, na segunda metade do século XIX, mas só veio a tornar-se relevante neste século. Seu desenvolvimento deu-se inicialmente nos Estados Unidos, onde a relativa proximidade entre os campos produtores de hidrocarbonetos e a infra-estrutura existente para a distribuição de gás de rua permitiu dar viabilidade econômica ao gás natural descoberto durante as campanhas que buscavam encontrar petróleo.

Como consequência, o gás natural vem ocupando parcela crescente da matriz energética mundial. Na apresentação do Balanço Energético Nacional efetuado pelo MME -Ministério das Minas e Energia em 1998, o gás natural na matriz energética mundial, corresponde a 23,66%; enquanto que no Brasil, dado ao seu potencial, a participação do gás natural ainda é pequena, apenas 2,84%, devendo nos próximos anos, segundo estimativas do governo, ser ampliada gradualmente, até alcançar cerca de 12% em 2010.

A mudança na estrutura tradicional do mercado termelétrico tem sido fortemente induzida pelas crescentes restrições ambientais ao uso do carvão, especialmente nos países industrializados, onde a infra-estrutura de transporte do gás natural já está desenvolvida; bem como nos países em desenvolvimento que se encontram implantando tal infra-estrutura, como é o caso do Brasil. Com efeito, a menor intensidade nas emissões de dióxido de carbono é recorrentemente apontada como a principal vantagem competitiva do gás natural quando comparado com o carvão, que assim vai se tornando praticamente a única fonte primária economicamente viável para a geração térmica de energia elétrica, já que a energia nuclear não se mostrou ainda capaz de responder às críticas dos ambientalistas e as outras fontes alternativas estão longe da viabilidade econômica.

A partir da implantação do Gasoduto Bolívia-Brasil (GASBOL), foram feitos vários Estudos de Viabilidade Técnica e Econômica para implantação de Usinas Termelétricas em pontos estratégicos do País, principalmente no Estado de São Paulo, dada à sua característica fortemente industrial. Estes Estudos indicaram como viáveis uma série de Usinas Termelétricas, seja para uso privado, como geradora de energia

para o processo produtivo de uma determinada indústria e venda do excedente de energia para as Concessionárias; seja como complemento de capacidade das Concessionárias para geração em pontos específicos, cuja demanda é maior que a oferta.

Além disso, o País vive uma crise energética e o governo empenha-se em solucionar o problema no curto prazo; tendo então as termelétricas, papel fundamental. Antes da eclosão desta crise, o governo criou o Programa Prioritário de Termelétricidade – PPT. Posteriormente, a Câmara de Gestão da Crise de Energia Elétrica – GCE, criou o Programa Estratégico de Aumento da Oferta de Energia Elétrica, o qual juntamente com o PPT, tem planejamento de construção de 98 usinas termelétricas no período 2001 a 2004, totalizando 11.594 MW.

Por outro lado, há fortes críticas por parte de vários segmentos da sociedade, questionando a implantação destas usinas termelétricas, sob vários aspectos: dependência externa do combustível (segurança e balanço de pagamentos), localização, transferência de tecnologia, utilização de água de mananciais considerados escassos e principalmente quanto aos aspectos ambientais. Fatos recentes, ocorridos em diversas Audiências Públicas, indicam que, sem uma adequada comunicação com os vários níveis da sociedade, haverá uma grande dificuldade na viabilização dos empreendimentos termelétricos.

Diferentemente das hidrelétricas, as usinas termelétricas, praticamente, não produzem impactos ambientais na fase de construção. Ao iniciarem a operação, começam a produzir ruído e efluentes industriais lançados à atmosfera, nos cursos d'água e no solo, em concentrações que dependem das características do combustível empregado, da tecnologia de controle ambiental adotada e do fator de carga médio da usina. A capacidade de absorção ou dispersão das emissões da usina, pelo meio ambiente onde a mesma se insere, determinará os impactos ambientais que o empreendimento irá produzir ao longo de sua vida útil.

No caso das usinas termelétricas, a poluição atmosférica é a mais crítica. No Estado de São Paulo, a CETESB, solicita que os Estudos de Impacto Ambiental – EIA sejam efetuados considerando-se os seguintes poluentes: óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>),

monóxido de carbono (CO), dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), material particulado (MP), compostos orgânicos voláteis (VOC) e compostos orgânicos totais (TOC-Hidrocarbonetos).

Uma reclamação quase unânime, dos técnicos que participaram do Workshop-Geração Térmica a Gás Natural, ocorrido em Porto Alegre, no período de 25 a 28/06/01, e que integraram o Grupo de Trabalho da Qualidade do Ar, foi o baixo grau de qualidade de boa parte dos Estudos de Impacto Ambiental-EIA's apresentados por empresas de consultoria, o que pode ser um indicativo da falta de treinamento e experiência dos profissionais que prestam consultoria aos empreendedores. Além disso, o Grupo identificou também, que em algumas regiões do país, determinados órgãos ambientais precisam ter pessoal técnico qualificado, com treinamento na área de modelagem de dispersão atmosférica.

Com base neste cenário, este trabalho tem como objetivo, através de um Estudo de Caso, a abordagem dos impactos ambientais produzidos por usinas termelétricas, com enfoque na poluição atmosférica.

O caso selecionado é o da Usina Termelétrica de Piratininga, em São Paulo, sob a designação de unidades 5 e 6, uma vez que as unidades de 1 a 4, já existentes, operam com óleo combustível. Cada uma destas novas unidades, com potência nominal de 450 MW, é composta por: duas turbinas a gás, dois geradores de turbinas a gás, duas caldeiras de recuperação, uma turbina a vapor operando em sistema de ciclo combinado, um gerador de turbina a vapor e duas chaminés.

Para este empreendimento, a ELETROPAULO – Eletricidade de São Paulo S/A, ex-proprietária da Termelétrica, contratou a realização de Estudo de Dispersão dos Poluentes junto à empresa de consultoria MAIN Engenharia S/A, que utilizou para a simulação da concentração dos mesmos, o modelo ISC-ST – “Industrial Source Complex”- “Short Term” – versão 3, referendado pela “Environmental Protection Agency” dos Estados Unidos - USEPA. Este estudo, efetuado somente para os poluentes NO<sub>x</sub>, CO e TOC (hidrocarbonetos), considerou o relevo plano e para dados meteorológicos foi utilizado um dia hipotético, denominado “dia mais crítico”, o qual foi baseado em informações de relatórios de qualidade do ar da CETESB.

A modelagem do Estudo de Caso foi efetuada utilizando-se os mesmos dados e modelo utilizados pela Consultora, objetivando permitir uma análise crítica dos resultados. Com relação às taxas de emissão dos demais 3 poluentes (SO<sub>2</sub>; MP e VOC), solicitados pela CETESB e não modelados pela Consultora, foram feitas estimativas das mesmas, a partir dos fatores de emissão constantes no “Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume 1-Stationary Point and Areas Sources. Publication No. AP-42 da USEPA”.

Como dados meteorológicos, no Estudo de Caso foram utilizados os da Estação de Amostragem da CETESB no Aeroporto de Congonhas, relativos aos anos de 1997 e 1998, compatíveis com os utilizados pela Consultora. Relativamente ao relevo, considerando-se que a chaminé está localizada numa cota de 724m, a sua altura é de 80m; e que na área de influência da termelétrica encontram-se pontos com cotas superiores a 850m, a modelagem do Estudo de Caso foi efetuada considerando-se terreno complexo, isto é, o relevo natural.

Fundamentalmente, este trabalho objetiva, através de um Estudo de Caso, a avaliação da poluição atmosférica causada pelos poluentes emitidos por usinas termelétricas. Este Estudo tem como base a modelagem efetuada com o modelo ISC3, referenciado pela USEPA; e a correspondente análise crítica dos resultados desta modelagem, principalmente, quanto aos Padrões Nacionais de Qualidade do Ar – PNQA; e aos resultados obtidos pela Consultora, cuja modelagem foi efetuada considerando terreno plano e um hipotético “dia mais crítico”; enquanto que no Estudo de Caso utiliza-se o relevo natural e os arquivos meteorológicos de 1997 e 1998.

## **2. REVISÃO DA LITERATURA**

### **2.1. Matriz Energética**

A elaboração da Matriz Energética Nacional é parte de um processo mais global de planejamento estratégico para o País que envolve a Sociedade e, através dos poderes constituídos, o Estado. A Matriz é um instrumento do planejamento energético integrado na área de energia que, por sua vez, está ligado ao planejamento estratégico do País.

A Matriz Energética Nacional e as Matrizes Regionais, assim como os Planos Setoriais são os principais instrumentos de explicitação dessa política, que deve se harmonizar com as Políticas Social e Econômica do Governo.

A Matriz Energética deve levar em conta os planos de investimentos e as diretrizes governamentais para os setores Industrial, Transporte e Agrícola que, juntamente com o setor Residencial, são os setores principais no uso da energia. Devem ser considerados ainda os cenários internacional e regional e suas configurações no âmbito global do país. É ainda necessário ter em conta os aspectos tecnológicos que condicionam o uso e a produção de energia no presente e no futuro, a médio e longo prazo, além do impacto ambiental de sua produção e uso no curto, médio e longo prazo.

No caso do Setor elétrico a Matriz Energética Nacional deverá fornecer às empresas do Setor as perspectivas de demanda de eletricidade por setores de consumo, e futuramente por região, em seus usos específicos e nos usos em que estará em competição com outros energéticos. Deve-se assinalar que num sistema em que a produção é predominantemente hídrica, e sujeito a uma maior rigidez e dependência do regime de chuvas, as alternativas de uso, entre eletricidade e outro energético, são também um importante fator a ser considerado do ponto de vista de regulação do mercado. Igualmente a introdução de uma maior base térmica e uma maior flexibilidade na comercialização aumentam as perspectivas do comércio de calor secundário e de energia elétrica de autoprodutores.

Para o setor elétrico foi criado o Comitê Coordenador do Planejamento da Expansão dos Sistemas Elétricos - CCPE (Portarias MME 150 e 485 de 1999) com o objetivo, entre outros, de orientar as ações de governo para assegurar o fornecimento de energia nos níveis de qualidade e quantidade demandados pela sociedade, em consonância com a Política Energética Nacional, emanada do CNPE.

O planejamento energético integrado, cujo objetivo é estabelecer a política energética está, pois, sob a responsabilidade executiva do MME, seja por suas funções precípuas no âmbito de Minas e Energia, seja por seu papel como Secretaria Executiva do CNPE. A nova realidade do setor impõe que esse seja um planejamento aberto e participativo e onde seja preservado o aspecto de competição entre as empresas e entre os energéticos.

### **2.1.1. Conceitos Básicos**

Para um melhor entendimento dos balanços energéticos efetuados pelo governo ou demais entidades públicas ou privadas, é importante a abordagem de alguns conceitos básicos.

Por **energia primária** entendem-se aquelas fontes providas pela natureza na sua forma direta, como o petróleo, gás natural, carvão mineral, energia hidráulica, lenha, etc.

A maior parcela da energia primária é consumida (transformada) nos **Centros de Transformação** (refinarias de petróleo, plantas de gás natural, coquearias, usinas hidrelétricas, etc.), onde é convertida em fontes de **energia secundária** (óleo diesel, gasolina, coque de carvão mineral, eletricidade, etc.), com as respectivas perdas de energia, inerentes ao processo de transformação.

A outra parcela de energia primária é consumida diretamente nos diversos setores da economia, sendo este consumo designado por **consumo final**. Exemplos: consumo de lenha para cocção de alimentos, consumo de carvão vapor em fornos e caldeiras na indústria, etc.

Com a energia secundária, também acontece o mesmo, sendo que a maior parcela vai diretamente para o consumo final nos setores da economia e a outra vai para os



Centros de Transformação, onde é convertida em outras formas de energia secundária. Exemplos: óleo combustível em eletricidade, nafta em gás canalizado, etc.

O **consumo total** de cada fonte de energia primária e de energia secundária está representado, portanto, pela soma de **energia transformada** com a energia que foi para **consumo final**.

**Consumo Final de Energia** é a quantidade de energia consumida pelos diversos setores da economia, para atender às necessidades dos diferentes usos, como calor, força motriz, iluminação, etc.. Não inclui nenhuma quantidade de energia que seja utilizada como matéria-prima para produção de outra forma de energia.

É de se destacar, ainda, que o **consumo final** de fontes primárias e secundárias se desagrega em **energético e não-energético**, sendo que o consumo final energético abrange diversos setores da economia, tais como: o próprio setor energético, o residencial, comercial, público, agropecuário, transporte e industrial. Por sua vez, o setor de transporte é desagregado em: rodoviário, ferroviário, aéreo e hidroviário e o setor industrial em: cimento, ferro-gusa e aço, ferro-ligas, mineração / pelotização, não-ferrosos, química, alimentos e bebidas, têxtil, papel e celulose, cerâmica e outras indústrias.

Por **energia útil** entende-se a energia de que dispõe o consumidor depois da última conversão feita nos seus próprios equipamentos. Trata-se da energia final (a energia fornecida aos equipamentos) diminuída das perdas na conversão.

A identificação desta energia útil permite visualizar quais setores econômicos são energeticamente menos eficientes e quais as formas de energia que são utilizadas com maior eficiência, permitindo, assim, a implementação de programas de substituição e conservação de energia.

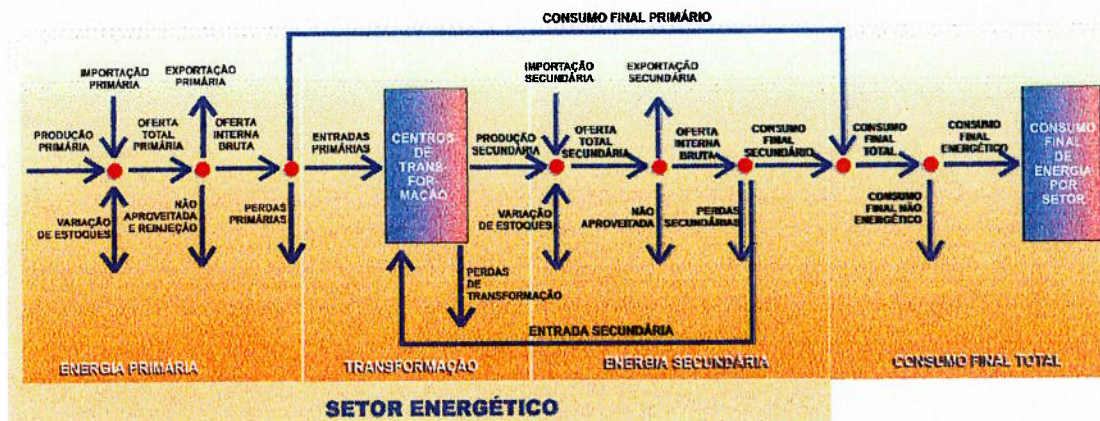


Figura 1: Centros de transformação de energia primária em secundária.

Fonte: (MME apud PETROBRAS, 2001)

### 2.1.2. Matrizes Energéticas – Nacional e Mundial

O Ministério das Minas e Energia – MME apresenta o Balanço Energético Nacional efetuado pelo em 1998; bem como, um balanço mundial para o mesmo ano, baseado em dados publicados pela "BP Statistical Review of World Energy - 2000". (MME apud PETROBRAS (2001))

É importante salientar que este Balanço Energético Brasileiro, divulgado pelo MME em 1999, abrangendo o período de estudo 1970/98, apresenta as seguintes importantes constatações:

- A economia brasileira cresceu a uma taxa média anual de 4,3%, apresentando comportamentos distintos a cada década - 8,6% nos anos setenta, 1,6% nos anos oitenta e 2,9% nos anos noventa; enquanto que neste mesmo período, a Oferta Interna de Energia-OIE apresentou praticamente igual desempenho – 4,4% ao ano.
- O Setor Elétrico mais que quintuplicou sua capacidade instalada de geração no período 1970/98. Em dezembro 1998 o setor contava com 65,2 GW em operação (incluindo os autoprodutores), proporcionando 91% de geração hidráulica e 9% de geração térmica e nuclear. A capacidade instalada de geração hidráulica de 56,8 GW, em 31/12/98, representava cerca de 22% do potencial hidráulico total do País. O consumo de eletricidade no período 1970/98 cresceu 7,7% a.a., e a

participação da eletricidade no consumo final de energia passou de 16% em 1970 para 39% em 1998.

- Historicamente, até 1975, os investimentos no Setor Energético Brasileiro representaram cerca de 8 a 10% dos investimentos totais. A política de redução da dependência externa e o aumento da intensidade energética passaram a exigir maiores investimentos em energia. O ápice ocorreu em 1984, com os investimentos em energia representando 24% do total. Nos últimos anos os investimentos em energia voltaram a representar cerca de 8% a 9% dos investimentos totais.

A Tabela I e a Figura 2 apresentam o consumo mundial de Energia Primária em Toneladas de Óleo Equivalente - TOE (1998). (MME apud PETROBRAS, 2001)

Tabela I - Consumo Mundial de Energia Primária em Toneladas de Óleo Equivalente - TOE - (1998).

Energético	TOE (milhões)	Porcent. (%)
Óleo cru	3.460,6	40,00
Gás natural	2.015,4	23,66
Energia hidráulica	224,8	2,64
Carvão	2.243,2	26,34
Energia Nuclear	626,9	7,36
<b>TOTAL</b>	<b>8.516,9</b>	<b>100,0</b>

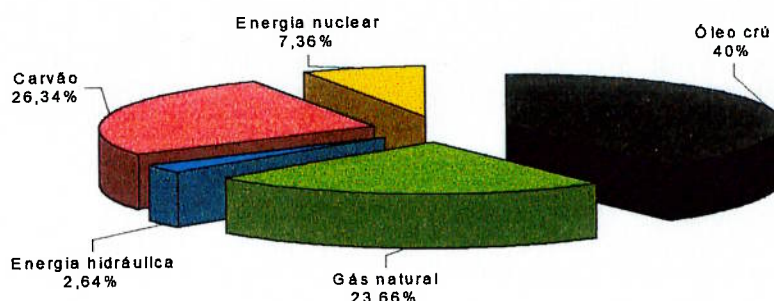


Figura 2 - Consumo Mundial de Energia Primária em Toneladas de Óleo Equivalente - (1998).

A Tabela II e a Figura 3 apresentam o consumo nacional de Energia Primária em Toneladas de Óleo Equivalente - TOE (1998). (MME apud PETROBRAS, 2001)

Tabela II - Consumo Nacional de Energia Primária em Toneladas de Óleo Equivalente - (1998).

Energético	TOE (milhões)	Porcent. (%)
Óleo cru	77,314	33,00
Gás natural	6,645	2,84
Energia hidráulica	84,468	36,07
Carvão Vapor	1,750	0,75
Carvão Metal	9,508	4,06
Lenha	21,237	9,06
Prod. de cana de açúcar	24,966	10,65
Energia Nuclear	4,990	2,13
Outros	3,385	1,44
<b>TOTAL</b>	<b>234,263</b>	<b>100,0</b>

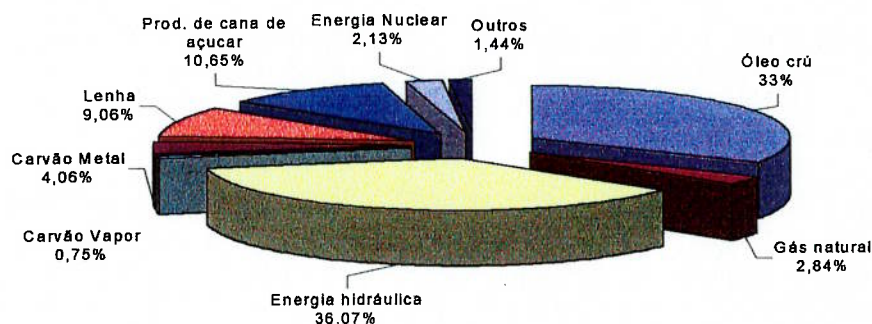


Figura 3 - Consumo Nacional de Energia Primária em Toneladas de Óleo Equivalente - (1998).

A Figura 4 apresenta um gráfico comparativo do Consumo Mundial e Nacional de Energia Primária em Toneladas de Óleo Equivalente - TOE (1998). Pode-se notar que o gás natural tem uma participação importante na matriz energética mundial, correspondendo a 23,66%; enquanto que no Brasil, dado ao seu potencial, a mesma



ainda é pequena, apenas 2,84%, devendo nos próximos anos, segundo estimativas do governo, ser ampliada gradualmente, até alcançar cerca de 12% em 2010.

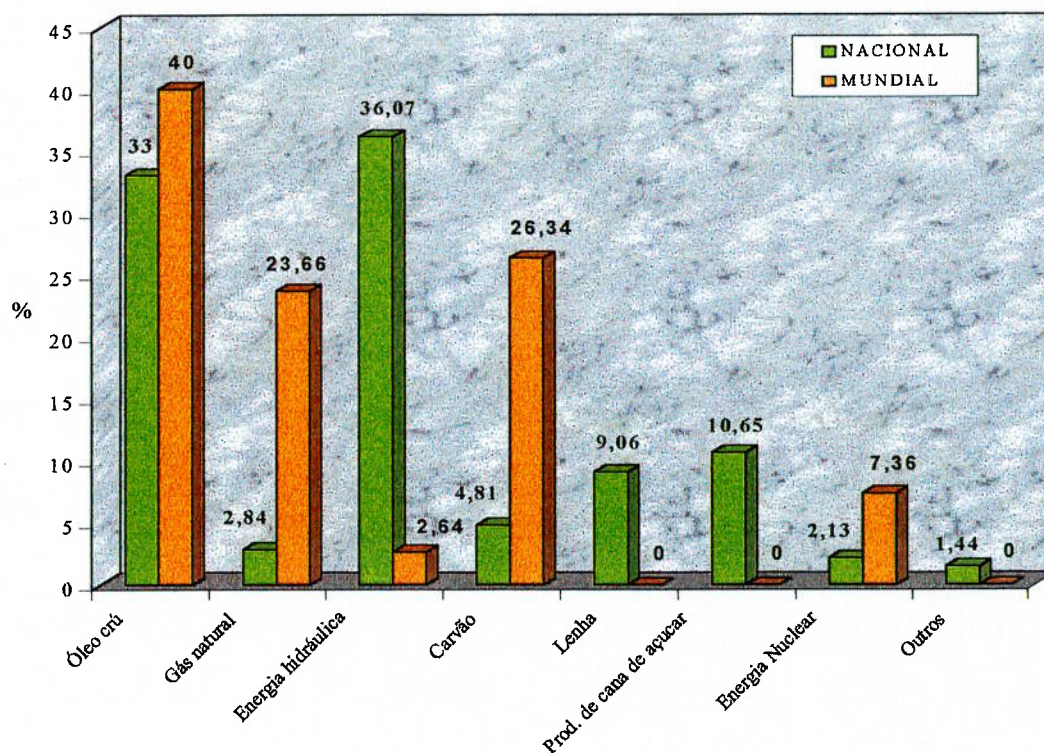


Figura 4 - Gráfico comparativo do consumo mundial e nacional de Energia Primária em Toneladas de Óleo Equivalente - TOE (1998).

A ampliação do uso do gás natural na geração térmica de eletricidade, no Brasil, insere-se na política energética dos governos estadual e federal, que juntando esforços com a iniciativa privada, tem como objetivo aumentar a participação do gás natural na matriz energética nacional. A disponibilidade de gás para esta ampliação será obtida através do aumento da produção nacional e da importação, atualmente da Bolívia e futuramente da Argentina.

Na matriz energética, o gás natural irá produzir energia elétrica, através da construção de diversas termelétricas em todo o País; substituindo óleo diesel (petróleo) e investimentos em hidroelétricas (energia hidráulica); bem como substituir derivados de petróleo utilizados nos setores produtivos dos setores industriais, comerciais, residenciais e de transportes.

## 2.2. Setor Elétrico – Panorama até 2004

O Brasil dispõe da maior bacia hidrográfica do mundo, com um incomparável potencial de geração de energia elétrica. Daí a natural e histórica opção dos brasileiros por esta matriz energética. As usinas hidrelétricas proliferaram a partir da década de 50, dando sustentação ao forte impulso do país rumo à industrialização e ao desenvolvimento. Hoje o Brasil dispõe de um dos maiores parques hidrelétricos do mundo, respondendo por quase 90% do total da energia gerada no país. (MME-Energia Brasil, 2002)

É certo que, apesar do país possuir 15% dos recursos mundiais em água doce dentro do seu território, 70% desses recursos encontram-se na região Norte (Amazônia) e pouco mais que 15% no Centro-Oeste.

As regiões Sul e Sudeste dispõem de apenas cerca de 12% destes recursos. Como os rios que oferecem condições para a exploração hidrelétrica ficam muito distantes dos grandes centros onde a demanda por energia é maior, trazer a eletricidade para o Rio e São Paulo implica em elevado custo de transmissão, já que é grande a perda de energia numa transmissão de longa distância.

O sistema elétrico brasileiro foi planejado a partir de uma das piores secas enfrentadas pelo país neste século, entre os anos de 1951 e 1956. Para fazer face à eventualidade de um novo episódio como este, o sistema foi concebido de modo a funcionar a plena carga mesmo na ausência continuada de chuvas, o que é possível com a manutenção de excedentes permanentes, em grandes reservatórios, da matéria prima energética que é a água. Levando em conta os diferentes regimes pluviométricos característicos das diversas regiões brasileiras, instalou-se também, progressivamente, um regime de vasos comunicantes, que permite o aproveitamento de sobras de energia de determinadas regiões em outras onde ela eventualmente se mostre escassa. (MME-Energia Brasil, 2002)

Por muitos anos o Brasil conviveu com a impressão de que suas fontes energéticas hidrológicas eram inesgotáveis; entretanto em meados dos anos 90, o sistema hidrelétrico instalado começou a dar sinais de esgotamento. Os excedentes de água que davam garantia de abastecimento para os cinco anos seguintes passaram a ser

consumidos sem a compensação proporcional que deveria ser assegurada pelos períodos chuvosos.

Finalmente, em 2001, o Brasil foi submetido a um dos piores regimes pluviométricos das últimas décadas, que somado à ausência de investimentos adequados no setor, gerou problemas de insegurança e incertezas para toda a população brasileira.

Neste cenário, o governo criou e instalou, através da Medida Provisória 2147, de 15 de maio de 2001, a Câmara de Gestão da Crise de Energia - GCE, do Conselho do Governo, com o objetivo de estabelecer diretrizes para programas de enfrentamento da crise de energia elétrica.

Quando da criação da Câmara de Gestão da Crise de Energia, já se encontrava em andamento o Programa Prioritário de Termelétrica.

A Câmara de Gestão da Crise de Energia desenvolveu trabalhos, conjuntamente com os demais órgãos do governo, estabelecendo metas e investimentos que compõem o Programa Estratégico de Aumento da Oferta de Energia Elétrica.

### 2.2.1. Investimentos

O mercado de energia elétrica experimenta um crescimento da ordem de 4,5% ao ano, devendo ultrapassar a casa dos 100 mil MW em 2008. (ANEEL, 2002)

O planejamento governamental prevê para o período 2001-2004, através do Programa Estratégico de Aumento da Oferta de Energia Elétrica, base maio/2002, necessidade de investimentos da ordem de R\$ 42 milhões para expansão da matriz energética brasileira, em atendimento à demanda do mercado consumidor, distribuídos conforme Tabela III. (MME-Energia Brasil, 2002)

Tabela III - Previsão de Investimentos no setor elétrico no período 2001 – 2004.

INVESTIMENTOS	VALORES ESTIMADOS (R\$ milhões)		
	PRIVADOS	PÚBLICO	TOTAL
<b>Total</b>	32.585,00	9.713,30	42.298,30
<b>%</b>	77	23	100

### 2.2.2. Oferta de Energia

De acordo com o previsto pelo Programa Estratégico de Aumento da Oferta de Energia Elétrica, período 2001 a 2004, a Tabela IV apresenta a ampliação da oferta de energia; bem como a Tabela V apresenta a evolução da potência instalada. (MME-Energia Brasil, 2002)

Tabela IV - Oferta de energia elétrica prevista para o período 2001 – 2004.

TIPO DO EMPREENDIMENTO (Unidade)	AMPLIAÇÃO DA OFERTA (2001-2004)				
	2001 Realizado	2002	2003	2004	Total
HIDRELÉTRICAS (24)	1.397	3.045	2.463	3.122	10.027
TERMELÉTRICAS (40)	1.354	2.829	4.342	916	9.441
TERMELÉTRICAS EMERGENCIAIS (58)	–	2.163	–	–	2.163
IMPORTAÇÃO (8)	98	1.188	400	800	2.486
PCHs (29)	66	170	145	–	381
COGERAÇÃO (17)	125	162	500	–	787
EÓLICA (42)	2	261	394	393	1.050
<b>TOTAL (MW)</b>	<b>3.042,0</b>	<b>9.808</b>	<b>8.244</b>	<b>5.231</b>	<b>26.326</b>
LINHAS (26) DE TRANSMISSÃO - Km	505	1.037	4.383	3.348	9.273
SUBESTAÇÕES (MVA)		3.347	4.460	1.050	8.847

\* Considerada uma redução de 30% de não realização do programa previsto.

Tabela V - Evolução da potência instalada, no período 2001 – 2004.

Tipo de Geração	Potência Instalada 2001 (MW)		Previsão 2004 (MW)	
Usina Hidrelétrica	61.555	82%	69.448	67%
Usina Termelétrica	6.944	9%	17.024	17%
Usina Nuclear	1.966	3%	1.966	2%
Fontes Alternativas (Eólica, PCH, Biomassa)	2.345	3%	5.645	5%
<b>SUBTOTAL</b>	<b>72.810</b>	<b>92%</b>	<b>94.083</b>	<b>91%</b>
Importação de Itaipu	5.500	7%	6.200	6%
Demais Importações	1.150	1%	3.438	3%
<b>TOTAL</b>	<b>79.460</b>	<b>100%</b>	<b>103.721</b>	<b>100%</b>



### 2.2.3. Importação de Energia

O planejamento governamental prevê para o período 2001-2004, através do Programa Estratégico de Aumento da Oferta de Energia Elétrica, a necessidade de importar 2386 MW de energia, distribuída conforme Tabela VI. (MME-Energia Brasil, 2002)

Tabela VI - Necessidades de importação de energia no período 2001 – 2004

IMPORTAÇÃO	UF	EMPREENDEDOR	META MW	ANOS			
				2001	2002	2003	2004
1. ARGENTINA Garabi	RS	CIEN	1.000		1.000		
2. ARGENTINA Foz do Iguaçu	PR	TOTALFINAELF	1.200			400	800
3. ARGENTINA Uruguiana	RS	ELETROBRAS	35	35			
4. BOLIVIA Puerto Soarez	MS	DUKE/PETROBRAS	88		88		
5. URUGUAI Livramento	RS	ELETROBRAS	63	63			
<b>TOTAL</b>			<b>2.386</b>	<b>98</b>	<b>1.088</b>	<b>400</b>	<b>800</b>

### 2.2.4. Hidrelétricas

A Tabela VII apresenta as hidrelétricas constantes do Programa Estratégico de Aumento da Oferta de Energia Elétrica. (MME-Energia Brasil, 2002)

Tabela VII – Usinas hidroelétricas constantes do Programa Estratégico de Aumento da Oferta de Energia Elétrica , período 2001-2004.

UHE	UF	EMPREENDEDOR	META TOTAL	METAS			
				2001	2002	2003	2004
1	MG	Consórcio Aimorés	330			110	220
2	GO	Cia. Energética Meridional	472		314	157	
3	MG	Consórcio Candonga	140			47	93
4	GO	Corumbá Concessões S/A	64				64
5	RS	Consórcio Dona Francisca	126	126			
6	MG	Cemig - CVRD	180		60	120	
7	MT	Consórcio Guaporé	120		80	40	
8	SC/RS	Consórcio Itá	290	290			
9	PR	Itaipu Binacional	1400				1400
10	BA	Itapebi Ger. Energia SA	450			450	
11	MT	Itiquira Energética SA	156		156		
12	MT	Consórcio Jauru	113		76	38	
13	TO	Con. Usina Lajeado	870	360	510		
14	SC/RS	Consórcio Machadinho	1140		1140		
15	MT	Consórcio APM Manso	159	159			
16	SP/PR	Ourinhos Energia S/A	44				44
17	SP	Cia. Brasileira Alumínio	80		80		
18	MT/MS	Ponte Pedra Energética	176				176
19	MG	Consórcio Porto Estrela	112	112			
20	SP	Cesp	660	330	220	110	
21	SC	Cia. Energética Chapecó	120			120	
22	GO/MG	Consórcio Queimado	105			105	
23	BA/MG	Energética Santa Clara	60	20	40		
24	PA	Eletonorte	2625		375	1125	1125
<b>SOMATÓRIO</b>			<b>9991</b>	<b>1397</b>	<b>3051</b>	<b>2422</b>	<b>3122</b>

## 2.2.5. Termelétricas

### 2.2.5.1. Programa Prioritário de Termelétricidade

O governo lançou, através do Decreto nº 3.371 de 24 de fevereiro de 2000, o Programa Prioritário de Termelétricidade, o qual foi complementado pela Portaria do Ministério das Minas e Energia Nº 43 de 25 de fevereiro de 2000.

O Programa visa incentivar a geração de energia elétrica por meio de usinas térmicas, conferindo maior confiabilidade ao parque gerador de energia, minimizando o risco de deficit energético pela redução do nível de água dos reservatórios das usinas hidrelétricas e aumentando o crescimento industrial/econômico.

As ações determinantes para fazer deslanchar o programa foram lançadas no primeiro semestre de 1999, quando o Ministério de Minas e Energia passou a coordenar

discussões com empreendedores e investidores dispostos a participar de projetos prioritários de geração termelétrica.

A concretização do Programa Prioritário de Termelétricidade, além de incrementar a utilização do gás natural, também garante a utilização de combustíveis nacionais como o carvão mineral e o xisto. (Além disso, há projetos que levam em consideração o uso de combustíveis alternativos, como o bagaço de cana.)

O Programa conta com a participação da PETROBRAS, da ELETROBRÁS, do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e da Agência Nacional de Petróleo (ANP).

#### **2.2.5.1.1. Garantias Governamentais**

Através da Portaria do MME N° 43 de 25 de fevereiro de 2000, o governo estabelece garantias para os investidores privados:

**Art. 2º** Garantir que as usinas termelétricas constantes do programa farão jus às seguintes prerrogativas:

I - garantia pela Petróleo Brasileiro S.A. - PETROBRAS de suprimento de gás natural, por prazo de até vinte anos, ao preço médio equivalente em reais a US\$ 2,26/MM btu, na base de setembro de 1999, para as usinas vinculadas ao sistema elétrico interligado, de acordo com a política de gás natural nacional e de acordo com as demais condições de comercialização constantes nos contratos firmados para o gás natural importado;

II - garantia da aplicação do valor normativo à distribuidora de energia elétrica, por um período de até vinte anos, de acordo com a Resolução n° 233, de 29 de julho de 1999, da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL;

III - garantia pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social S.A. - BNDES de acesso ao Programa de Apoio Financeiro a Investimentos Prioritários no Setor Elétrico.

Através do Artigo 29 da Lei 10.438, de 26 abril de 2002, o governo ampliou o prazo para que as empresas iniciem a operação comercial das termelétricas admitidas no PPT. Este prazo, definido inicialmente pela Portaria 551/2000, do Ministério de Minas e Energia, encerrar-se-ia em 31 de dezembro de 2003, tendo sido prorrogado para 31 de dezembro de 2004.

#### **2.2.5.1.2. Instrumentos legais do PPT:**

Os principais instrumentos legais relativos ao Programa Prioritário de Termelétricidade são: Decreto 3371, de 24/12/2000; Portaria MME 43, de 25/02/2000; Portaria MME 551, de 06/12/2000; Portaria Interministerial MF/MME 176, de 01/06/2001; Resolução GCE 23, de 07/07/2001; Resolução GCE 36, de 15/07/2001; Resolução GCE 37, 21/08/2001; Resolução GCE 56, de 15/10/2001; Resolução GCE 100, de 15/01/2002; Resolução GCE 101, de 15/01/2002; Resolução GCE 105, de 24/01/2002 e Resolução GCE 127, de 16/04/2002.

#### **2.2.5.1.3. Termelétricas Prioritárias e Emergenciais**

As Figuras 5 e 6 apresentam, respectivamente, a distribuição de potência, por Estado, das Termelétricas consideradas Prioritárias e Emergenciais pelo Governo Federal. O Programa de Termelétricas Emergenciais foi criado pelo Governo Federal, com base no Artigo 6º da Medida Provisória 2147, de 15 de maio de 2001. (MME-Energia Brasil, 2002)

O ANEXO I apresenta a relação destas termelétricas.

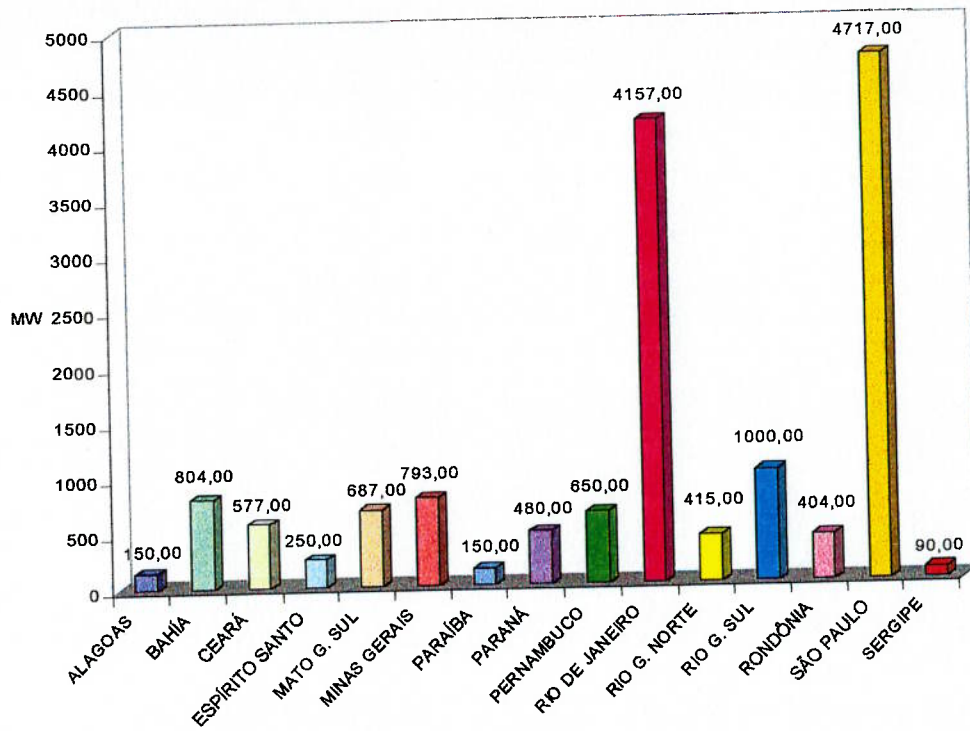


Figura 5 - Distribuição das Termelétricas Prioritárias por Estado.

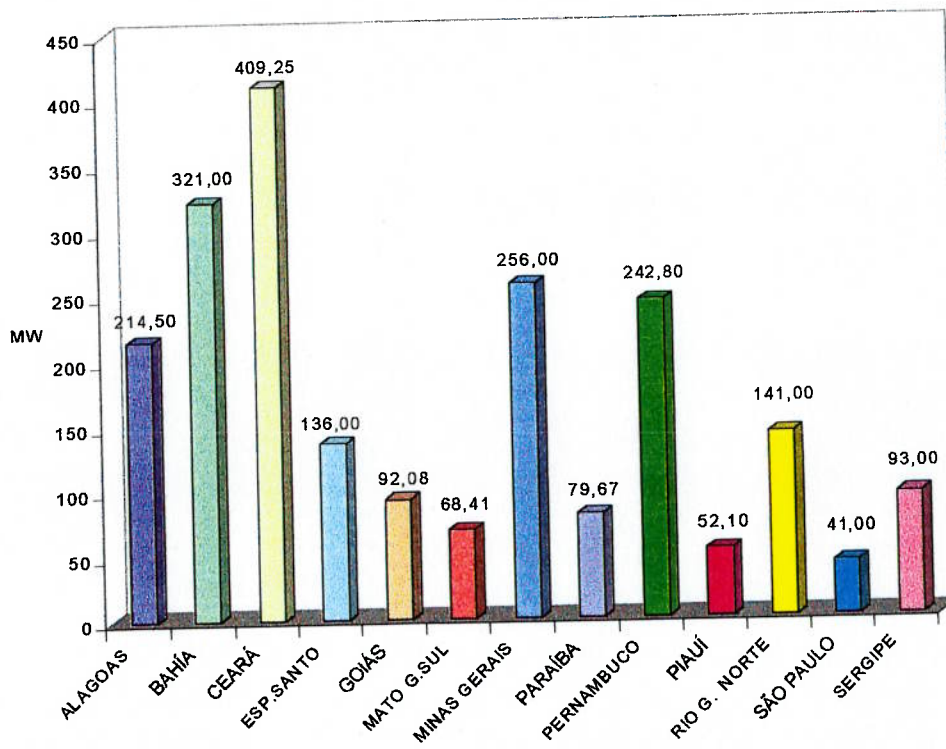


Figura 6 - Distribuição das Termelétricas Emergenciais por Estado.

### 2.2.6. Competitividade das Usinas Termelétricas

Deve ser ressaltado, que é grande o impacto ambiental, que uma hidrelétrica causa a curto, médio e longo prazos. É necessário inundar uma grande área onde vivem centenas de espécies da fauna e da flora, além do próprio homem, perdendo-se muitas vezes vastas extensões de terra cultivável, cidades, e a própria história do País. Os investimentos necessários para compensar os impactos sofridos pela população local e pelo meio ambiente são muito altos.

Além disso, estudos recentes de pesquisadores da Coordenação do Programas de Pós-Graduação em Engenharia - COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ mostram que a grande reserva de biomassa depositada no fundo dos reservatórios deteriora-se liberando quantidades consideráveis de gases como o metano, gás carbônico e óxido nitroso; os quais contribuem para o aumento do efeito estufa. Estes gases são gerados a partir da decomposição da vegetação pré-existente, submersa por ocasião do enchimento dos reservatórios; pela ação de algas primárias que emitem  $\text{CO}_2$ ; e pelo acúmulo de nutrientes orgânicos trazidos por rios e pela chuva que se acumulam nas barragens. De acordo com os pesquisadores, em reservatórios com mais de 40 m de profundidade, o metano não sobe à superfície por causa da pressão da água. A pesquisa feita em 9 usinas hidroelétricas, apresenta como maior poluidora por liberação de metano, a Usina de Três Marias, com emissões diárias de  $196,5 \text{ mg/m}^2$  e por liberação de gás carbônico, a Usina de Tucuruí, com emissões diárias de  $8.474 \text{ mg/m}^2$ . (Saneamento Ambiental, 2002)

É cada vez mais difícil o licenciamento ambiental dos aproveitamentos hídricos remanescentes e economicamente viáveis. E, apesar de tudo isso, a demanda de energia continua crescente.

Este quadro assegura às usinas termelétricas um importante papel na matriz energética nacional. Esta opção torna-se ainda mais atraente quando consideramos que o Brasil, além do gás natural produzido, tem o gás natural que vem importado da Bolívia, através do Gasoduto Bolívia-Brasil e encontra-se em negociações com a Argentina, objetivando a obtenção de mais combustível desta natureza.



A tecnologia é o fator primordial para o desempenho operacional da usina termelétrica no que se refere à confiabilidade, aos custos de operação e manutenção, às condições de segurança e à manutenção dos efluentes líquidos e das emissões aéreas abaixo dos limites estabelecidos pela legislação ambiental.

Dentre os novos empreendimentos de geração para diferentes fontes energéticas, a Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL, após extenso estudo, sinalizou para a termelétrica movida a gás natural o menor valor normativo. Os valores normativos limitam o repasse, para as tarifas de fornecimento, dos preços livremente negociados na aquisição de energia elétrica, por parte dos concessionários e permissionários de distribuição. Embora esses valores estejam sujeitos a pequenas modificações, a termelétrica a gás natural desponta não só como a geração de menor custo, mas também a que apresenta menores riscos e prazos de instalação para empreendimentos de grande porte, conforme Tabela VIII. (JAAKKO PÖYRY ENGENHARIA, 2000)

A Tabela VIII - Valores normativos para as fontes de geração de energia elétrica disponíveis no país.

<b>FONTE DE GERAÇÃO</b>	<b>VALOR NORMATIVO (RS / MWh)</b>
Termelétrica Gás Natural	48,50
Hidráulica	50,40
Termelétrica Carvão	52,30
Usina Eólica	66,50
Pequena Central Hidrelétrica - PCH	71,30
Termelétrica Biomassa	80,80
Usina Solar – Foto voltagem	237,50

De acordo com (JAAKKO PÖYRY ENGENHARIA, 2000), sob o ponto de vista técnico-econômico, as usinas de geração de energia elétrica classificam-se em dois grandes grupos: hidrelétricas e termelétricas.

A comparação dos investimentos para diferentes alternativas deve ser considerando-se o investimento específico por kilowatt instalado, conforme Tabela IX.

Tabela IX - Comparação de investimentos para diferentes alternativas de geração elétrica.

<b>FONTE DE GERAÇÃO</b>	<b>INVEST. ESPECÍFICO (US\$ / KW) (a)</b>
Termelétrica Gás Natural	560 a 700
Hidroelétricas	1.600 a 2.000
Termelétrica Carvão	2.000
Termelétrica óleo combustível	1.700
Usinas Nucleares	2.200

NOTA:

(a) – Na comparação de valores, devem ser levados em consideração os custos de investimentos de transmissão (construção das linhas, aquisição de faixas de terrenos, licenciamentos/permissoes de passagem, etc.)

Como os assuntos, gás natural e termelétricas, são relativamente novos para o governo e para a sociedade, comparativamente com outros países, há o questionamento: “Qual será o papel da geração termelétrica?”: complementação à hidreletricidade, seguro contra baixa pluviosidade, desenvolvimento do mercado de gás, otimização do Sistema Interligado, geração distribuída, auto-geração e cogeração?

Na realidade este é um assunto que o próximo governo acabará definindo.

Assim como o programa nuclear brasileiro gastou o que podia e o que não podia, o programa de termelétricidade é visto, por alguns, como uma nova edição da falta de imposição do planejamento. Quando tivermos regimes hidrológicos favoráveis, verteremos água ao invés de produzir energia barata, porque obrigatoriamente estaremos pagando pelo combustível dolarizado, o gás natural boliviano.

O principal critério utilizado para que os projetos termelétricos sejam implementados em São Paulo tem sido a disponibilidade de fornecimento de gás natural. Entretanto, a escassez de água em algumas bacias hidrográficas da região também tem sido um dos



fatores condicionantes para a instalação de unidades geradoras. As bacias do Alto Tietê, Piracicaba e os afluentes do Rio Grande sofrem grandes restrições quantitativas e qualitativas no fornecimento de água, o que inviabiliza grande parte dos projetos para implementação de termelétricas nessas áreas. (CUNHA, 2001)

Mesmo diante do cenário otimista do gás natural, como alternativa do governo para ajudar o Brasil a superar a crise de energia, existem críticas de alguns setores contrários às políticas de estimular a utilização do gás natural para termoeletricas em detrimento do uso da biomassa que, como matéria prima nacional, resultaria em mais empregos no país. Soma-se a isso a dependência energética que a importação de gás natural traz ao país.

### **2.3. Principais Configurações de Usinas Termelétricas**

Em uma usina termelétrica a energia elétrica é obtida a partir de uma série de conversões de energia. Inicia-se com a transformação da energia química do combustível em energia térmica que é transferida a um fluido de trabalho. Este mediante sua expansão em uma turbina (a gás ou a vapor) transforma-se em energia mecânica de rotação, e, conseqüentemente, em energia elétrica por meio da ação eletromagnética em um gerador elétrico acoplado à turbina.

Nos processos das turbinas a gás, o combustível é misturado e queimado com ar num combustor formando um gás, também a altas temperaturas e pressões, que é enviado diretamente à turbina.

Já nos processos das turbinas a vapor, um determinado combustível fóssil (líquido ou gasoso) é queimado em uma caldeira que produz gases a alta temperatura, os quais são utilizados para converter a água de circulação em vapor a alta temperatura e pressão. Sua expansão faz girar uma turbina e um alternador elétrico que gera energia elétrica.

São comuns, combinações desses equipamentos para aumentar a eficiência de uma unidade de geração de energia elétrica, o que ocorre com muita freqüência nos Estados Unidos. Com a ocorrência dos choques do petróleo de 1973 e 1978, os EUA objetivando combater a crise de energia e a escassez de gás natural, vistas pelo

governo americano como ameaças à segurança nacional e à estabilidade macroeconômica, editaram em 1978 o *National Energy Act* (NEA) contendo, basicamente, cinco blocos independentes: (GUIMARÃES, E.T., 2001)

- PURPA - Power Utilities Regulatory Policies Act
- FUA - Power Plant and Industrial Fuel Use Act
- NGPA - Natural Gás Policy Act
- NETA - National Energy Tax Act
- NECPA - National Energy Conservation Policy Act

Dos cinco blocos, o PURPA foi o que diretamente incentivou o desenvolvimento dos sistemas de Cogeração, pois o mesmo tinha como objetivo promover a conservação de energia e incremento da eficiência através da Cogeração de vapor e eletricidade, além de fomentar a utilização de fontes alternativas/renováveis para geração de energia elétrica. Foram criadas as figuras do co-gerador e do pequeno produtor, denominados *qualifying facilities* (QF).

### **2.3.1. Turbinas a Gás Natural em Ciclo Simples ou Aberto**

Estes sistemas são constituídos, basicamente, de três elementos dispostos em série: um compressor, um combustor e a turbina propriamente dita; conforme Figura 7.

O ar à pressão atmosférica é inicialmente captado, tratado e conduzido a um compressor, atingindo pressões entre 20 e 40 Kgf/cm<sup>2</sup> e temperaturas entre 250 e 350° C. Após a compressão o ar é injetado no combustor, juntamente com o gás natural à temperatura ambiente e pressões da ordem de 35 Kgf/cm<sup>2</sup>. Neste equipamento, o combustível é queimado em mistura com o ar, numa proporção de cerca de 60:1, formando um gás a temperaturas superiores a 1000 °C e elevadas pressões.

Passando do combustor para a turbina, este gás resultante da queima se expande, produzindo potência mecânica suficiente para acionar o compressor e ainda produzir energia elétrica através do gerador elétrico. (JAAKKO PÖYRY ENGENHARIA, 2000).

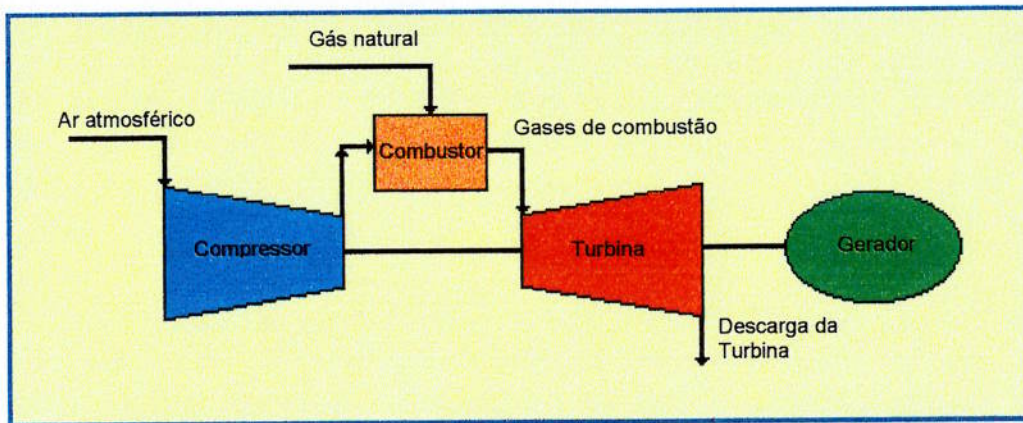


Figura 7 - Esquema básico de uma turbina a gás operando em ciclo simples ou aberto.

Embora as configurações e o número de estágios da turbina e do compressor possam variar, o ciclo básico de operação é sempre o mesmo: compressão, aquecimento do gás e sua expansão. Este ciclo é denominado, termodinamicamente, de Ciclo Brayton, o qual quando ideal, consiste em processos isoentrópicos de expansão e compressão, bem como variação de temperatura à pressão constante.

No ciclo simples, os gases quentes, após a expansão da turbina, são descarregados para a atmosfera, ainda a altas temperaturas (entre 450 °C e 550 °C) e o calor disponível, bastante significativo, não é aproveitado; acarretando perdas de energia e poluição térmica do meio ambiente. (CUNHA, 2001)

Estas perdas, relativamente altas, ligadas a uma baixa eficiência de produção de energia elétrica das turbinas a gás operando em ciclo simples; no máximo 42%, inibem a adoção deste ciclo para geração de energia elétrica em larga escala.

Neste sentido o ciclo combinado, descrito a seguir, é alternativa mais interessante, por aproveitar o calor que é perdido no ciclo simples.

### 2.3.2. Turbinas a Gás Natural e a Vapor em Ciclo Combinado

Denomina-se “ciclo combinado” à utilização de dois ou mais ciclos termodinâmicos em uma mesma planta *com a finalidade exclusiva de produzir energia elétrica*; ou seja, todo o vapor produzido por recuperação é empregado na turbina a vapor para a produção de energia elétrica. (JAAKKO PÖYRY ENGENHARIA, 2000)

Diferentes processos térmicos podem ser combinados, seja trabalhando com meios fluidos distintos, ou com meios fluidos iguais, e ciclos empregando as mais diferentes substâncias poder ser construídos. Contudo, até o presente momento, um tipo de ciclo combinado tem encontrado ampla aplicação, qual seja, a utilização de turbinas a gás (ciclo Brayton) juntamente com turbinas a vapor (ciclo Rankine).

Em termos práticos, esta combinação consiste em aproveitar-se a alta temperatura disponível nos gases de exaustão da turbina a gás em uma caldeira de recuperação, gerando vapor que é utilizado para o acionamento de uma ou mais turbinas a vapor.

Ao sair da turbina a vapor, o vapor expandido, e portanto a uma pressão mais baixa que a atmosférica, é liquefeito em condensadores e após tratamento convencional, reaproveitado como água de alimentação da caldeira de recuperação.

O Ciclo Rankine é um ciclo composto de quatro processos reversíveis (portanto ideal), o qual levando em consideração as restrições de natureza prática, mais se aproxima do rendimento máximo. Os processos que o compõem são: dois processos isobáricos reversíveis e dois processos isoentrópicos.

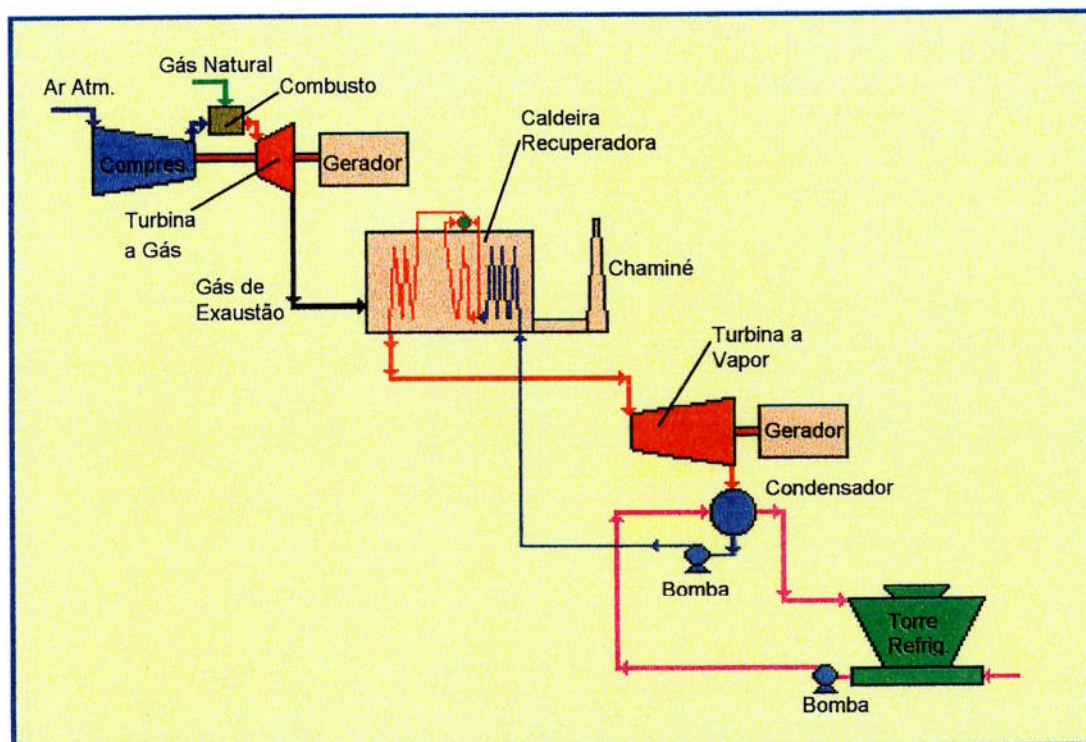


Figura 8 - Esquema típico de um Ciclo Combinado.

Fonte: (JAAKKO PÖYRY ENGENHARIA, 2000)

Três razões principais justificam esta configuração:

- Uso de componentes com desempenho já comprovado em aplicações de ciclo simples;
- Níveis de temperaturas elevados (acima de 1000 °C), o que permite boa eficiência;
- Ciclo Rankine utiliza água, que é um fluido também de fácil obtenção e aplicável na faixa de baixas e médias temperaturas.

Os ciclos combinados podem ser classificados em “*topping*” (em português denominado montante) e *bottoming* (jusante), em função da seqüência de utilização da energia. No primeiro caso, o combustível é queimado primeiramente em turbinas a gás (ou motores) para produção de energia elétrica ou mecânica e o calor aí rejeitado usado para geração de vapor a ser injetado em uma turbina de condensação. O rejeito térmico da turbina a gás possui um nível de temperatura vantajoso para ser utilizado por um sistema a vapor típico. Desta forma, é razoável utilizar-se o ciclo Brayton como “*topping*” e o ciclo Rankine como “*bottoming*”. (GUIMARÃES, E.T., 2001)

### **2.3.2.1. Principais Características do Ciclo Combinado**

As principais características técnicas, de operação e econômicas das usinas termelétricas em ciclo combinado são as seguintes:

- A energia elétrica é produzida em geradores distintos ligados, respectivamente, a cada turbina: a gás e a vapor;
- Apesar do aproveitamento dos gases quentes, o ciclo permanece aberto, com a descarga dos mesmos para a atmosfera, após passarem pela caldeira de recuperação. No entanto, neste caso, a temperatura dos gases exauridos para o meio ambiente é bem menor, variando em função do combustível empregado, de 60 a 120 °C;
- O ciclo de vapor, por sua vez, é normalmente fechado. Após acionar a turbina, o vapor passa por um condensador, retornando ao estado líquido, sendo reaproveitado como água de alimentação da caldeira de recuperação;



- Apesar do investimento específico da usina em ciclo combinado ser mais alto que o das usinas a ciclo simples, seu valor absoluto ainda pode ser considerado baixo, comparado ao requerido pelas usinas termelétricas convencionais;
- As usinas termelétricas em ciclo combinado, em função da independência das unidades de turbinas a gás e a vapor, podem ter a sua implantação e operação escalonadas. Em outras palavras, as turbinas a gás, que normalmente são entregues em um prazo mais curto, podem ser postas em operação em ciclo simples com antecedência, enquanto a turbina a vapor e os complementos do ciclo são instalados.

### **Eficiência Termodinâmica**

O ciclo combinado, que permite o aproveitamento do calor que anteriormente era desperdiçado e causava poluição térmica na atmosfera, pode incrementar em até 15% a eficiência global do processo, o qual poderá atingir valores da ordem de 50 a 60%, dependendo da tecnologia empregada. Segundo (CUNHA,F.J.,2001), a definição analítica da eficiência global do processo de uma planta de ciclo combinado é dada por:

$$\eta_{CC} = \frac{P_{TG} + P_{TV}}{Q_{TG} + Q_{HRSG}} \quad (1)$$

Diversas configurações podem ser utilizadas na construção de uma planta de ciclo combinado. Uma das principais questões é aproveitar de forma ótima o rejeito térmico da turbina a gás na caldeira de recuperação.

O arranjo mais simples para uma planta de ciclo combinado é a de um nível de pressão. Consiste de uma (ou mais) turbinas a gás, caldeira recuperadora de um nível de pressão, turbina a vapor condensante e um condensador. Nesse arranjo, a caldeira recuperadora possui um economizador, um evaporador e o superaquecedor.

Plantas mais complexas, com múltiplos níveis de pressão, podem se construídas. Nesse caso, maior eficiência térmica é obtida, mas com um custo inicial sensivelmente mais elevado. Cabe ressaltar que o aumento na potência, obtido pela inclusão de uma turbina a vapor, não representa qualquer gasto ou consumo adicional

de combustível; apenas a recuperação de energia, anteriormente lançada sob a forma de calor na atmosfera. (CUNHA, F.J.,2001)

### **2.3.2.2. Parâmetros Básicos das Usinas Termelétricas em Ciclo Combinado**

Alguns parâmetros operacionais e técnicos característicos de uma usina termelétrica em ciclo combinado são determinantes para a sua eficiência. A sua escolha, evidentemente, depende de fatores como o tipo e o custo do combustível, o regime de operação da usina e condições da área de instalação. Estes parâmetros são apresentados a seguir, com uma breve análise das alternativas e dos respectivos rendimentos do ciclo. (MAIN ENGENHARIA, 1997)

#### **a) Condições Locais**

Basicamente, são dois os fatores locais que afetam diretamente a eficiência do ciclo combinado: a temperatura de bulbo seco e a pressão atmosférica (altitude). No primeiro caso, quanto mais elevada for a temperatura do local, menor será a eficiência da unidade. Em relação à altitude o efeito é similar: quanto mais alto o local da instalação, menor a pressão atmosférica e, conseqüentemente, menor a eficiência global da instalação.

Embora em ambos os casos, a redução da eficiência não seja significativa, isto representa, sempre, incremento no investimento específico e no custo de operação.

#### **b) Queima Suplementar**

A caldeira de recuperação do ciclo combinado normalmente utiliza apenas os gases quentes exauridos da turbina a gás, constituindo assim o arranjo denominado "unfired". Eventualmente, porém, pode-se utilizar queima suplementar de combustível na caldeira (supplemental firing) de maneira a otimizar sua operação, mediante temperatura mais elevada dos gases e, em conseqüência, melhores condições do vapor gerado nesta etapa do processo. A queima suplementar foi mais utilizada no passado, quando as turbinas a gás tinham baixas temperaturas de exaustão, por limitações tecnológicas dos materiais empregados na fabricação. A opção pelo uso ou não da queima suplementar de combustível deve ser feita buscando equilíbrio entre o rendimento total da unidade, o investimento desejado e o custo do

combustível. O ciclo combinado sem queima suplementar é atualmente o mais utilizado por ser maior a sua eficiência global.

#### c) Níveis de Pressão

A eficiência global de um ciclo combinado está muito ligada ao melhor aproveitamento do calor residual dos gases de exaustão da turbina a gás. Assim fica claro que o projeto térmico da caldeira de recuperação é um dos pontos mais importantes. Neste sentido, os níveis de pressão do vapor gerado na caldeira atuam de forma importante.

Nos ciclos de uma só pressão (sistemas mono-pressão), a temperatura de exaustão dos gases da chaminé é ainda elevada, indicando baixa recuperação do calor residual. Outro indicativo dessa menor eficiência é a alta diferença de temperatura entre os gases de exaustão da turbina a gás e o vapor nos evaporadores da caldeira.

Com utilização do sistema de dupla pressão, esses dois indicativos diminuem sensivelmente, aumentando a eficiência global do ciclo combinado em cerca de 1,7%. Embora os sistemas de mono-pressão tenham um investimento mais baixo e a operação mais simples, a sua aplicação tem sido restrita, sendo atualmente mais empregado o sistema de dupla-pressão. Um ponto importante a ressaltar é a temperatura dos gases na chaminé que, no sistema a dupla-pressão, para combustíveis de baixo teor de enxofre, chega no máximo a 90° C.

#### d) Pinch-Point

Em termos genéricos, a quantidade de vapor produzida no ciclo combinado está diretamente relacionada à capacidade da caldeira. Um parâmetro que define esta eficiência é o chamado “pinch-point”: menor diferença entre a temperatura do gás na saída do evaporador da caldeira e a temperatura da água/vapor. É evidente que, quanto menor esta diferença, maior será a recuperação de calor e, portanto, a eficiência do equipamento. Porém, inversamente, a área de troca térmica da caldeira deveria ser maior para que isso ocorresse, de forma que a determinação do “pinch-point” ideal acaba limitada por fatores técnico-econômicos. Normalmente, fixa-se o



valor do “pinch-point” em torno de 10 a 15° C, atingindo uma razoável recuperação de calor, sem custos excessivos com a caldeira.

#### e) Vácuo no Condensador

Quanto menor a pressão com que o condensador trabalha (vácuo ótimo), melhor é o aproveitamento do calor do vapor. No entanto, isto requer, além de um condensador de maior porte, água adicional no sistema de alimentação, já que sob menores pressões, o condensado seria mais frio.

O vácuo no condensador, embora possa ser maximizado pelo dimensionamento do par condensador/fonte fria, depende diretamente das condições locais.

Assim, a determinação do vácuo ótimo na exaustão da turbina a vapor estaria sujeita a um balanço térmico e econômico envolvendo fatores como as características do corpo de baixa pressão da turbina, do condensador, do custo do combustível e outros fatores mais difíceis de se fixar, como os climáticos ( temperatura e umidade do ar), regime de operação da usina, etc..

#### f) Sistema de Resfriamento

A escolha do sistema de resfriamento do condensador e, portanto, do nível de vácuo que pode ser alcançado no mesmo é função da disponibilidade hídrica no local da instalação. Os sistemas de resfriamento comumente empregados são os descritos a seguir:

##### ➤ Sistema de Resfriamento em Circuito Aberto:

Utiliza, em altas vazões, a água de rios, mar ou lagos; devolvendo-a para o mesmo corpo, após passar pelo condensador, com até 15 °C acima da temperatura de captação.

- *VANTAGENS*: sistemas mais simples, mais eficientes, mais econômico e que apresentam o menor consumo de água.
- *DESVANTAGENS*: requer maior disponibilidade hídrica e há descarga de água quente no corpo receptor, causando poluição térmica, devendo esta descarga ser enquadrada na legislação.

➤ Torre Úmida com Tiragem Mecânica:

Este sistema prevê a recirculação de água convenientemente tratada, a fim de evitar incrustações e corrosão, em circuito semi-aberto, sendo a própria torre de resfriamento o único ponto aberto à atmosfera.

O funcionamento da torre de resfriamento pode ser com tiragem mecânica (através de ventiladores para induzir a passagem de ar), ou com tiragem natural (carcaça de formato hiperbólico, produzindo o efeito "chaminé" para a movimentação do ar).

O principal impacto deste sistema de resfriamento é a emissão de vapor d'água para a atmosfera, a qual deve ser avaliada em termos de "lay-out" da instalação, bem como de seus efeitos sobre as vizinhanças da unidade.

- *VANTAGENS*: possibilita o controle sobre a temperatura da água; a umidade relativa do ar ambiente tem efeito sobre o desempenho da torre; baixo custo de implementação. Evita, praticamente, todos os impactos negativos à vida aquática do corpo receptor.
- *DESVANTAGENS*: há possibilidade de recirculação do ar úmido de exaustão; elevada perda de água por evaporação; elevado custo de operação; elevada concentração de sólidos dissolvidos na água de descarga de fundo da torre, principalmente pela presença de produtos químicos utilizados no tratamento da água.

➤ Torre Seca:

O Sistema de resfriamento através de torre seca corresponde a um circuito fechado de água para troca de calor com o vapor no condensador. Esta água, após circular pelo condensador, é resfriada através de trocadores de calor em grandes torres com tiragem forçada ou com tiragem natural (hiperbólicas).

- *VANTAGENS*: requer volume reduzido de água de reposição, minimizando assim os problemas de disponibilidade de água e de contaminação dos corpos receptores pelos efluentes decorrentes da purga contínua e da poluição térmica.
- *DESVANTAGENS*: alto custo de implantação, ocupação de considerável área para sua implementação, maior impacto visual e circulação de grandes volumes

de ar. No caso de tiragem forçada, acrescenta-se ainda: as falhas mecânicas e os altos custos de implantação, operação e manutenção.

➤ **Condensador a Ar:**

Em um sistema típico de condensação a ar, o vapor é conduzido através de um duto de grande diâmetro até vários módulos que constituem o condensador, cada um formado por tubos aletados, em várias configurações, diâmetros e comprimentos (conforme a tecnologia do fornecedor), e normalmente dispostos em forma de delta.

São utilizados grandes ventiladores, com tiragem induzida ou forçada, para resfriar um ou mais módulos de condensação. Todo o conjunto é apoiado em uma estrutura metálica ou de concreto, erguida separadamente da casa de máquinas, no piso inferior da usina, ou montada no próprio teto da casa de máquinas.

O sistema de condensação a ar surgiu por volta de 1930, continuando a ser desenvolvido até hoje, procurando-se aumentar o seu rendimento, com a conseqüente diminuição da área de troca térmica necessária.

- *VANTAGENS*: não necessita de água para efetuar o resfriamento; e o impacto visual é imperceptível.
- *DESVANTAGENS*: exige extensas superfícies para a troca de calor, o que implica na necessidade de grandes espaços próximo à casa de máquinas, ou então a realização de sua instalação no próprio teto da casa de máquinas.

### **2.3.3. Turbinas a Gás Natural e a Vapor em Ciclo Combinado com Cogeração**

Conforme vimos anteriormente, as usinas termelétricas convencionais, queimando combustíveis fósseis, operando em ciclo simples; têm uma eficiência térmica máxima da ordem de 42%, isto é, só esta percentagem da energia contida no combustível é transformada em trabalho mecânico. O restante é perdido em forma de calor, seja na exaustão ou na condensação do vapor. Em uma unidade de Cogeração, a energia que seria inaproveitada é usada para prover calor a um processo, ou aquecimento de ambientes.

Cogeração, também conhecida como *combined heat and power* (CHP) é freqüentemente definida como sendo a produção seqüencial de energia térmica (calor) e energia motriz (elétrica ou mecânica) em uma mesma planta e a partir de um único insumo energético. A energia motriz é em geral usada para acionar um gerador elétrico, mas poderá ter outras finalidades como o acionamento de compressores ou a propulsão de navios. O calor é quase sempre utilizado para geração de vapor para processo, ou água quente para aquecimento.

Plantas de Cogeração já eram empregadas na primeira década deste século, quando eram denominadas "*plantas de energia total*" e utilizadas como forma de otimizar a geração de calor e força motriz necessárias à operação das indústrias. Naquela época era raro o fornecimento de energia elétrica através de grandes centrais, fato este que obrigava grandes e médios consumidores de eletricidade a instalarem seus próprios sistemas de geração. Com o surgimento das grandes Concessionárias, os sistemas de geração foram paulatinamente perdendo importância.

A crescente disponibilidade de gás natural e o desenvolvimento técnico das turbinas a gás têm tornado os Sistemas de Cogeração extremamente eficientes, além de propiciar menor agressão no meio ambiente, visto que a utilização de gás natural implica em menores taxas de emissão de poluentes. Os rendimentos térmicos situam-se acima de 75%. (CUNHA, F.J., 2001)

Os Sistemas de Cogeração vêm sendo utilizado nos diversos tipos de indústrias (refinarias, siderúrgicas, petroquímica, alumínio, cimento, mineração, cerâmicas, cervejarias, fertilizantes, têxteis, farmacêuticas, papel e papelão, usinas de cana, etc.), nas seguintes aplicações: (GUIMARÃES E.T., 2001)

- geração de eletricidade para consumo próprio, com eventual venda de excedente;
- secagem de bauxita;
- fornos de pirólise;
- geração de vapor de alta, média e baixa pressão;
- pré-aquecimento de ar para fornos;
- secagem de grãos;
- aquecimento de fluidos industriais.

Os Sistemas de Cogeração vêm encontrando também ampla aplicação no setor terciário (hotéis, shoppings, edifícios comerciais, hipermercados, hospitais, etc.). Nesses locais, a geração de energia elétrica destina-se ao fornecimento de força motriz e iluminação, enquanto o rejeito térmico é utilizado para climatização.

É possível afirmar que as preocupações mundiais com relação à alteração do clima têm aumentado substancialmente o interesse nos benefícios ambientais advindos dos Sistemas de Cogeração. Os avanços tecnológicos mais recentes tornaram esses sistemas mais eficientes e de menor custo para aplicações industriais e comerciais.

A Figura 9 apresenta um arranjo típico de cogeração empregando um turbogerador com turbina a gás e uma caldeira recuperadora (usualmente denominada *Heat Recovery Steam Generator – HRSG*) para geração de eletricidade e vapor para processo. Parte do vapor gerado na caldeira recuperadora pode ser também aproveitado para acionar uma turbina a vapor produzindo potência elétrica adicional, sendo o restante do vapor utilizado como calor no processo.

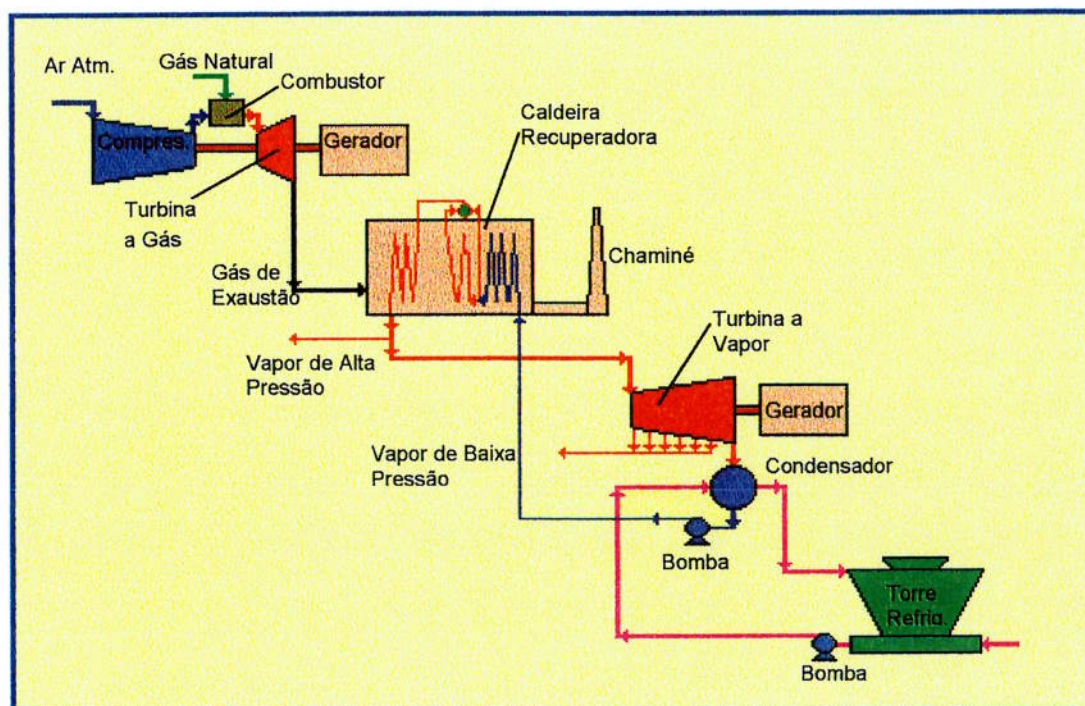


Figura 9 - Esquema típico de um Ciclo Combinado com Sistema de Cogeração.

Fonte: (CUNHA, F.J. 2001)

Ao utilizar o escoamento efluente de energia, que de outra forma seria rejeitado ao meio ambiente, os Sistemas de Cogeração podem operar com eficiências maiores do que as obtidas quando o calor a ser utilizado de maneira útil; e o trabalho (potência) são produzidos em processos distintos.

Outra particularidade deste tipo de sistema é a possibilidade de efetuar queima suplementar utilizando os gases da descarga, visto que os mesmos possuem elevado teor de oxigênio (cerca de 15%). Para isto, são instalados queimadores entre a exaustão da turbina a gás (ou motor) e a caldeira recuperadora, o que propicia, em caso de necessidade operacional, maior vazão de vapor para o processo.

A razão entre eletricidade e calor (E/H) é um parâmetro importante. A eficiência global de uma planta de cogeração e a eficiência elétrica equivalente crescem à medida em que (E/H) diminui. De forma oposta, se E/H for muito grande – especialmente maior do que 5, a planta de cogeração assemelha-se a uma planta de ciclo combinado, na qual o único objetivo é o de produzir energia na forma elétrica. (GUIMARÃES, E.T., 2001)

### **Eficiência Termodinâmica**

A fim de avaliar o desempenho de um sistema de cogeração, parâmetros tais como eficiência termodinâmica, energia térmica recuperável e consumo de combustível são utilizados. A eficiência termodinâmica do sistema pode ser calculada através da seguinte equação. (CUNHA, F.J., 2001)

$$\eta_G = \frac{P_E + Q}{Q_C} \quad (2)$$

$$Q_c = (m_{TG} + m_{HRSG}) \cdot PCI \quad (3)$$

A quantidade de energia térmica passível de ser recuperada da exaustão da turbina a gás é calculada a partir da equação de balanço de calor, isto é:

$$Q = m_{exh} \cdot C_p \cdot (T_1 - T_2) \quad (4)$$

A temperatura  $T_2$  é um parâmetro crítico no projeto da caldeira recuperadora. A fim de maximizar a recuperação de calor, é desejável obter o valor mínimo possível para  $T_2$  que seja viável em termos práticos. Este valor mínimo é limitado pela possibilidade de condensação de produtos de combustão, pois óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>) eventualmente presentes no gás exausto, juntamente com vapor d'água, formariam uma solução ácida (acid dew point), o que implicaria em severa corrosão para as partes metálicas (dew point corrosion). Este problema é particularmente grave quando é utilizado combustível líquido que contenha enxofre em sua composição.

A vazão mássica de vapor pode ser determinada a partir da seguinte equação:

$$m_{\text{VAPOR}} = \frac{Q}{(h_2 - h_1)} \quad (5)$$

A seleção, avaliação e eventual implementação de um Sistema de Cogeração são tarefas complexas, que pressupõem um conhecimento detalhado das demandas de calor e eletricidade, e seus respectivos custos. Provavelmente cada instalação terá mais de uma solução, todas exigindo estudos minuciosos dos aspectos técnicos e econômicos para que a melhor dentre elas seja selecionada. (Cunha, 2001)

#### **2.3.4. Combustível Alternativo ou de Emergência**

As turbinas a gás implantadas nas termelétricas podem queimar combustíveis líquidos e gasosos. Praticamente todos os combustíveis gasosos podem ser utilizados nas turbinas a gás industriais; já os combustíveis líquidos devem ter baixa viscosidade e baixo teor de contaminantes. (Main Engenharia, 1997)

O Combustível utilizado pelas termelétricas de porte, em implantação no Estado de São Paulo, é o gás natural; o qual é fornecido pela COMGÁS, através de Contrato firmado entre as partes, na pressão requerida pelas turbinas da termelétrica. Nos limites das termelétricas, a COMGÁS instala uma estação redutora de pressão para os níveis necessários, bem como uma estação para a medição do consumo. A partir destes limites o gás natural é enviado, diretamente, para as turbinas a gás.

Entretanto em situações emergenciais, as termelétricas devem dispor de um combustível alternativo, o qual tem por finalidade única, ser utilizado em situações

específicas de emergência, em substituição ao gás natural. Neste sentido, a maioria das termelétricas optou pelo emprego do óleo diesel, que a despeito do seu elevado valor de mercado, pode substituir o gás natural por um curto período de tempo, dentro das especificações requeridas pelo processo. O óleo diesel é um combustível de elevado valor calorífico; bem como limpo e com baixos teores de enxofre e outros poluentes, se comparado aos demais combustíveis fósseis.

O óleo diesel é normalmente recebido em caminhões-tanque e transferido para um tanque de estocagem através de bombas centrífugas. Este tanque, normalmente, deve ter capacidade que permita 24 h de operação da usina. Algumas usinas utilizam capacidade para apenas 4 horas de operação. Do tanque de estocagem, o óleo diesel é bombeado para os queimadores das turbinas a gás.

Em termos econômicos, a operação com óleo diesel é extremamente prejudicial, implicando em custos de geração da ordem de 5 vezes superiores em relação ao gás natural. Quanto aos aspectos ambientais, a operação das termelétricas com óleo diesel é mais prejudicial que com gás natural, pois as emissões de SO<sub>2</sub>, material particulado e NOx serão mais significativas. (Jaakko Pöyry Engenharia, 2000)

#### **2.4. Impactos Ambientais Produzidos por Usinas Termelétricas**

As reivindicações por uma maior participação nos processos de planejamento e implantação de empreendimentos setoriais são diferentes entre projetos hidrelétricos e termelétricos, tanto com relação aos agentes envolvidos quanto aos canais de participação utilizados. O motivo reside no fato dos impactos sócio-ambientais produzidos por hidrelétricas e termelétricas diferirem na forma, na intensidade ou na temporalidade.

As hidrelétricas concentram a maior parte de seus impactos sócio-ambientais nas fases de construção e de formação do reservatório, quando, via de regra, faz-se necessária a desocupação de áreas a serem inundadas e a remoção das famílias que vivem na região. Após os primeiros anos de existência do reservatório, e ao longo da vida útil do empreendimento hidrelétrico, os impactos sócio-ambientais tendem a diminuir gradativamente até se estabelecer um novo patamar de equilíbrio.



Diferentemente das hidrelétricas, as usinas termelétricas praticamente não produzem efeitos negativos na fase de construção. Ao iniciarem a operação, começam a produzir efluentes industriais lançados à atmosfera, nos cursos d'água e no solo, em concentrações que dependem das características do combustível empregado, da tecnologia de controle ambiental adotado e do fator de carga médio de operação de cada usina. A capacidade de absorção ou dispersão das emissões da usina, pelo meio ambiente onde a mesma se insere, em conjunto com os outros aspectos já mencionados, determinará os impactos ambientais que o empreendimento irá produzir ao longo de sua vida útil.

Enquanto, em geral, não se pode prescindir do reservatório de acumulação para a operação de uma hidrelétrica, a magnitude das emissões produzidas por uma usina térmica depende de opções técnico-econômicas decorrentes das condições de contorno sócio-ambientais, políticas e legais vigentes.

A seguir apresentam-se os principais impactos sócio-ambientais, de acordo com as fases do empreendimento:

- a) **PLANEJAMENTO:** Surgimento de apreensão e eventual reação contrária ao empreendimento, expectativa de emprego com a notícia da implantação da termelétrica,
- b) **IMPLANTAÇÃO:** Comprometimento da qualidade ambiental pelo aumento dos níveis de ruído, interferência na cobertura vegetal e na fauna, aumento do trânsito de veículos e pessoas na região do empreendimento e desmobilização de mão de obra em cada fase da implantação,
- c) **OPERAÇÃO:** Alteração na qualidade das águas do corpo receptor dos efluentes líquidos tratados, geração de empregos, alteração nos níveis de qualidade do ar, alteração no mercado de energia e geração de resíduos sólidos.

#### **2.4.1. Custos Sócio-Ambientais**

A Sociedade Brasileira, nos últimos anos, vem sinalizando mudanças de valores e de posturas, às quais os diversos segmentos industriais devem se adaptar para que possam continuar desempenhando com eficácia sua missão.

Dentre os desafios atuais para as empresas que atuam no planejamento, na implantação e na operação de usinas termelétricas, está a adaptação dos seus planejamentos à conjuntura política e econômica, da qual destaca-se a preocupação com o meio ambiente.

Fatos recentes, ocorridos em diversas Audiências Públicas, indicam que, sem uma adequada comunicação com os vários níveis da sociedade, haverá uma grande dificuldade na viabilização dos próximos empreendimentos termelétricos.

Deve ser dada atenção especial à questão sócio-ambiental, contemplando-a no planejamento dos novos empreendimentos. Este planejamento deve ser executado de forma integrada, considerando as informações de mercado (tanto de consumo, como de insumos), a análise econômico-energética, os custos sócio-ambientais e os aportes financeiros disponíveis. Há a necessidade de se discutir o montante destes custos sócio-ambientais e como considerá-los na avaliação econômico-energética dos empreendimentos e no processo de tomada de decisão.

A conceituação e quantificação dos custos sócio-ambientais, possibilitará a correta orçamentação dos empreendimentos, evidenciando seus custos reais e dimensionando os recursos financeiros requeridos para o adequado tratamento da questão sócio-ambiental. Este é um assunto recente, que tem se tornado um desafio mundial.

Conceitos e instrumentos que viabilizem a efetiva interpretação destes custos têm sido objeto de investigação de universidades, centros de pesquisa e empresas de todo o mundo. Um vasto caminho ainda precisa ser percorrido para que a ciência econômica venha a equacionar os impactos ambientais.

Os empreendimentos de usinas termelétricas não fogem a esta regra, enfrentam dificuldades na identificação e apropriação de seus custos sócio-ambientais e, conseqüentemente, na definição da competitividade econômico-energética do projeto e na sua própria viabilidade de implementação.

Destacam-se, ainda, as dificuldades relacionadas à interpretação e à aplicação prática do conceito de custo sócio-ambiental. Estas se originam de algumas características peculiares aos investimentos nesta área, tais como:

- a dificuldade em se distinguir, no custo dos componentes de um empreendimento, qual é a parte especificamente sócio-ambiental. Como exemplo citam-se o acréscimo da altura das chaminés das usinas térmicas convencionais,
- a prática de se incorporar aos projetos, desde as primeiras obras do setor, aspectos de cunho nitidamente sócio-ambiental, mas que nunca foram assim definidos, o que se pode exemplificar com a utilização de queimadores mais eficientes nas usinas térmicas,
- muitas variáveis ambientais não são quantificáveis e, mesmo quando passíveis de quantificação, não podem ser expressas monetariamente de forma a serem transformadas em variáveis integrantes dos modelos tradicionais utilizados para a avaliação econômico-financeira de um empreendimento.

A busca de respostas às questões colocadas vem indicando a necessidade de se investir em um tratamento econômico da questão ambiental que remete a uma investigação tanto conceitual como metodológica.

Em que pese o grande debate acerca das questões relativas à economia ambiental existe, de uma maneira geral, um consenso sobre as etapas de trabalho necessárias para a estimativa dos custos sócio-ambientais.

Segundo (Munasinghe Apud Eletrobrás, 1992), definido o empreendimento e tendo-se elaborado o diagnóstico ambiental, o passo fundamental para a análise dos custos sócio-ambientais é a identificação dos impactos ambientais advindos da implantação do empreendimento. Estes impactos são determinados a partir de uma análise comparativa dos cenários da região "com" e "sem" o empreendimento.

A etapa seguinte corresponde à identificação dos programas e projetos ambientais que visam evitar, minimizar ou compensar os impactos decorrentes da implantação do empreendimento. Finalmente, o último passo é a atribuição de valores monetários aos programas e projetos identificados. A Figura 10, esquematiza estas ações.

A tarefa mais complexa é a de atribuir valores monetários às variáveis ambientais.

Destaca-se, também, que a valoração monetária dos impactos incorre, inevitavelmente, numa subestimativa visto que muitas variáveis ambientais não são quantificáveis ou, quando passíveis de quantificação, não podem ser expressas monetariamente.

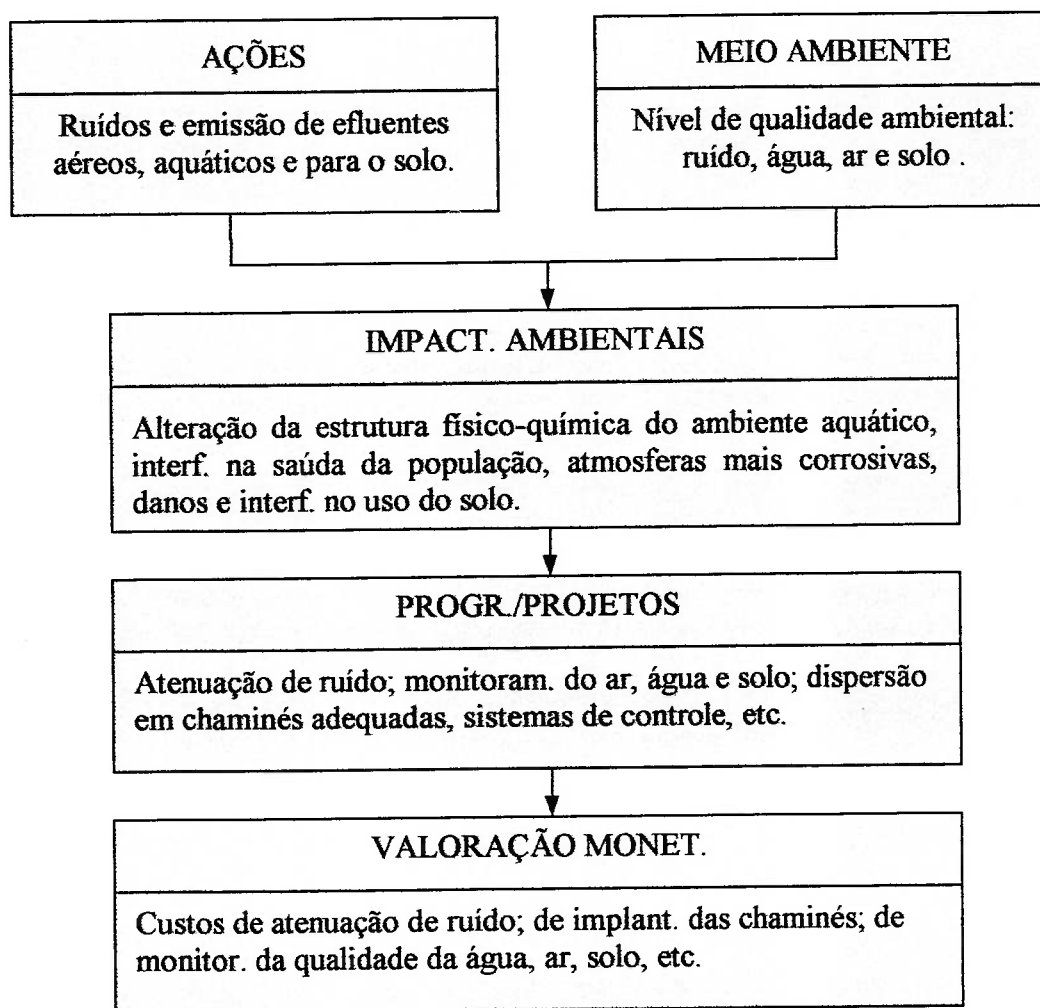


Figura 10 - Esquema para valoração monetária dos impactos ambientais.

A correta valoração monetária dos empreendimentos de termelétricas, evidenciando seus custos reais e dimensionando os recursos financeiros requeridos para o adequado tratamento da questão ambiental, permite elaborar análises mais realistas da viabilidade econômico-energética dos empreendimentos.

Sabe-se que os custos sócio-ambientais têm sido expressivos nos empreendimentos mais recentes, ultrapassando às vezes o valor de algumas contas tradicionalmente consideradas de maior significado nos empreendimentos.

De acordo com (ELETROBRÁS, 2000), a Tabela X apresenta os tipos, conceitos e exemplos de custos sócio-ambientais relativos às usinas termelétricas.

Tabela X - Tipos, conceitos e exemplos de custos sócio-ambientais das termelétricas.

Fonte: (ELETROBRÁS, 1999)

TIPOS DE CUSTOS	CONCEITOS	EXEMPLOS
<b>CONTROLE</b>	Custos incorridos para evitar a ocorrência (total ou parcial) dos impactos sócio-ambientais de um empreendimento.	Custos relativos à implantação de sistemas de controle objetivando minimizar as emissões de poluentes para a atmosfera.
<b>MITIGAÇÃO</b>	Custos incorridos nas ações para redução das conseq. dos impactos sócio-ambientais provocados por um empreendimento.	Custos relativos à implantação de um programa de saúde para a população atingida.
<b>COMPENSAÇÃO</b>	Custos incorridos nas ações que compensam os impactos sócio-ambientais provocados por um empreendimento nas situações em que a reparação é impossível.	Custos incorridos na construção de hospital, creche ou clube; para a população atingida.
<b>DEGRADAÇÃO</b>	Custos externos provocados pelos impactos sócio-ambientais de um empreendimento, quando não há controle, ou pelos impactos ambientais residuais quando da existência de controle, de compensação e de mitigação.	Custos relativos ao impacto na saúde das pessoas e no meio ambiente, mesmo após a colocação dos sistemas de controle e a implantação do programa de saúde.
<b>MONITORAMENTO</b>	Custos incorridos nas ações de acompanhamento e avaliação dos impactos e programas sócio-ambientais.	Custos de implant. e manutenção de estações de monitoramento da qualidade do ar, pontos de amostragem em chaminés, etc.
<b>INSTITUCIONAIS</b>	Custos incorridos nas seguintes situações: a) elaboração de estudos sócio-ambientais referentes às etapas de planejamento, implantação e operação; b) elaboração dos estudos requeridos pelos órgãos ambientais (EIA/RIMA), c) na obtenção do licenciamento e na realização de audiências públicas.	

Segundo (ELETROBRÁS, 1999), tendo como referência o conceito de custos sócio-ambientais, foram definidos como tal os seguintes itens:

- Aquisição de terrenos e benfeitorias necessários à implantação dos programas sócio-ambientais;
- Instalações e equipamentos necessários para o tratamento dos efluentes líquidos;

- Instalações e equipamentos necessários para, durante o processo de combustão, reduzir a emissão de gases;
- Instalações e equipamentos necessários para, no estágio pós-combustão, reduzir a emissão de gases e partículas;
- Obras e equipamentos destinados a remoção de inertes e/ou redução do teor de enxofre do combustível, no estágio pré-combustão, bem como de contenção de vazamentos;
- Instalações e equipamentos destinados ao manuseio e disposição de resíduos sólidos gerados no processo;
- Implantação dos programas de mitigação e compensação de impactos sócio-ambientais, tais como: apoio aos municípios, adequação de estrutura habitacional e educacional, saúde e saneamento básico, implantação de manejo de florestas, etc;
- Licenciamento ambiental e gestão institucional;
- Monitoramento físico-biótico e sócio-econômico.

Os equipamentos acima referidos são, de uma maneira geral, inerentes ao funcionamento de uma usina térmica, e destinam-se ao controle dos impactos sócio-ambientais. Como exemplo citam-se o precipitador eletrostático, os equipamentos destinados a disposição de resíduos sólidos e ao tratamento de efluentes líquidos, etc. Os impactos sócio-ambientais causados pelas usinas termelétricas e os respectivos programas ambientais, variam segundo: a região onde será implantada a termelétrica, as características do empreendimento, o tipo de combustível utilizado, os níveis de produção da usina, as tecnologias empregadas nas diversas etapas de produção, bem como as medidas de controle adotadas.

#### **2.4.2. Poluição do Ar**

No decurso dos últimos anos e na maioria dos países industrializados, o combate à poluição do ar e a proteção do meio ambiente têm adquirido uma importância crescente. O aperfeiçoamento da tecnologia e o crescimento da população ocasionaram um aumento gradual do consumo de energia e da produção industrial. Estes fatores de desenvolvimento levaram a sociedade a considerar a poluição atmosférica como um dos mais graves problemas que se lhe coloca, tornando-se

necessário definir estratégias que possibilitem, ao nível urbano, regional, nacional e global, reduzir os efeitos negativos no equilíbrio dos ecossistemas e minimizar os problemas ocasionados pela destruição da camada de ozono existente na estratosfera e a acumulação de gases radioativos que provocam o efeito estufa.

Apesar da composição natural da atmosfera não ter sido, significativamente, alterada durante longos períodos de tempo, são hoje notórios os efeitos dos poluentes emitidos para o ar, associados ao desenvolvimento urbano e industrial, bem como à crescente utilização de veículos motorizados, podendo ser diferentemente acentuados conforme as condições climáticas dominantes. A concentração de poluentes está fortemente relacionada às condições meteorológicas, ou melhor, à qualidade do ar em uma localidade ou região e é estabelecida a partir de uma complexa interação entre estes fatores.

Os efeitos dos poluentes atmosféricos na saúde humana, na vegetação, nas construções e na produtividade dos solos, dependem principalmente, dos níveis de concentração e do tempo de exposição.

Segundo (Rechome, 2002), os poluentes podem ser classificados de acordo com a origem, o estado físico e composição química:

#### A. Origem

- a) *Poluentes Primários* - Estão presentes na atmosfera na forma em que são emitidos como resultado de algum processo. Os principais poluentes desta categoria são tanto sólidos, como líquidos e gasosos, ou mesmo radiações. Citamos como poluentes primários; partículas finas, partículas grosseiras, compostos de nitrogênio, óxidos de carbono, compostos de enxofre, compostos halogenados, compostos orgânicos, entre outros.
- b) *Poluentes Secundários* - São produzidos na atmosfera pela reação entre dois ou mais poluentes primários, ou pela reação com constituintes normais atmosféricos, com ou sem foto-ativação. Citamos como poluentes secundários; oxidantes, névoas ácidas, smog.

## B. Estado Físico

- a) Gases e vapores - CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>
- b) Partículas sólidas e líquidas - Poeiras, fumos, névoas e fumaças

## C. Composição Química

- a) Poluentes Orgânicos - Hidrocarbonetos, aldeídos e cetonas
- b) Poluentes Inorgânicos - H<sub>2</sub>S, HF, NH<sub>3</sub>

### 2.4.2.1. Padrões de Qualidade do Ar

Um padrão de qualidade do ar define legalmente as concentrações máximas de um componente atmosférico para garantir a proteção da saúde e do bem estar das pessoas. Os padrões de qualidade do ar são baseados em estudos científicos dos efeitos produzidos por poluentes específicos e são estabelecidos em níveis que possam propiciar uma margem de segurança adequada.

Em nível federal, a primeira legislação mais efetiva de controle da poluição atmosférica foi a Portaria do Ministério do Interior de nº 231, de 27 de abril de 1976, que visava a estabelecer padrões nacionais de qualidade do ar para *material particulado, dióxido de enxofre, monóxido de carbono e oxidantes fotoquímicos*.

Nos anos 80, com o crescimento da frota automobilística no Brasil, o Governo Federal propôs o estabelecimento de um programa de controle de poluição veicular, o que foi feito por meio da *Resolução Conama Nº 18*, de 06 de maio de 1986.

No entanto, percebeu-se ser de igual importância a criação de um programa nacional que contemplasse as fontes fixas de poluição atmosférica. Tendo em vista que a maioria dos estados não dispunha de padrões locais de emissão de fontes, observou-se a necessidade da fixação de dispositivos de caráter normativo e do estabelecimento de ações de monitoramento atmosférico.

### **PRONAR - Programa Nacional de Controle de Qualidade do Ar**

Assim, por meio da *Resolução Conama Nº 05*, de 15 de junho de 1989, foi criado o Programa Nacional de Controle de Qualidade do Ar — PRONAR — com o intuito de



promover a orientação e controle da poluição atmosférica no país, envolvendo estratégias de cunho normativo, como o estabelecimento de padrões nacionais de qualidade do ar e de emissão na fonte, a implementação de uma política de prevenção de deterioração da qualidade do ar, a implementação da rede nacional de monitoramento do ar e o desenvolvimento de inventários de fontes e poluentes atmosféricos prioritários.

A estratégia básica do PRONAR, conforme disposto na referida resolução, é de estabelecer limites nacionais para as emissões, por tipologia de fontes e poluentes prioritários, reservando o uso dos padrões de qualidade do ar como ação complementar de controle. Para que isso fosse implementado, foram definidas metas de curto, médio e longo prazo para que se desse prioridade à alocação de recursos e fossem direcionadas as ações.

Como medidas de curto prazo foram estabelecidas: a definição dos limites de emissão para fontes poluidoras prioritárias; a definição dos padrões de qualidade do ar; o enquadramento das áreas na classificação de usos pretendidos; o apoio à formulação dos Programas Estaduais de Controle de Poluição do Ar; a capacitação laboratorial e a capacitação de recursos humanos.

O primeiro dispositivo legal decorrente do PRONAR, foi a *Resolução Conama Nº 03*, de 28 de junho de 1990, que estabeleceu os novos padrões nacionais de qualidade do ar PNQA. (Tabela XI)

A determinação dos parâmetros regulamentados para a definição da qualidade do ar é limitada a um restrito número de poluentes, definidos em função da sua importância e que servem como indicadores de qualidade, consagrados universalmente.

São eles:

- Partículas totais em suspensão,
- Partículas inaláveis,
- Fumaça,
- Dióxido de enxofre,
- Monóxido de carbono,

- Dióxido de nitrogênio e
- Ozônio troposférico

A razão da escolha destes parâmetros como indicadores da qualidade do ar está ligada a sua maior frequência de ocorrência e dos efeitos adversos que causam à saúde e ao meio ambiente.

Além de estender o número de parâmetros regulamentados de quatro para sete, foi introduzida na legislação a figura dos padrões secundários de qualidade do ar, mais restritivos que os primários, constituindo-se seu atendimento em meta de longo prazo.

**Padrões primários** de qualidade do ar, são as concentrações de poluentes que, ultrapassadas poderão afetar a saúde da população. Podem ser entendidos como níveis máximos toleráveis de concentração de poluentes atmosféricos, constituindo-se em *metas de curto e médio prazo*.

**Padrões secundários** de qualidade do ar, são as concentrações de poluentes atmosféricos abaixo das quais se prevê o mínimo efeito adverso sobre o bem estar da população, assim como o mínimo dano à fauna e à flora, aos materiais e ao meio ambiente em geral. Podem ser entendidos como níveis desejados de concentração de poluentes, constituindo-se em *meta de longo prazo*.

O objetivo do estabelecimento de padrões secundários é criar uma base para uma política de prevenção da degradação da qualidade do ar. Deve ser aplicado a áreas de preservação (por exemplo: parques nacionais, áreas de proteção ambiental, estâncias turísticas, etc.). Não se aplicam, pelo menos a curto prazo, a áreas de desenvolvimento, onde devem ser aplicados os padrões primários.

Como prevê a própria Resolução CONAMA nº 03/90, a aplicação diferenciada de padrões primários e secundários requer que o território nacional seja dividido em classes I, II e III; conforme o uso pretendido. A mesma Resolução prevê ainda que enquanto não for estabelecida a classificação das áreas, os padrões aplicáveis serão os primários.

Tabela XI - Padrões Nacionais de Qualidade do Ar – Resolução CONAMA N° 3, de 28/06/90.

POLUENTE	TEMPO DE AMOSTRAGEM	PADRÃO PRIMÁRIO $\mu\text{g}/\text{m}^3$	PADRÃO SECUNDÁRIO $\mu\text{g}/\text{m}^3$	MÉTODO DE MEDIÇÃO
Partículas Totais em Suspensão	24 horas (1) MGA (2)	240 80	150 60	Amostrador de grandes volumes
Partículas Inaláveis	24 horas (1) MAA (3)	150 50	150 50	Separação Inercial/Filtração
Fumaça	24 horas (1) MAA (3)	150 60	100 40	Refletância
Dióxido de Enxofre	24 horas MAA (3)	365 80	100 40	Pararosanilina
Monóxido de Carbono	1 hora (1) 8 horas	40.000 35 ppm 10.000 (9 ppm)	40.000 35 ppm 10.000 (9 ppm)	Infravermelho não dispersivo
Dióxido de Nitrogênio	1 hora MAA	320 100	190 100	Quimiluminescência
Ozônio	1 hora (1)	160	160	Quimiluminescência

(1) Não deve ser excedido mais que uma vez ao ano.

(2) Média geométrica anual.

(3) Média aritmética anual.

Outro avanço dessa resolução foi o estabelecimento em nível nacional dos critérios para elaboração de plano de emergência para episódios agudos de poluição do ar, antes existentes apenas no Estado de São Paulo.

A Tabela XIII apresenta os Padrões Nacionais de Qualidade do Ar dos USA, elaborados pela USEPA. (USEPA, NAAQS, 2002)

Comparando-se os Padrões americanos com os nacionais, verifica-se que o  $\text{SO}_2$  e o CO apresentam os mesmos limites. A USEPA estabelece padrões para o chumbo, o

que não ocorre com os Padrões Nacionais. Da mesma forma, nacionalmente, estabelecem-se Padrões para a fumaça, o que não ocorre com a USEPA.

Relativamente ao Dióxido de Nitrogênio ( $\text{NO}_2$ ), o padrão anual é o mesmo em ambos, entretanto a USEPA não estabelece padrão para 1 hora. Quanto ao ozônio, o Padrão Nacional ( $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$  - Padrões Primário e Secundário), é mais restritivo que o estabelecido pela USEPA ( $235 \mu\text{g}/\text{m}^3$  - Padrões Primário e Secundário).

Tabela XII - Critérios para episódios agudos de poluição do Ar – Resolução CONAMA N° 3, de 28/06/90.

PARÂMETROS	NÍVEIS		
	ATENÇÃO	ALERTA	EMERG.
Dióxido de Enxofre ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) – 24 h	800	1.600	2.100
Partículas Totais em Suspensão (PTS) ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) – 24 h	375	625	875
SO <sub>2</sub> X PTS ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )x( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) – 24 h	65.000	261.000	393.000
Monóxido de Carbono (ppm) – 8 h	15	30	40
Ozônio ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) – 1 h	400 (1)	800	1.000
Partículas Inaláveis ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) – 24 h	250	420	500
< Fumaça ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) – 24 h	250	420	500
Dióxido de Nitrogênio ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) – 1 h	1.130	2.260	3.000

#### 2.4.2.2. Principais Poluentes do Ar Gerados por Usinas Termelétricas

Segundo o Grupo de Trabalho de Qualidade do Ar, estabelecido no Workshop – Geração Termelétrica a Gás Natural, é recomendável que sejam considerados como principais poluentes emitidos pelas termelétricas os seguintes: óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), material particulado ( $\text{MP}$ ), óxidos de enxofre ( $\text{SO}_x$ ) e os compostos orgânicos totais (hidrocarbonetos -  $\text{TOC}$ ).

Segundo a (USEPA, AP-42, 2000), os principais poluentes de uma turbina a gás são os óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), o monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), e em menor escala, os compostos orgânicos voláteis ( $\text{VOC}$ ). A formação dos óxidos de nitrogênio é

extremamente dependente da alta temperatura desenvolvida no combustor. O Monóxido de carbono, os compostos orgânicos voláteis (VOC), e o material particulado (MP) são resultantes, principalmente, da combustão incompleta.

A CETESB, solicita que os Estudos de Impacto Ambiental – EIA das usinas termelétricas sejam efetuados considerando-se os seguintes poluentes:

- Óxidos de nitrogênio (**NO<sub>x</sub>**)
- Monóxido de carbono (**CO**)
- Dióxido de enxofre (**SO<sub>2</sub>**)
- Material Particulado (**MP**)
- Compostos orgânicos voláteis (**VOC**)
- Compostos orgânicos totais (**TOC-Hidrocarbonetos**)

Tabela XIII - Padrões Nacionais de Qualidade do Ar dos USA.

Fonte: (USEPA, NAAQS, 2001)

POLUENTE	AMOSTRAGEM	PADRÕES	
		PRIMÁRIO	SECUNDÁRIO
Monóxido de Carbono (CO)	Média de 8 h	9 ppm (10 mg/m <sup>3</sup> )	-
	Média de 1 h	35 ppm (40 mg/m <sup>3</sup> )	-
Dióxido de Nitrogênio (NO <sub>2</sub> )	Média Aritmética Anual	0,053 ppm (100 µg/m <sup>3</sup> )	0,053 ppm (100µg/m <sup>3</sup> )
Ozônio (O <sub>3</sub> )	Média de 1 h	0,12 ppm (235 µg/m <sup>3</sup> )	0,12 ppm (235 µg/m <sup>33</sup> )
	Média de 8 h	0,08 ppm (157 µg/m <sup>3</sup> )	0,08 ppm (157 µg/m <sup>33</sup> )
Chumbo	Média Trimestral	1,5 µg/m <sup>3</sup>	1,5 µg/m <sup>3</sup>
Material Particulado < 10 mm	Média Aritmética Anual	50 µg/m <sup>3</sup>	50 µg/m <sup>3</sup>
	Média de 24 h	150 µg/m <sup>33</sup>	150 µg/m <sup>3</sup>
Material Particulado < 2,5 µm	Média Aritmética Anual	15 µg/m <sup>3</sup>	15 µg/m <sup>3</sup>
	Média de 24 h	65 µg/m <sup>33</sup>	65 µg/m <sup>33</sup>
Dióxido de Enxofre (SO <sub>2</sub> )	Média Aritmética Anual	0,03 ppm (80 µg/m <sup>3</sup> )	-
	Média de 24 h	0,14 ppm (365 µg/m <sup>3</sup> )	-
	Média de 3 h	-	0,50 ppm (1300µg/m <sup>3</sup> )

A amplitude das faixas de concentrações destes poluentes resulta, evidentemente, da composição do gás natural, das características dos equipamentos e sistemas de controle da poluição, utilizados na instalação.

Apresentam-se, a seguir, as características dos principais poluentes gerados por usinas termelétricas, conforme solicitação da CETESB para o Estudo de Impacto Ambiental - EIA.

#### **2.4.2.2.1. Óxidos de Nitrogênio - NO<sub>x</sub>**

Os óxidos de nitrogênio, representados genericamente por NO<sub>x</sub>, compreendem fundamentalmente óxido nítrico (NO) e dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>). São formados durante a combustão devido à reação química do oxigênio com o nitrogênio do próprio ar ou presente no combustível. A formação de óxidos de nitrogênio ocorre, fundamentalmente, por três diferentes mecanismos: NO<sub>x</sub> térmico, NO<sub>x</sub> combustível e NO<sub>x</sub> ativo ou “prompt”. (USEPA, AP-42, 2000)

O NO<sub>x</sub> 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. (Negri, 2002)

##### **NO<sub>x</sub> térmico**

É o principal mecanismo de formação dos óxidos de nitrogênio nas turbinas a gás ou combustíveis líquidos, o qual se forma da dissociação térmica e subsequente reação das moléculas do nitrogênio (N<sub>2</sub>) e o oxigênio (O<sub>2</sub>) do ar de combustão. Esta reação é importante em temperaturas acima de 1.700 °C.

O NO<sub>x</sub> 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<sub>x</sub> térmico aumenta com a carga do equipamento, visto que o aumento de potência térmica gerada implica maiores temperaturas. (Negri, 2002)

A formação máxima de NO<sub>x</sub> térmico ocorre com mistura de combustível ligeiramente pobre, em relação ao oxigênio disponível para a reação (menos combustível); assim, o controle estequiométrico da reação é crítico para a minimização da formação do NO<sub>x</sub> térmico. (USEPA, AP-42, 2000)

### **NO<sub>x</sub> 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<sub>x</sub> combustível aumenta com a quantidade de nitrogênio presente no combustível e com excesso de ar. (Negri, 2002)

É um mecanismo importante em combustíveis líquidos e sólidos. A quantidade de nitrogênio 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<sub>x</sub> combustível na queima de gás natural e óleo destilado. (Negri, 2002)

### **NO<sub>x</sub> 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 reação das moléculas de nitrogênio molecular presentes no ar, com radicais derivados de hidrocarbonetos presentes na chama de combustíveis. (USEPA, AP-42, 2000)

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

### Características dos óxidos de nitrogênio

Os compostos de nitrogênio mais importantes como poluentes atmosféricos são o monóxido de nitrogênio (NO) e o dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>), designados conjuntamente por óxidos de nitrogênio-NO<sub>x</sub>.

As principais fontes dos óxidos de nitrogênio são os processos de combustão, tanto naturais como os gerados pelas fontes antropogênicas

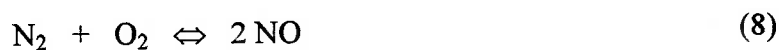
Segundo (Davis, 1998), as ações bacteriológicas nos solos (processo natural) emitem óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) para a atmosfera, o qual na troposfera e estratosfera reage com o oxigênio atômico (resultante da dissociação do ozônio), formando óxido nítrico (NO).



Posteriormente, o óxido nítrico reage com o ozônio (oxidação fotoquímica), formando o dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>).



Segundo (Davis, 1998), os processos de combustão representam aproximadamente 96% das fontes antropogênicas de formação dos óxidos de nitrogênio. Embora o oxigênio e o nitrogênio coexistam em nossa atmosfera, sem reações, a sua relação é muito menos indiferente a altas temperaturas. A temperaturas superiores a 1600 K, eles reagem, formando o óxido de nitrogênio:



Posteriormente, na atmosfera, o óxido de nitrogênio reage com o ozônio ou o oxigênio, formando o dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>).

O NO<sub>2</sub> é um gás marrom avermelhado, muito irritante, facilmente detectável pelo forte odor. O NO é um gás incolor, insípido, inodoro e pouco tóxico. (CETESB, 2002)



O NO é um gás menos reativo com tecidos biológicos e não é considerado como tendo efeitos adversos sobre a saúde nas concentrações encontradas na atmosfera. (Saldiva, 1991)

O NO<sub>2</sub> reage com todas as partes do corpo expostas ao ar (pele e mucosas), exercendo a sua ação tóxica, principalmente, nos pulmões e vias aéreas periféricas, sendo capaz de produzir irritações nos olhos e nariz a partir de 10 a 15 ppm. Os epitélios (revestimentos celulares) que mais sofrem são aqueles das vias respiratórias, por serem mais sensíveis do que a pele ou os epitélios da boca e da faringe, e, portanto, ocorrem degenerações celulares e inflamações no sistema respiratório, desde o nariz até à profundidade dos alvéolos pulmonares. (Saldiva, 1991)

Segundo (Davis, 1998), a exposição a concentrações de NO<sub>2</sub> acima de 5 ppm por um período de 15 minutos, resulta em tosse e irritação do sistema respiratório. A continuidade de exposição pode produzir um acúmulo anormal de líquido no pulmão (edema pulmonar).

A exposição ao NO<sub>2</sub> acarreta um aumento da sensibilidade à asma e à bronquite, diminuindo a resistência às infecções respiratórias. (CETESB, 2001)

Os óxidos de nitrogênio - NO<sub>x</sub> têm, igualmente, efeitos negativos sobre a vegetação, principalmente no desenvolvimento das florestas e culturas agrícolas. Estes efeitos são ainda mais acentuados quando o dióxido de nitrogênio e o dióxido de enxofre estão presentes simultaneamente.

#### **2.4.2.2.2. Monóxido de Carbono - CO**

O Monóxido de Carbono (CO) à temperatura ambiente é um gás incolor, inodoro e insípido, produzido em quantidades significativas, tanto por processos naturais (erupções vulcânicas, decomposição da clorofila, fogos florestais, etc.); como por atividades humanas.

O CO de origem antropogênica é emitido para a atmosfera principalmente como resultado da combustão incompleta de combustíveis fósseis ou outros materiais que contenham carbono em sua composição; sendo o transportes rodoviário o setor que mais contribui para as emissões deste poluente (Braga et al , 2002).

Segundo (Davis, 1998), a decomposição anaeróbica, natural, de materiais carbonáceos pelos microorganismos do solo, emitem anualmente para a atmosfera, em todo o mundo, aproximadamente  $9 \times 10^{15}$  mols de metano ( $\text{CH}_4$ ). A formação natural do CO resulta de um passo intermediário da oxidação do metano. As fontes antropogênicas são responsáveis pela emissão anual, em todo o planeta, de  $1 \times 10^{13}$  mols de CO. Os veículos automotores são responsáveis por mais de 60 % desta emissão.

No caso das emissões de turbinas a gás, as emissões de monóxido de carbono (CO) resultam quando há insuficiente tempo de residência da mistura no combustor, ou a mistura é insuficiente para completar a oxidação do carbono contido no combustível. A oxidação de CO para dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) nas temperaturas das turbinas a gás é uma reação lenta, comparada com a maioria das reações de oxidação dos hidrocarbonetos. (USEPA, AP-42, 2000)

Turbinas a gás a plena carga operam com alta eficiência, reduzindo a formação de monóxido de carbono; assim como operações a baixa ou média carga apresentam baixa eficiência (combustão incompleta), o que aumenta a formação de monóxido de carbono (CO). (USEPA, AP-42, 2000)

Segundo (Saldiva, 1991), a toxicidade do CO foi uma das primeiras a ser intensamente investigada e, portanto, é muito bem conhecida. O primeiro autor a estudar os efeitos do CO sobre sistemas biológicos foi Haldane, em 1895. Segundo este, o efeito tóxico do CO é consequência da sua habilidade de se ligar à hemoglobina do sangue, com a qual tem afinidade muitas vezes maior que o oxigênio. A hemoglobina é a substância que está dentro dos glóbulos vermelhos do sangue, a qual carrega o oxigênio aos tecidos do corpo humano. Nos capilares pulmonares, a hemoglobina (Hb) recebe oxigênio ( $\text{O}_2$ ) do ar que está nos alvéolos e, depois circula pelos vasos sanguíneos para levar este elemento vital a todos os tecidos. O  $\text{O}_2$  é entregue a cada setor do organismo conforme sua necessidade e a hemoglobina recebe o  $\text{CO}_2$  lá existente, e que é o produto resultante do metabolismo celular do qual os tecidos precisam se livrar.

A ligação do CO com a hemoglobina é 245 vezes mais estável que com o oxigênio, transformando a hemoglobina em Carboxihemoglobina (COHb), a qual é incapaz de

transportar oxigênio aos tecidos do corpo humano. Por esta razão o CO é considerado um asfixiante sistêmico.

Segundo (Davis, 1998), em níveis de 5 a 10% de COHb, a percepção visual, a destreza manual e a habilidade para aprender são prejudicadas. Concentrações de 50 ppm de CO por um período de 8 horas resultam num nível de 7,5% de COHb. Se 20% a 30% da hemoglobina ficarem saturados com CO, aparecem os sintomas e sinais de hipóxia (falta de oxigenação do organismo); acima de 60% de saturação, ocorrem perda da consciência e morte em poucas horas, e acima de 90% temos morte em poucos minutos.

Entretanto, é importante saber que nas intoxicações agudas ou crônicas, se a vítima não mais respirar CO e, desse modo, a concentração de carboxihemoglobina se mantiver estável, a hemoglobina lentamente se livra desse gás tóxico, o sistema sangüíneo reage produzindo novos glóbulos vermelhos prontos para a troca vital de gases e, após vários dias, restabelece-se o ciclo normal da oxigenação celular. A absoluta maioria dos pacientes tem recuperação completa e sem seqüelas.

#### **2.4.2.2.3. Dióxido de enxofre - SO<sub>2</sub>**

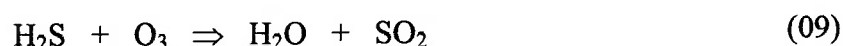
O dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) é um gás incolor, detectável pelo odor característico do enxofre e terrivelmente irritante para as mucosas, principalmente, conjuntiva e trato respiratório. (Saldiva, 1991)

Os óxidos de enxofre podem ser de origem primária ou secundária. Plantas industriais que utilizem queima de combustíveis fósseis que tenham enxofre em sua composição, vulcões e oceanos emitem óxidos de enxofre, diretamente, como poluente primário. (Braga et al, 2002)

Processos de degradação biológica e algumas fontes industriais emitem H<sub>2</sub>S, o qual através de um processo de oxidação forma SO<sub>2</sub> como poluente secundário. (Davis, 1998)

Em termos de emissão de enxofre, as fontes naturais emitem, aproximadamente,  $1,25 \times 10^{11}$  Kg/ano; enquanto que às fontes antropogênicas podem ser atribuídos, aproximadamente,  $4,5 \times 10^{13}$  Kg/ano. (Davis, 1998).

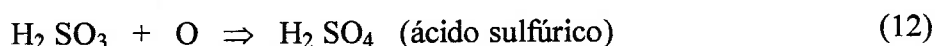
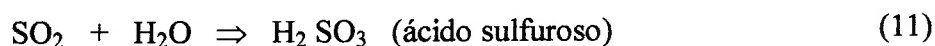
A mais importante reação de oxidação do  $H_2S$  ocorre com o envolvimento do ozônio. (Davis, 1998)



A produção de dióxido de enxofre através da combustão de combustíveis fósseis é diretamente proporcional ao enxofre contido no combustível: (Davis, 1998)



Na atmosfera, o dióxido de enxofre pode reagir com o vapor de água existente no ar e com o oxigênio, formando o ácido sulfúrico e sulfatos, acarretando a chamada “chuva ácida”:



O  $SO_2$  é um gás irritante para as mucosas dos olhos e vias respiratórias, podendo ter, em concentrações elevadas, efeitos agudos e crônicos na saúde humana, principalmente no aparelho respiratório. A intoxicação aguda e fatal por  $SO_2$  simplesmente queima as vias respiratórias, desde a boca e o nariz até aos alvéolos. A destruição é marcada por inflamação, hemorragia e necrose dos tecidos.

Uma grande quantidade de estudos tem focalizado os efeitos dos óxidos de enxofre sobre a saúde populacional, sendo que as principais conclusões podem ser resumidas da seguinte forma: (Saldiva, 1991)

- Em situações de aumento dos níveis atmosféricos de  $SO_2$  associado a material particulado, ocorre aumento significativo de consultas/ internações hospitalares por doenças respiratórias; sendo que os pacientes portadores de

doenças pulmonares relatam agravamento dos sintomas nestas mesmas ocasiões. Estudos indicam haver também uma correlação positiva entre mortalidade e níveis atmosféricos elevados de SO<sub>2</sub>.

- Estudos epidemiológicos tem revelado uma correlação entre níveis atmosféricos de SO<sub>2</sub> e material particulado, com doenças respiratórias na população infantil.
- Estudos epidemiológicos que levam em conta fatores sócio-econômicos e hábito de fumar, revelam que áreas com maiores níveis de SO<sub>2</sub> estão associadas a uma maior prevalência de bronquite crônica e redução do volume expiratório, principalmente para fumantes.
- Estudos realizados em necropsia mostram uma associação positiva entre hipertrofia de glândulas mucosas das vias aéreas e gravidade do enfisema em áreas com maiores concentrações de SO<sub>2</sub>. O gás SO<sub>2</sub> é muito solúvel e ao chegar na mucosa respiratória, sabidamente úmida, encontra água. Assim transforma-se em ácido sulfuroso e/ou sulfúrico que, mesmo em quantidades muito pequenas, ao longo do tempo lesam o aparelho mucociliar e, em consequência, uma das defesas importantes do pulmão. A doença provocada é a tráqueo-bronquite crônica que, depois de certo tempo é irreversível, pois as defesas foram definitivamente comprometidas. Deste modo teremos uma afecção inflamatória crônica das vias aéreas superiores, cujo portador fica predisposto a frequentes infecções respiratórias, por exemplo broncopneumonias, porque o ar que respiramos contém bactérias e vírus.

#### **2.4.2.2.4. Material Particulado - MP**

Segundo (Braga et al. 2002), entende-se por material particulado, as partículas de material sólido e líquido, capazes de permanecer em suspensão no ar, como é o caso da poeira, fuligem e das partículas de óleo, além do pólen. Estas partículas são provenientes de atividades naturais como os vulcões, dispersão do pólen ou da ação do vento sobre o solo e superfícies aquáticas; bem como de processos de combustão, tais como a queima de combustíveis fósseis, incineração, processos industriais e veículos.

O material particulado pode ser de origem primária, quando as partículas são emitidas diretamente a partir das fontes poluidoras, ou secundária, quando as partículas se formam na atmosfera pela condensação de vapores ou como resultado de reações químicas.

Fontes secundárias de material particulado incluem a conversão de  $H_2S$ ,  $SO_2$ ,  $NO_x$ ,  $NH_3$  e hidrocarbonetos.  $H_2S$  e  $SO_2$  são convertidos para sulfatos;  $NO_x$  e  $NH_3$  são convertidos para nitratos e os hidrocarbonetos reagem formando produtos que condensam, formando partículas à temperatura ambiente. (Davis, 1998)

Nas operações de turbinas a gás natural, as emissões de material particulado resultam, principalmente, de traços de produtos não combustíveis presentes no gás. As emissões de MP são desprezíveis quando o combustível é o gás natural e insignificantes, no caso de óleo destilado com baixo teor de cinzas. (USEPA, AP-42, 2000)

Segundo (Saldiva, 1991), o diâmetro da partícula exerce um papel fundamental em sua eficiência de penetração na via aérea. Além do diâmetro, a forma da partícula determinará o grau de acesso e deposição no organismo. Desta forma convencionou-se estudar a penetração, e conseqüentemente o efeito tóxico do material particulado de acordo com seu "diâmetro-equivalente", definido como o diâmetro de uma esfera de densidade unitária que apresente a mesma velocidade terminal de deposição que a partícula não esférica em questão. A menor deposição fracional na árvore respiratória ocorre em torno de 0,50 a 1,5 ( $\mu m$ ) de diâmetro aerodinâmico. Isto significa que as partículas com este valor de diâmetro aerodinâmico apresentam a maior eficiência de acesso alveolar.

Os efeitos tóxicos do material particulado dependem, como se pode depreender do parágrafo acima, de diversas características: concentração atmosférica, parâmetros aerodinâmicos e composição química. O material particulado pode provocar alterações respiratórias diversas, tais como inibição do transporte mucociliar, destruição dos espaços aéreos distais e aumento da reatividade brônquica.

Outro aspecto que também deve ser considerado é a atuação do material particulado como carregador de outros poluentes. Nestas condições, o material particulado

potencializa a ação de outros poluentes, dado que sua remoção é mais lenta que dos gases e gotículas de vapores.

#### **2.4.2.2.5. Compostos orgânicos voláteis (VOC)**

Os poluentes comumente classificados como VOC podem abranger um grande espectro de compostos orgânicos voláteis, alguns dos quais são poluentes perigosos no ar. Estes compostos são lançados na atmosfera, quando parte do combustível não é queimado, ou então é queimado parcialmente, durante o processo de combustão. Da mesma forma que no monóxido de carbono (CO), as emissões de compostos orgânicos voláteis (VOC) são afetadas pela condição de carga da turbina (baixa, média ou plena). As emissões de VOC são altas para turbinas operando a baixas cargas, comparativamente, a operações a plena carga. (USEPA, AP-42, 2000)

#### **2.4.2.2.6. Compostos orgânicos totais (TOC-Hidrocarbonetos)**

Os hidrocarbonetos presentes na atmosfera são resultantes da queima incompleta dos combustíveis, bem como da evaporação desses combustíveis e de outros materiais como, por exemplo, os solventes orgânicos. (Braga, et al, 2002)

Muitos dos hidrocarbonetos presentes na atmosfera são relativamente inertes, como os parafínicos, outros são extremamente reativos, como os olefínicos, e combinam rapidamente com o NO em presença de luz solar, para formarem compostos altamente oxidantes. (Saldiva, 1991)

Sob o ponto de vista biológico, os hidrocarbonetos aromáticos são extremamente ativos. As medidas de concentrações de hidrocarbonetos, realizadas nos grandes centros urbanos, indicam que seus habitantes, particularmente, aqueles que habitam ao longo de vias com alta densidade de tráfego, inalam diariamente, consideráveis quantidades de hidrocarbonetos, principalmente os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, responsáveis pelo aumento da incidência de câncer no pulmão. Alguns estudos demonstraram correlação entre o aumento de incidência de mortalidade por câncer em população urbana e poluição do ar. Dentre os tumores pesquisados, encontrou-se correlação entre o câncer de pulmão e a concentração de hidrocarbonetos. (Saldiva,1991)

### **2.4.2.3. Tecnologias de Controle das Emissões Atmosféricas das Usinas Termelétricas**

Considerando-se que o NO<sub>x</sub> é o poluente mais crítico, os sistemas de controle tem como foco principal o abatimento do mesmo.

Os sistemas disponíveis para controle das emissões de NO<sub>x</sub> são resultado de intensas pesquisas tecnológicas na área de combustão e materiais. A utilização das diversas tecnologias é função do tipo de combustível utilizado e dos padrões de emissão aplicáveis. Os principais processos de redução da emissão do NO<sub>x</sub> são aplicados no próprio processo de combustão, evitando-se a sua formação.

Há três tipos genéricos de controle das emissões de turbinas a gás:

- Remoção prévia do nitrogênio presente no combustível,
- Redução da formação durante a combustão,
- Processo de tratamento de gases efluentes

#### **2.4.2.3.1. Remoção prévia**

Diferentemente do SO<sub>x</sub> que depende apenas da presença de enxofre no combustível, a formação do NO<sub>x</sub> tem 2 mecanismos inerentes à combustão.

Portanto, a remoção de nitrogênio do combustível só teria efeito sobre o NO<sub>x</sub> combustível. É uma técnica em geral dispendiosa e não estabelecida na prática. (Negri, 2002)

#### **2.4.2.3.2. Redução durante a combustão**

As técnicas de redução de formação de NO<sub>x</sub> durante a combustão buscam reduzir os teores de nitrogênio e oxigênio na zona de temperatura máxima; bem como reduzir esta temperatura e o tempo de residência na zona de combustão. A prevenção da formação de NO<sub>x</sub> durante o processo de combustão é a forma mais econômica da redução de sua emissão.

Segundo a (USEPA, AP 42, 2000), neste contexto, podem ser considerados os “controles úmidos” e os “controles secos”:



## **Controles Úmidos**

Os controles úmidos são efetuados, basicamente, através da injeção de água ou vapor, cujo objetivo é aumentar a massa térmica pela diluição e assim reduzir a temperatura da chama. A injeção de água ou vapor ocorre numa relação água-combustível menor que um. Dependendo dos níveis iniciais de NO<sub>x</sub>, a injeção de água ou vapor pode reduzir estes níveis em 60% ou mais. As emissões de monóxido de carbono (CO) e compostos orgânicos voláteis aumentam com a injeção de água. (USEPA, AP-42, 2000)

## **Controles Secos**

Desde que a emissão de NO<sub>x</sub> é função da temperatura (exponencialmente) e do tempo (linearmente), as bases para o controle seco são a diminuição da temperatura no combustor utilizando misturas pobres de ar-gás, ou diminuição do tempo de residência da mistura no combustor. (USEPA, AP-42, 2000)

Os controles secos podem ser efetuados, principalmente, pelas seguintes técnicas:

### **a) Combustão pobre (excesso de ar)**

A combustão pobre envolve o aumento de ar na relação ar-combustível da mistura, objetivando que as temperaturas máxima e média no interior do combustor sejam menores que aquelas decorrentes de uma mistura estequiométrica, conseqüentemente, diminuindo a formação de NO<sub>x</sub> térmico. A introdução de excesso de ar não só cria uma mistura pobre, mas também reduz o tempo de residência a altas temperaturas. (USEPA, AP-42, 2000)

Enquanto o excesso de ar inibe a formação de NO<sub>x</sub> térmico e NO<sub>x</sub> combustível, provoca aumento na formação de monóxido de carbono (CO) e material particulado. Experiências indicam reduções de NO<sub>x</sub> na faixa de 17 a 38% sem comprometer a emissão de monóxido de carbono (CO) e material particulado. (Negri, 2002)

### **b) Combustão estagiada**

Esta técnica é baseada em combustão por etapas, tendo-se:

Combustores de dois estágios (pobre/pobre), nos quais cada estágio queima mistura pobre. São alcançados baixos níveis de emissão de NOx, através da diminuição da temperatura de chama, resultante da combustão pobre, evitando a existência de “pontos quentes” em função da pré-mistura de ar e combustível.

Combustores de dois estágios (rico/pobre), nestes combustores o primeiro estágio é operado com mistura rica e o segundo com mistura pobre. A mistura rica produz menores temperaturas (comparativamente à mistura estequiométrica) e altas concentrações de monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H<sub>2</sub>), porque a combustão é incompleta. A mistura rica também diminui a quantidade de oxigênio (O<sub>2</sub>) disponível para a geração de NOx. (USEPA, AP-42, 2000)

#### c) Recirculação de gases

A recirculação ou re-injeção de gases de exaustão na zona de combustão provoca redução de NOx em função da diminuição da temperatura de chama e dispersão do oxigênio (O<sub>2</sub>) em excesso.

É uma técnica sobretudo utilizada para o gás natural e óleos com baixo nitrogênio, reduzindo principalmente o NOx térmico. (Negri, 2002)

#### d) Queimadores de baixa emissão (“Dry-Low NOx –DLN”)

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

No Brasil a geração termoeétrica em implementação tem predominância dos 2 últimos ciclos. O controle de NOx 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 NOx . (Negri, 2002)

Segundo a Negri (2002), importante fabricante de turbinas industriais a gás, a Hitachi garante a seguinte configuração e níveis de emissão de NOx na queima de gás natural:

- queimador comum: 188 ppm
- queimador comum com injeção de vapor (1,45 kgvapor/kgcomb): 53 ppm
- queimador comum com injeção de água (1,45 kgágua/kgcomb): 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 NOx”, o queimador modular-híbrido, no qual a meta é atingir 9 ppm, e combustão catalítica com meta de 3 ppm. (Negri, 2002)

#### **2.4.2.3.3. Processo de tratamento de gases efluentes**

As estratégias de remoção do NOx dos gases efluentes, que tem sido efetivamente utilizadas pela indústria consistem nas tecnologias “Selective Catalytic Reduction – SCR” e “Selective Non-Catalytic Reduction - SNCR”. Estas tecnologias produzem níveis de emissão de NOx extremamente baixos, mas com altos custos dos equipamentos, instalação, operação e manutenção.

Os Sistemas de Redução Catalítica – SCR, reduzem a emissão de NOx através da injeção de amônia (NH<sub>3</sub>) nos gases de exaustão. Os óxidos de nitrogênio (NOx), amônia (NH<sub>3</sub>) e oxigênio (O<sub>2</sub>) reagem na superfície do catalisador, formando nitrogênio (N<sub>2</sub>) e água (H<sub>2</sub>O). Os gases de exaustão necessitam conter uma quantidade mínima de oxigênio (O<sub>2</sub>) e estar dentro de uma faixa de temperatura (normalmente entre 45° e 850° F). para que o sistema SCR opere adequadamente.

A faixa de temperatura é definida pelo material do catalisador, normalmente fabricado com metais nobres, tais como vanádio e titânio. A eficiência de remoção de um sistema SCR, em perfeitas condições de operação, é da ordem de 65 a 90%. Temperaturas dos gases de exaustão maiores que o limite provocam a passagem do NOx e da amônia (NH<sub>3</sub>) através do catalisador, sem reação dos mesmos. (USEPA, AP-42, 2000)

No sistema SNCR, há a injeção de amônia ou uréia, diretamente, nos gases de exaustão, não havendo a presença de catalisador. Em algumas situações a uréia é preferida em relação à amônia, porque esta é venenosa e de difícil manuseio. O controle da conversão de NOx é baseado, principalmente, na vazão de amônia (ou uréia); sendo que a temperatura também é uma variável importante e controlada.

Embora os sistemas SCR e SNCR possam operar isoladamente, os mesmos são, normalmente, utilizados em conjunto com sistemas de injeção de água ou vapor, ou outros sistemas de controle.

Nos EEUU estão aplicados 72 sistemas SCR em turbinas a gás com garantia de 10 ppm de NOx. A Tabela XIV apresenta um resumo por técnica do abatimento de NOx. (Negri, 2002)

Tabela XIV - Porcentagem de abatimento de NOx para diversas técnicas de redução.

TÉCNICA	COMBUSTÍVEL		
	Carvão	Óleo	Gás Natural
<b>Alteração na Combustão</b>			
Injeção de água/vapor	Não disp.	10 - 50	Não disp.
Combustão pobre	10 - 30	10 - 30	10 - 30
Combustão estagiada	20 - 50	20 - 50	20 - 50
Recirculação de gases	Não disp.	20 - 50	20 - 50
Queimadores DLN	30 - 40	30 - 40	30 - 40
<b>Tratamento de Gases Efluentes</b>			
SCR	60 - 90	60 - 90	60 - 90
SNCR	Não disp.	30 - 70	30 - 70

No Estado de São Paulo, o licenciamento das termelétricas, sob o enfoque do sistema de controle, enquadra-se no Art. 41 do Decreto Estadual N° 8.468, de 08/09/76:

“As fontes de poluição, para as quais não foram estabelecidos padrões de emissão, adotarão sistemas de controle de poluição do ar baseados na melhor tecnologia prática disponível para cada caso.”

Este Decreto, em seu Parágrafo Único, estabelece que o empreendedor deve apresentar à CETESB para análise e aprovação, um Plano de Controle especificando as medidas a serem adotadas e a redução almejada para a emissão.

### **2.4.3. Poluição das Águas**

A Poluição hídrica pode ser definida como a introdução num corpo d'água de qualquer matéria ou energia que venha a alterar as propriedades dessa água, afetando, ou podendo afetar, por isso, a "saúde" das espécies animais ou vegetais que dependem dessa água ou com ela tenham contato, ou mesmo que venham a provocar modificações físico-químicas nas espécies minerais contatadas.

No caso das usinas termelétricas, a poluição da água mais importante a considerar é a poluição térmica, a qual é decorrente dos processos de refrigeração.

A elevação da temperatura afeta a solubilidade do O<sub>2</sub> na água, fazendo com que esse gás escape mais facilmente para a atmosfera, conseqüentemente acarretando uma diminuição de sua disponibilidade na água, o que prejudica diversas formas aeróbicas aquáticas.

Para os seres vivos, os principais efeitos da elevação da temperatura dizem respeito à aceleração do ritmo do metabolismo, ou seja, das atividades químicas que ocorrem nas células.

A aceleração do metabolismo aumenta a necessidade de oxigênio de um animal aquático e, em conseqüência, seu ritmo de respiração. Experiências realizadas com peixes da família do salmão mostraram que estes, submetidos à temperatura máxima a que podiam resistir, chegavam a consumir quatro vezes mais oxigênio que o normal. Em algumas espécies, o ritmo cardíaco pode ser tomado como índice da tensão metabólica ou respiratória do organismo.

Além de aumentar a necessidade de oxigênio dos peixes, a elevação da temperatura em virtude da hemoglobina (pigmento dos glóbulos vermelhos que fixa o oxigênio) ter pouca afinidade com o oxigênio quente, torna muito mais difícil o processo de respiração dos peixes. Assim até mesmo os peixes que são capazes de sobreviver com pequena quantidade de oxigênio passam a viver sob grande tensão.

Além de controlar o período da desova, a temperatura controla, também, a época de abertura dos ovos. Alguns pesquisadores descobriram que há temperaturas críticas, abaixo ou acima das quais os animais aquáticos não se reproduzem.

Além de influir no metabolismo e na reprodução dos animais aquáticos, a temperatura influi também sobre seu índice de longevidade, período de crescimento e tamanho.

O limite de resistência de cada espécie, de qualquer forma, não implica uma atenuação à poluição térmica, pois o que importa não são as temperaturas letais a cada espécie, mas as desfavoráveis a todo o sistema biológico. Os peixes maiores dependem dos menores, estes, de pequenos crustáceos, algas e outras plantas, formando uma cadeia alimentar. Algumas espécies, individualmente, podem resistir ou aclimatar-se a um aumento de temperatura, mas se esta é fatal a outras, o equilíbrio ecológico pode ser rompido, afetando a médio ou a longo prazo todas as formas de vida.

Combinada e reforçada com outras formas de poluição, a poluição térmica pode empobrecer o ambiente de forma imprevisível, causando prejuízos à fauna e flora aquáticas.

#### **2.4.3.1. Principais Efluentes Líquidos Gerados por Usinas Termelétricas**

Nas termelétricas são gerados dois tipos de efluentes: industriais e sanitários (ou domésticos) (Main Engenharia, 1997).

##### **2.4.3.1.1. Efluentes Industriais**

A operação de uma usina termelétrica gera certa quantidade de efluentes industriais, basicamente, provenientes das seguintes áreas:

- **Sistema de Tratamento de Água**

Nos casos em que as termelétricas captam água bruta para sua utilização, e para tanto necessitam efetuar o devido tratamento, há a necessidade de clarificação desta água. O efluente proveniente desta clarificação, que é uma água com concentração de sólidos, constitui-se num efluente industrial.

- **Sistema de Resfriamento**

Os sistemas de resfriamento usuais nas termelétricas geram dois tipos de efluentes: uma descarga contínua, composta por sólidos que se concentram gradativamente na água de resfriamento, em função da evaporação ocorrida na torre, e o efluente resultante da limpeza das bacias da torre, que é um efluente não-contínuo.

- **Sistema de Desmineralização da Água**

Toda água desmineralizada, consumida pela termelétrica, é normalmente fornecida por uma planta de desmineralização.

O efluente gerado neste sistema, constitui-se basicamente, das águas de lavagem das colunas utilizadas nos processos de regeneração dos leitos catiônicos e aniônicos do sistema; bem como a água de lavagem do filtro de carvão ativado.

A regeneração das resinas catiônicas e aniônicas é feita, respectivamente, com ácido sulfúrico (ou clorídrico) e soda cáustica. No entanto, uma vez que estas substâncias não são completamente retidas pelas resinas, seu excesso é removido com lavagens de água, formando, assim, soluções de ácido e de hidróxido, que se constituem no efluente desta unidade.

- **Purga da Caldeira**

A purga da caldeira é uma operação esporádica de retirada ou drenagem de uma parte da água que, tem seus teores de sólidos suspensos e dissolvidos aumentados em função do processo de evaporação da água.

Em sistemas com água de alimentação de pureza elevada, através de sistemas auxiliares de desmineralização, a quantidade de água a ser purgada é significativamente menor, da ordem de 0,1 a 0,2% da água introduzida na caldeira.

Na caldeira são utilizados produtos químicos com a função de evitar incrustações e corrosão, incluindo soluções de hidrazina/amoníaco, e soluções de fosfato e/ou soda cáustica. A água da purga apresentará, então, um alto grau de alcalinidade e estará a uma temperatura muito elevada.

A água de purgas da caldeira vai ser resfriada e despressurizada antes de ser transferida à bacia da torre de resfriamento, não havendo, portanto, descarte imediato da mesma.

- **Efluentes de Drenagem**

São os líquidos provenientes da drenagem da água das chuvas e da água utilizada na limpeza dos pátios e equipamentos na área industrial. Estes efluentes, normalmente, são encaminhados para o sistema de tratamento de efluentes, onde são tratados, antes de serem descartados.

- **Efluentes da Limpeza da Caldeira**

A limpeza química das superfícies internas da caldeira é uma operação efetuada quando da parada programada da unidade para manutenção geral, com frequência, aproximadamente, anual.

Esta limpeza química é efetuada em duas fases: ácida e alcalina.

Nesta limpeza são utilizados produtos químicos, tais como: ácido clorídrico, soda cáustica, carbonato de cálcio e fosfato trissódico. No entanto como, normalmente, deve ser usado um volume muito maior de ácido clorídrico, se comparado ao volume total dos produtos alcalinos, este efluente será tipicamente ácido.

Os efluentes de limpeza química provenientes das caldeiras e da lavagem das turbinas a gás, normalmente são submetidos à centrifugação. Após centrifugados, o líquido retornará ao processo e o sólido será enviado a local adequado, juntamente com os demais resíduos sólidos gerados na termelétrica.

#### **2.4.3.1.2. Efluentes Sanitários**

Os efluentes sanitários são provenientes dos sanitários, vestiários e refeitórios; tanto na fase de implantação da termelétrica, como na sua fase de operação.

Na fase de implantação tem-se o canteiro de obras, que apresenta vestiários, sanitários, refeitórios e escritórios provisórios. Estima-se uma geração média de 80 a 95 litros/pessoa/dia de esgoto para esta fase. Esta fase apresenta o maior número de



peças contribuindo com efluentes sanitários, chegando a picos de mais de 700 pessoas.

Na fase de operação são encaminhados para o tratamento, o efluente sanitário de sanitários, vestiários e refeitório, das instalações administrativas e operacionais. Nesta fase, o número de contribuintes para o efluente sanitário é bem menor, ou seja, da ordem de 30 a 50 funcionários, dependendo do porte da termelétrica, bem como de sua concepção, a nível de automação e terceirização de serviços de manutenção.

Estima-se uma vazão média da ordem de 2 a 4 m<sup>3</sup>/h de efluente sanitário durante a fase de operação das termelétricas.

Para o tratamento dos efluentes sanitários é implantado um tanque séptico e filtro anaeróbico, de acordo com a NBR 7229 da ABNT, principalmente, quando da inexistência de sistema de coleta pública.

#### **2.4.4. Poluição do Solo – Resíduos Sólidos**

O solo faz parte integrante dos ecossistemas, pela sua participação nos ciclos biogeoquímicos. A utilização de água e nutrientes é cíclica desde que, retirados do solo, tais elementos retornem ao mesmo através dos ciclos biogeoquímicos.

Um dos problemas ecológicos atuais é a despreocupação humana em relação a essa reciclagem, especialmente no que concerne aos nutrientes de vegetais e condicionadores de solos agriculturáveis

##### **2.4.4.1. Caracterização dos Resíduos Sólidos gerados nas termelétricas**

Serão gerados resíduos sólidos distintos para ambas as fases do empreendimento. (Jaako Pöyry Engenharia, 2000)

###### **a) Fase de Implantação:**

- Embalagens dos equipamentos,
- Resíduos do refeitório, sanitários e escritórios.

As embalagens decorrentes dos equipamentos e materiais da usina, serão encaminhadas para reciclagem e/ou coleta seletiva.

Considerando uma média de 400 pessoas trabalhando nesta fase de implantação, incluindo funcionários, visitantes e contratados, e uma média de 400 g/dia/pessoa; os resíduos gerados nos escritórios, refeitório e sanitários devem corresponder à aprox. 58 toneladas por ano (58 t/ano).

#### **b) Fase de Operação**

- Resíduos do processo operacional,
- Resíduos do refeitório, sanitários e escritórios.

O processo em si de geração de energia elétrica e produção de vapor, normalmente, não gera nenhum resíduo sólido direto.

Na etapa de operação, de forma indireta, não vinculados ao processo, é prevista a geração de 3 tipos de resíduos sólidos, de acordo com a origem:

- **Administrativa e de refeitório:** gerados em escritório e refeitório;
- **Manutenção:** compreendendo materiais e peças de refugo utilizados na manutenção, tais como, panos impregnados de óleo, latas de tinta, peças desgastadas, as quais devem ser dispostas de acordo com a legislação vigente em locais adequados;
- **Processo:** principalmente, resíduos oleosos e lodo das bacias de torres de resfriamento.

Considerando uma média de 50 pessoas, nesta fase de operação, incluindo funcionários, visitantes e contratados, e uma média de 550 g/dia/pessoa; os resíduos gerados nos escritórios, refeitório e sanitários devem corresponder à aproximadamente 10 toneladas por ano (10 t/ano). Comparativamente um valor bem menor que na fase de implantação.

#### **2.4.4.2. Disposição Final dos Resíduos Sólidos**

Todos os resíduos sólidos gerados pelas termelétricas, em ambas as fases do empreendimento (implantação e operação), podem ser classificados como **domésticos e industriais**; sendo os mesmos encaminhados para sistemas de disposição final, agrupados da seguinte forma:

a) Resíduos sólidos domésticos:

Caracterizam-se nesta categoria os resíduos tais como papéis, restos de alimentação, etc., originados pelas atividades de canteiros de obras, escritórios, restaurante, e outras; deverão ser dispostos através do sistema urbano de coleta de lixo municipal, ou coletados por empresas autorizadas para disposição em aterros sanitários devidamente legalizados pelo órgão ambiental.

b) Resíduos sólidos industriais:

- **Resíduos Recicláveis**, tais como papel, plástico, alumínio, vidro, etc. Estes resíduos são encaminhados para sistema de coleta e reciclagem da empresa, podendo ser comercializados, posteriormente.
- **Resíduos oleosos**, incluindo borras, resíduos sólidos contaminados com óleo e originados de atividades de manutenção dos equipamentos e de eventuais vazamentos coletados. Esses resíduos deverão ser coletados e enviados para reprocessamento em instalações devidamente licenciadas para esta finalidade, tal como preconiza a legislação em vigor.
- **Resíduos de solventes e tintas**, originados na implantação do empreendimento e, posteriormente, das atividades de manutenção dos equipamentos. Estes resíduos deverão ser devidamente coletados e acondicionados; e posteriormente encaminhados para recuperação ou destruição em instalações licenciadas para tal fim.
- **Resíduos de processo**, tais como pré-camadas utilizadas no filtro de polimento de condensado e lodo da bacia da torre de resfriamento. As pré-camadas do filtro de polimento serão engrossadas em um tanque de estocagem na usina antes do destino final. O lodo da torre de resfriamento deve ser retirado periodicamente, em intervalos variando entre 2 a 4 anos, sendo removido e centrifugado na usina antes de disponibilizá-lo ao aterro.

- **Resíduos gerais de manutenção,** Os resíduos de parada e manutenção devem ser dispostos em aterro Classe 1, devidamente legalizado junto ao órgão ambiental.

#### 2.4.5. Poluição Sonora - Ruído

Poluição Sonora é qualquer alteração das propriedades físicas do meio ambiente causada por som puro; ou por conjugação de sons, que direta ou indiretamente seja nociva à saúde, segurança e ao bem.

O som é um fenômeno físico ondulatório periódico, resultante de variações da pressão num meio elástico que se sucedem com regularidade.

O som pode ser representado por uma série de compressões e rarefações do meio em que se propaga, a partir da fonte sonora. Não há deslocamento permanente de moléculas, ou seja, não há transferência de matéria, apenas de energia.



A ação perturbadora do som depende:

- De suas características, como intensidade e duração;
- Da sensibilidade auditiva, variável de pessoa para pessoa;
- Da necessidade de concentração, como estudar;
- Da fonte causadora, que pode ser atrativa, como uma discoteca.

Há cerca de 2500 anos a humanidade conhece os efeitos prejudiciais do ruído à saúde. Existem textos relatando a surdez dos moradores que viviam próximos às cataratas do Rio Nilo, no antigo Egito.

Depois da primeira guerra mundial, foi que se verificou o aumento das doenças profissionais, notadamente a surdez, além do aparecimento de outras moléstias, devidas ao desenvolvimento espantoso trazido pelo surto industrial.

### 2.4.5.1. Limites de ruído

A Resolução CONAMA 01/90, fixa como limites legais, os estabelecidos pelas normas brasileiras NBR 10151 e NBR 10152:

A NBR 10151, em sua Tabela 1, estabelece os limites de ruído para diversos tipos de áreas para os períodos diurno e noturno, reproduzidos a seguir na Tabela XV.

Tabela XV- Limites de ruído para ambientes externos estabelecidos pela NBR 10151.

TIPOS DE ÁREAS	LIMITES – dB(A)	
	DIURNO	NOTURNO
Sítios e fazendas	40	35
Estritamente residencial urbana ou de hospitais ou de escolas	50	45
Mista, predominantemente residencial	55	50
Mista com vocação comercial e administrativa	60	55
Mista com vocação recreacional	65	55
Predominantemente industrial	70	60

Uma comunidade reage negativamente a uma fonte sonora, em geral, a partir de 65 dB(A), quando surgem raras reclamações. Estas se tornam generalizadas quando o nível de ruído atinge 75 dB(A), sendo que a poluição sonora torna-se inaceitável a partir dos 80 dB(A). Como regra geral, pode-se considerar que um ruído provoca pequena perturbação se estiver 3 dB(A) acima do ruído de fundo preexistente; com mais de 5 dB(A), o nível de incômodo é médio, sendo alta a perturbação provocada por fontes sonoras com mais de 10 dB(A) acima do ruído de fundo.

A NBR 10152, apresenta os limites de ruído para diversos ambientes, que no caso das usinas termelétricas, aplicam-se os apresentados na Tabela XVI.

Tabela XVI - Limites de ruído para ambientes de trabalho das termelétricas – NBR 10152

LOCAIS	LIMITE dB(A)
Salas de reunião	30 - 40
Salas de gerência e administração	35 - 45
Salas de computadores (controle)	45 - 65

#### **2.4.5.2. Principais Efeitos Causados pela Poluição Sonora**

Os ruídos aumentam a pressão sangüínea, o ritmo cardíaco e as contrações musculares. São capazes de interromper a digestão, as contrações do estômago, o fluxo da saliva e dos sucos gástricos. Provocam maior produção de adrenalina e outros hormônios, aumentando, no sangue, o fluxo de ácidos graxos e glicose. No que se refere ao ruído intenso e prolongado ao qual o indivíduo habitualmente se expõe, resultam mudanças fisiológicas mais duradouras até mesmo permanentes, incluindo desordens cardiovasculares, de ouvido-nariz-garganta e, em menor grau, alterações sensíveis na secreção de hormônios, nas funções gástricas, físicas e cerebrais.

Em casos de estresse crônico (permanente) nos trabalhadores, tem sido constatado efeitos psicológicos, distúrbios neurovegetativos, náuseas, cefaléias, irritabilidade, instabilidade emocional, redução da libido, ansiedade, nervosismo, hipertensão, perda de apetite, sonolência, insônia, aumento de prevalência da ulcera, distúrbios vitais, consumo de tranqüilizantes, perturbações labirínticas, fadiga, redução de produtividade, aumentos dos números de acidentes, de consultas médicas e do absentéismo.

Tem sido observado que em certos tipos de atividades, como as de longa duração e que requerem contínua e muita atenção, um nível acima de 90 dB afeta, desfavoravelmente, a produtividade, bem como a qualidade do produto.

#### **Limites de Intensidade:**

- Ruído com intensidade de até 55 dB(A) não causam nenhum problema.
- Ruídos de 56 a 75 dB(A) podem incomodar, embora sem causar malefícios à saúde.
- Ruídos de 76 a 85 dB(A) podem afetar a saúde, e acima dos 85 dB(A) a saúde será afetada, a depender do tempo da exposição. Uma pessoa que trabalha 8 horas por dia com ruídos de 85 dB(A) terá, fatalmente, após 2 anos problemas auditivos.

O ruído de 140 dB(A) pode destruir totalmente o tímpano, provocando o que se denomina "estouro do tímpano".

Quando o nível de ruído atinge 100 dB(A) pode causar o "trauma auditivo" e a conseqüente surdez. Ao nível de 120 dB(A), além de lesar o nervo auditivo, provocam no mínimo, zumbido constante nos ouvidos, tonturas e aumento do nervosismo.

A Organização Mundial de Saúde (OMS) considera que o início do estresse auditivo se dá sob exposições a 55 dB.

## **2.5. Legislação e Licenciamento Ambiental**

### **2.5.1. Legislação**

A legislação ambiental tem por objetivo principal assegurar a todos o direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, como um bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, cabendo ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações (Constituição Federal - Cap. VI, Art. 225). Partindo desta premissa, a legislação deve buscar, através de seus instrumentos, a compatibilização do desenvolvimento econômico e social com a preservação da qualidade ambiental em níveis que garantam o equilíbrio ecológico, ou seja, um desenvolvimento sustentável.

Um dos pontos básicos no desenvolvimento do projeto de uma nova unidade industrial, do ponto de vista do meio ambiente, diz respeito ao seu enquadramento dentro dos limites impostos pela legislação vigente em sua área de implantação.

Definidas a concepção e características básicas da unidade industrial, é da análise detalhada da legislação que surgem os parâmetros básicos que permitem conceituar, definir e orçar os seus sistemas de proteção ambiental.

A legislação ambiental vigente no Brasil, além do previsto em capítulo específico da Constituição Federal, compreende uma série de diplomas legais disseminados (Código de Águas, Código Florestal, Código de Mineração e outros), e um conjunto promulgado diretamente pelos órgãos de meio ambiente, em datas mais recentes, a partir da década de 80.

Além da Legislação Federal, os Estados e Municípios também têm plena competência para legislar em matéria ambiental, desde que não se contrariem preceitos estabelecidos pelas Leis Federais, ou seja, desde que as novidades não tragam disfarçada desobediência às regras gerais. Desse modo, governos estaduais e prefeituras municipais podem tornar as normas federais mais restritivas, mas nunca menos restritivas do que aquelas válidas em todo território nacional. (Constituição Federal/88 - Artigos 24º e 30º).

A Lei Estadual Nº 9509 de 20/03/97, em seu Artigo 7º, inciso V, parágrafo 1º, estabelece que: "Os Municípios também poderão estabelecer normas supletivas e complementares às normas federais e estaduais relacionadas com a administração da qualidade ambiental, uso dos recursos ambientais, desenvolvimento sustentável e controle da produção, comercialização e o emprego de técnicas, métodos, substâncias que comportem risco para a vida, qualidade de vida e o meio ambiente".

Mais recentemente, o Dec. Estadual Nº 47.397-02 de 04/12/02, em seu Art. 57, inciso 3º, estabelece que as fontes de poluição relacionadas em seu Anexo 9, poderão submeter-se apenas ao licenciamento ambiental procedido pelo município, desde que este tenha implementado o Conselho Municipal de Meio Ambiente, possua em seus quadros ou à sua disposição profissionais habilitados, e tenha legislação ambiental específica e em vigor.

Assim, observa-se que os Estados e Municípios se apresentam como co-responsáveis pela preservação, conservação, defesa, recuperação e melhoria do meio ambiente e do trabalho, com a participação da coletividade; atendidas as peculiaridades regionais e locais e em harmonia com o desenvolvimento social e econômico.

Neste contexto distinguem-se dois tipos básicos de regulamentação:

- um grupo de normas e padrões de emissão e qualidade ambiental, onde são fixados limites máximos para a poluição (atmosférica, hídrica e solo) que o empreendimento pode provocar;
- um conjunto de normas criando e regulamentando o licenciamento ambiental de atividades poluidoras, junto aos órgãos do meio ambiente.



A legislação ambiental brasileira ganhou mais força a partir dos anos 80, tanto devido aos crescentes problemas provocados pela poluição quanto pela maior conscientização da população de que poderia ter, por meios legais, uma melhoria na qualidade de vida.

A Política Nacional de Meio Ambiente foi implementada em 1981 pela Lei nº 6.938, regulamentada pelo Decreto nº 88.351 em 1983. Este último foi revogado e substituído pelo Dec. 99.274, de 06/06/90.

Como instrumentos da Política Nacional de Meio Ambiente (Lei 6.938 de 31/8/81), podemos citar:

- normas e padrões de qualidade ambiental;
- zoneamento ambiental;
- licenciamento ambiental;
- incentivos à produção e instalação de equipamentos e criação ou absorção de tecnologias, voltadas para a melhoria da qualidade ambiental;
- penalidades ao descumprimento das medidas necessárias à preservação ou recuperação da qualidade ambiental.

Estes instrumentos, devidamente regulamentados e implantados de forma gradativa e concomitante devem balizar o desenvolvimento sustentável, equacionando conflitos existentes e potenciais.

O planejamento, a implantação e a operação de empreendimentos termelétricos deverá considerar a legislação ambiental relacionada à poluição atmosférica, das águas e do solo; bem como, do ruído.

#### **2.5.1.1. Poluição do Ar**

No Brasil, a preocupação relativa à poluição atmosférica intensificou-se no início da década de 70, período de forte crescimento econômico e industrial. Problemas de grave poluição em cidades como São Paulo, Cubatão e Porto Alegre, evidenciaram a necessidade de se adotar políticas públicas sobre o tema.

No caso da poluição atmosférica, deverá ser considerada a legislação ambiental relacionada ao controle da poluição atmosférica, principalmente quanto aos seguintes instrumentos legais: Dec. Estadual 8468/76, Resolução CONAMA 005/89, Resolução CONAMA 003/90, Resolução CONAMA 008/90, Lei 9.605/98, Dec. Estadual 47397-02, Dec. Estadual 47400-02.

A Legislação Estadual - DE 8468 de 08/09/76 estabelece para todo o Estado de São Paulo, condições para o lançamento de poluentes gasosos na atmosfera, em seu Título III, Capítulo II.

#### **2.5.1.2. Poluição das Águas**

A questão da água é abordada na Constituição Federal, que em seu Art. 20, estabelece entre os bens da União: lagos, rios e quaisquer correntes de água em terrenos de seu domínio, ou que banhem mais de um Estado, sirvam de limites com outros países, ou se estendam a território estrangeiro ou dele provenham, bem como os terrenos marginais e as praias fluviais (inc. III).

No Art. 26, estabelece entre os bens dos Estados: águas superficiais ou subterrâneas, fluentes, emergentes e em depósito, ressalvadas as decorrentes de obras da União (inc. I).

Diversos outros instrumentos legais disciplinam a qualidade da água e os efluentes industriais: Portaria SEMA 1/74, Dec. Estadual 8468/76, Lei Federal 6938/81, Decreto 87.561/82, Resolução CONAMA 020/86, Lei Estadual 7663/91, Lei 9.433/97, Lei 9.605/98, Dec. Estadual 47397/02, Dec. Estadual 47400/02.

A Legislação Estadual (DE 8468 de 08/09/76) estabelece para todo o Estado de São Paulo, condições para o lançamento de efluentes em corpos d'água, em seu Título II, Capítulo II.

#### **2.5.1.3. Poluição do Solo - Resíduos Sólidos**

Em vista da legislação existente sobre o tema, as termelétricas devem estar atentas, principalmente, quanto ao destino a ser dado aos resíduos sólidos gerados em seus empreendimentos, obedecendo à legislação e normas existentes quanto à disposição,

transporte e armazenamento de tais resíduos: Decreto-lei 1.413/75, Decreto Estadual Nº 8468, Decreto 88.821/83, Resolução CONAMA 001-A/86, Decreto 96.044/88, Resolução CONAMA 006/88, Resolução CONAMA 009/93, Lei 9.605/98, Portaria Interministerial MME-MMA 1/99, Dec.Estadual 47397/02, Dec.Estadual 47400/02. A Legislação Estadual (DE 8468 de 08/09/76) estabelece para todo o Estado de São Paulo, condições para o lançamento de resíduos sólidos, em seu Título IV.

#### **2.5.1.4. Poluição Sonora - Ruído**

A Resolução CONAMA 01/90 fixa índices aceitáveis aos ruídos, visando o conforto da comunidade e à proteção da saúde, de acordo com os padrões, critérios e diretrizes estabelecidos pelas normas NBR – 10151 (Acústica – Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade - Procedimento) e NBR – 10152 (Níveis de Ruído para Conforto Acústico).

A NBR – 10151 tem como objetivo a fixação das condições exigíveis para avaliação da aceitabilidade do ruído em comunidades, independentemente da existência de reclamações; enquanto que a NBR – 10152 tem por objetivo a fixação de níveis de ruído compatíveis com o conforto acústico em ambientes diversos.

#### **2.5.2. Licenciamento Ambiental**

O Licenciamento Ambiental é um procedimento jurídico administrativo caracterizado como um dos instrumentos da Política Nacional de Meio Ambiente. Foi introduzido em nosso ordenamento jurídico, inicialmente, pela lei Nº 6.803 de 02/07/80, posteriormente convalidado pela Lei Nº 6.938 de 31/8/81 e disciplinado pela Resolução CONAMA 237 de 19/12/97.

As obras relativas à implantação de unidades industriais, bem como, à criação e implantação de distritos industriais e/ou zonas estritamente industriais são atividades consideradas potencialmente degradadoras do meio ambiente e sujeitas ao Licenciamento Ambiental, conforme explicitado na Resolução CONAMA Nº 001/86, e reiterado pela Resolução CONAMA Nº 237/97.

No caso particular das usinas de produção de energia termelétrica, a Resolução CONAMA Nº 001/86, em seu Art. 2º, estabelece a necessidade de licenciamento para

as usinas de geração de eletricidade, qualquer que seja a fonte de energia primária, acima de 10 MW. Posteriormente, a Resolução CONAMA N° 237/97; através de seu Anexo I, enquadra-as como "Serviços de Utilidade", sem referência à sua capacidade de produção.

A Resolução CONAMA 279, de 27 de junho de 2001, estabelece procedimentos para o licenciamento ambiental simplificado de empreendimentos elétricos com pequeno potencial de impacto ambiental., possibilitando através do Art. 1° - inciso II, o enquadramento de diversas usinas termelétricas.

A Resolução SMA 14, de 16 de agosto de 2001, aprova procedimentos para o licenciamento ambiental dos empreendimentos do setor de energia elétrica causadores de significativo impacto ambiental.

No Estado de São Paulo, as recentes legislações aperfeiçoaram o mecanismo de licenciamento ambiental. Através do Decreto Estadual N° 47.397-02 (04/12/02) foi dada nova redação ao Título V e ao Anexo 5, bem como acrescentados os Anexos 9 e 10, ao Regulamento da Lei N° 997/76, aprovado pelo Decreto Estadual N° 8.468/76, o qual dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente. Através deste Decreto foi estabelecida a figura da licença renovável e da possibilidade de repasse do licenciamento das atividades de impacto local para os municípios. A partir da publicação desta lei os novos empreendimentos já tem que se enquadrar às novas regras do licenciamento ambiental, assim como todas as fontes de poluição existentes, num prazo máximo de 5 anos, serão convocados pelo Estado para a renovação de suas licenças.

No caso das usinas termelétricas, através do Decreto Estadual N° 47.397-02, em seu Art. 57, as mesmas são enquadradas como fontes de poluição. O Art. 58, parágrafo 2°, estabelece que "Dependerão de licenciamento prévio, apenas no âmbito da Secretaria do Meio Ambiente, as atividades e obras sujeitas a avaliação de impacto ambiental", que é o caso das usinas termelétricas.

O Decreto Estadual N° 47.400-02, de 04/12/02, regulamenta dispositivos da Lei Estadual N° 9509/97, referentes ao licenciamento ambiental, estabelece prazos de validade para cada modalidade de licenciamento ambiental, bem como condições

para a sua renovação. Com o objetivo de agilização dos procedimentos de licenciamento ambiental, estabelece prazo de análise dos requerimentos e licenciamento ambiental, institui procedimento obrigatório de notificação de suspensão ou encerramento de atividades.

Objetivando agilizar e integrar as diversas licenças ambientais expedidas pela Secretaria Estadual do Meio Ambiente-SMA e CETESB, em julho de 1996, foi criado o "**Balcão Único**" para o licenciamento ambiental na Região Metropolitana de São Paulo. Destina-se ao atendimento dos usuários públicos e privados, cujos empreendimentos estão sujeitos ao licenciamento ambiental de mais de um órgão integrante do Sistema Estadual do Meio Ambiente.

O licenciamento ambiental, conforme preconiza a legislação ambiental, consiste na obtenção de três licenças, quais sejam:

- **Licença Prévia (LP)** - É emitida na fase de planejamento da atividade, contendo requisitos quanto à localização, instalação e operação das instalações;
- **Licença de Instalação (LI)** - Autoriza o início da implantação do empreendimento, de acordo com o projeto aprovado;
- **Licença de Operação (LO)** - Autoriza o início da atividade licenciada.

O Decreto N° 47.400-02, em seu Art. 1º estabelece que a Secretaria do Meio Ambiente expedirá a Licença Prévia, Licença de Instalação e a Licença de Operação; as quais terão os seguintes prazos máximos de validade: Licença Prévia – 5 anos, Licença de Instalação – 6 anos e Licença de Operação – 10 anos.

Contudo, a obtenção destas licenças requer o desenvolvimento de várias atividades, cuja cronologia é apresentada na Figura 11; na qual pode-se observar, esquematicamente, os fatores que condicionam cada tipo de licença ambiental. (Morgado, 2001)

O Art. 5º da Resolução CONAMA N° 006 determina, no caso de usinas termelétricas, que "a LP deverá ser requerida no início do estudo de viabilidade; a LI antes do início da efetiva implantação do empreendimento e a LO depois dos testes realizados e antes da efetiva colocação da usina em geração comercial de energia". Desta forma, depreende-se que os testes pré-operacionais deverão ser realizados no

contexto da Licença de Instalação da atividade, o que vem sendo utilizado, em geral, pelos organismos licenciadores. O Decreto Estadual N° 47.400-02, de 04/12/02, em seu Art. 2º, inciso 2º, estabelece que “Poderá ser concedida autorização para teste, previamente à concessão da licença de operação, em caráter excepcional e devidamente fundamentada pelo órgão licenciador, que será estabelecida em razão do período necessário para avaliar a eficiência das condições, restrições e medidas de controle ambiental, impostas à atividade ou ao empreendimento, não podendo, em qualquer hipótese, exceder o prazo de 180 (cento e oitenta) dias.

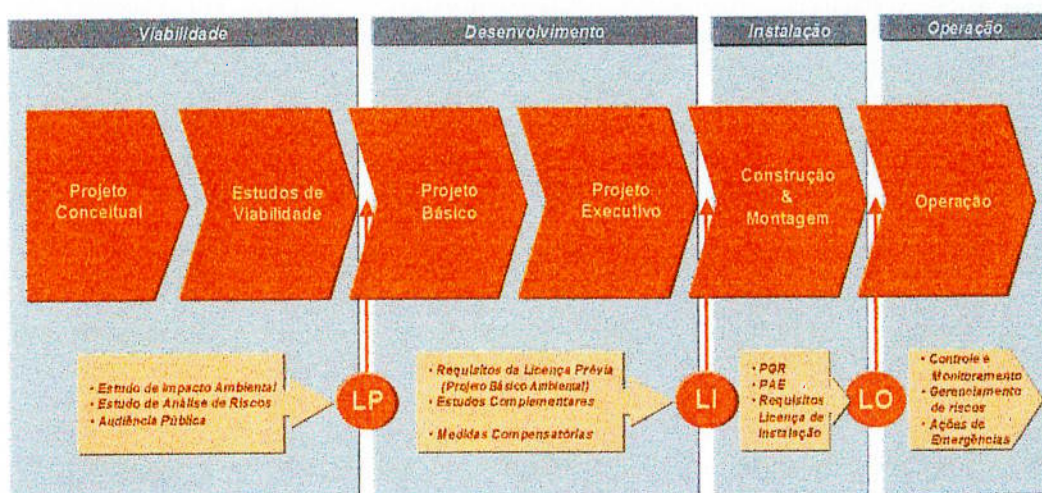


Figura 11 - Atividades de Licenciamento Ambiental – Fatores condicionantes.

Fonte: (Morgado, 2001)

### 2.5.2.1. Licença Prévia - LP

A Licença Prévia deve ser requerida, obrigatoriamente, pelo empreendedor, ao órgão de meio ambiente, na fase preliminar do planejamento do empreendimento ou atividade. Basicamente, todos os aspectos relacionados à elaboração dos estudos ambientais, a discussão pública do empreendimento, e a sua aprovação pelos órgãos ambientais competentes, concentram-se na primeira fase do licenciamento, referente à Licença Prévia - LP.

É nessa fase que se decide sobre a necessidade da exigência ou não do Estudo de Impacto Ambiental - EIA e seu respectivo Relatório de Impacto ambiental - RIMA, que dependerá da complexidade do empreendimento.



A Resolução CONAMA Nº 01/86 apresenta as seguintes definições:

- EIA – ESTUDO DE IMPACTOS AMBIENTAIS: Relatório Técnico, elaborado por equipe multidisciplinar, independente do empreendedor, profissional e tecnicamente habilitada para analisar os aspectos físico, biológico e socioeconômico do ambiente, que, além de atender aos princípios e objetivos da Lei da Política Nacional do Meio Ambiente, deve obedecer a uma série de outras diretrizes.
- RIMA - RELATÓRIO DE IMPACTO AMBIENTAL: Relatório-resumo dos estudos do EIA, em linguagem objetiva e acessível para não técnicos, cujo conteúdo deve apresentar, no mínimo o conteúdo estabelecido em lei.

Na elaboração do EIA são consideradas às características técnicas do projeto, bem como, as características ambientais da área de influência do projeto (meios físico, biológico e sócio-econômico). Da conjugação destes dois conjuntos de informações são identificados os potenciais impactos ambientais, a partir dos quais é definido um conjunto de medidas mitigadoras e o estabelecimento de programas ambientais para controle dos impactos residuais previsto. É importante salientar que as medidas mitigadoras e programas ambientais podem ser referentes às fases de projeto, implantação e operação do empreendimento, devendo, evidentemente, serem observadas em cada fase, pois passam a ser condicionantes das licenças ambientais concedidas. A Figura 12 apresenta as diversas etapas do Estudo de Impacto Ambiental – EIA.

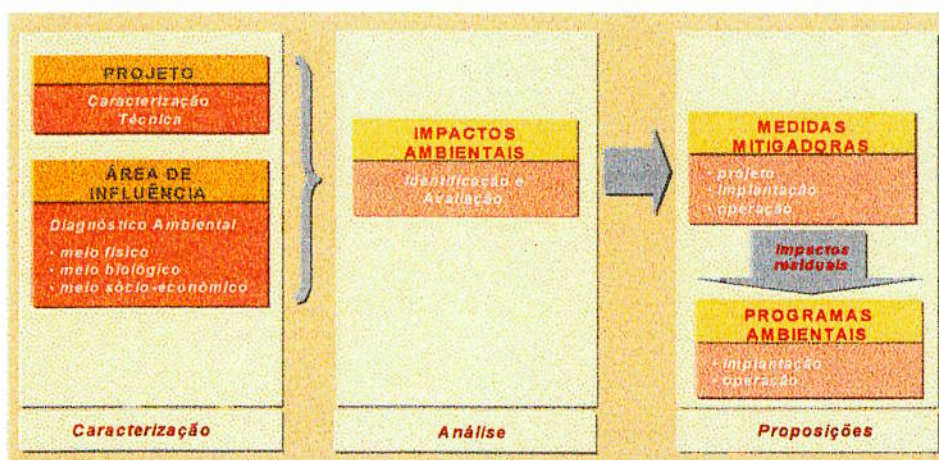


Figura 12 - Etapas do Estudo de Impacto Ambiental – EIA

Fonte: (Morgado, 2001)

### **2.5.2.1.1. Audiência Pública**

A Audiência Pública é vinculada ao processo de licenciamento ambiental de empreendimentos sujeitos a Estudos de Impacto Ambiental; e tem por finalidade expor aos interessados o conteúdo dos Estudos, dirimindo dúvidas e recolhendo dos presentes as críticas e sugestões; sendo a mesma regulamentada pelos seguintes instrumentos legais: Resolução CONAMA N° 001/86, Resolução CONAMA N° 009/87, Deliber. CONSEMA N° 50/92, Deliber. CONSEMA N° 42/94, Resolução CONAMA N° 237/97.

O parágrafo 3° do Artigo 3 da Deliberação CONSEMA N° 50/92 estabelece que as Audiências Públicas serão realizadas sempre no município ou área de influência em que a obra, atividade, plano ou programa já estiver implantado, ou em fase de implantação, ou previsto para ser implantado, tendo prioridade para escolha o município onde os impactos ambientais forem mais significativos. Posteriormente, a Deliberação CONSEMA N° 42/94, em seu item 6.2 estabelece que a Audiência Pública poderá realizar-se, também na Capital do Estado, caso os impactos atinjam dois ou mais municípios e for solicitada nos termos da Resolução CONAMA N° 09/87.

A deliberação CONSEMA N° 50/92 em seu Artigo 5° disciplina a organização das Audiências Públicas, estabelecendo que as mesmas serão integradas por uma mesa diretora, uma tribuna e um plenário. A mesa diretora terá a seguinte composição:

- Secretário do Meio Ambiente, ou seu representante, que presidirá a Audiência Pública,
- Coordenador da Coordenadoria de Planejamento Ambiental - CPLA, da Secretaria do Meio Ambiente, ou seu representante,
- Secretário Executivo do CONSEMA, ou seu representante, que coordenará a Audiência Pública,
- Um membro do CONSEMA, escolhido de comum acordo entre os conselheiros presentes à Audiência Pública.

Há uma dupla caminhada na audiência, em que o órgão presta informações ao público e o público passa informações à Administração Pública. A Resolução n° 09/87 não



prevê exposição da equipe multidisciplinar, como também do proponente do projeto ou empreendedor. Contudo, não estando formalmente proibidos de intervir, a exposição da equipe e a intervenção do proponente não poderiam ser interditadas; assim a audiência pública, via de regra, tem do seguinte desenvolvimento:

- Empreendedor - ( aprox. 15 min.)
- Apresentação das características do empreendimento e suas justificativas.
- Consultora - (aprox. 30 min. )
- Apresentação dos estudos ambientais realizados e suas conclusões.
- Debates.
- Antes dos debates, pode haver a manifestação de entidades ambientalistas ou do Órgão Ambiental, sobre sua avaliação dos estudos apresentados.

A Audiência Pública, a última grande etapa do procedimento de estudo prévio de impacto ambiental, inserida no processo com igual valor que as fases anteriores, servirá de base para a "análise e parecer final". O órgão licenciador deverá valorizar os argumentos expostos na audiência, assim como a documentação apresentada. Constituirá nulidade do ato administrativo autorizador, que poderá ser invalidado por instância administrativa superior ou por via judicial, se o mesmo deixar de apreciar os elementos que constituem a ata e seus anexos.

#### **2.5.2.2. Licença de Instalação - LI**

Após a concessão da LP, o empreendedor deverá detalhar os planos, programas e projetos ambientais, que foram objeto do processo de licenciamento prévio. Este detalhamento é exigido por meio do Projeto Básico Ambiental – PBA. Após a análise e aprovação do PBA a Licença de Instalação é liberada para o empreendimento.

A Licença de Instalação é o documento que autoriza a instalação do empreendimento ou atividade de acordo com as especificações constantes dos planos, programas e projetos aprovados, incluindo as medidas de controle ambiental e demais condicionantes, da qual constituem motivo determinante.

Na análise da solicitação da Licença de Instalação são considerados fatores como critérios ambientais, características do local, diretrizes municipais e estaduais de uso e

ocupação do solo, de maneira que, agindo preventivamente, seja evitada a ocorrência de problemas de poluição ambiental no futuro.

Obtida a Licença de Instalação, podem ser iniciadas as obras. E, para esta fase, devem ser observados os requisitos ambientais para a construção, cujo atendimento poderá ser verificado por meio de auditoria ambiental.

O Projeto Básico Ambiental - PBA é determinado pela Resolução CONAMA N° 06/87 e deverá apresentar um detalhamento de todos os programas e projetos ambientais previstos, ou seja, aqueles provenientes do EIA/RIMA, bem como os considerados pertinentes pelo órgão licenciador. Constitui um dos documentos-base para a obtenção da Licença de Instalação-LI. É composto de, no mínimo: objetivos e justificativas, abrangência, escopo dos estudos, procedimentos metodológicos, equipe técnica e cronogramas de execução, resultados esperados, produtos, anexos, referência bibliográfica. Para a realização desse estudo, o órgão ambiental apresenta Termo de Referência específico para o interessado.

A concessão dessa licença autoriza o início da instalação do empreendimento e tem seu prazo de validade estabelecido pela duração do cronograma de instalação do empreendimento ou atividade, não podendo ser superior a 6 (seis) anos.

A concessão da LI implica no compromisso do interessado em manter o projeto final compatível com as condições de seu deferimento.

### **2.5.2.3. Licença de Operação - LO**

É o documento concedido pelo órgão ambiental competente, devendo ser solicitado antes da conclusão dos testes pré-operacionais. Sua concessão está condicionada à vistoria do empreendimento para verificar se todas as exigências e detalhes técnicos descritos no projeto aprovado foram desenvolvidos e atendidos ao longo de sua implantação, bem como se está de acordo com o previsto nas Licenças Prévia e de Instalação.

Para a obtenção da Licença de Operação (LO) é necessário o detalhamento dos Planos de Gerenciamento de Riscos (PGR) e de Ação de Emergência (PAE), bem como o atendimento às restrições (condicionantes) contidas na Licença de Instalação.

Nesta fase o órgão licenciador analisa os documentos solicitados na LI e vistoria as instalações e equipamentos de controle ambiental instalados. A Licença de Operação não será expedida se, por ocasião da vistoria técnica no local, constatar-se alguma das seguintes situações:

- as exigências técnicas constantes da Licença de Instalação não estiverem totalmente cumpridas;
- as instalações e atividades não corresponderem às mencionadas no Memorial de Caracterização do Empreendimento - MCE, apresentado pelo interessado, por ocasião do pedido de Licença de Instalação.

Autoriza a operação comercial da atividade ou empreendimento, após a verificação do efetivo cumprimento do que consta das licenças anteriores, com as medidas de controle ambiental e condicionantes determinadas para a operação.

A solicitação da L.O. é de caráter obrigatório e sua concessão implica o compromisso do interessado em manter o funcionamento dos equipamentos de controle ambiental e dos programas de monitoramento, atendendo às condições estabelecidas no seu deferimento.

A concessão da LO implica no compromisso do interessado em manter o funcionamento dos equipamentos de controle da poluição, de acordo com as condições de seu deferimento.

### **2.5.3. Aspectos Legais sobre a Proporção de NO<sub>2</sub> no NO<sub>x</sub>**

Os Padrões Nacionais de Qualidade do Ar, estabelecidos através da Resolução CONAMA N<sup>o</sup> 3 de 28/06/90, assim como os Padrões dos Estados Unidos, adotados pela EPA, não definem padrão legal para o caso do Monóxido de Nitrogênio (NO) e dos Óxidos de Nitrogênio (NO<sub>x</sub>), mas somente para o Dióxido de Nitrogênio (NO<sub>2</sub>).

Considerando que o NO<sub>x</sub> é definido como sendo:

$$[\text{NO}_x] = [\text{NO}] + [\text{NO}_2] \quad (13)$$

e que a conversão de NO em NO<sub>2</sub> tem potencial de ocorrer na razão de 1 para 1, pois o oxigênio está presente na atmosfera de forma abundante; então cada molécula de NO tem a possibilidade de se converter em uma molécula de NO<sub>2</sub>, através da associação com um átomo de oxigênio (O) da atmosfera.

Em face disto, a CETESB em suas análises e exigências adota como premissa conservadora que todo o NO se transforma em NO<sub>2</sub>, na atmosfera e portanto considera que a concentração de NO<sub>x</sub> é a mesma de NO<sub>2</sub>. Ocorre que esta consideração tem sido questionada e estudos tem sido feitos no sentido de se obter embasamento para a discussão do assunto.

Segundo Fruehauf (2002): “Enquanto alguns órgãos ambientais adotam a hipótese conservadora e pessimista de que toda a emissão de NO<sub>x</sub> pode ser considerada como NO<sub>2</sub>, isto é  $[NO_x] = [NO_2]$ ; outros permitem que se considere que parte do NO<sub>x</sub> é constituída por outros gases”. Assim, ainda segundo FRUEHAUF, qual é a relação entre NO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>?

Ou seja:

$$NO_2 = \alpha \cdot NO_x; \quad (14)$$

onde:  $0 < \alpha < 1$

Fruehauf (2002), apresenta em seu trabalho uma análise qualitativa das concentrações de NO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> efetuadas a partir de dados da CETESB, contidos no Relatório de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo – 2001; bem como resultados de estudos de concentrações horárias efetuados na Suécia, nos quais, na média  $\alpha = 0,173$ ; e estudos na Grã Bretanha, que resultam em  $\alpha = 0,14$ .

Segundo Dixon et al. (2001), verifica-se que há maior conversão de NO<sub>x</sub> em NO<sub>2</sub> nas menores concentrações de NO<sub>x</sub>, apresentando uma relação empírica desenvolvida por Derwent e Middleton (1996):

$$[NO_2] = 2,166 - [NO_x].[1,236 - 3,348A_{10} + 1,933.(A_{10})^2 - 0,326.(A_{10})^3] \quad (15)$$

Onde:

- $[\text{NO}_2]$  e  $[\text{NO}_x]$  representam, respectivamente, as concentrações médias horárias do  $\text{NO}_2$  e do  $\text{NO}_x$  em [ppb].
- $A_{10} = \log_{10} \{[\text{NO}_x]\}$
- A equação acima aplica-se no intervalo:  $9,0 < [\text{NO}_x] < 1141,5$  ppb
- Abaixo de 9,0 ppb de  $[\text{NO}_x]$ , a relação  $[\text{NO}_2] : [\text{NO}_x]$  fornece  $\alpha_{\max} = 0,723$
- Acima de 1141,5 ppb de  $[\text{NO}_x]$ , a relação  $[\text{NO}_2] : [\text{NO}_x]$  fornece  $\alpha_{\min} = 0,25$

Através dos estudos desenvolvidos por Dixon et al. (2001), para concentrações ocorridas no ano de 1997, em local diferente daquele utilizado por Derwent e Middleton, o mesmo obteve para concentrações de  $[\text{NO}_x]$  variando de 941 a 254 (ppb), concentrações de  $[\text{NO}_2]$  na faixa de 204 a 105, resultando em relações  $[\text{NO}_2] : [\text{NO}_x]$ , com:

$$0,143 < \alpha < 0,366$$

Objetivando a obtenção de um parâmetro para efeito de análise, a partir do mesmo Relatório da CETESB, tomaram-se valores de concentrações horárias do  $\text{NO}_x$  e  $\text{NO}_2$ , em cada local de amostragem e foram elaboradas as Tabelas XVII e XVIII.

Analisando-se os resultados da Tabela XVII, desconsiderando os valores referentes aos anos de 98 e 99 da Lapa, verifica-se que:

$$\alpha_{\min} = 0,13 \text{ e } \alpha_{\max} = 0,357$$

Da análise da Tabela XVIII, que se refere aos valores médios ocorridos nos diversos locais analisados, constatamos que:

$$\alpha_{\min} = 0,164 \text{ e } \alpha_{\max} = 0,298$$

O valor médio geral é:  $\alpha_{\text{média geral}} = 0,232$

Concluimos que todos os valores obtidos em nossa análise encontram-se coerentes com a faixa dos resultados obtidos nos estudos de Dixon et al. (2001), ou seja:

$$0,143 < \alpha < 0,366$$

Verifica-se que o município de Campinas apresenta o valor  $\alpha_{\text{médio}} = 0,164$ , compatível com o da Suécia ( $\alpha = 0,173$ ) e da Grã Bretanha ( $\alpha = 0,14$ ), enquanto que os demais municípios apresentam valores compatíveis com os resultados dos estudos de Dixon et al. (2001). Assim, constata-se que nem todo o NOx é convertido em NO<sub>2</sub> na atmosfera, e que a premissa de considerar todo o NOx = NO<sub>2</sub> é bastante conservadora.

## **2.6. Considerações sobre a Dispersão Atmosférica**

### **2.6.1. Gradiente Vertical Adiabático de Temperatura**

Os poluentes lançados na atmosfera são fortemente afetados pelas condições atmosféricas específicas. A movimentação do ar na direção vertical afeta o clima e os processos de mistura do poluente. Quando a atmosfera tem pouca movimentação na vertical é denominada ESTÁVEL, caso contrário denomina-se INSTÁVEL.

#### **2.6.1.1. Camadas Atmosféricas**

Segundo Braga et al. (2002), existem diversas formas de descrever a estrutura atmosférica, entretanto a classificação feita de acordo com a estratificação atmosférica, tendo por base o gradiente térmico em função da altitude, é a mais adequada sob o ponto de vista ambiental, sendo dividida nas seguintes camadas:

a) TROPOSFERA: É a camada junto à terra, constituída por aproximadamente 95% do ar terrestre, possuindo uma altitude que varia de 8 a 10 Km. Esta altitude varia conforme a latitude e o tempo, sendo que no Equador alcança aproximadamente 16,5 Km. Nos pólos ela possui 8,5 Km e em latitudes de 45° alcança aproximadamente 10,5 Km. Nesta camada a temperatura diminui com a altura, e o ar mantém-se bem misturado devido à convecção vertical. (Braga et al., 2002)

Tabela XVII - Valores de Concentrações horárias de NOx e NO<sub>2</sub>; e correspondentes valores de α, nos locais de amostragem da CETESB

LOCAL DE AMOST.	ANO	NO <sub>x</sub>		NO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	α	α (Médio)	
		(ppb)	(µg/m <sup>3</sup> )				
<b>1º MAIOR VALOR – 1 HORA</b>							
SÃO PAULO	Parque D. Pedro II	97	666	1366,7	332	0,243	0,183
		98	973	1996,7	298	0,149	
		99	799	1639,7	322	0,196	
		00	1028	2109,6	328	0,156	
		01	729	1496,0	257	0,172	
	Ibirapuera	97	838	1719,7	487	0,283	0,230
		98	554	1136,9	258	0,227	
		00	539	1106,1	295	0,267	
		01	763	1565,8	221	0,141	
	Congonhas	97	1406	2885,3	486	0,168	0,188
		98	921	1890,0	392	0,207	
	Lapa	98	1097	2251,2	182	0,081	0,119
		99	988	2027,5	184	0,091	
		01	879	1803,8	335	0,186	
	Cerqueira Cesar	97	811	1664,3	492	0,296	0,256
		98	655	1344,1	394	0,293	
		01	917	1881,8	338	0,180	
	Centro	97	800	1641,7	379	0,231	0,225
		98	785	1610,9	399	0,247	
		99	896	1838,7	363	0,197	
Pinheiros	01	1172	2405,1	312	0,130	0,130	
OSASCO	Esquina da Av. dos Autonomistas com Rua São Maurício	97	661	1356,5	332	0,245	0,247
		98	605	1241,5	303	0,244	
		99	617	1266,2	302	0,238	
		01	657	1348,3	355	0,263	
MAUÁ	Escola Estadual "Prof. Terezinha Sartori"	97	452	927,6	317	0,342	0,298
		98	419	859,8	293	0,341	
		99	453	929,6	302	0,325	
		00	391	802,4	200	0,250	
		01	329	675,2	158	0,234	
S. CAETANO DO SUL	Vila Paula	97	862	1769,0	437	0,247	0,210
		98	883	1812,0	339	0,187	
		99	752	1543,2	270	0,175	
		00	676	1387,2	342	0,246	
		01	738	1514,5	297	0,196	
CAMPINAS		00	550	1128,7	179	0,158	0,164
Centro		01	464	952,2	162	0,170	
CUBATÃO		99	213	437,1	156	0,357	0,278
Centro		00	268	550,0	110	0,200	

Do ponto de vista climático, a troposfera possui importância fundamental, pois é nessa camada que tem origem, praticamente, todas as massas de ar que caracterizam as mudanças climáticas da Terra.

Entre a Troposfera e a camada seguinte (Estratosfera); encontra-se uma camada de transição (limite superior da troposfera), denominada *TROPOPAUSA*, a qual apresenta temperatura praticamente constante.

Tabela XVIII - Valores de  $\alpha$  médios dos municípios e média geral dos municípios, nos locais de amostragem da CETESB

MUNICÍPIO	$\alpha$ -MÉDIO	$\alpha$ -MÉDIA GERAL
SÃO PAULO	0,197	0,232
SÃO CAETANO DO SUL	0,210	
OSASCO	0,247	
MAUÁ	0,298	
CAMPINAS	0,164	
CUBATÃO	0,278	

b) **ESTRATOSFERA:** Estende-se desde a tropopausa até uma altura de aproximadamente 50 Km. Nessa camada a temperatura mantém-se constante na baixa Estratosfera, aumentando em seguida, até à chamada Estratopausa. Esta camada, rica em ozônio, ( $O_3$ ), protege a terra das radiações ultravioleta provenientes do Sol. (Braga et al., 2002).

Da mesma forma, entre a Estratosfera e a camada seguinte (Mesosfera); há uma camada de transição (limite superior da Estratosfera), denominada *ESTRATOPAUSA*, a qual apresenta temperatura praticamente constante.

c) **MESOSFERA:** É a camada que se estende, aproximadamente, entre 50 e 80 Km de altura. Essa camada possui um forte decréscimo de térmico, registrando-se na mesma a mais baixa temperatura da atmosfera, atingindo valores de até 175 K (-98° C). (Lora, 2000).



Entre esta camada e a seguinte (Termosfera); há uma camada de transição (limite superior da Mesosfera), denominada *MESOPAUSA*, a qual, semelhantemente às demais camadas de transição, também apresenta temperatura praticamente constante.

d) **TERMOSEFERA:** Esta camada, também conhecida como *IONOSFERA*, alcança aproximadamente, 190 Km de altitude. Quanto aos gases predominantes, até a Termoesfera a maior porcentagem é de oxigênio e nitrogênio; acima desta camada, até uma altitude de 970 Km, a maior porcentagem é de oxigênio; em seguida até aproximadamente 2400 Km, o gás predominante é o hélio; a seguir, até 9700 Km, a predominância é do hidrogênio; e acima deste valor estão os gases interplanetários (Braga et al., 2002). Na Termosfera, a densidade molecular é de  $10^3$  moléculas/cm<sup>3</sup>. Em termos comparativos, ao nível do mar este parâmetro tem um valor médio de  $2,5 \times 10^9$  moléculas/cm<sup>3</sup> (Lora, 2000).

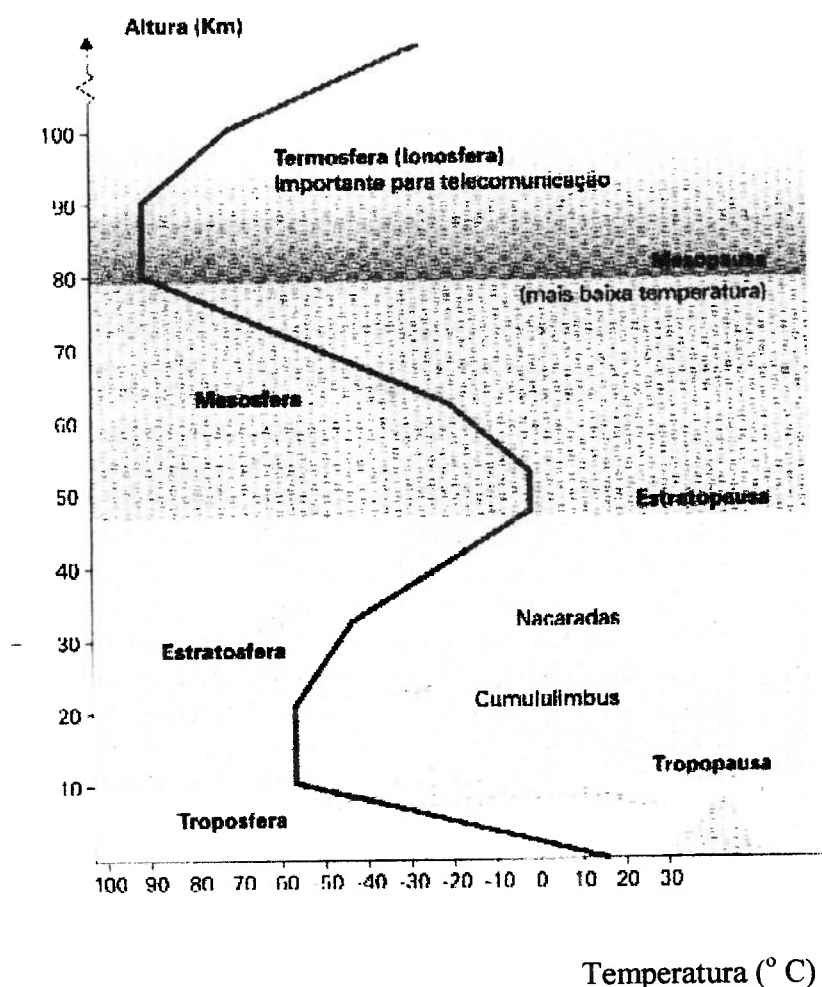


Figura 13 - Camadas e estratificação térmica da atmosfera

Fonte: (Braga et al., 2002).

### 2.6.1.2. Gradiente Adiabático

Define-se *gradiente adiabático de temperatura* ( $\Gamma$ ) como sendo a variação da temperatura com a altura para uma "parcela" de ar ascendente que se resfria adiabaticamente.

O conceito de "parcela" de ar ascendente (Seinfeld, 1986 apud Lora, 2000)

$$\frac{t_2 - t_1}{h_2 - h_1} \text{ - Gradiente adiabático de temperatura}$$

pode ser verificado através do esquema abaixo:

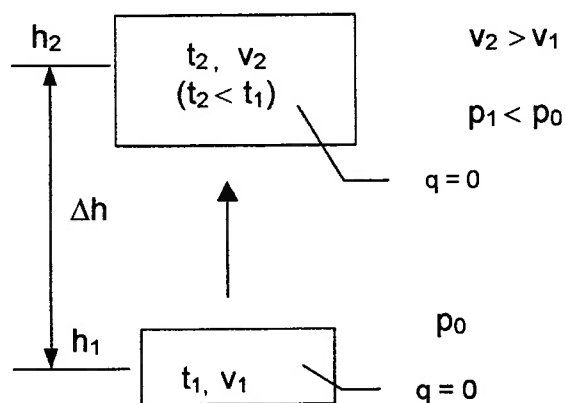


Figura 14 - Esquema de "parcela" de ar ascendente.

Observemos a figura acima sob as seguintes considerações:

- Na posição (1) temos uma massa hipotética de ar, denominada "parcela", a qual pode se deformar durante a sua movimentação vertical na atmosfera,
- Esta "parcela" é de dimensões suficientemente grandes para poder considerar pequena a troca de moléculas através de suas fronteiras (em comparação com o número total de moléculas na "parcela"),
- À medida que a "parcela" de ar sobe na atmosfera (da posição (1) para a (2)), expande-se por causa da pressão decrescente com a altitude (despreza-se a troca de calor entre a "parcela" e o ar circundante). Em função da expansão, a temperatura da "parcela" diminui, em sua ascensão da posição (1) para a (2).

Assim, o processo de mistura vertical na atmosfera pode-se imaginar como um grande número de "parcelas" de ar subindo e descendo. A relação entre a temperatura

do ar circundante e a temperatura da parcela determina se esta continua subindo, caindo, ou se detém. O gradiente de temperatura vertical é a grandeza determinante do grau de mistura vertical das parcelas que contêm poluentes.

### Dedução do Gradiente adiabático ( $\Gamma$ ):

A dedução do valor do gradiente adiabático, segundo (Seinfeld, 1986 apud Lora, 2000), é feita através da aplicação da Primeira Lei da Termodinâmica:

$$dU = dQ - dW \quad (16)$$

onde:

$dU$  - Acréscimo da energia interna do sistema.

$dQ$  - Valor fornecido ao sistema através de suas fronteiras ( $dQ=0$  para processos adiabáticos).

$dW$  - Trocas de energia do sistema ao meio ambiente pelo trabalho realizado para aumentar o volume do sistema ( $p dv$ )

$$dU = C_v dT \quad (17)$$

$c_v$  - calor específico do sistema a volume constante.

Assim, pelas eq. (16) e (17) temos:

$$C_v dT = - p dv \quad (18)$$

Aplicando a lei dos gases ideais temos:

$$p v = m R T / M_a \quad (19)$$

Onde:  $m$  é a massa de ar na parcela.

Derivando ambos membros da eq. (19):

$$d(pv) = \frac{mR}{M_a} dT = p dv + v dp \quad (20)$$

$$p \, dv = \frac{mR}{M_a} dT - v \, dp \quad (21)$$

Substituindo a eq. (21) na eq. (18) tem-se:

$$C_v \, dT = v \, dp - \frac{mR}{M_a} dT \quad (22)$$

Substituindo o valor de  $v$  pela eq. (19) na eq. (22):

$$C_v \, dT = \frac{mR}{M_a} \frac{T}{p} \frac{dp}{p} - \frac{mR}{M_a} dT \quad (23)$$

Reorganizando a eq. (23):

$$\frac{dT}{dp} = \frac{mRT/M_a p}{C_v + \frac{mR}{M_a}} \quad (24)$$

Retomando a lei dos gases ideais, na seguinte forma:

$$p = \frac{\rho RT}{M_a} \quad (25)$$

A pressão do ar é a força por unidade de área, causada pelo peso das camadas de ar localizadas acima do ponto considerado, e portanto temos:

$$p = \int_z^{\infty} g \rho \, dz \quad (26)$$

$$dp = -g \rho \, dz \quad (27)$$

E então, a relação geral entre a pressão e a temperatura numa determinada altitude é:

$$\frac{dp(z)}{dz} = \frac{gM_a p}{RT} \quad (28)$$

Combinando as eq. (24) e eq. (28) e dividindo pela massa "m", tem-se:

$$\frac{dT}{dz} = -\frac{g}{C'_v + R/M_a} = -\frac{g}{C'_p} \quad (29)$$

Onde:

$C'_v = C_v / m$  - Calor específico a volume constante por unidade de massa de ar.

$C'_p = C_v + R/M_a$  - Calor específico a pressão constante por unidade de massa de ar.

$$\frac{dT}{dz} = -\frac{g}{C'_p} \approx \text{const} \approx 0.976 \text{ } ^\circ\text{C} / 100 \text{ m} \approx 1 \text{ } ^\circ\text{C} / 102.39 \text{ m} \quad (30)$$

$$\Gamma = \frac{dT}{dz} = -\frac{g}{C'_p} \Rightarrow \text{Gradiente vertical seco adiabático de temperatura} \quad (31)$$

### 2.6.2. Regimes de Estabilidade Atmosférica

A dispersão dos poluentes na atmosfera é função das condições de estabilidade da mesma, as quais são função de uma série de parâmetros e fenômenos físicos. A turbulência da atmosfera é determinada, principalmente, pela velocidade do vento e pelo gradiente térmico vertical.

A fonte primária de aquecimento da terra é o sol, ou mais exatamente a radiação solar. À medida que o sol sobe no horizonte, sob céu pouco nublado, uma grande quantidade de radiação atinge a superfície terrestre. Isso causa o aquecimento da camada de ar próxima à superfície terrestre e uma "parcela" deste ar quente começa um movimento vertical de ascensão. A quantidade de radiação solar que atinge a superfície da terra depende da camada de nuvens e da inclinação do sol (insolação).

Assim, quanto mais direto o sol atinge a superfície terrestre, mais aquecimento causa na terra e em consequência maior é a turbulência convectiva, induzida pelo gradiente térmico vertical. À medida que a "parcela" de ar sobe, a mesma é substituída por outra massa de ar mais fria, descendente. À noite a radiação solar cessa e a terra esfria à medida que o seu calor é irradiado de volta para a atmosfera. Na ausência de

vento, o ar esfria, diminui de volume e aumenta a densidade; tendendo à descida para a superfície terrestre. (Assunção, 1995)

Segundo (Lora, 2000), o critério de estabilidade atmosférica pode ser explicado utilizando-se o esquema mostrado na Figura 15.

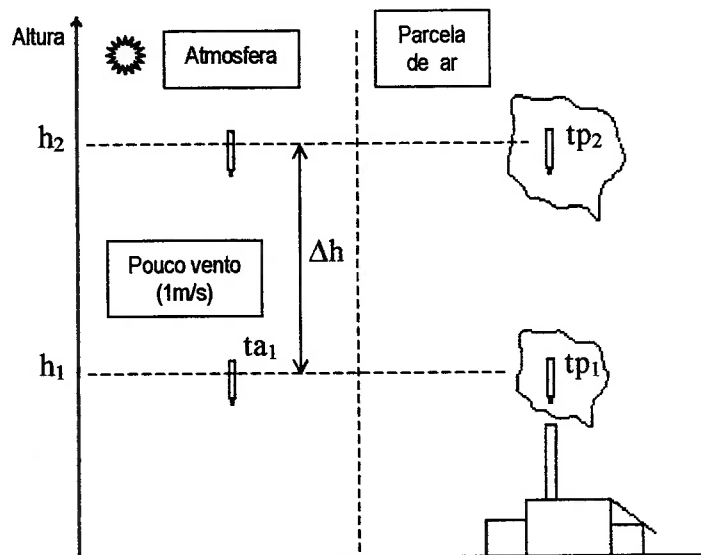


Figura – 15: Fundamentação do critério de estabilidade atmosférica.

Fonte: (Lora, 2000)

onde:

- $ta_1 \Rightarrow$  Temperatura ambiente à altura de lançamento da pluma -  $h_1$
- $ta_2 \Rightarrow$  Temperatura ambiente à altura genérica -  $h_2$
- $tp_1 \Rightarrow$  Temperatura da "parcela" de ar emitida pela chaminé na altura  $h_1$
- $tp_2 \Rightarrow$  Temperatura da "parcela" de ar emitida pela chaminé à altura -  $h_2$

Analisando a figura verificamos que se apresentam dois gradientes de temperatura:

- O gradiente da "parcela" de gases que sai pela chaminé, o qual é igual ao gradiente adiabático de temperatura ( $\Gamma$ ):

$$\Gamma = \left( \frac{tp_1 - tp_2}{\Delta h} \right) \quad (32)$$

- O gradiente atmosférico, representando a taxa de diminuição da temperatura ambiente com a altura na atmosfera:

$$\gamma = \left( \frac{ta_1 - ta_2}{\Delta h} \right) \quad (33)$$

Estes dois gradientes térmicos são apresentados, esquematicamente, segundo (Lora, 2000) na Figura: 16.

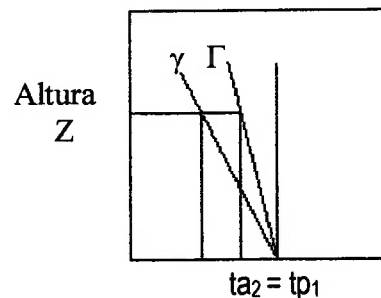


Figura 16 - Representação do gradiente adiabático e do gradiente atmosférico.

A estabilidade atmosférica é função do gradiente vertical de temperatura; e a relação entre os mesmos é apresentada, esquematicamente, na Figura 17.

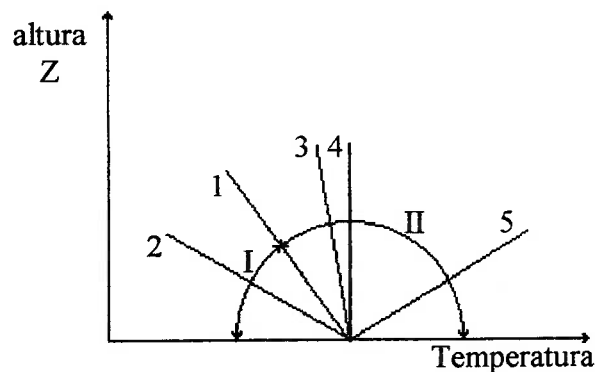


Figura 17 - Relação entre o gradiente de temperatura da atmosfera e a sua estabilidade. Fonte: (Lora, 2000)

As retas esquematizadas na figura correspondem a:

- (1) - **Gradiente vertical adiabático (  $\Gamma$  )**: Conforme visto anteriormente, representando um gradiente de  $1\text{ }^\circ\text{C}/100\text{m}$ .
- (2) - **Gradiente super-adiabático**: Esta situação corresponde a um regime instável com boa dispersão dos poluentes.

- **(3) - Gradiente sub-adiabático:** A "parcela" de ar está mais fria que o meio circundante (atmosfera), pelo que retorna a sua posição original (regime estável).
- **(4) - Gradiente isotérmico:** Temperatura constante com a variação da altura (regime estável).
- **(5) - Inversão:** Observa-se o aumento da temperatura com a altura, constituindo um regime extremamente estável. É denominada "inversão térmica", propicia para episódios de poluição, principalmente nos meses de inverno.

Assim verificamos, que um gradiente vertical de temperatura maior que o adiabático (gradiente super-adiabático) caracteriza uma atmosfera instável, com uma boa dispersão dos poluentes. Um gradiente vertical menor que o adiabático (sub-adiabático, isotérmico ou de inversão), corresponde a uma atmosfera estável com pouca dispersão dos poluentes. Por exemplo, num dia de muito sol e pouco vento, quando a camada de ar localizada perto do solo aquece consideravelmente, o gradiente atmosférico é maior que o adiabático, ou seja, a temperatura da atmosfera diminui mais rapidamente com a altura que o ar da "parcela". Isto significa que a qualquer altura o ar da "parcela" estará mais quente que a atmosfera circundante, pelo que continuará ascendendo, caracterizando a atmosfera como instável.

Na prática, é possível observar condições "quase-adiabáticas", o que corresponde a um céu bem nublado com forte vento. Assim as nuvens evitam a chegada da radiação solar direta à superfície terrestre, fazendo com que a temperatura do solo difira pouco da temperatura do ar. O vento garante uma boa mistura das diferentes camadas de ar e elimina o gradiente de temperatura que possa existir entre as mesmas.

### **2.6.3. Classes de Estabilidade de Pasquill**

Vários pesquisadores estudaram o fenómeno da estabilidade atmosférica, com o objetivo de estabelecer um critério para a estimativa da mesma; o que foi conseguido e publicado, em 1961, por Pasquill, que introduziu uma forma de estimar a estabilidade atmosférica.

Os principais parâmetros que, em função de sua magnitude, caracterizam a estabilidade atmosférica são: velocidade do vento, radiação solar e ocorrência de



nuvens. Através destes parâmetros Pasquill padronizou as condições de estabilidade em seis classes:

Tabela XIX - Classes de estabilidade de Pasquill

Fonte: (Turner, 1994)

CLASSE	CONDIÇÃO DE ESTABILIDADE
A	Extremamente instável
B	Instável
C	Ligeiramente instável
D	Neutra
E	Ligeiramente estável
F	Estável

A Tabela XX apresenta, de forma simplificada, o inter-relacionamento dos parâmetros determinantes da classe de estabilidade atmosférica, efetuado por Pasquill & Turner.

Tabela XX - Inter-relacionamento, de Pasquill & Turner, entre os parâmetros determinantes da classe de estabilidade atmosférica.

Fonte: (Pasquill, 1961, apud Turner, 1994)

VELOC. VENTO (m/s) (*)	DIA			NOITE	
	Radiação Solar Incidente			Nublado	Pouco Nub.
	Forte	Moderada	Fraca	> 4/8	< 3/8
< 2	A	A - B	B	---	---
2 - 3	A - B	B	C	E	F
3 - 5	B	B - C	D	D	E
5 - 6	C	C - D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

(\*) – velocidade superficial do vento = 10 m/s

Analisando a Tabela XX, nota-se que:

- A INSTABILIDADE atmosférica ocorre durante o dia, sendo caracterizada por forte/moderada radiação solar associada a ventos fracos (baixa velocidade).

- A condição de ESTABILIDADE ocorre à noite, na ausência de radiação solar e ventos fracos. As condições atmosféricas mais estáveis acontecem à noite, com céu limpo, isento de nuvens.
- A condição NEUTRA ocorre para radiação moderada/fraca com fortes ventos ou à noite, também com fortes ventos.

Em condições atmosféricas instáveis, a alta turbulência associada à mistura vertical produz uma alta concentração do poluente, ao nível do solo, próximo à fonte e baixos níveis de concentração distantes da fonte.

Em condições atmosféricas estáveis, o baixo nível de mistura vertical resulta numa baixa concentração junto ao solo, com concentrações relativamente mais altas para distâncias mais longas da fonte.

Para efeito de visualização e análise, as condições de estabilidade de Pasquill & Turner podem ser apresentadas num gráfico "altitude x temperatura".

A classe de estabilidade NEUTRA (D), de Pasquill, corresponde ao Gradiente Vertical Adiabático ( $\Gamma$ ), (gradiente de  $1\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ); representado graficamente por:

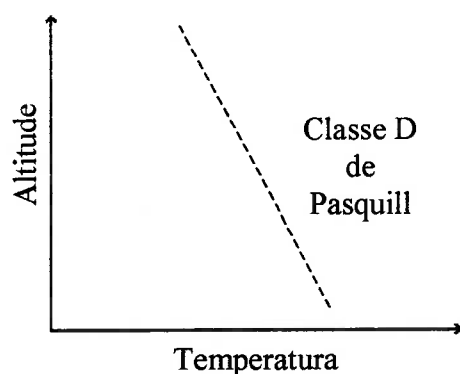


Figura 18 - Classe de estabilidade NEUTRA (D).

#### 2.6.4. Camada de Mistura

Os fenômenos meteorológicos se desenvolvem, simultaneamente, em três escalas principais: a larga escala, média escala e a pequena escala, as quais estão interligadas dentro da extensão horizontal e vertical da atmosfera. A dispersão da poluição do ar

ocorre dentro das regiões da meso e pequena escala em interação com os efeitos do campo de pressão de larga escala. Na baixa atmosfera, dentro da área metropolitana, a movimentação turbulenta do ar é bastante complexa, devido à influência da rugosidade da superfície, aos efeitos da brisa marítima, aos transportes de fluxo de calor sensível, ao vapor d'água e a um série de outros fatores secundários causados como consequência da formação da ilha de calor. (Oliveira, Sagula, Bruni, 1992)

Nos meses de verão, na parte da tarde, a transferência de calor da superfície do solo para a atmosfera estabelece a formação de correntes convectivas que provocam intensa mistura vertical, formando uma camada cuja extensão depende da temperatura inicial, podendo atingir elevadas alturas; a qual é denominada CAMADA DE MISTURA. Já nos meses de inverno este processo é inibido devido à excessiva estabilidade atmosférica dominante. (Oliveira, 1989)

Assim a CAMADA DE MISTURA, também conhecida como ALTURA DE MISTURA E CAMADA LIMITE CONVECTIVA, é definida como sendo a região da baixa atmosfera que apresenta uma forte mistura vertical turbulenta. No horário da manhã, a superfície terrestre está se aquecendo pela ação da radiação solar, que produz completa mistura convectiva na baixa atmosfera, iniciando-se o fenômeno da FUMIGAÇÃO.

No período da tarde, sobre áreas continentais, em latitudes médias, a CAMADA DE MISTURA atinge uma altura que varia entre 1 a 3 Km. O seu limite superior é determinado pela altura da base de inversão térmica elevada.

A inversão térmica é um caso típico de anomalia das condições ideais da atmosfera na região da troposfera (é a região do espaço que se estende da superfície terrestre até à altitude de 10 km, aproximadamente, e onde há um gradiente térmico de  $1^{\circ}\text{C} / 100\text{m}$ ) e constitui um caso típico de estabilidade atmosférica. Neste fenômeno, o ar próximo do solo, ao anoitecer, se resfria rapidamente e, como ele é mau condutor de calor, somente a camada de ar junto ao solo se resfriará. Acima dessa camada haverá ar mais quente, caracterizando a inversão térmica. Esta camada de ar frio é densa e vai reter os poluentes, minimizando a sua diluição na atmosfera.

A propriedade física do ar que governa a dispersão e diluição dos poluentes é a turbulência atmosférica; sendo a mesma composta por dois fenômenos físicos distintos e portanto dividida em dois tipos, térmica e mecânica; dependendo se a mesma é decorrente de um gradiente térmico na atmosfera, ou se de origem mecânica (proveniente das condições atmosféricas).

Os movimentos verticais originados pela turbulência térmica são conhecidos como plumas convectivas. De um modo geral as plumas convectivas são correntes verticais ascendentes que se estendem do solo à altura da camada de mistura.

Os efeitos da fricção na superfície, ou seja da turbulência mecânica, se restringem a alguns poucos metros, em forte contraste com a grande extensão da região de convecção, a qual atinge a altura da base de inversão térmica.

Os parâmetros meteorológicos, que combinados podem ser utilizados como elementos indicadores da turbulência, são: a velocidade do vento, a camada de inversão térmica, o gradiente térmico vertical e a temperatura superficial.

A altura da camada de mistura é o parâmetro chave para os modelos de poluição do ar. Ela determina o volume de ar disponível para a dispersão dos poluentes, e é utilizada em muitos métodos e modelos para avaliar a concentração dos poluentes, sendo também um parâmetro importante nos modelos de fluxo atmosférico. As substâncias emitidas na camada de mistura são gradualmente dispersadas horizontal e verticalmente através da ação da turbulência; e finalmente tornam-se completamente misturadas na camada de mistura.

A camada de mistura não é medida através de práticas meteorológicas padrão. Os problemas práticos e teóricos associados à determinação da camada de mistura e mesmo até quanto à sua definição, são refletidos em numerosas definições encontradas na literatura.

A determinação da altura da camada de mistura pode ser efetuada através de Radiosondas e Sistemas de Sondagem Remota; sendo as Radiosondas o método mais utilizado.

A sonda acústica é um equipamento simples, automático, pouco oneroso, portátil e de operação simples. Foi desenvolvida por McAllister (1968), com o objetivo de monitorar, continuamente, a microestrutura turbulenta da temperatura na região da camada de mistura.

O seu funcionamento baseia-se na emissão vertical de um pulso acústico para a atmosfera, que provoca espalhamento nas regiões de alta refletividade acústica. O pulso refletido é captado pela antena parabólica que o envia para o registrador do sistema da sonda.

A referência (Seibert, 2002) aborda os vários métodos para a determinação da altura da camada de mistura, fazendo uma revisão dos conceitos e uma comparação entre os mesmos, além de apresentar suas vantagens e desvantagens.

Em função do assunto camada de mistura não ser totalmente dominado e sistematizado, sucessivos esforços tem sido feitos para descrever a turbulência e a dispersão dos poluentes nesta camada; sendo que vários pesquisadores tem desenvolvido teses e feito experiências para validação das mesmas.

#### **2.6.5. Formato da Pluma em Função da Estabilidade Atmosférica**

Segundo (Braga, 2000), o entendimento do processo de mistura de poluentes na atmosfera pode ser feito através da Teoria da Turbulência.

A turbulência atmosférica é dividida em dois tipos, térmica e mecânica; dependendo se a mesma é decorrente de um gradiente térmico na atmosfera; ou se de origem mecânica (proveniente das condições físicas atmosféricas).

A turbulência térmica é devida à diferença de temperatura entre a superfície terrestre e a temperatura do ar, a qual varia com a altitude. Assim dependendo da altitude considerada, temos diferentes gradientes de temperatura. Durante o dia, o aquecimento solar intensifica a turbulência. Neste caso, a mistura vertical entre camadas horizontais aumenta e o perfil do vento torna-se uniforme quando comparado com o da noite. (Braga, 2000)

A turbulência mecânica decorre do escoamento do ar sobre a superfície atmosférica (solo), sendo função de grandezas não-térmicas, tais como velocidade do vento e rugosidade superficial. Quanto maior a velocidade do vento e/ou rugosidade superficial, maior a turbulência mecânica.

A topografia exerce efeitos locais nos ventos. Junto ao mar, a brisa marítima pode provocar ventos favoráveis à dispersão dos poluentes; enquanto que nos vales, o vento tende a descer as encostas durante a noite, na direção do fundo do vale. Durante o dia o ar fica aprisionado no vale durante um certo tempo, criando condições impróprias para a dispersão dos poluentes.

A rugosidade superficial constituída por edifícios, topografia, etc., serve como anteparo ao fluxo de poluentes na atmosfera, quando aparecem os chamados “efeitos de separação ou de descolamento”; surgindo em determinados locais, vórtices com altas concentrações de poluentes. (Braga, 2000)

A condição de estabilidade estável não apresenta, praticamente, nenhuma turbulência (nem mecânica, nem térmica); enquanto que na condição neutra, a turbulência é quase que somente mecânica. Já a condição instável apresenta ambas turbulências, mecânica e térmica (Turner, 1994).

A forma geométrica das plumas, apresentada na Figura 19, depende, principalmente, das características da turbulência e do perfil de temperatura na atmosfera; podendo ser classificada de acordo com o perfil de temperatura na atmosfera, conforme apresentado a seguir; desprezando-se os seguintes efeitos: (Braga, 2000)

- Diferença de densidades entre os poluentes e o ar,
- Velocidade de saída dos poluentes da chaminé,
- Sedimentação dos poluentes.

### **Pluma tipo “Looping”**

Sob *condições atmosféricas instáveis*, ou seja, para as classes de estabilidade "A", "B" e "C" de Pasquill, temos a presença das turbulências mecânica e térmica, sendo que nestes casos a turbulência térmica é grande, proporcionando movimentos

verticais, em função das trocas de calor entre as camadas da atmosfera. (Assunção, 1995)

Pode-se observar que a pluma ao ser liberada pela chaminé apresenta grandes "loops", com movimentos ascendentes e descendentes, como se fosse uma "montanha russa"; razão pela qual este formato de pluma é conhecido como "LOOPING". Esta aparência da pluma resulta dos movimentos ascendentes das correntes térmicas, seguidos dos movimentos descendentes do ar mais denso (mais frio); sendo que estes movimentos ocorrem, simultaneamente, com o movimento de deslocamento da pluma na direção do vento. Em função desta grande movimentação da pluma, para cima e para baixo, resulta uma considerável dispersão do poluente na direção vertical

Este tipo de pluma ocorre durante o período diurno, em dias de céu claro com poucas nuvens e muita insolação, quando a turbulência térmica provoca grandes turbilhões que dispersam rapidamente a nuvem de poluição. Em locais próximos à fonte, junto ao solo, pode ocorrer alta concentração de poluentes, devido a esta turbulência que leva a nuvem ao nível do solo. (Braga, 2000)

### **Pluma tipo "Coning"**

Sob condições atmosféricas neutras, ou seja, classe de estabilidade "D" de Pasquill, conforme mencionado, anteriormente, a turbulência mecânica é predominante. Os redemoinhos turbulentos têm orientações aleatórias, resultando numa dispersão relativamente simétrica, tanto na vertical como na horizontal; e portanto a pluma apresenta a forma de um cone com seu vértice na fonte; decorrendo daí o termo "coning" para descrever esta condição

Em comparação com a pluma "looping", esta pluma provoca maior concentração de poluentes, próximo ao solo, em locais bem distantes da fonte. A pluma "coning" ocorre em dias nublados, com ventos moderados. (Braga, 2000)

### **Pluma tipo "Fanning"**

Este tipo de pluma ocorre com sob condições atmosféricas estáveis, ou seja, classes de estabilidade "E" e "F" de Pasquill, onde podem ocorrer condições de inversão térmica. (Assunção, 1995)

Sob condições estáveis, a estrutura térmica inibe o movimento vertical das camadas de ar, não ocorrendo, portanto, quase nenhuma dispersão de poluentes na vertical. A mistura horizontal é também muito pequena por causa da ausência de ventos. Embora não provoque grandes concentrações em baixas altitudes, este tipo de pluma geralmente precede uma situação mais crítica, que é a pluma do tipo “fumigation”. (Braga, 2000)

### **Pluma tipo "Lofting"**

Este tipo de pluma é decorrente de uma condição de lançamento acima da camada de inversão, ocorrendo normalmente ao anoitecer, quando a inversão por radiação se inicia. Se a coluna permanecer acima da camada de inversão, a pluma permanece; caso a camada de inversão suplante a fonte, a pluma passa a ter um comportamento do tipo “fanning”. (Braga, 2000)

### **Pluma tipo "Fumigation"**

Este formato é caracterizado por uma condição instável do solo até ao topo da chaminé, seguido de uma condição estável a partir do topo da chaminé. É causada pela quebra da inversão por radiação, durando muito pouco, de 30 a 60 minutos. Numa situação de brisa marítima, este tipo de pluma pode durar várias horas. (Braga, 2000)



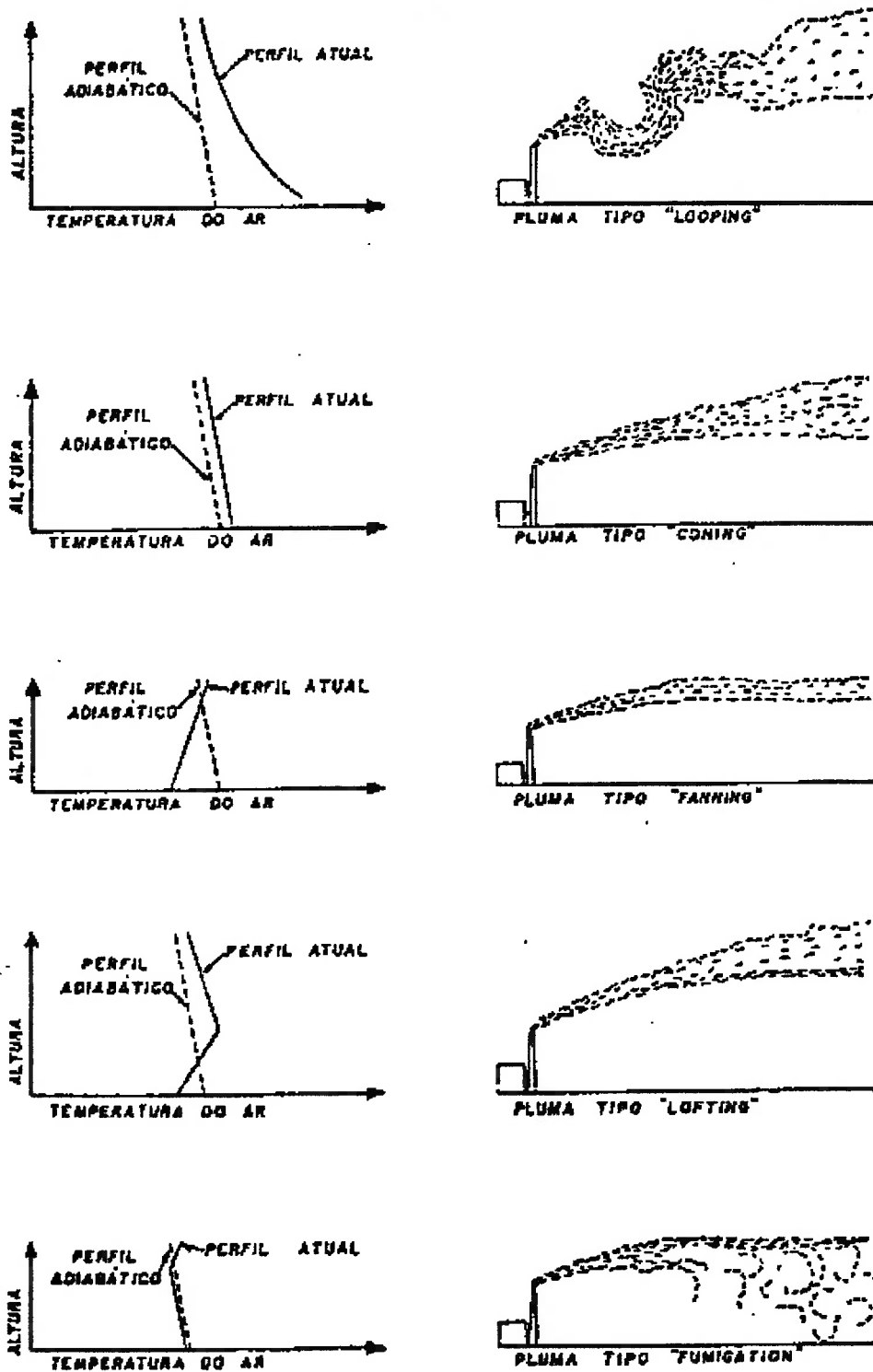


Figura 19 - Perfis de temperatura da atmosfera e respectivos formatos da pluma emitida por uma chaminé.

Fonte: (Assunção, 1995)

### **2.6.6. Poluição de Fundo – Background**

Designa-se por poluição de fundo numa região, à poluição existente à época da instalação de uma nova fonte de poluição. Esta poluição de fundo é proveniente, principalmente, dos processos das indústrias instaladas na região, da frota de veículos, da área agrícola e do consumo de combustíveis nas fontes estacionárias (principalmente industriais como comerciais).

Com relação às indústrias, a emissão é função do processo industrial adotado pela mesma, bem como dos sistemas de controle instalados.

A frota de veículos que contribui com a poluição de fundo é aquela correspondente aos veículos existentes circulando na área em estudo, bem como aquela que transita pelas estradas e rodovias que cortam a área.

No caso da área agrícola, a contribuição da mesma, geralmente ocorre em função das queimadas efetuadas na região.

Quanto ao consumo de combustíveis nas fontes estacionárias, a sua contribuição depende do tipo de equipamento, do tipo de combustível e ainda da existência ou não de sistema de controle da poluição no equipamento.

A obtenção da poluição de fundo pode ser feita através da utilização dos correspondentes fatores de emissão; entretanto o mais recomendável é a sua obtenção através de dados da qualidade do ar, coletados nas vizinhanças da nova fonte, através de monitores oficialmente instalados pelo órgão ambiental, ou por este monitorado. A instalação destes monitores pode também ser efetuada por instituições ou pelo próprio interessado na instalação de uma nova fonte.

A poluição de fundo é uma parte essencial no cálculo da concentração total na qualidade do ar, a ser considerada nos impactos provenientes de uma nova fonte.

A referência (Negri , 2002) apresenta uma metodologia para o processo de análise de instalação de uma nova usina termelétrica, a qual leva em consideração a poluição de fundo. A Figura 20 apresenta um fluxograma sintético da metodologia proposta.

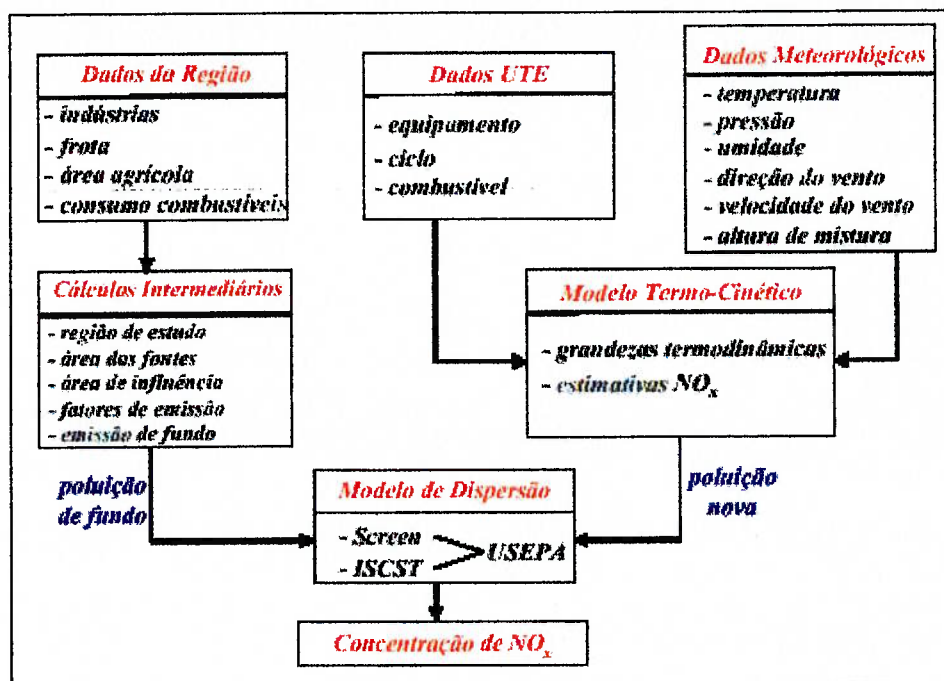


Figura 20 - Fluxograma de metodologia de análise de instalação de uma nova usina termelétrica considerando a poluição de fundo.

Fonte: (Negri, 2002)

## 2.7. Modelagem de Processos de Dispersão Atmosférica

Com o objetivo de manter a qualidade do ar em níveis razoáveis, muitos países estabeleceram padrões de qualidade do ar, os quais devem ser obedecidos pelas instalações existentes, bem como pelos novos empreendimentos a serem instalados; os quais no seu processo de licenciamento, na maioria dos casos, apresentam a necessidade de execução de estudos de impacto ambiental.

Para a realização de estudos de impacto ambiental das instalações em operação, bem como destes novos empreendimentos, como é o caso das usinas termelétricas; objetivando a estimativa da contribuição das fontes na degradação da qualidade do ar em sua área de influência, normalmente utiliza-se o recurso da modelagem de dispersão, a qual simula a dispersão dos poluentes emitidos por uma determinada fonte em função das características meteorológicas e climatológicas da região, da topografia; bem como das principais características da fonte emissora estudada.

A Figura 21 apresenta a macro estrutura de um Modelo de Dispersão.

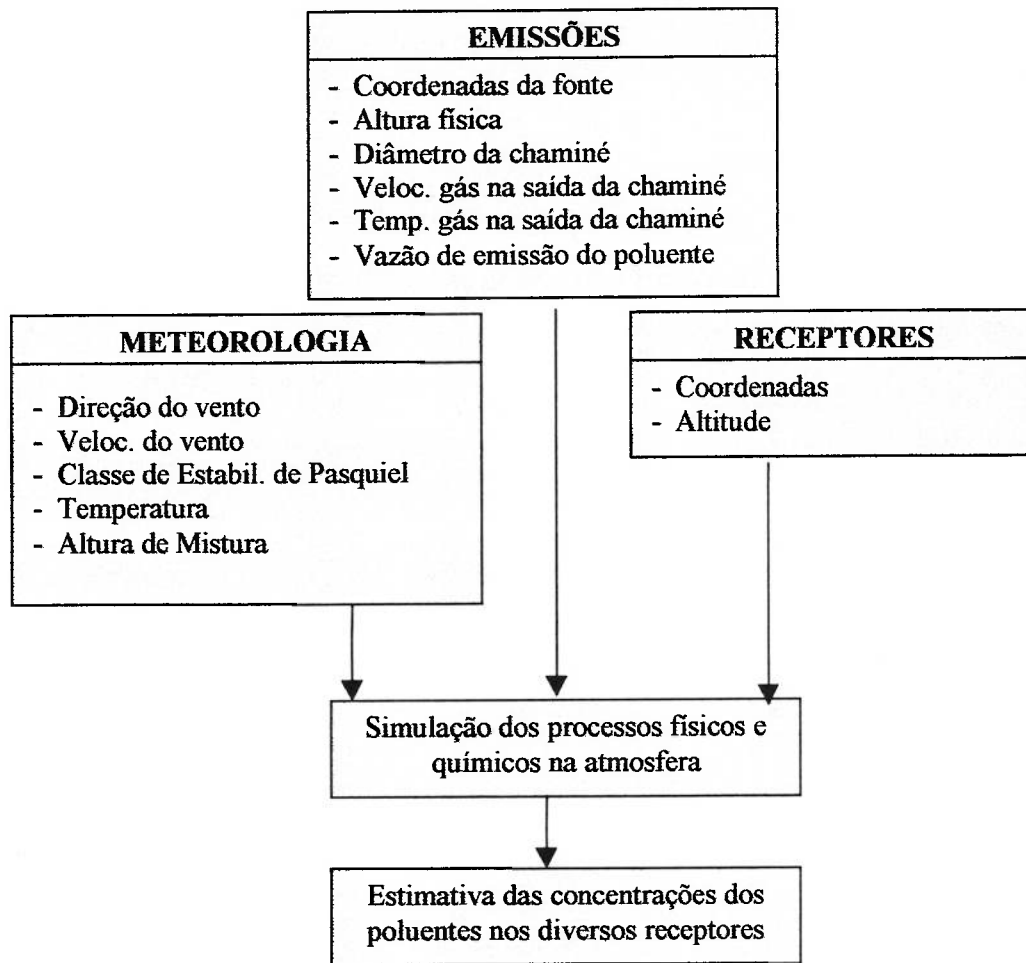


Figura 21 - Macro estrutura de um Modelo de Dispersão.

Através do modelo de dispersão são simuladas as condições meteorológicas, dentro do comportamento típico da região, que influenciam diretamente no transporte e dispersão dos poluentes na atmosfera, permitindo desta forma uma análise do impacto esperado, especialmente, nas piores condições de dispersão.

Além disto, pode haver a necessidade de se obter a contribuição, em termos de poluição, de uma dada fonte de emissão de uma determinada região para as regiões circunvizinhas; bem como a influência da redução das fontes de emissão em uma determinada região na poluição nas regiões circunvizinhas.

Para todas estas situações é necessário desenvolver adequados modelos matemáticos para a análise da qualidade do ar, os quais, provavelmente, na maioria das situações são a única ferramenta disponível.

Os modelos de qualidade do ar podem ser classificados em quatro tipos: gaussianos; numéricos; estatísticos ou empíricos; e físicos. (USEPA, 40 CFR, 1999)

Os *modelos gaussianos* são baseados no decaimento da função de Gauss, sendo os mais utilizados para a estimativa de impactos de poluentes não reativos.

Os *modelos numéricos* são uma metodologia alternativa aos gaussianos, sendo mais apropriados que os gaussianos para aplicações em áreas urbanas, envolvendo poluentes reativos; entretanto os mesmos requerem uma extensa base de dados e recursos; redundando em aplicações limitadas.

Técnicas *estatísticas ou empíricas* são freqüentemente empregadas em situações onde não há um completo entendimento e equacionamento dos processos físicos e químicos; ou ainda, quando falta uma base de dados suficiente para a utilização de um modelo numérico ou gaussiano.

A modelagem *física* envolve o uso de túnel de vento. Esta classe de modelagem é um processo complexo, requerendo um alto nível de especialização técnica. Todavia, a modelagem física pode ser utilizada para situações de escoamentos complexos, como em locais com edificações, topografia acidentada, impacto da pluma em terreno elevado, difusão em área urbana, ou terreno complexo. Este tipo de modelagem é particularmente aplicado para fonte ou grupo de fontes situadas em pequenas áreas, da ordem de poucos quilômetros quadrados.

A EPA desenvolveu modelos apropriados para aplicações regulatórias, organizados em 8 (oito) categorias: rural, urbano, complexo industrial urbano (chaminé em nível baixo), poluentes reativos, fontes móveis, terrenos complexos (mais alto que a fonte), visibilidade e transporte a longa distância. (USEPA, 40 CFR, 1999)

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

a) orientativos (“screening”) que induzem a uma avaliação mais geral e conservativa sem detalhamento meteorológicos, sendo utilizadas 5 técnicas de avaliação das concentrações, dependendo sobretudo da localização, 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 modelagem mais sofisticada.

### **2.7.1. Classificação dos Modelos - EPA**

Através da referência (USEPA, 40 CFR, 1999), Apêndice “W” do Capítulo 51, a EPA estabelece condições para a aplicação de modelos de qualidade do ar para fins regulatórios, as quais estão baseadas e são revisadas, periodicamente, em função de sugestões apresentadas: nos vários workshops anuais patrocinados pela EPA; pela comunidade científica; bem como, em função de novos produtos desenvolvidos pela própria EPA.

Neste Apêndice “W”, são apresentados os modelos de qualidade do ar recomendados pela EPA; considerações gerais sobre modelagem e a precisão e incerteza dos modelos. Nos Apêndices “A” e “B” deste Apêndice “W” são apresentados, respectivamente, resumos dos modelos de qualidade do ar preferidos e alternativos, indicados pela EPA.

#### **2.7.1.1. Modelos Preferidos**

O Apêndice “A” apresenta de forma resumida, os modelos de qualidade do ar preferidos pela EPA; os quais podem ser usados sem uma demonstração formal de sua aplicabilidade, uma vez que os mesmos se enquadram nas recomendações daquele órgão regulatório:

- Buoyant Line and Point Source Dispersion Model (BLP)
- Caline3
- Climatological Dispersion Model (CDM 2.0)
- Gaussian-Plume Multiple Source Air Quality Algorithm (RAM)
- **Industrial Source Complex Model (ISC3)**
- Urban Airshed Model (UAM)
- Offshore and Coastal Dispersion Model (OCD)
- Emissions and Dispersion Modeling System (EDMS)

- Complex Terrain Dispersion Model Plus Algorithms For Unstable Situations (CTDMPLUS)

### **2.7.1.2. Modelos Alternativos**

O Apêndice "B" resume as principais características de modelos de qualidade de ar, que podem ser utilizados em casos particulares, alternativamente aos preferidos pela EPA, conforme especificado na referência (USEPA, 40 CFR, 1999), listados abaixo:

- B.1 AVACTA II Model
- B.2 Dense Gas Dispersion Model (DEGADIS)
- B.3 ERT Visibility Model
- B.4 HGSYSTEM
- B.5 HOTMAC/RAPTAD
- B.6 LONGZ
- B.7 Maryland Power Plant Siting Program (PPSP) Model
- B.8 Mesoscale Puff Model (MESOPUFF II)
- B.9 Mesoscale Transport Diffusion and Deposition Model For Industrial Sources (MTDDIS)
- B.10 Multi-Source (SCSTER) Model
- B.11 PANACHE
- B.12 PLUME Visibility Model (PLUVUE II)
- B.13 Point, Area, Line Source Algorithm (PAL-DS)
- B.14 Reactive Plume Model (RPM-IV)
- B.15 Shoreline Dispersion Model (SDM)
- B.16 SHORTZ
- B.17 Simple Line-Source Model
- B.18 SLAB
- B.19 WYNDvalley Model

### **2.7.2. Modelo "Industrial Source Complex - ISC"**

O modelo "Industrial Source Complex - ISC", é um dos modelos preferidos pela EPA, tendo sido desenvolvido nesta instituição. O EPA, com o objetivo de melhorar a qualidade, confiança, manutenção, estrutura dos arquivos e interface com o usuário,

vem promovendo várias revisões no modelo, encontrando-se atualmente na versão 3, denominada - ISC3.

O modelo ISC3 é um modelo de pluma gaussiana e tem sido amplamente aplicado em estudos tais como: projetos de chaminés, projetos de redes de monitoramento, estudos de impacto ambiental, avaliação da qualidade do ar, entre outros; sendo que a maioria das termelétricas, em processo de instalação no Brasil, tiveram suas emissões atmosféricas estudadas através do mesmo; determinando as concentrações dos poluentes emitidos pela fonte.

O modelo ISC3 possui duas opções para simulação, as quais diferem, principalmente, pelo período de amostragem para o cálculo das concentrações e pela formatação dos dados meteorológicos de entrada:

- ISC-ST (Short Term): Calcula a concentração de poluentes para períodos de 1, 2, 3, 4, 6, 8, 12 e 24 horas. Quando utilizada uma seqüência anual de dados meteorológicos horários, permite o cálculo da concentração média anual,
- ISC-LT (Long Term): Utiliza dados estatísticos do regime dos ventos para calcular a concentração sazonal ou anual dos poluentes.

O modelo ISC-ST-3 permite associar cenários climáticos e aproximar o máximo possível da realidade física, sendo utilizado tanto pela comunidade acadêmica, como pelas Agências Nacionais e Internacionais de controle ambiental, e ainda pelas consultorias em geral. O cálculo da concentração dos poluentes permite a obtenção de resultados tanto na escala espacial como na temporal, para se comparar com os padrões vigentes no Estado de São Paulo e os estabelecidos na legislação CONAMA Nº 03/90.

A estabilidade atmosférica é um parâmetro importante para se identificar as condições meteorológicas para a dispersão dos poluentes. O modelo calcula os parâmetros de dispersão de Pasquill-Gifford para todas as classes de estabilidade atmosférica (Pasquill – Classes A, B, C, D, E e F).

O ISC3 é utilizado para avaliar concentrações de poluentes de quatro categorias de fontes: ponto, área, volume e fontes abertas. No caso de avaliação de várias fontes



simultâneas, o mesmo faz uma somatória dos resultados obtidos para cada fonte de emissão para obter as concentrações totais nos pontos de interesse.

Segundo a (USEPA 40 CFR, 1999) este modelo pode ser utilizado nas seguintes aplicações, objetivando resultados para uso regulatório: fontes industriais complexas, áreas rurais e urbanas, terreno plano ou montanhoso (relevo natural), transporte do poluente em distâncias menores que 50 Km, calculo de concentrações médias de 1 hora a concentrações médias anuais, e emissões contínuas de poluentes.

Nas aplicações para usos regulatórios, as seguintes opções podem ser selecionadas:

- Para modelagens “Short Term” ou “Long Term” pode ser selecionada a condição “default”, sendo automaticamente selecionados os algoritmos referentes a: efeito downwash, elevação final da pluma, dispersão induzida pela flutuação da pluma (Buoyancy Induced Dispersion - BID), gradiente vertical de temperatura, tratamento da condição de calmarias, expoentes para o perfil vertical do vento, o valor da meia vida de alguns poluentes, e o efeito esteira devido às construções próximas,
- Opção Rural, para aplicações em ambiente semelhante ao rural
- Opção Urbano, para aplicações em regiões urbanas,
- Unidades dos resultados das concentrações.

#### **2.7.2.1. Dados de Entrada**

A dispersão atmosférica de poluentes é função de um conjunto de parâmetros meteorológicos que atuam, simultaneamente, no sentido de transportar, dispersar e concentrar os níveis de poluição em uma determinada região. Os principais processos atmosféricos que determinam o potencial de dispersão dependem das condições meteorológicas que determinam o potencial de dispersão dependem das condições meteorológicas acionadas a partir da interação entre as diversas escalas do movimento que atuam simultaneamente. As condições meteorológicas têm um papel determinante na descrição físico-química do transporte de poluentes entre a fonte e o receptor.

A influência do relevo e da rugosidade da superfície do terreno no transporte e dispersão de poluentes na atmosfera são fatores importantes, pois criam áreas de turbulência favoráveis à dispersão dos poluentes. Em geral a modelagem é mais precisa para terrenos relativamente planos e campo aberto, ou seja, para condições ideais de topografia e rugosidade do terreno, que possam causar um mínimo de influência no regime de escoamento dos gases e portanto, o mínimo de influência na forma da pluma.

São necessários os seguintes dados de entrada para os modelos ISC3:

b1) *Informações da fonte*: localização, taxa de emissão dos poluentes (vazão em massa), altura física da chaminé, velocidade de saída dos gases na chaminé, diâmetro interno na saída da chaminé e temperatura dos gases na saída da chaminé.

*Entradas opcionais de informações da fonte*: elevação da fonte; construções relevantes nas proximidades; tamanho das partículas e a correspondente velocidade de sedimentação; e os coeficientes de reflexão superficial.

b2) *Dados meteorológicos*: O ISC3 requer informações horárias das condições meteorológicas superficiais, em arquivo no formato ASC II, contendo classe de estabilidade, direção do vento, velocidade do vento, temperatura e altura de mistura.

b3) *Dados dos receptores*: Devem ser informados para cada receptor, as coordenadas (X e Y), e no caso de receptores elevados, a elevação dos mesmos.

#### **2.7.2.2. Dados de Saída**

As opções de saída do modelo ISC3 são:

- parâmetros de controle do programa, dados das fontes e dados dos receptores,
- tabelas dos dados meteorológicos horários para cada dia específico,
- concentração média diária ou deposição total calculada para cada receptor ou para qualquer arranjo de fontes,

- valores de concentração ou deposição calculadas para qualquer arranjo de fontes, em todos os receptores para qualquer dia específico ou intervalo de tempo neste dia,
- tabelas do 1º e 2º maiores valores de concentração ou valores de deposição, calculados para cada receptor, num período de tempo específico, para qualquer arranjo de fontes,
- tabelas de concentrações ou deposição dos 50 valores máximos calculados num período de tempo específico, para qualquer combinação de fontes desejada.

### 2.7.3. Equação Básica da Dispersão

O fenômeno físico do transporte de poluentes do ar a longa distância é um fenômeno bastante complexo, constituído de três etapas principais: *emissão, transporte e transformações* que ocorrem durante o transporte. Durante estas etapas desenvolvem-se cinco processos: *emissão, advecção, difusão, deposição e reações químicas*.

A primeira tarefa para o desenvolvimento de um modelo para esta finalidade, consiste na descrição matemática destes cinco processos, resultando num sistema de equações diferenciais parciais.

Segundo (Zlatev, 1995), cada um destes processos pode ser estudado, isoladamente, como se os demais não acontecessem; o que é uma situação hipotética, mas que facilita o desenvolvimento das correspondentes equações diferenciais.

Posteriormente, estas equações desenvolvidas isoladamente, são agrupadas numa única equação diferencial - "Equação Básica da Dispersão Atmosférica", representando todos os processos envolvidos no transporte do poluente.

#### a) Emissão

Durante o primeiro estágio, diferentes poluentes são emitidos para a atmosfera, que são os poluentes primários. Os poluentes secundários aparecem como resultado de reações químicas durante o processo de transporte na atmosfera. Isto significa que na atmosfera não estão presentes, somente os poluentes emitidos por agentes industriais

e naturais, mas também, poluentes produzidos por reações e transformações químicas durante o processo de transporte na atmosfera.

Assim para efeito de modelagem, consideremos que para o poluente de concentração  $C(x,y,z,t)$ , a fonte de emissão é descrita pela função  $E(x,y,z,t)$

$$\frac{dc}{dt} = E \quad (34)$$

### b) Advecção

Quando os poluentes são lançados à atmosfera, através da emissão de uma fonte, os mesmos são transportados pelo vento, através de longas distâncias, sendo este processo denominado advecção dos poluentes no ar; e representado pela equação diferencial parcial a seguir, a qual descreve um puro processo de advecção num espaço Euclidiano tri-dimensional:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{\partial(u.c)}{\partial x} - \frac{\partial(v.c)}{\partial y} - \frac{\partial(w.c)}{\partial z} \quad (35)$$

Desenvolvendo tem-se:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\left(u \cdot \frac{\partial c}{\partial x} + c \cdot \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \left(v \cdot \frac{\partial c}{\partial y} + c \cdot \frac{\partial v}{\partial y}\right) - \left(w \cdot \frac{\partial c}{\partial z} + c \cdot \frac{\partial w}{\partial z}\right) \quad (36)$$

Considerando as velocidades do vento constantes nas três direções cartesianas:

$$u = \text{Cte.}; \quad v = \text{Cte.}; \quad w = \text{Cte.}; \quad \text{então temos:}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (37)$$

E a equação diferencial da advecção torna-se:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -u \frac{\partial c}{\partial x} - v \frac{\partial c}{\partial y} - w \frac{\partial c}{\partial z} \quad (38)$$

### c) Difusão

Quando os poluentes do ar são lançados por uma fonte de emissão na atmosfera, os mesmos são transportados pelo vento (advecção). Vários processos físicos acontecem durante este transporte, sendo o fenômeno da difusão um destes processos. Os poluentes do ar podem ser difundidos, ou dispersados nas direções horizontal e vertical.

Não há, claramente, nenhum limite para a difusão na direção horizontal, porém, há duas barreiras importantes para a difusão na direção vertical, as quais devem ser levadas em consideração nos modelos matemáticos.

A primeira delas é o topo da camada limite de mistura, normalmente denominada de "Altura de Mistura". Durante a noite a Altura de Mistura é normalmente menor que de dia (o topo da camada limite está próximo da superfície). No período diurno, a "Altura de Mistura" pode ser muito alta, da ordem de vários quilômetros. Os poluentes do ar, misturam-se relativamente rápido, no interior da camada limite de mistura.

A segunda destas barreiras é a tropopausa (sua altura é aproximadamente 15 Km). Enquanto os poluentes do ar podem ser difundidos acima da camada limite de mistura (embora este processo, normalmente, seja muito lento), não há, praticamente, nenhum processo de mistura acima da tropopausa. Mesmo que a mistura ocorra, é tão pequena e ocorre tão raramente, que pode ser desprezada; sendo o que ocorre nos diversos modelos de poluição do ar.

A difusão do poluente do ar na atmosfera, considerando-se o processo, isoladamente, pode ser descrita pela equação diferencial parcial:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad (39)$$

### d) Deposição

O processo de deposição dos poluentes na superfície terrestre (terra, água e vegetação) ocorre sob duas formas: deposição seca e deposição úmida.

A *deposição seca* dos poluentes do ar é um processo que acontece ao longo do transporte dos mesmos. Há diferentes mecanismos de deposição seca: sedimentação gravitacional (partículas grandes), impactos na vegetação, bem como processos de reação e absorção na superfície terrestre; os quais dependem de vários fatores, tais como: parâmetros meteorológicos; propriedades físicas, químicas e fisiológicas da superfície terrestre e propriedades específicas dos poluentes.

A *deposição úmida*, que acontece quando ocorrem chuvas, também conhecida como "precipitação scavenging"; é um dos mecanismos mais efetivos de limpeza da atmosfera. Entretanto, enquanto a atmosfera está sendo limpa, pode ocorrer que o solo esteja sendo contaminado pela deposição de alguns poluentes indesejáveis, principalmente em determinadas áreas sensíveis.

De uma forma geral, a deposição do poluente do ar que está sendo transportado, depende dos demais poluentes presentes no transporte; entretanto sob certas hipóteses, a mesma pode ser considerada independente da deposição dos demais poluentes envolvidos no transporte; e desta forma a deposição é função somente da concentração do poluente; o que implica no uso de uma equação diferencial ordinária.

Sob as considerações feitas acima, o processo de deposição do poluente pode ser descrito pela seguinte equação diferencial ordinária linear:

$$\frac{dc}{dt} = -(K_1 + K_2) c \quad (40)$$

#### e) Reações Químicas

Um dos processos mais importantes processos que ocorrem durante o transporte dos poluentes na atmosfera é o químico, o qual por sua natureza e componentes químicos existentes na atmosfera, é de difícil implementação no modelo; entretanto inúmeros esforços e pesquisas estão sendo desenvolvidos neste sentido. Diversos trabalhos estão sendo realizados com o objetivo de incorporar nos modelos, esquemas avançados de reações químicas na atmosfera.

Assim para efeito de equacionamento, consideremos que as reações químicas possam ser descritas pela função:

$$\frac{dc}{dt} = Q(C_1, C_2, C_3, \dots, C_q) \quad (41)$$

Combinando as expressões matemáticas desenvolvidas, isoladamente, para cada um dos processos que ocorrem durante o transporte do poluente, obtemos a "**Equação Básica da Dispersão Atmosférica**" na sua forma mais geral:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -u \frac{\partial c}{\partial x} - v \frac{\partial c}{\partial y} - w \frac{\partial c}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \quad (42)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) - (K_1 + K_2)c + E + Q$$

As seguintes hipóteses são feitas para simplificar a equação anterior:

a- regime permanente:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = 0$$

b- O eixo "x" é orientado na direção da velocidade média do vento e então fazemos:

$$u = U$$

c- Como as componentes da velocidade do vento nas direções vertical (w) e transversal ao deslocamento da pluma (y) são muito menores que a velocidade na direção da pluma (x), as mesmas são desprezadas:

$$v = 0 \quad ; \quad w = 0$$

d- A deposição e as reações químicas do poluente são desprezadas, e portanto:

$$-(K_1 + K_2) \cdot c = 0$$

$$Q = 0$$

Em função das hipóteses anteriores, a "Equação Básica da Dispersão Atmosférica" assume a seguinte forma, a qual constitui a base da maioria dos modelos de dispersão de poluentes na atmosfera, cuja solução ocorre por métodos numéricos. Sob uma série de outras hipóteses e simplificações, pode-se obter a solução analítica desta equação.

$$U \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) + E \quad (43)$$

#### 2.7.4. Dispersão Gaussiana

##### 2.7.4.1. Premissas no Estudo da Dispersão Gaussiana

Na utilização de um modelo gaussiano para o cálculo das concentrações de poluentes, são utilizadas as seguintes premissas:

- **Emissão Contínua**

As emissões de poluente ocorrem continuamente, não havendo variação da massa emitida por unidade de tempo (vazão em massa constante).

- **Conservação da massa**

É assumido, também, que toda massa que sai da fonte se conserva (conservação da massa), permanecendo na atmosfera durante o transporte do poluente, desde a fonte até ao receptor. Nenhum material é removido através de reações químicas, nem precipita no solo por ação da gravidade ou movimentos de turbulência.

Supõem-se que qualquer deposição de poluente junto ao solo, através de redemoinhos de turbulência, será novamente lançado para a atmosfera através de outros redemoinhos turbulentos subsequentes. Isto é chamado de reflexão turbulenta. Acontece a reflexão total da pluma na superfície da terra, ou seja, não há deposição, nem reação na superfície.

- **Regime Permanente**



O modelo Gaussiano assume que as condições meteorológicas permanecem inalteradas com o decorrer do tempo e portanto, também, todos os parâmetros meteorológicos importantes no processo; pelo menos no período de transporte do poluente, desde a fonte até ao receptor.

- **Distribuição das Concentrações na Vertical e Horizontal**

É feita a hipótese de que o perfil de concentração do poluente, a qualquer distância da fonte, nas direções vertical e horizontal (perpendiculares ao percurso do poluente), pode ser representado por uma distribuição Gaussiana.

- **Velocidade e Altura da Pluma**

Quando a pluma penetra na atmosfera, se eleva até alcançar uma certa altura de equilíbrio horizontal. Com isso, a altura do centro da pluma permanece constante na direção predominante do vento, adotada como fixa na trajetória da pluma.

O efeito da tensão de cisalhamento do vento não é considerado na difusão horizontal (o efeito torna-se grande após aprox. 10 km).

- **Concentração**

Para qualquer distância da fonte, a concentração máxima sempre ocorre no centro da pluma

- **Parâmetros de Dispersão**

O modelo assume que os parâmetros de dispersão são independentes de "Z" e função, somente, de "X"

#### **2.7.4.2. Equação de Dispersão Gaussiana**

Na solução analítica da "Equação Básica da Dispersão Atmosférica", os modelos que consideram este tipo de distribuição, assumem que a dispersão de uma pluma lançada ao ar, pontualmente, se dá de forma que a concentração do poluente, em função da posição relativa à fonte, tem comportamento Gaussiano.

A forma mais geral da “Equação de Dispersão Gaussiana”, será inicialmente apresentada, seguida de equações derivadas para condições específicas. Esta equação estima a concentração do poluente num determinado receptor de coordenadas “X” e “Y”, à cota “Z”, acima do solo; a qual resulta de uma fonte de emissão de altura efetiva “H” acima do nível do solo.

$$C(x, y, z, H) = \frac{Q}{2\pi U_y \sigma_z} \cdot \left( \exp \left[ \frac{-Y^2}{2(\sigma_y)^2} \right] \right) \cdot \left\{ \exp \left[ \frac{-(z-H)^2}{2(\sigma_z)^2} \right] + \exp \left[ \frac{-(z+H)^2}{2(\sigma_z)^2} \right] \right\} \quad (44)$$

O modelo Gaussiano é o de uso mais geral e, apesar das variações envolvidas o mesmo provê estimativas razoáveis para terrenos planos ou pouco acidentados.

A equação acima deve ser utilizada para emissão contínua e para poluentes que não reagem facilmente na atmosfera. A concentração obtida é válida para período curto de tempo.

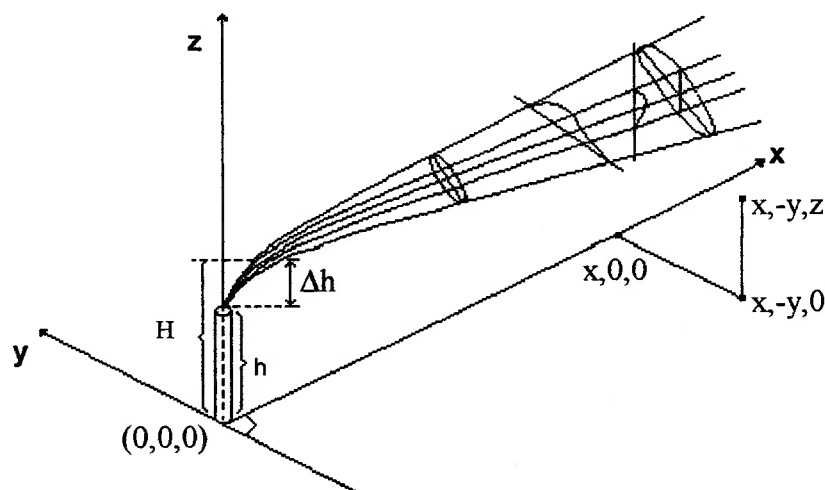


Figura 22 - Sistema de coordenadas da pluma de dispersão

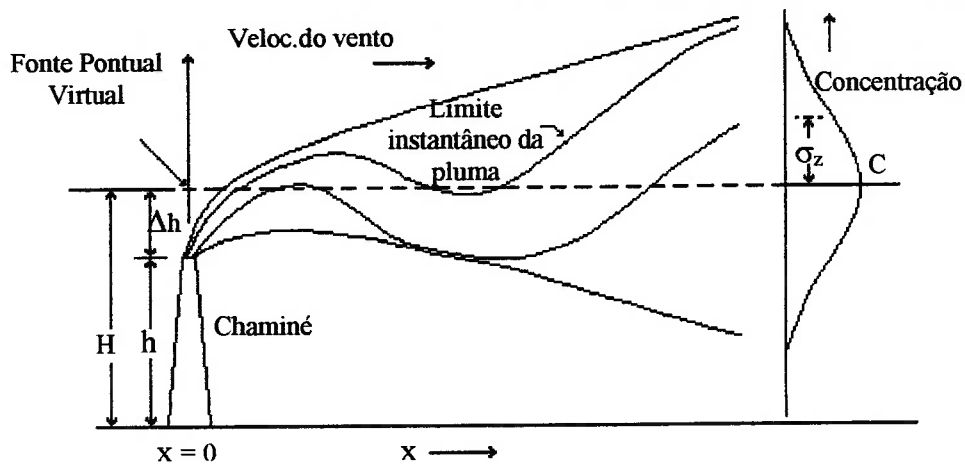


Figura 23 - Perfil vertical da pluma de dispersão

#### 2.7.4.2.1. Condições Específicas de Aplicação da Equação Gaussiana

##### a) Concentração ao Nível do Solo

Para receptores ao nível do solo ( $z=0$ ), a equação de dispersão Gaussiana torna-se:

$$C(x, y, 0; H) = \frac{Q}{\pi U \sigma_y \sigma_z} \cdot \exp\left[\frac{-y^2}{2(\sigma_y)^2}\right] \cdot \exp\left[\frac{-H^2}{2(\sigma_z)^2}\right] \quad (45)$$

##### b) Concentração ao Nível do Solo e no Centro da Pluma

Para receptores ao nível do solo ( $z=0$ ), e concentração no centro da pluma ( $y=0$ ), a equação de dispersão gaussiana reduz-se a:

$$C(x, 0, 0; H) = \frac{Q}{\pi \cdot U \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \cdot \exp\left[\frac{-H^2}{2(\sigma_z)^2}\right] \quad (46)$$

##### c) Concentração no Centro da Pluma à Altura Efetiva de Emissão

A determinação da concentração do poluente, no centro da pluma ( $Y=0$ ), à altura "H" ( $Z=H$ ), pode ser determinada por:

$$C(x, 0, H; H) = \frac{Q}{2\pi U \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \left\{ 1 + \exp\left[\frac{-H^2}{2(\sigma_z)^2}\right] \right\} \quad (47)$$

#### d) Concentração ao Nível Solo, no Centro da Pluma e Emissão ao Nível do Solo

Para a determinação das concentrações ao nível do solo ( $z=0$ ), no centro da pluma ( $y=0$ ) proveniente de uma fonte, também, ao nível do solo ( $H=0$ ), temos:

$$C(x,0,0;0) = \frac{Q}{\pi \cdot U \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \quad (48)$$

#### e) Concentração na Condição de Inversão Térmica

Quando ocorre uma inversão térmica, a equação básica da dispersão deve levar em consideração que a pluma não se dispersa totalmente na vertical, uma vez que alcança a camada de inversão -Figura 24. A pluma começará a se misturar quando alcançar a base da camada de inversão a uma distância  $X_L$  da chaminé na direção do vento. Esta distância  $X_L$  é função da estabilidade na camada abaixo da inversão.

Quando a pluma alcança duas vezes a distância do contato inicial com a base de inversão, a mesma é dita como completamente misturada através da camada abaixo da inversão.

Segundo (Davis, 1998), foi determinado empiricamente, que o coeficiente de dispersão vertical  $\sigma_z$  pode ser calculado de acordo com as seguintes equações:

$$\text{- a uma distância } X_L \text{ da fonte:} \quad \sigma_z = 0,47 L \quad (49)$$

$$\text{- a partir da distância } 2X_L \text{ da fonte:} \quad \sigma_z = L \quad (50)$$

Onde:

$L$  = altura da camada de inversão (m)

$H$  = altura efetiva da chaminé (m)

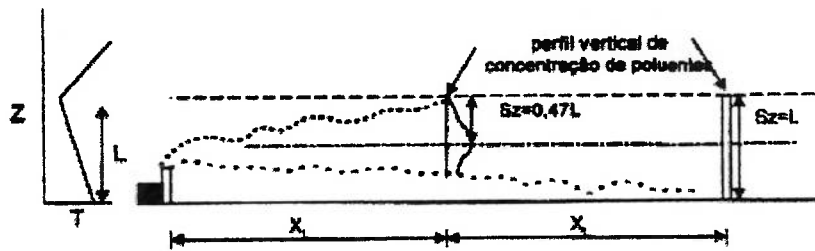


Figura 24 - Efeitos da dispersão na ocorrência de inversão térmica

Fonte: (Davis, 1998)

Segundo (Davis, 1998), nas distâncias da fonte, a partir de  $2 X_L$ , a concentração do poluente na linha de centro da pluma, pode ser estimada utilizando-se a seguinte equação:

$$C = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \cdot U \cdot \sigma_y \cdot L} \quad (51)$$

#### 2.7.4.3. Parâmetros da Equação Gaussiana

Este item apresenta uma breve abordagem dos parâmetros utilizados na equação gaussiana.

##### Quantidade de Poluente Emitida - Q

A quantidade de poluente emitida é caracterizada como vazão em massa (g/s); sendo considerada contínua durante intervalo de tempo maior ou igual ao tempo que a pluma leva para ir do ponto de emissão ao ponto onde se deseja obter as concentrações.

##### Altura Efetiva da Chaminé - H

Ao sair da chaminé onde é emitida, a pluma do poluente sofre um acréscimo na altura em que é emitida. Este fenômeno é explicado devido à velocidade de saída dos gases e à diferença de temperatura existente entre este e o meio ambiente.

Designa-se, então, como "altura efetiva da chaminé", a altura em que o deslocamento do eixo da pluma começa a ser aproximadamente horizontal. Desta forma a "altura

efetiva da chaminé" corresponde à soma da altura física mais a elevação da pluma acima da chaminé:

$$H = h + \Delta h \quad (52)$$

O incremento de altura da pluma depende das condições de emissão da mesma, bem como, de fatores meteorológicos.

### Velocidade do vento – U

A velocidade do vento utilizada na Equação Gaussiana corresponde àquela que ocorre no ponto de lançamento dos poluentes ( $u_s$ ), isto é, à altura da chaminé ( $h_s$ ).

Embora a velocidade do vento possa acontecer em três dimensões, só é comum considerar suas componentes horizontais; as quais são função dos gradientes horizontais de pressão e temperatura. Por convenção, considera-se a direção do vento, como sendo aquela de origem do mesmo.

A importância da determinação da direção do vento, é a obtenção da direção do transporte dos poluentes emitidos pela fonte. Assim, um vento oeste causa poluição a leste da fonte. Para emissões contínuas, a diluição dos poluentes ocorre a partir da sua emissão, no topo da chaminé.

A rugosidade superficial (asperezas) sobre a qual o vento está fluindo, é determinante para a variação da velocidade do vento com a altura. Em função desta rugosidade, a velocidade do vento é reduzida junto ao solo, variando com a altura.

Para o cálculo da concentração do poluente na pluma, é necessária a velocidade do vento ao nível de lançamento. Ocorre que na maioria das vezes dispomos da velocidade do vento ( $u_{ref}$ ) medida em outros pontos ( $z_{ref}$ ), diferentes deste, sendo necessário efetuar-se a devida correção, através da equação que estabelece a variação da velocidade do vento com a altitude (USEPA, ISC3, 1995) :

$$u_s = u_{ref} \cdot \left( \frac{h_s}{z_{ref}} \right)^p \quad (53)$$

Onde "p" é o expoente do perfil do vento, função da categoria de estabilidade atmosférica, sendo utilizados os valores característicos, apresentados na Tabela XXI.

Tabela XXI - Valores do expoente "p" do perfil de velocidades do vento, função da categoria de estabilidade atmosférica.

Fonte: (USEPA, ISC3, 1995)

CLASSE	ESTABILIDADE	EXPOENTE (p)	
		Rural	Urbano
A	Extrem. instável	0,07	0,15
B	Instável	0,07	0,15
C	Ligeir. instável	0,10	0,20
D	Neutra	0,15	0,25
E	Ligeir. estável	0,35	0,30
F	Estável	0,55	0,30

### Coefficientes de Dispersão - $\sigma_y$ e $\sigma_z$

Os coeficientes de dispersão são as grandezas que indicam o grau de dispersão do poluente na atmosfera. Os principais fatores que influenciam estes parâmetros são a estrutura da turbulência atmosférica, a existência de inversões térmicas, a altura sobre o solo, a topografia do terreno, a hora em que se efetuam os estudos, a velocidade do vento e a distância do ponto de estudo à fonte (Turner, 1994).

Nos modelos regulatórios aprovados pela EPA são utilizados procedimentos de cálculo, considerando a hipótese de que a concentração dos poluentes, nas direções perpendiculares ao sentido de deslocamento da pluma ("Y" e "Z"), apresentam uma distribuição Gaussiana resultando, respectivamente, nos coeficientes de dispersão " $\sigma_y$ " e " $\sigma_z$ ".

O cálculo destes coeficientes leva em consideração o tipo de solo, sendo o seu cálculo considerado para zonas rurais e urbanas.

#### A) Coeficientes de Dispersão em Zonas Rurais

Para o cálculo dos coeficientes de dispersão nas zonas rurais, os modelos aprovados pela EPA utilizam o *modelo de Pasquill-Gifford*, apresentados nas Figuras 25 e 26.

Estas Figuras apresentam os coeficientes de dispersão de *Pasquill-Gifford* em escalas logarítmicas (1961), em função da distância da fonte ao receptor e das Classes de Estabilidade Atmosférica de Pasquill. (Turner, 1994).

Em 1970, Turner estabeleceu equações para o cálculo dos coeficientes " $\sigma_Y$ " e " $\sigma_Z$ ", as quais representam, aproximadamente, as curvas de *Pasquill-Gifford* apresentadas nas Figuras 25 e 26.

**a) Coeficiente de Dispersão " $\sigma_Y$ "**

$$\sigma_Y = 465,11628 \cdot x \cdot \tan(\theta) \quad (54)$$

$$\theta = 0,017453293[c - d \cdot \ln(x)] \quad (55)$$

Onde:

$c$  e  $d \Rightarrow$  São coeficientes adimensionais que dependem da classe de estabilidade de Pasquill, fornecidos pela Tabela XXII

Tabela XXII - Parâmetros utilizados para o cálculo de " $\sigma_Y$ " - Zona Rural.

Fonte: (USEPA, ISC3, 1995)

<b>C.E.PASQUILL</b>	<b>c</b>	<b>d</b>
<b>A</b>	24,1670	2,53340
<b>B</b>	18,3330	1,80960
<b>C</b>	12,5000	1,08570
<b>D</b>	8,3330	0,72382
<b>E</b>	6,2500	0,54287
<b>F</b>	4,1667	0,36191



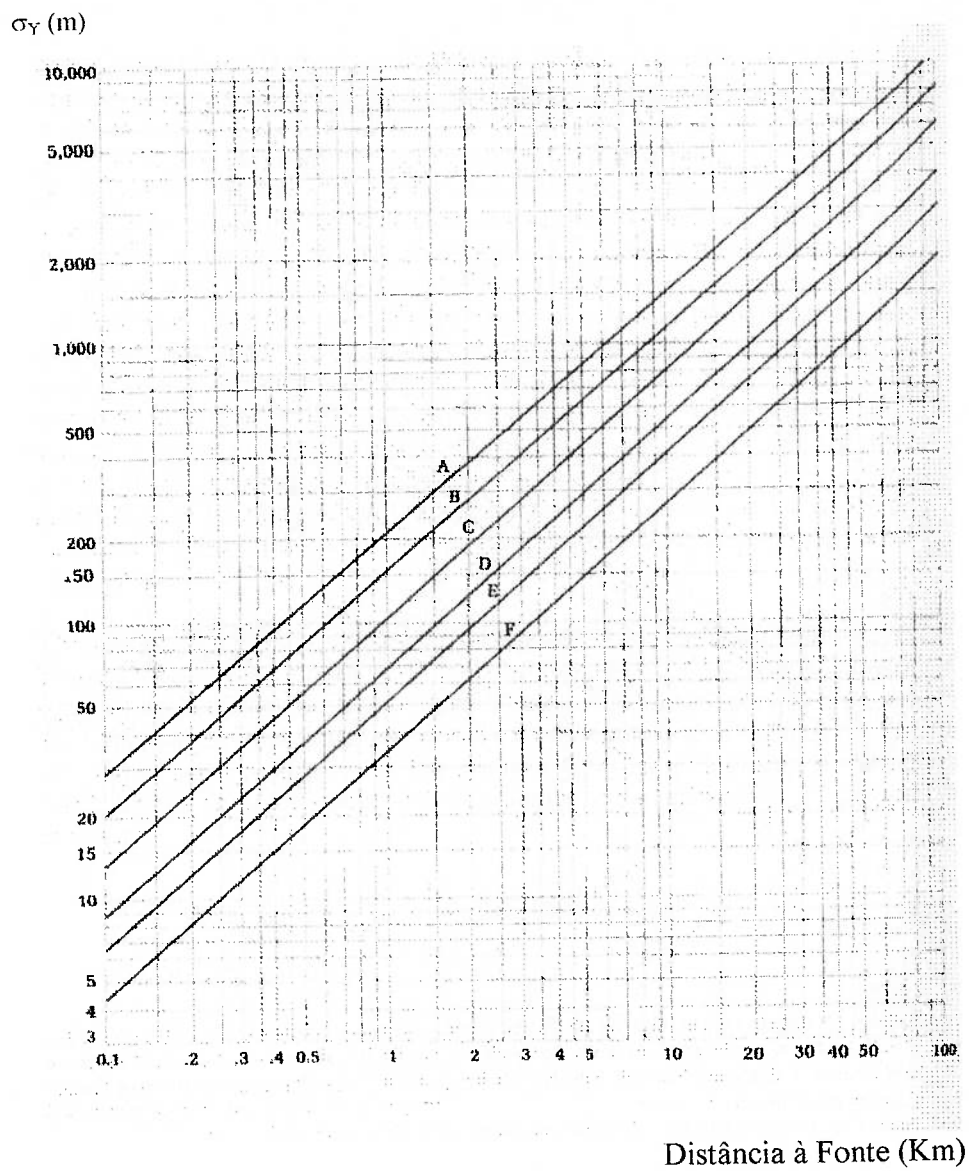


Figura 25 - Coeficiente de Dispersão Horizontal “  $\sigma_Y$ ” em Função da Distância à Fonte. Fonte: (Davis, 1998)

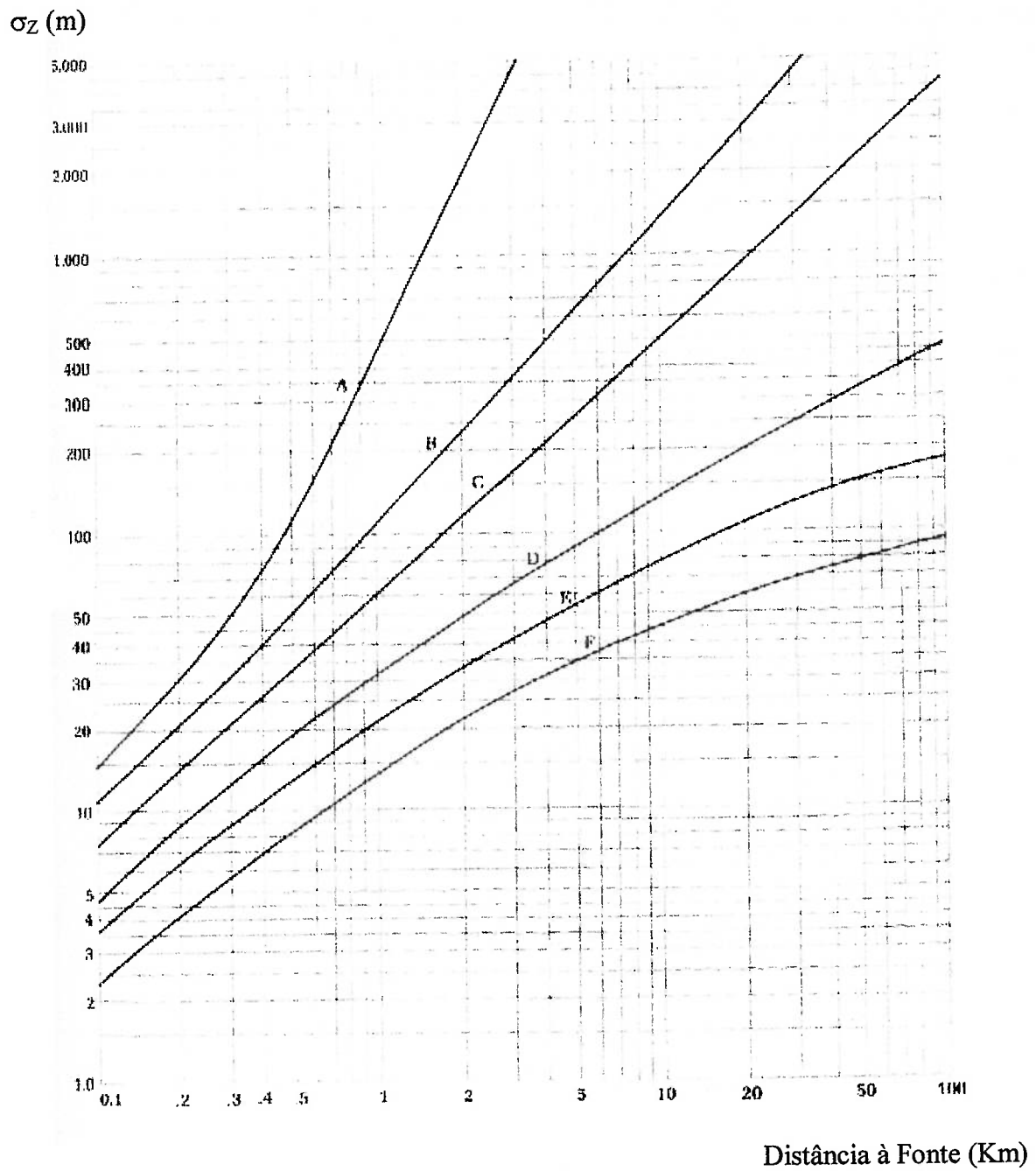


Figura 26 - Coeficiente de Dispersão Vertical " $\sigma_z$ " em Função da Distância à Fonte.

Fonte: (Davis, 1998)

**b) Coeficiente de Dispersão " $\sigma_z$ "**

$$\sigma_z = a \cdot (x)^b \quad (56)$$

Onde:

a e b  $\Rightarrow$  São coeficientes adimensionais que dependem da classe de estabilidade de Pasquill e da distância do ponto considerado até à fonte, fornecidos pela Tabela XXV

### B) Coeficientes de Dispersão em Zonas Urbanas

Para o cálculo dos coeficientes de dispersão nas zonas urbanas, os modelos regulatórios da EPA utilizam as equações de Briggs McElroy-Pooler, as quais são função das classes de estabilidade de Pasquill e da distância do receptor à fonte de emissão. As tabelas XXIII e XXIV apresentam estas equações.

Tabela XXIII - Equações de Briggs McElroy/Pooler, para o cálculo de " $\sigma_Y$ " - Zona Urbana.

Fonte: (USEPA, ISC3, 1995)

C.E.PASQUILL	$\sigma_Y$ (m)
A	$0,32.x.(1,0 + 0,0004.x)^{-1/2}$
B	$0,32.x.(1,0 + 0,0004.x)^{-1/2}$
C	$0,22.x.(1,0 + 0,0004.x)^{-1/2}$
D	$0,16.x.(1,0 + 0,0004.x)^{-1/2}$
E	$0,11.x.(1,0 + 0,0004.x)^{-1/2}$
F	$0,11.x.(1,0 + 0,0004.x)^{-1/2}$

Tabela XXIV - Equações de Briggs - McElroy/Pooler, para o cálculo de " $\sigma_Z$ " - Zona Urbana.

Fonte: (USEPA, ISC3, 1995)

C.E.PASQUILL	$\sigma_Z$ (m)
A	$0,24.x.(1,0 + 0,001.x)^{1/2}$
B	$0,24.x.(1,0 + 0,001.x)^{1/2}$
C	0,20.x
D	$0,14.x.(1,0 + 0,0003.x)^{-1/2}$
E	$0,08.x.(1,0 + 0,0015.x)^{-1/2}$
F	$0,08.x.(1,0 + 0,0015.x)^{-1/2}$

Tabela XXV - Parâmetros utilizados para o cálculo de " $\sigma_z$ " - Zona Rural.

Fonte: Fonte: (USEPA, ISC3, 1995)

C.E.PASQUILL	X (Km)	a	b
A*	< 0,10	122,800	0,94470
	0,10 - 0,15	158,080	1,05420
	0,16 - 0,20	170,220	1,09320
	0,21 - 0,25	179,520	1,12620
	0,26 - 0,30	217,410	1,26440
	0,31 - 0,40	258,890	1,40940
	0,41 - 0,50	346,750	1,72830
	0,51 - 3,11	453,850	2,11660
	> 3,11	**	**
B*	< 0,20	90,673	0,93198
	0,21 - 0,40	98,483	0,98332
	> 0,40	109,300	1,09710
C*	All	61,141	0,91465
D	< 0,30	34,459	0,86974
	0,31 - 1,00	32,093	0,81066
	1,01 - 3,00	32,093	0,64403
	3,01 - 10,00	33,504	0,60486
	10,01 - 30,00	36,650	0,56589
	> 30,00	44,053	0,51179
E	< 0,10	24,260	0,83660
	0,10 - 0,30	23,331	0,81956
	0,31 - 1,00	21,628	0,75660
	1,01 - 2,00	21,628	0,63077
	2,01 - 4,00	22,534	0,57154
	4,01 - 10,00	24,703	0,50527
	10,01 - 20,00	26,970	0,46713
	20,01 - 40,00	35,420	0,37615
	> 40,00	47,618	0,29592
F	< 0,20	15,209	0,81558
	0,21 - 0,70	14,457	0,78407
	0,71 - 1,00	13,953	0,68465
	1,01 - 2,00	13,953	0,63227
	2,01 - 3,00	14,823	0,54503
	3,01 - 7,00	16,187	0,46490
	7,01 - 15,00	17,836	0,41507
	15,01 - 30,00	22,651	0,32681
	30,01 - 60,00	27,074	0,27436
	> 60,00	34,219	0,21716

NOTAS:(\*) -Se o valor de " $\sigma_z$ " calculado for maior que 5.000, adotar  $\sigma_z = 5.000$  m.(\*\*) - Adotar  $\sigma_z = 5.000$  m.

#### 2.7.4.4. Elevação da Pluma

Vários estudos foram desenvolvidos e modelos matemáticos tem sido propostos para determinação do incremento de altura da pluma, tendo a EPA - Agência de Proteção Ambiental Americana, adotado as fórmulas de BRIGGS para a determinação do incremento de altura da pluma ( $\Delta h$ ).

Segundo (Briggs, 1975 apud USEPA, ISC3,1995) o incremento de altura  $\Delta h$  é função de vários fatores:

a) Fluxo de Empuxo:

$$F_b = g \cdot v_s d_s^2 \left( \frac{\Delta T}{4T_s} \right) \quad (57)$$

b) Fluxo de Quantidade de Movimento:

$$F_m = v_s^2 \cdot d_s^2 \cdot \frac{T_a}{4T_s} \quad (58)$$

Onde:

$F_b$  = Fluxo de Empuxo por unidade de massa ( $m^4/s^3$ )

$F_m$  = Fluxo de Quantidade de Movimento ( $m^4/s^3$ )

$g$  = aceleração da gravidade ( $m/s^2$ )

$V_s$  = Velocidade de saída dos gases da chaminé (m/s)

$d_s$  = Diâmetro interno da chaminé, na altura de emissão do poluente (m)

$T_a$  = Temperatura ambiente do ar (K)

$T_s$  = Temperatura de saída dos gases da chaminé (K)

$\Delta T$  =  $T_s - T_a$

#### A) Estabilidade Atmosférica: Instável e Neutra

Para os casos em que a temperatura de saída dos gases da chaminé é maior ou igual à temperatura ambiente, há a necessidade de se determinar se a elevação da pluma é dominada pelo Fluxo de Empuxo ou pelo Fluxo de Quantidade de Movimento; tal

determinação pode ser feita (Briggs, 1969, p.59 e Briggs, 1971, p.1031), da seguinte forma: (USEPA, ISC3, 1995)

- Para  $F_b < 55 \text{ (m}^4/\text{s}^3)$

$$(\Delta T)_c = 0,0297 \cdot T_s \cdot \frac{v_s^{1/3}}{d_s^{2/3}} \quad (59)$$

- Para  $F_b \geq 55 \text{ (m}^4/\text{s}^3)$

$$(\Delta T)_c = 0,00575 \cdot T_s \cdot \frac{v_s^{2/3}}{d_s^{1/3}} \quad (60)$$

Sendo  $\Delta T = T_s - T_a$ , então temos:

**Se:**  $\Delta T \geq (\Delta T)_c \Rightarrow$  A elevação da pluma é dominada pelo Empuxo e então temos: (Briggs,1971, apud USEPA, ISC3, 1995)

- Para  $F_b < 55 \text{ (m}^4/\text{s}^3)$

$$\Delta h = 21,425 \cdot \frac{F_b^{3/4}}{u_s} \quad (61)$$

- Para  $F_b \geq 55 \text{ (m}^4/\text{s}^3)$

$$\Delta h = 38,71 \cdot \frac{F_b^{3/5}}{u_s} \quad (62)$$

**Se:**  $\Delta T < (\Delta T)_c$  (para  $F_b < 55 \text{ m}^4/\text{s}^3$  ou  $F_b \geq 55 \text{ m}^4/\text{s}^3$ )  $\Rightarrow$  A elevação da pluma é dominada pela Quantidade de Movimento e então temos: (Briggs,1969, apud USEPA, ISC3, 1995)

$$\Delta h = 3 \cdot d_s \cdot \frac{v_s}{u_s} \quad (63)$$

### **B) Estabilidade Atmosférica: Estável**

Para a condição de estabilidade atmosférica, é calculado o Parâmetro de Estabilidade (S) pela equação de Briggs: (Briggs 1971, apud USEPA, ISC3, 1995)

$$S = g \cdot \frac{\frac{\partial \theta}{\partial z}}{T_a} \quad (64)$$

São utilizados como valores padrão para o gradiente de temperatura:

- Classe de Estabilidade E:

$$\frac{\partial\theta}{\partial z} = 0,020(\text{K/m})$$

- Classe de Estabilidade F:

$$\frac{\partial\theta}{\partial z} = 0,035(\text{K/m})$$

Da mesma forma que para condições atmosféricas instáveis e neutras, também para a situação de condições atmosféricas estáveis, quando a temperatura de saída dos gases da chaminé é maior ou igual à temperatura ambiente, há a necessidade de se determinar se a elevação da pluma é dominada pelo Fluxo de Empuxo ou pelo Fluxo de Quantidade de Movimento; tal determinação, no caso de estabilidade atmosférica é feita (Briggs, 1975, p.96 e Briggs, 1969, p.59), da seguinte forma: (Briggs apud USEPA, ISC3, 1995)

Sendo  $\Delta T = T_s - T_a$ , então temos:

$$(\Delta T)_c = 0,019582 \cdot T_s \cdot v_s \cdot \sqrt{S} \quad (65)$$

**Se:**  $\Delta T \geq (\Delta T)_c \Rightarrow$  A elevação da pluma é dominada pelo Empuxo e então temos: (Briggs, 1975, apud USEPA, ISC3, 1995)

$$\Delta h = 2,6 \cdot \left( \frac{F_b}{u_s \cdot S} \right)^{1/3} \quad (66)$$

• **Se:**  $\Delta T < (\Delta T)_c$  (para  $F_b < 55 \text{ m}^4/\text{s}^3$  ou  $F_b \geq 55 \text{ m}^4/\text{s}^3$ )  $\Rightarrow$  A elevação da pluma é dominada pela Quantidade de Movimento e então temos: (Briggs, 1969, apud USEPA, ISC3, 1995):

$$\Delta h = 1,5 \cdot \left( \frac{F_m}{u_s \cdot \sqrt{S}} \right)^{1/3} \quad (67)$$

A equação da pluma, para a condição Instável/Neutra, com domínio pela Quantidade de Movimento, também deve ser analisada; o menor resultado entre estas duas

equações deve ser utilizado como altura da pluma, uma vez que na condição atmosférica Estável, a elevação da pluma não deve exceder a altura da pluma da condição Instável/Neutra.

#### **2.7.4.5. Variação da Concentração com o Período de Amostragem**

As concentrações dos poluentes emitidos por uma fonte, decrescem com o período de amostragem, principalmente, com o aumento do  $\sigma_y$ , devido ao aumento dos meandros na direção do vento. (Turner, 1994)

Stewart, Gale e Crooks (1958) verificaram que esta diminuição na concentração segue uma *lei exponencial (expoente 0,2)* com o tempo de amostragem para períodos de amostragem de aproximadamente 3 minutos até aproximadamente uma hora e meia. Este estudo foi baseado em observações feitas próximas à altura de lançamento da pluma. (Turner, 1994)

Segundo (Gifford, 1960 apud Turner, 1994), para alturas diferentes da altura de lançamento, bem como em pontos afastados do eixo da pluma, os valores das concentrações médias eram bem mais altos que os observados pela lei exponencial mencionada acima. Ele também observou que para grandes distâncias da fonte, a lei exponencial para as concentrações próximas ao solo, aproxima-se da unidade.

Singer (1961) e Singer et al. (1963) mostraram que a lei exponencial para as concentrações médias, depende também, da estabilidade atmosférica e da rugosidade do solo sobre o qual a pluma está se deslocando. (Turner, 1994)

Meade (1960) em seu trabalho “Um estudo dos coeficientes de difusão horizontal e vertical para ventos em regime permanente” deduziu uma relação entre as concentrações calculadas ao nível do solo e o tempo de amostragem, apresentada na tabela XXVI.



Tabela XXVI - Variação da concentração do poluente com o tempo de amostragem

Fonte: (Turner, 1994)

<b>TEMPO DE AMOSTRAGEM</b>	<b>Relação da concentração calculada com a concentração de três-minutos</b>
3 minutos	1,00
15 minutos	0,82
1 hora	0,61
3 horas	0,51
24 horas	0,36

Os dados da Tabela XXVI representam uma lei exponencial com o tempo do tipo:

$$C \propto t^{-0,17} \quad (68)$$

Hino (1968) apud Turner (1994), examinou a relação entre as concentrações ao nível do solo e os tempos de amostragem e verificou que para tempos de amostragem entre 10 minutos e cinco a seis horas, as concentrações eram proporcionais exponencialmente ao tempo de amostragem, com o expoente de (-0,5). Ele também verificou que o expoente (-0,20) indicado por Nonhebel (1960) é mais apropriado para períodos de amostragem menores que 10 minutos. A Tabela XXVII apresenta resultados obtidos por Hino, representando a relação entre as máximas concentrações de vários tempos de amostragem com a máxima concentração ocorrida em uma hora:

Tabela XXVII - Relações de Hino entre a máxima concentração em diferentes períodos de amostragem com a máxima concentração ocorrida em uma hora.

Fonte: (Turner, 1994)

<b>PERÍODO</b>	<b>RELAÇÃO</b>
1 hora	1,0
30 minutos	1,3
10 minutos	2,3
3 minutos	4,0
1 minuto	4,0 a 7,0
30 segundos	4,0 a 10,0

Segundo Herman (1980), numerosos esforços tem sido feitos para determinar um método de conversão de máximas concentrações obtidas num determinado período de amostragem para outros períodos de amostragem. Vários pesquisadores tem publicado artigos sobre estes assunto. Normalmente a relação entre estas concentrações segue a seguinte lei matemática:

$$C_1 = C_2 \left( \frac{t_1}{t_2} \right)^\beta \quad (69)$$

Onde:

$C_1$  = estimativa da máxima concentração para o tempo de amostragem  $t_1$

$C_2$  = Concentração calculada para o tempo de amostragem  $t_2$

$\beta$  = expoente

Os dados de Singer (1961) indicam que  $\beta$  varia de 0,30 a 0,57, em função da estabilidade atmosférica, para tempos de amostragem de 100 minutos ou menores. (Herman, 1980)

Wippermann (1961) recomenda que  $\beta = 0,17$  baseado em sua própria teoria e dados de experiências de outros pesquisadores. (Herman, 1980)

Segundo Turner, 1994, o valor de  $\beta$  situa-se entre 0,17 e 0,20

Os trabalhos desenvolvidos por Brassler (1976) e Herman (1980) mostraram que  $\beta \cong 0,25$  para dióxido de enxofre, valor menor que o defendido por Hino, que é  $\beta = 0,50$  para períodos de amostragem de 10 minutos a 1 hora.

Apesar da multiplicidade de valores disponíveis na literatura e da questionável validade estatística, a necessidade de converter concentrações relativas a um período de amostragem, para outro período de amostragem, permanece de suma importância prática.

### 3. ESTUDO DE CASO

O caso selecionado para estudo é o da Usina Termelétrica de Piratininga, em São Paulo, sob a designação de unidades 5 e 6, uma vez que as unidades de 1 a 4, já existentes, operam com óleo combustível..

Cada uma destas novas unidades, com potência nominal de 450 MW, é composta por:

- ◆ Duas turbinas a gás
  - Tipo “Heavy Duty”, único eixo, único corpo,
  - Potência (carga máxima) – 158 MW cada uma,
  - Consumo de combustível de cada turbina: 36.230 Nm<sup>3</sup>/h.
- ◆ Dois geradores de turbinas a gás
- ◆ Duas caldeiras de recuperação
  - Sem reaquecimento de vapor,
  - Sem queima suplementar de combustível.
- ◆ Uma turbina a vapor, operando em sistema de ciclo combinado
- ◆ Um gerador de turbina a vapor
- ◆ Duas chaminés

#### 3.1. Modelagem da Consultora

A Empresa de Consultoria MAIN Engenharia S/A contratada à época pela ELETROPAULO – Eletricidade de São Paulo S/A para o estudo de dispersão dos poluentes, utilizou para a simulação da concentração dos mesmos, o modelo ISC-ST – “Industrial Source Complex”- “Short Term” – versão 3, referendado pela EPA – “Environmental Protection Agency” dos Estados Unidos.

### 3.1.1. Inputs Usados na Simulação

#### 3.1.1.1. Dados da Fonte

As Tabelas XXVIII e XXIX apresentam as dimensões físicas das quatro chaminés, idênticas, das unidades 5 e 6 projetadas para a Usina; os parâmetros físicos de escoamento dos gases nas mesmas; bem como as estimativas de emissões por chaminé, sem sistema de controle.

A Consultora em seu EIA/RIMA, faz a seguinte consideração: "Salienta-se que o gás natural como combustível principal representa uma vantagem ambiental imediata, constatada pelos baixos níveis de material particulado e dióxido de enxofre, cujas concentrações estimadas no projeto variam de traços a 25 ppm, como produtos da queima. Assim considerou-se que não é necessária a utilização do modelo de dispersão para avaliar estes impactos". (Main Engenharia, 1997)

Em função disto, a Consultora efetuou a modelagem para os poluentes: Óxidos de Nitrogênio (NO<sub>x</sub>), Monóxido de Carbono (CO) e Hidrocarbonetos (Compostos Orgânicos Totais – TOC).

Tabela XXVIII – Parâmetros de escoamento dos gases e dimensões físicas das chaminés.

Fonte: (Main Engenharia, 1997)

Parâmetros	Unidades	Dimensão
Temperatura dos gases na saída da chaminé	° C	99,80
Velocidade dos gases na saída da chaminé	m/s	18,60
Vazão em volume real dos gases na saída da chaminé	Am <sup>3</sup> /h	1.593.864,00
	Am <sup>3</sup> /s	442,74
Diâmetro interno da chaminé na saída para a atmosfera	m	5,50
Altura física das 4 chaminés (idênticas), a partir do solo	m	80,00

Tabela XXIX – Taxas de emissão dos poluentes, sem sistema de controle.

Fonte: (Main Engenharia, 1997)

Parâmetros	Unidades	Poluente	Valor
Taxas de Emissões	g/s	NO <sub>x</sub>	25,33
		CO	4,41
		SO <sub>2</sub>	----
		HC	1,26
	Kg/d	NO <sub>x</sub>	2.188,51
		CO	381,02
		SO <sub>2</sub>	----
		HC	108,86

### 3.1.1.2. Receptores

Para a caracterização dos receptores, a Consultora após uma simulação preliminar considerou a distância de 10 Km no eixo Sul-Norte e 5 Km no eixo Leste-Oeste, como provável área de influência das emissões para a atmosfera. Para a determinação das concentrações dos poluentes emitidos pela fonte, ao nível do solo, tem-se uma rede de 961 receptores estabelecida para a simulação.

#### Receptores discretos

Como receptores discretos, foram considerados:

Estação de amostragem da CETESB no Aeroporto de Congonhas (aprox. 1400E, 10000N), Estação de amostragem da CETESB em Santo Amaro (aprox. -4600E, 5800N), Shopping Center Jardim Sul (aprox. -7600E, 8300N), Centro Campestre SESC INTERLAGOS (aprox. -500E, -3000N),

A Consultora considerou o sistema de coordenadas tendo sua origem ( $x = 0$  e  $y = 0$ ) coincidente com a posição da chaminé, representando o plano do solo da região. O eixo “y” representando a direção e sentido de SUL para NORTE. O eixo “x” representando a direção e sentido de OESTE para LESTE.

### 3.1.1.3. Dados Meteorológicos

Para a modelagem, a Consultora, baseada em estudos dos dados climáticos e meteorológicos analisados, definiu o “Dia Crítico” de dispersão atmosférica na região de São Paulo, apresentado na Tabela XXX

Tabela XXX - Dados Meteorológicos utilizados pela Consultora para compor o “dia mais crítico” para a dispersão atmosférica em sua modelagem.

Fonte: (Main Engenharia, 1997)

Hora	Vento		Altura Camada Mist.(m)	Temp. K	Categ. de Estabil. Pasquill	Pressão Atmosf (mb)	Umid. do ar (%)	Precip. (mm)
	Direção	Velocid. (m/s)						
1	SSE	0,5	200	290	F	696,0	Média meses mais frios	16,0
2	C	0	200	290	F			
3	C	0	200	290	F			
4	C	0	200	290	F			
5	C	0	200	290	F			
6	N	0,6	200	290	F			
7	C	0,5	200	290	F			
8	C	0	200	292	F			
9	C	0	200	292	F			
10	N	0,9	600	292	D			
11	N	2,6	600	292	D			
12	N	3,3	600	292	D			
13	N	2,8	600	292	D			
14	N	2,2	800	292	B			
15	N	2,3	800	292	B			
16	AUS	AUS	800	292	B			
17	AUS	AUS	800	292	B			
18	C	0	800	292	B			
19	C	0	800	292	B			
20	C	0	400	290	E			
21	C	0	400	290	E			
22	C	0	400	290	E			
23	C	0	400	290	E			
24	C	0	400	290	E			

Na Tabela XXX, coluna direção do vento, a notação “C” refere-se a calmaria e “AUS” refere-se a ausência de vento.

### 3.1.1.4. Relevô

Segundo a Consultora, tendo em vista as características de relevô da área de intervenção serem representadas por planícies aluviais e barreiras representadas pelas edificações da UTE, cujas alturas são inferiores a 50m, a mesma assumiu o relevô como sendo plano e sem rugosidades que pudessem interferir de forma significativa no transporte de poluentes, desprezando possíveis interferências com a trajetória da pluma.

### 3.1.2. Resultados da Consultora

Os resultados das modelagens para os poluentes considerados pela Consultora, para a usina operando com 2 ou 4 chaminés, estão apresentados nas Tabelas XXXI a XXXVI.

Tabela XXXI - Resultados das concentrações de NOx, para receptores genéricos.

Período de Tempo para Cálculo das Concentrações	Concentração de NOx ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )		Coordenadas (E,N) em metros
	2 Chaminés	4 Chaminés	
1º Maior Valor – 1 hora	85,01	170,02	(-6000,0)
2º Maior Valor – 1 hora	80,25	160,50	(-6000,0)
Média de 24 horas	12,25	24,50	(-6000,0)

Tabela XXXII - Resultados das concentrações de NOx nos receptores discretos.

Receptor	Máximas Médias Horárias ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
• Est. Amost. CETESB no Aerop. de Congonhas	< 10
• Est. Amostragem da CETESB em Santo Amaro	< 10
• Shopping Center Jardim Sul	< 10
• Centro Campestre SESC INTERLAGOS	< 70

Tabela XXXIII - Resultados das concentrações de CO nos receptores genéricos.

Período de Tempo para Cálculo das Concentrações	Concentração de CO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )		Coordenadas (E,N) em metros
	2 Chaminés	4 Chaminés	
1º Maior Valor – 1 hora	14,80	29,60	(-6000,0)
2º Maior Valor – 1 hora	13,97	27,94	(-6000,0)
1ª Maior Média - 8 horas	4,80	9,60	(-6000,0)
2ª Maior Média - 8 horas	2,07	4,14	(-4000,0)

Tabela XXXIV - Resultados das concentrações de CO nos receptores discretos.

Receptor	Máximas Médias Horárias ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
• Est. Amost. CETESB no Aerop. de Congonhas	< 2
• Est. Amostragem da CETESB em Santo Amaro	< 2
• Shopping Center Jardim Sul	< 2
• Centro Campestre SESC INTERLAGOS	≈ 14

Tabela XXXV - Resultados das concentrações dos Hidrocarbonetos (TOC) nos receptores genéricos.

Período de Tempo para Cálculo das Concentrações	Concentração de TOC ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )		Coordenadas (E,N) em metros
	2 Chaminés	4 Chaminés	
1ª Maior Média – 3 horas	1,41	2,82	(-6000,0)
2ª Maior Média - 3 horas	1,33	2,66	(-6000,0)

Tabela XXXVI - Resultados das concentrações de Hidrocarbonetos (TOC) nos receptores discretos.

Receptor	Máximas Médias Horárias ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
• Est. Amost. CETESB no Aerop. de Congonhas	< 0,2
• Est. Amostragem da CETESB em Santo Amaro	< 0,2
• Shopping Center Jardim Sul	< 0,2
• Centro Campestre SESC INTERLAGOS	≈ 1,5



### **3.2. Modelagem do Estudo de Caso**

Neste trabalho foi utilizado o mesmo tipo de modelo que a Consultora, ou seja, o ISC-ST – “Industrial Source Complex” - “Short Term” – versão 3, com o objetivo de comparação dos resultados.

#### **3.2.1. Inputs Usados na Simulação**

##### **3.2.1.1. Dados da Fonte**

Nesta modelagem foram utilizados os mesmos dados da fonte para a temperatura dos gases na saída da chaminé, velocidade dos gases na saída da chaminé, vazão em volume real dos gases na saída da chaminé, diâmetro interno da chaminé na saída para a atmosfera, altura física das chaminés a partir do solo.

Com relação às taxas de emissões dos diversos poluentes, considerando que a CETESB solicita que a modelagem seja feita para os poluentes: Óxidos de Nitrogênio, Monóxido de Carbono, Dióxido de Enxofre, Partículas Totais em Suspensão, Compostos Orgânicos Totais (TOC)/Hidrocarbonetos e Compostos Orgânicos Voláteis; este estudo de caso foi feito com a modelagem destes 6 poluentes.

Para o caso dos Óxidos de Nitrogênio, Monóxido de Carbono, e Compostos Orgânicos Totais (TOC)/ Hidrocarbonetos foram utilizadas as taxas de emissão consideradas pela Consultora; enquanto que para os demais poluentes, ou seja, o Dióxido de Enxofre, Partículas Totais em Suspensão e os Compostos Orgânicos Voláteis, foram feitas estimativas das taxas de emissão para a situação sem controle de emissão, como mencionado pela Consultora, a partir dos fatores de emissão constantes no “Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume 1-Stationary Point and Areas Sources. Publication No. AP-42 da USEPA”; conforme apresentado no ANEXO II.

A Tabela XXXVII apresenta os fatores de emissão calculados a partir do Compilation AP-42. O ANEXO II apresenta o cálculo das estimativas de emissão decorrentes destes fatores de emissão, o qual foi efetuado tomando como base a vazão de gases

efluentes da chaminé. Na modelagem do Estudo de Caso, para os poluentes considerados pela Consultora, utilizaram-se as mesmas taxas de emissão, constantes na Tabela XXXVII. Para os demais poluentes, cujas taxas de emissão não estavam disponíveis, foram utilizados na modelagem, os valores calculados com base no Compilation AP-42, apresentados na mesma Tabela. Estes cálculos foram efetuados considerando a ausência de sistema de controle, com exceção das Partículas Totais em Suspensão, para o qual o Compilation AP-42 só apresenta fatores de emissão com sistemas de controle, sendo então utilizado o de injeção de água.

Tabela.XXXVII - Taxas de emissão utilizadas na modelagem do Estudo de Caso.

POLUENTE	METODO DE CONTROLE	FAT. EMISSÃO Kg/10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	ESTIMATIVA - EMISSÕES (g/s)	
			Consultora	AP-42
				Sem Controle
NO <sub>x</sub>	S/Controle	5826,2	25,33	-----
CO	S/Controle	1493,0	4,41	-----
SO <sub>2</sub>	S/Controle	166,0	(c)	1,67
VOC <sup>(a)</sup>	S/Controle	37,5	(c)	0,38
TOC	S/Controle	200,0	1,26	-----
PTS <sup>(b)</sup>	Injeção de vapor d'água (d)	119,6	(c)	1,2

NOTAS:

- (a) ⇒ Valor calculado: VOC = THC – Metano
- (b) ⇒ Valor calculado: PTS = MP(condensável) + MP(filtrável)
- (c) ⇒ A Consultora não considerou esta emissão em sua modelagem
- (d) ⇒ O AP-42 não apresenta Fatores de Emissão para a situação sem controle.

### 3.2.1.2. Receptores

Considerando os resultados obtidos pela Consultora, para a caracterização dos receptores, na modelagem do Estudo de Caso foi tomado um plano horizontal de 20.000m por 20.000m, dividido em quadrículas de 500m por 500m, tendo como ponto central as torres da Usina Termelétrica. Este plano horizontal está melhor detalhado no item referente ao Relevo.

### Receptores discretos

Como receptores discretos, foram considerados os mesmos que a Consultora, considerando-se as seguintes coordenadas, obtidas através das plantas da EMPLASA, apresentadas na Tabela XXXVIII.

Tabela XXXVIII - Coordenadas dos receptores discretos.

RECEPTORES DISCRETOS	COORDENADAS	
	X	Y
Estação Amostragem da CETESB no Aeroporto de Congonhas	331.000	7.386.000
Estação amostragem da CETESB em Santo Amaro	325.300	7.373.000
Shopping Center Jardim Sul	322.800	7.385.500
Centro Campestre SESC INTERLAGOS	329.000	7.375.000

### 3.2.1.3 – Dados Meteorológicos

Como dados meteorológicos foram utilizados os do Aeroporto de Congonhas, relativos aos anos de 1997 e 1998, compatíveis com os utilizados pela Consultora.

A empresa de consultoria americana Trinity Consultants, acessa estes dados meteorológicos na rede mundial de meteorologia, processa-os gerando um arquivo meteorológico no formato ASC II para entrada no modelo ISCST – Versão 3. No caso de Congonhas, a Estação é a de número 83780.

Como exemplo, apresenta-se na Tabela XXXIX, as primeiras 24 horas do arquivo meteorológico do ano de 1997, num formato semelhante ao apresentado no resultado da simulação.

Tabela XXXIX - Primeiras 24 horas do arquivo meteorológico do ano de 1997 - Aeroporto de Congonhas – Estação N° 83780

ANO	MÊS	DIA	HORA	DIREÇÃO VENTO (°)	VELOC. VENTO (m/s)	TEMP (K)	CLAS ESTAB	ALT. MIST. RURAL	ALT. MIST. URBAN
97	01	01	01	341,000	4,120	293,1	5	485,5	733,8
97	01	01	02	338,000	3,605	293,1	5	381,7	587,6
97	01	01	03	324,000	3,090	293,1	6	269,0	547,7

## Continuação

ANO	MÊS	DIA	HORA	DIREÇÃO VENTO (°)	VELOC. VENTO (m/s)	TEMP (K)	CLAS ESTAB	ALT. MIST. RURAL	ALT. MIST. URBAN
97	01	01	04	323,000	2,575	293,1	6	162,8	547,7
97	01	01	05	343,000	2,575	292,0	6	161,8	548,2
97	01	01	06	342,000	2,575	292,0	5	161,8	548,2
97	01	01	07	345,000	3,090	292,6	4	814,6	1050,7
97	01	01	08	323,000	2,575	294,3	3	838,4	993,7
97	01	01	09	317,000	2,575	295,9	2	960,2	1087,1
97	01	01	10	311,000	2,575	297,0	2	1087,3	1182,9
97	01	01	11	324,000	3,605	298,1	2	1389,9	1535,2
97	01	01	12	316,000	5,150	299,3	3	1770,9	1794,1
97	01	01	13	343,000	6,180	298,7	3	1664,6	2117,9
97	01	01	14	349,000	5,665	299,3	3	2029,9	1955,3
97	01	01	15	342,000	6,180	299,3	4	1657,7	2112,4
97	01	01	16	334,000	7,725	298,1	4	2018,6	2600,4
97	01	01	17	1,000	8,240	297,0	4	2134,1	2760,5
97	01	01	18	357,000	7,725	295,9	4	1993,9	2583,2
97	01	01	19	354,000	6,180	295,4	4	1591,4	2065,9
97	01	01	20	327,000	5,665	294,3	4	2142,4	2323,1
97	01	01	21	320,000	5,665	293,1	4	1391,3	1832,2
97	01	01	22	342,000	5,665	293,7	4	1391,4	1832,2
97	01	01	23	320,000	5,665	293,1	4	1391,3	1832,2
97	01	01	24	340,000	5,150	292,0	4	1254,9	1655,8

**3.2.1.4. Relevo**

Segundo a (USEPA, 40 CFR, 1999), o terreno é considerado plano, quando as elevações do mesmo são todas menores que o topo da chaminé da fonte em questão. Da mesma forma, considera-se terreno complexo/relevo, quando estas elevações excedem a altura do topo da chaminé.

Desta forma considerando que a chaminé está localizada numa cota de 724m, a sua altura é de 80m; e que na área de influência encontram-se pontos com cotas superiores a 850m, a modelagem do Estudo de Caso foi efetuada considerando-se terreno complexo/relevo.

Para a caracterização do relevo da região de influência da Termelétrica, foram utilizadas 20 plantas da EMPLASA – Empresa Metropolitana de Planejamento da Grande São Paulo S/A, contendo levantamento aerofotogramétrico da região; objetivando o dimensionamento de uma grade que incorporasse os receptores discretos em relação à fonte de emissão e que permitisse o traçado das linhas de concentrações de poluentes para identificação dos pontos de concentração máxima.

Foram utilizadas as seguintes plantas, em função do posicionamento de “articulação” das mesmas: 2326, 3315, 3316, 3325, 2342, 3331, 3332, 3341, 2344, 3333, 3334, 3343, 2346, 3335, 3336, 3345, 2222, 3211, 3212 e 3221. A Usina Termelétrica encontra-se na planta 3334. A partir destas plantas, foi gerado um arquivo topográfico, em sistema cartesiano, contendo as coordenadas (X e Y) do centro de cada quadrícula, bem como a máxima altitude na quadrícula (Z). As direções X e Y foram consideradas as das coordenadas constantes nas plantas da EMPLASA, ortogonais entre si; as quais tem como origem da quilometragem UTM, o Meridiano Central e o Equador, acrescidas as constantes de 500 Km e 10.000 Km, respectivamente, conforme mencionado nas próprias plantas.

Para processamento no modelo ISC, este arquivo topográfico foi transformado para o formato ASC II.

#### 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A partir dos dados da fonte, dos receptores, do arquivo meteorológico e do arquivo topográfico; foram feitas simulações para os seis poluentes emitidos pela termelétrica e solicitados pela CETESB.

A Tabela XL apresenta os resultados do NO<sub>x</sub>, para as modelagens da Consultora e Estudo de Caso, sendo que para aos demais poluentes, os resultados encontram-se no ANEXO III. São apresentados (em vermelho) os valores das concentrações máximas para os diversos períodos de amostragem, considerando-se: operação de uma única unidade (2 chaminés), operação de duas unidades (4 chaminés), terreno plano, topografia real, arquivo meteorológico de 1997 e arquivo meteorológico de 1998. É apresentado, também neste ANEXO, um resumo da saída do modelo ISC3, em forma de listagem, contendo os resultados da modelagem do NO<sub>x</sub>.

Nas Figuras 27 a 41 são apresentados, por poluente, os resultados das modelagens, para os receptores genéricos e discretos, considerando a termelétrica operando a plena carga; comparativamente aos limites estabelecidos pelo PNQA. As anotações 97 e 98 nas abcissas indicam arquivos meteorológicos de 1997 e 1998; R indica relevo natural e P indica relevo plano.

Tabela XL – Resultados das modelagens do Estudo de Caso.

PERÍODO DE AMOST.	NO <sub>x</sub> - MAIORES CONCENTRAÇÕES (µg/m <sup>3</sup> )										PNQA µg/m <sup>3</sup>
	CONSULTORA		ESTUDO DE CASO								
			ARQ. METEOROL. 97				ARQ. METEOROL. 98				
			PLANO		RELEVO		PLANO		RELEVO		
2 CH	4 CH	2 CH	4 CH	2 CH	4 CH	2 CH	4 CH	2 CH	4 CH	2 CH	4 CH
<b>CONCENTRAÇÕES NOS RECEPTORES GENÉRICOS</b>											
<b>1º Maior valor 1 hora</b>	85,01	170,02	62,08	122,94	157,70	319,80	61,73	122,79	147,87	288,14	320,00
<b>Média 24 horas</b>	12,25	24,50	13,27	25,44	28,76	57,20	18,22	36,42	34,98	70,02	-----
<b>Média Anual</b>	N/D	N/D	2,43	4,81	3,22	6,34	2,34	4,71	2,90	5,83	100,00
<b>CONCENTRAÇÕES NOS RECEPTORES DISCRETOS</b>											
<b>CONGONHAS</b>											
<b>1º Maior valor 1 hora</b>	N/D	< 10,0	37,80	76,32	53,10	106,91	22,69	45,81	31,87	64,16	320,00
<b>Média 24 horas</b>	N/D	N/D	2,55	4,93	3,32	6,62	2,22	4,51	3,07	6,23	-----
<b>Média Anual</b>	N/D	N/D	0,26	0,53	0,31	0,62	0,086	0,17	0,10	0,20	100,00
<b>SANTO AMARO</b>											
<b>1º Maior valor 1 hora</b>	N/D	< 10,0	45,73	91,43	58,07	115,84	46,26	92,49	58,66	117,00	320,00
<b>Média 24 horas</b>	N/D	N/D	7,02	14,00	8,74	17,38	9,25	18,18	11,65	22,85	-----
<b>Média Anual</b>	N/D	N/D	1,17	2,35	1,38	2,76	0,91	1,82	1,04	2,06	100,00
<b>SHOPPING CENTER JARDIM SUL</b>											
<b>1º Maior valor 1 hora</b>	N/D	< 10,0	36,60	73,46	50,98	102,14	36,91	71,99	51,25	99,78	320,00
<b>Média 24 horas</b>	N/D	N/D	4,57	9,04	7,05	13,92	4,15	8,74	6,62	13,67	-----
<b>Média Anual</b>	N/D	N/D	0,64	1,27	1,16	2,33	0,51	1,01	0,85	1,71	100,00
<b>SESC INTERLAGOS</b>											
<b>1º Maior valor 1 hora</b>	N/D	< 70,0	57,32	113,82	157,70	319,80	47,83	94,44	126,32	261,50	320,00
<b>Média 24 horas</b>	N/D	N/D	6,38	12,82	14,85	30,32	7,96	16,09	16,81	34,49	-----
<b>Média Anual</b>	N/D	N/D	0,88	1,80	1,39	2,85	0,67	1,36	1,09	2,23	100,00



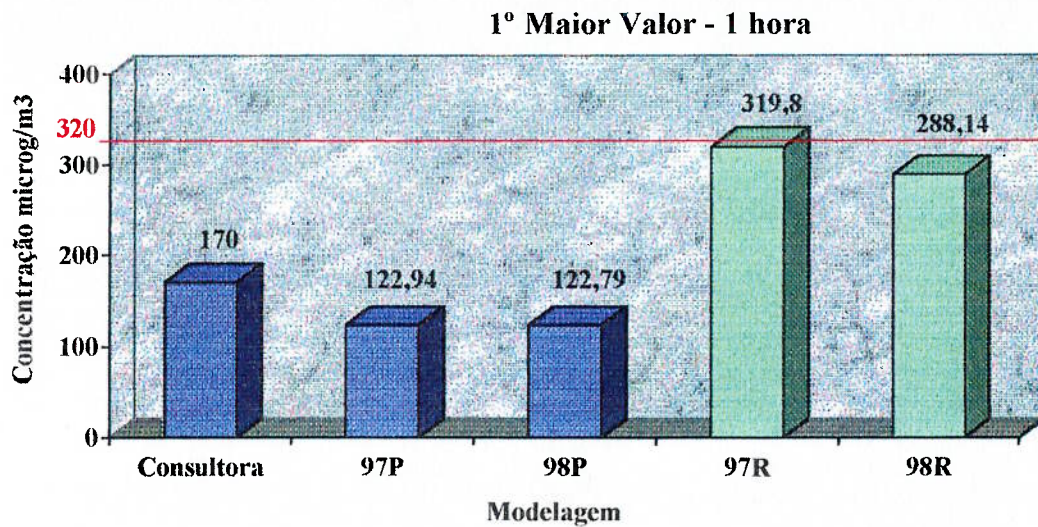


Figura 27 – Resultados da Modelagem do NO<sub>x</sub> nos Receptores Genéricos, comparativamente ao PNQA – “1º Maior Valor – 1 hora”

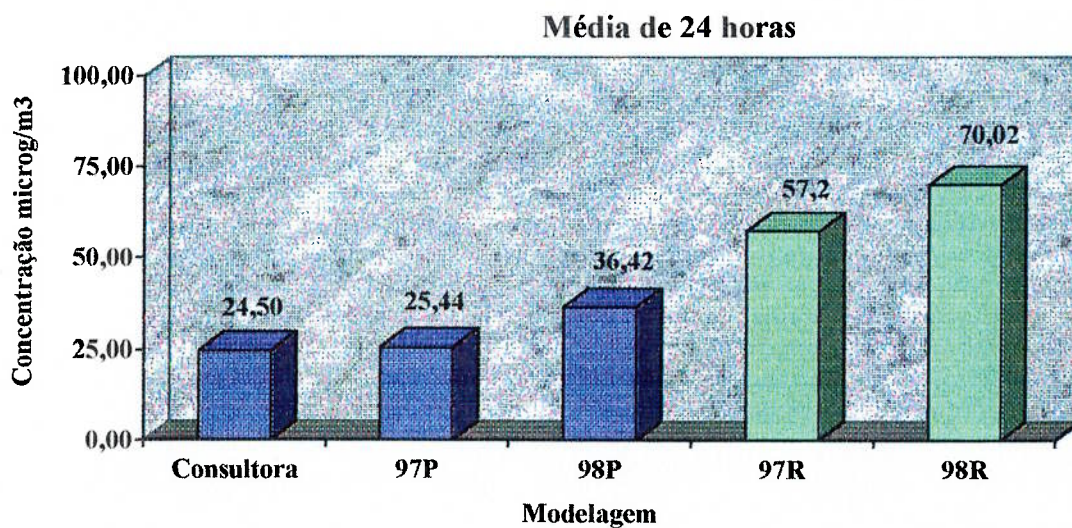


Figura 28 – Resultados da Modelagem do NO<sub>x</sub> nos Receptores Genéricos, comparativamente ao PNQA – “Média de 24 horas”



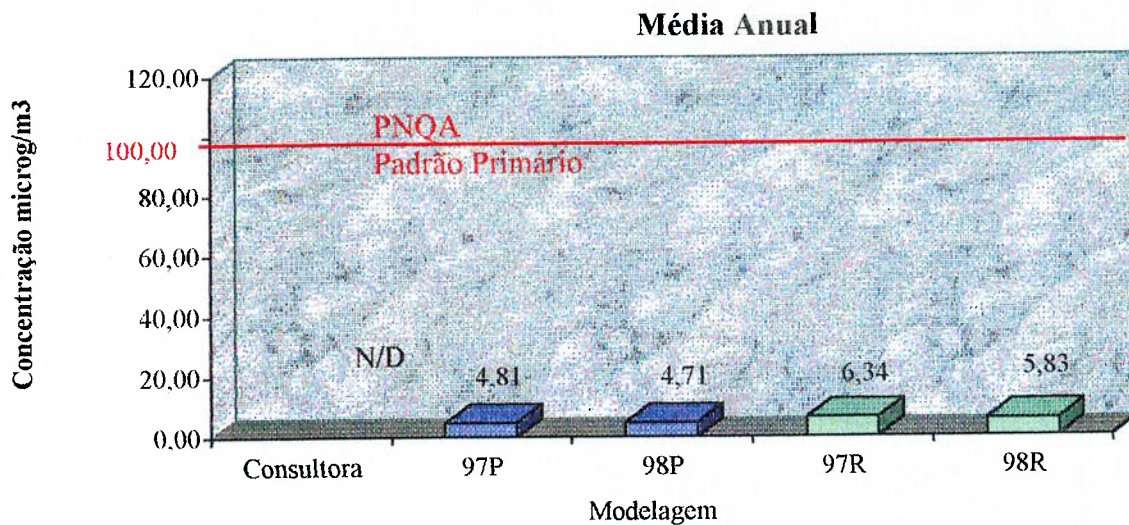


Figura 29 – Resultados da Modelagem do NOx nos Receptores Genéricos, comparativamente ao PNQA – “Média Anual”

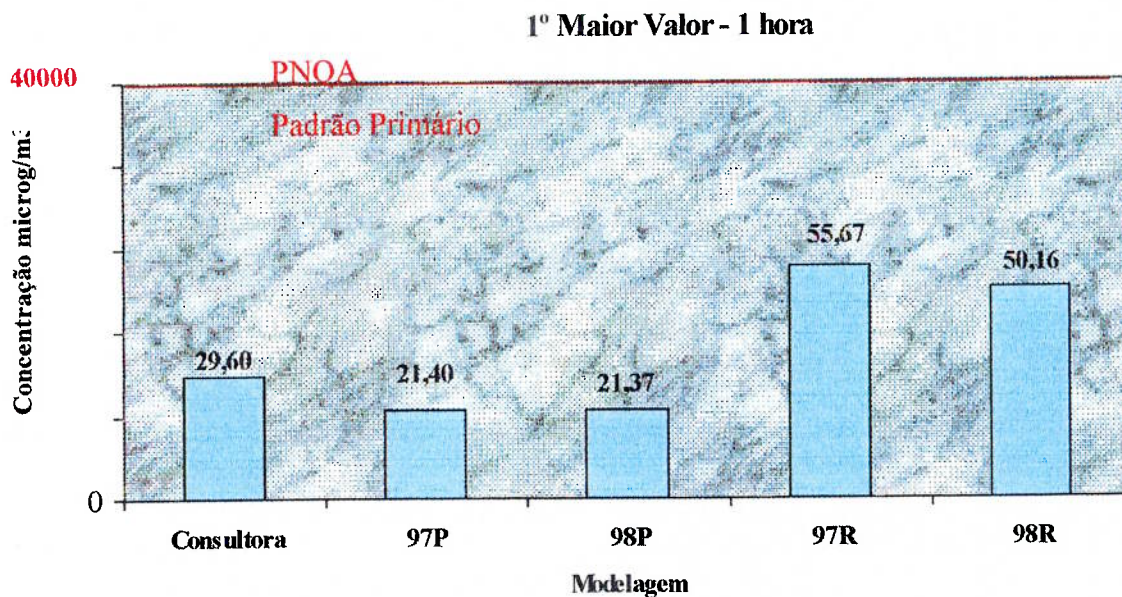


Figura 30 – Resultados da Modelagem do CO nos Receptores Genéricos, comparativamente ao PNQA – “1º Maior Valor – 1 hora”

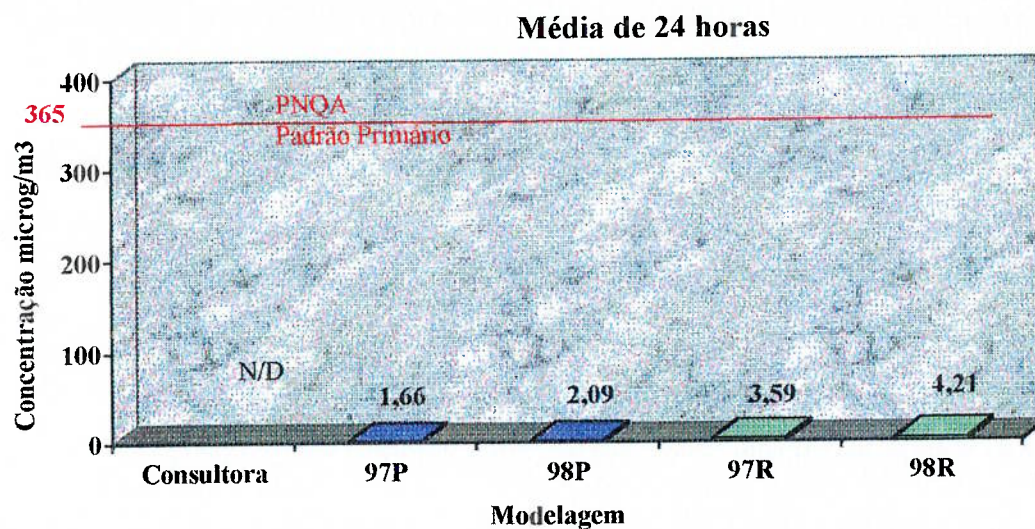


Figura 31 – Resultados da Modelagem do SO<sub>2</sub> nos Receptores Genéricos, comparativamente ao PNQA – “Média de 24 horas”

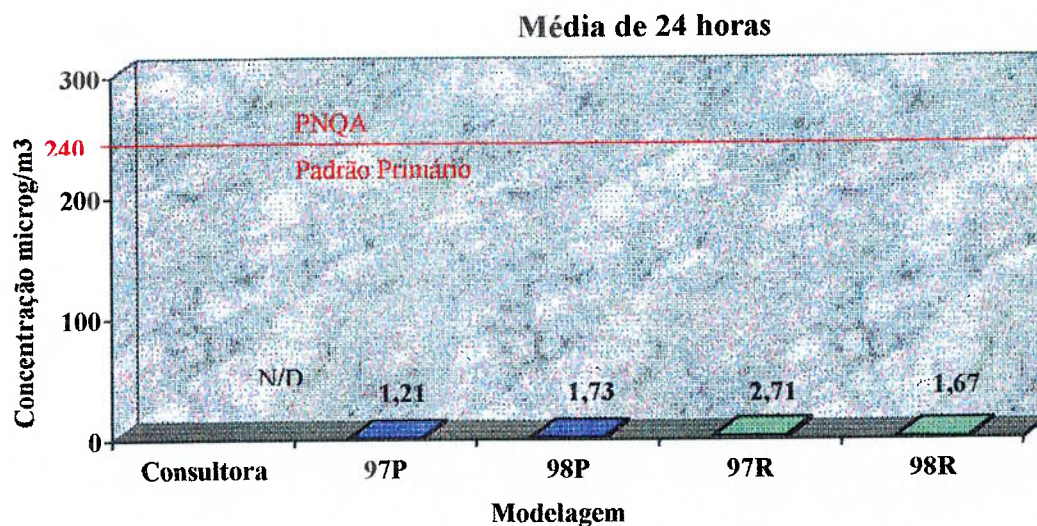


Figura 32 – Resultados da Modelagem do PTS nos Receptores Genéricos, comparativamente ao PNQA – “Média de 24 horas”



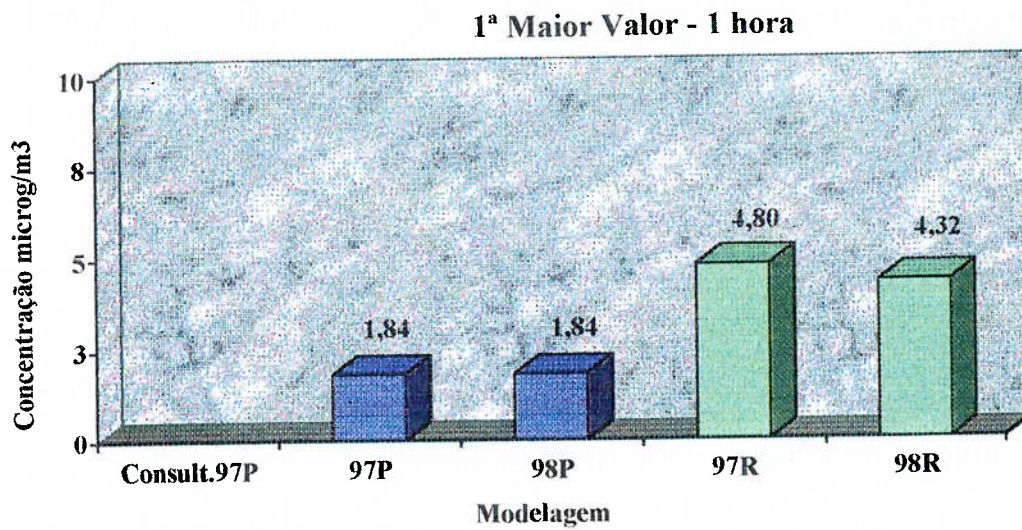


Figura 33 – Resultados da Modelagem do VOC nos Receptores Genéricos, comparativamente ao PNQA – “1º Maior Valor – 1 hora”

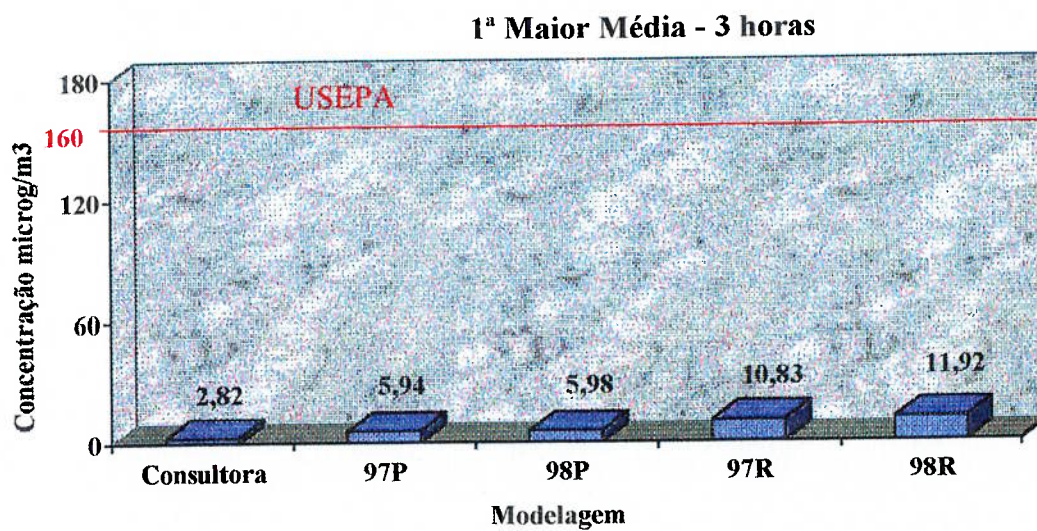


Figura 34 – Resultados da Modelagem do TOC nos Receptores Genéricos, comparativamente ao PNQA – “1ª Maior Média 3 horas”

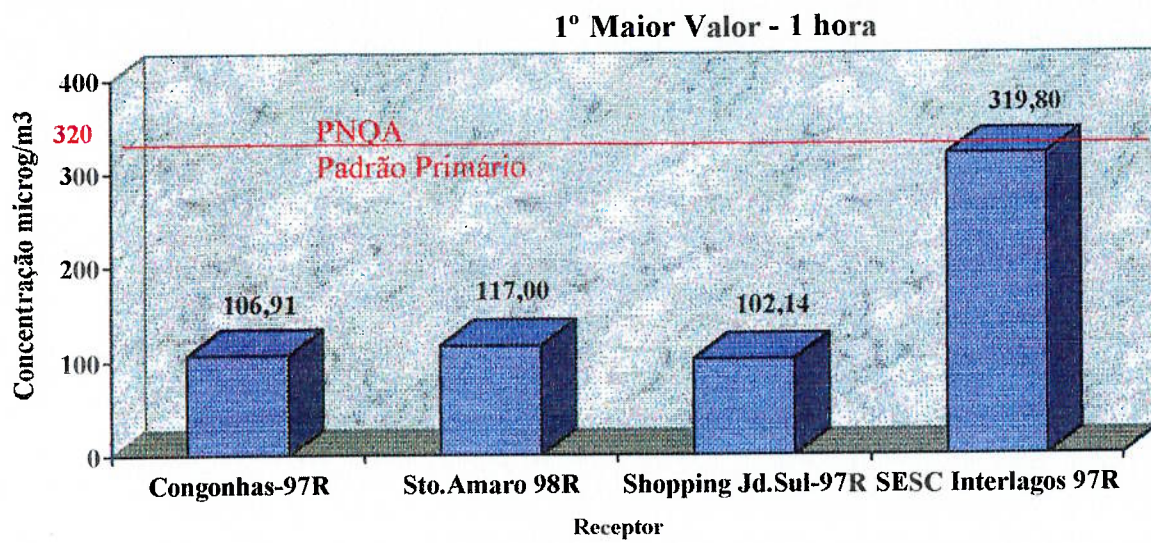


Figura 35 – Resultados da Modelagem do NO<sub>x</sub> nos Receptores Discretos, comparativamente ao PNQA – “1º Maior Valor – 1 hora”

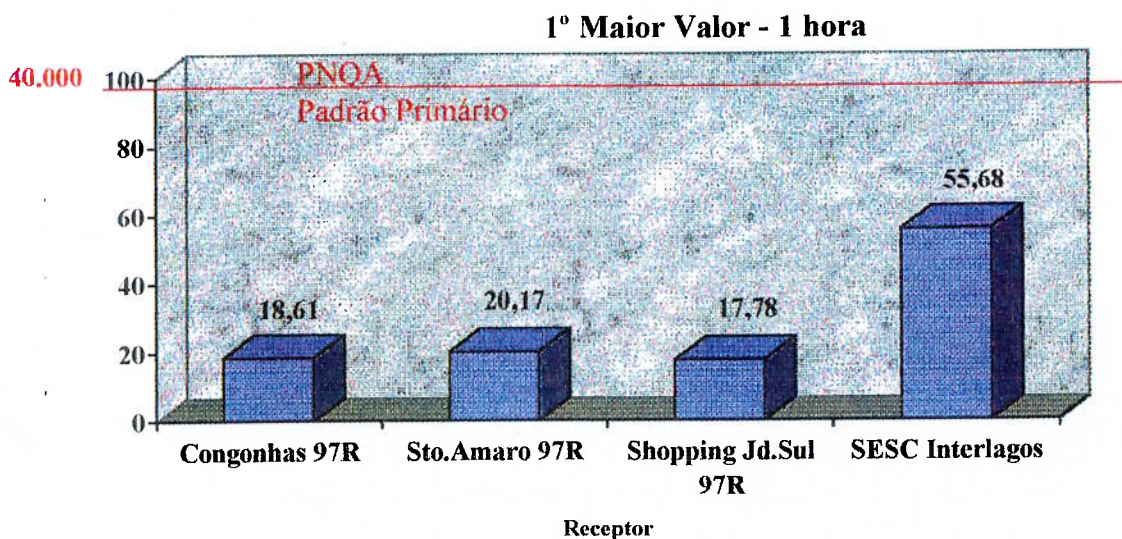


Figura 36 – Resultados da Modelagem do CO nos Receptores Discretos, comparativamente ao PNQA – “1º Maior Valor – 1 hora”



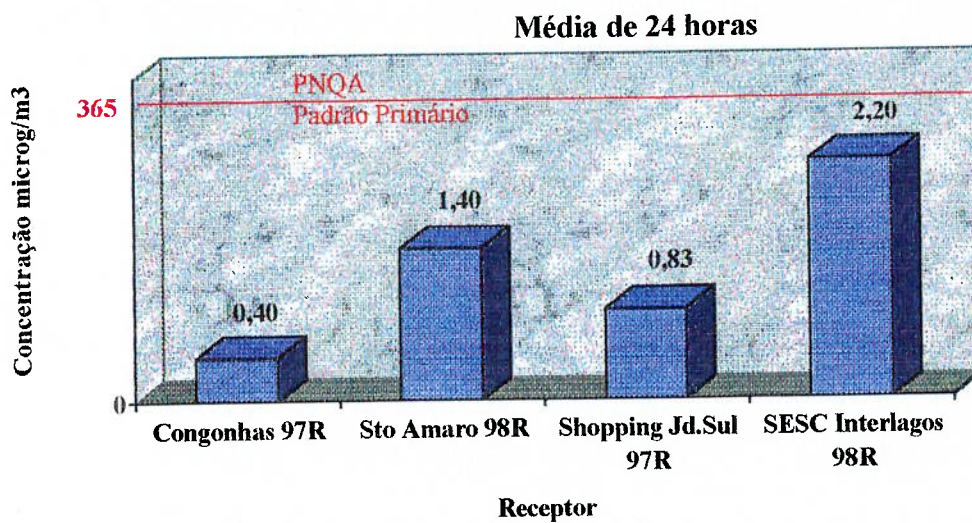


Figura 37 – Resultados da Modelagem do SO<sub>2</sub> nos Receptores Discretos, comparativamente ao PNQA – “Média de 24 horas”

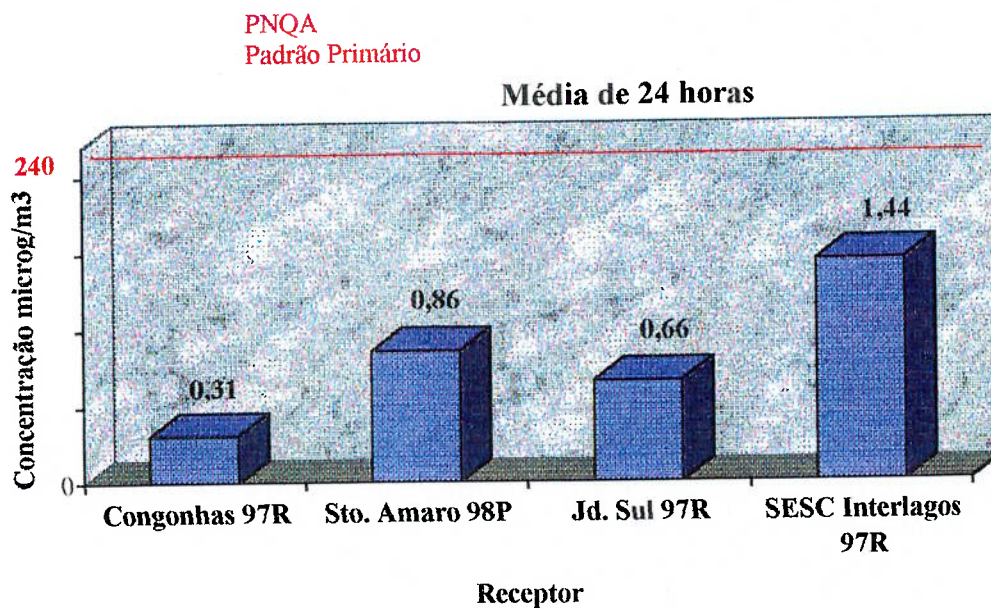


Figura 38 – Resultados da Modelagem do PTS nos Receptores Discretos, comparativamente ao PNQA – “Média de 24 horas”

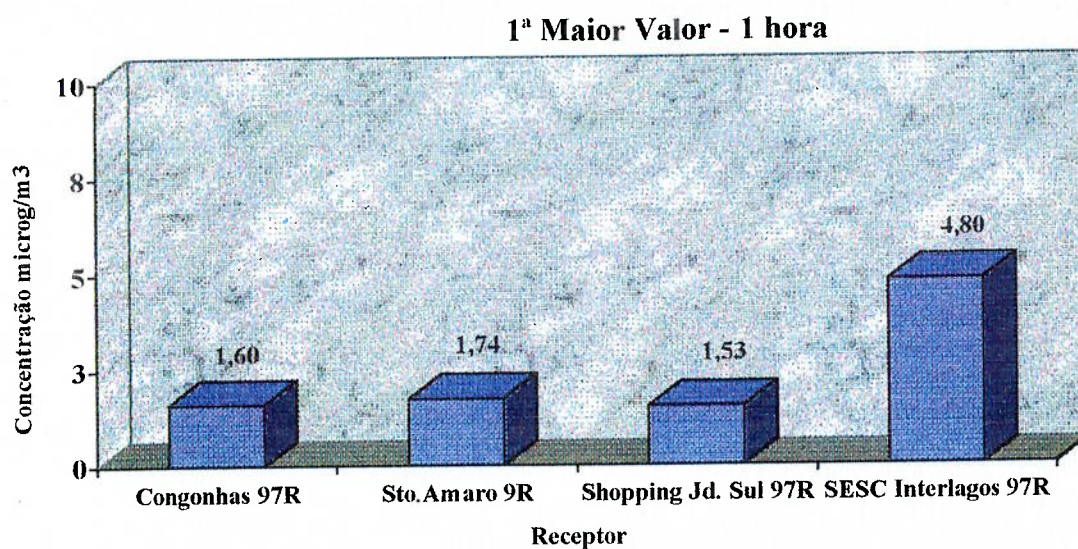


Figura 39 – Resultados da Modelagem do VOC nos Receptores Discretos, comparativamente ao PNQA – “1º Maior Valor – 1 hora”

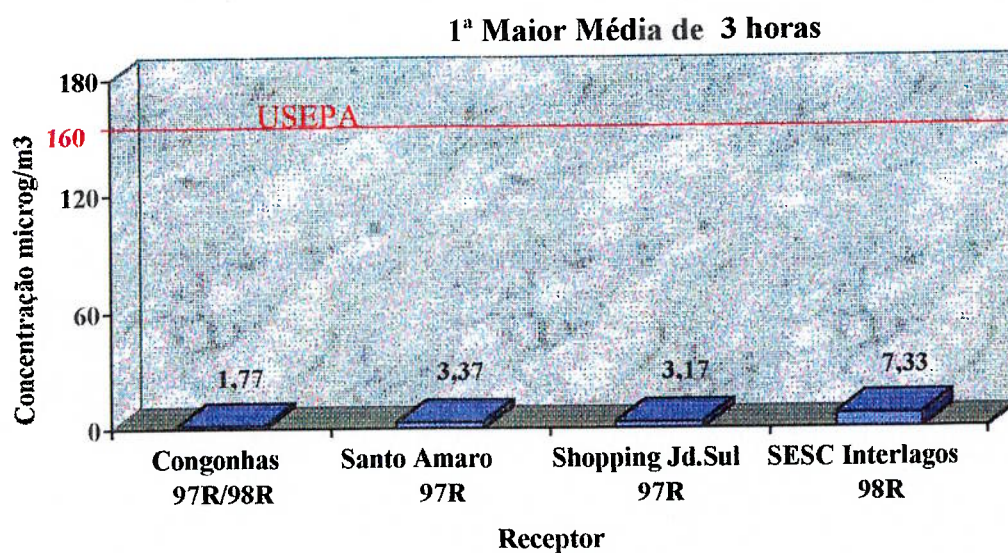


Figura 40 – Resultados da Modelagem do TOC nos Receptores Discretos, comparativamente ao PNQA – “1º Maior Valor – 3 horas”



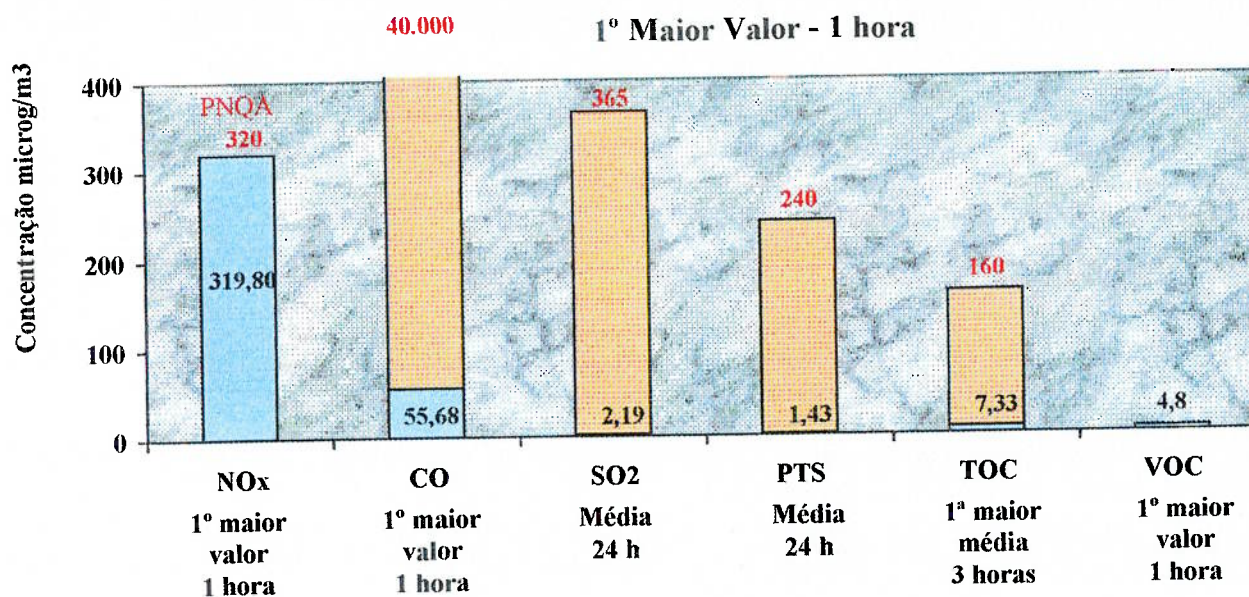


Figura 41 – Resultados de todos os poluentes no Receptor SESC Interlagos.

Na Figura 41 as indicações acima das barras referem-se aos Padrões Primários do PNQA, com exceção do TOC, cuja indicação refere-se ao valor limite utilizado, anteriormente, pela EPA. Os valores no interior das barras referem-se às máximas concentrações de cada poluente.

#### Curvas de ISO - Concentrações

A Figura 42, saída do modelo ISC 3, apresenta as curvas de iso-concentrações para o poluente NO<sub>x</sub>, para a modelagem da usina operando a plena carga (2 unidades), utilizando-se na modelagem terreno natural e arquivo meteorológico de 1997.

A Figura 43 apresenta a plotagem sobre mapa topográfico, das curvas de iso-concentração referentes à modelagem efetuada com relevo natural e arquivo meteorológico de 1997.

PROJECT TITLE:

Usina Piratininga NOx meteorologia 1997 - 4 chaminés  
 PLOT FILE OF HIGH 1ST HIGH 1-HR VALUES FOR SOURCE GROUP: ALL

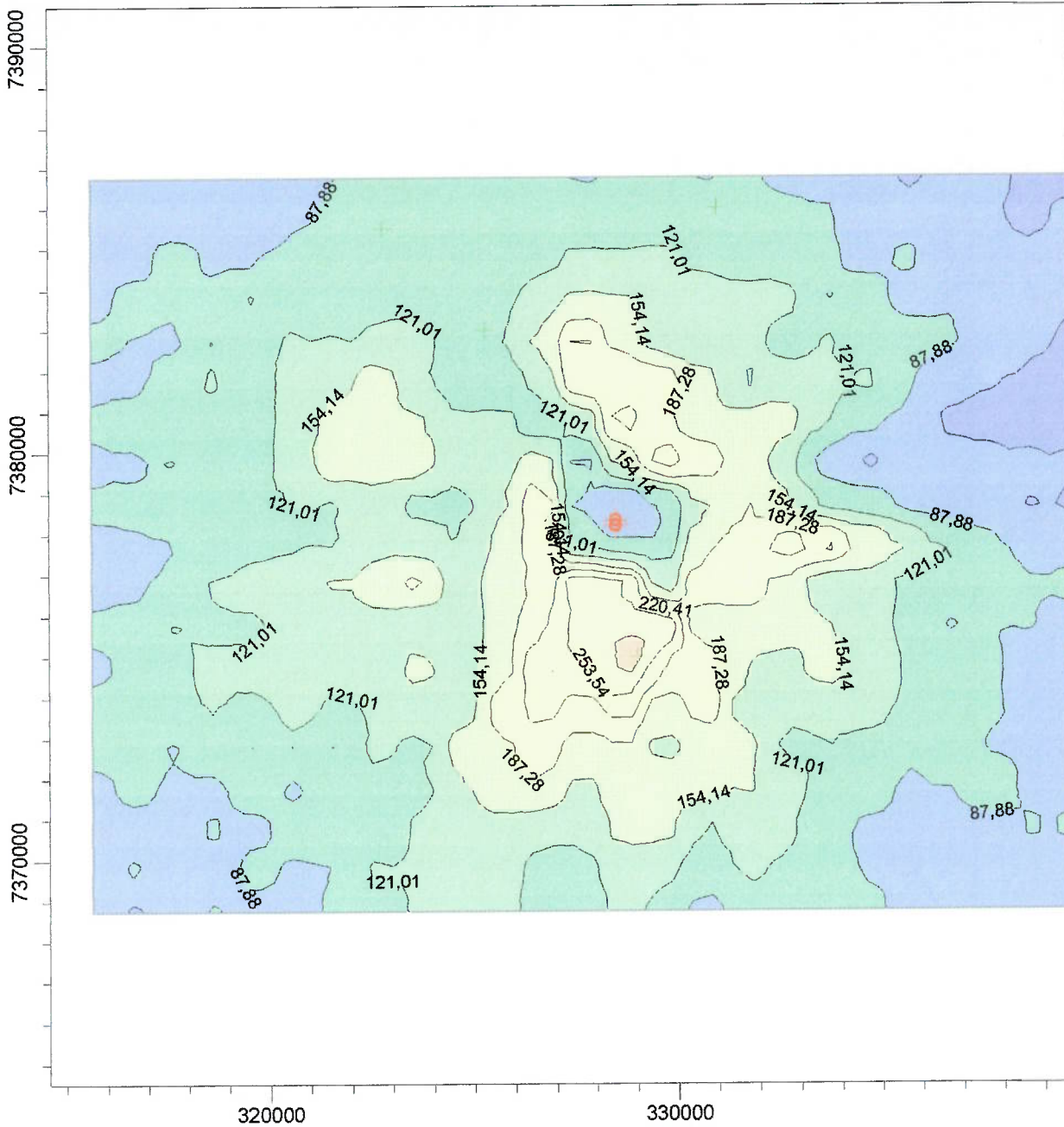
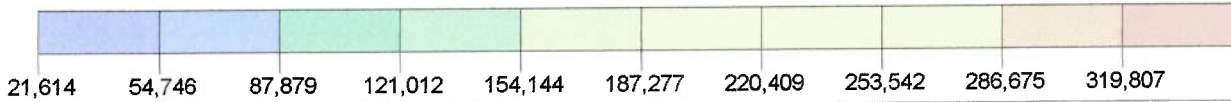


Figura 42 – Curvas de iso-concentração para o NOx, relevo plano, arq.met. 1997

µg/m³



MODELING OPTIONS: <b>CONC, URBAN, ELEV, DFAULT</b>			COMPANY NAME:	
OUTPUT TYPE: <b>CONC</b>	RECEPTORS: <b>479</b>	COMMENTS:	MODELER:	SCALE: 0  5 km
MAX: <b>319,80731</b>	UNITS: <b>µg/m³</b>		DATE: <b>07/01/03</b>	PROJECT NO.:



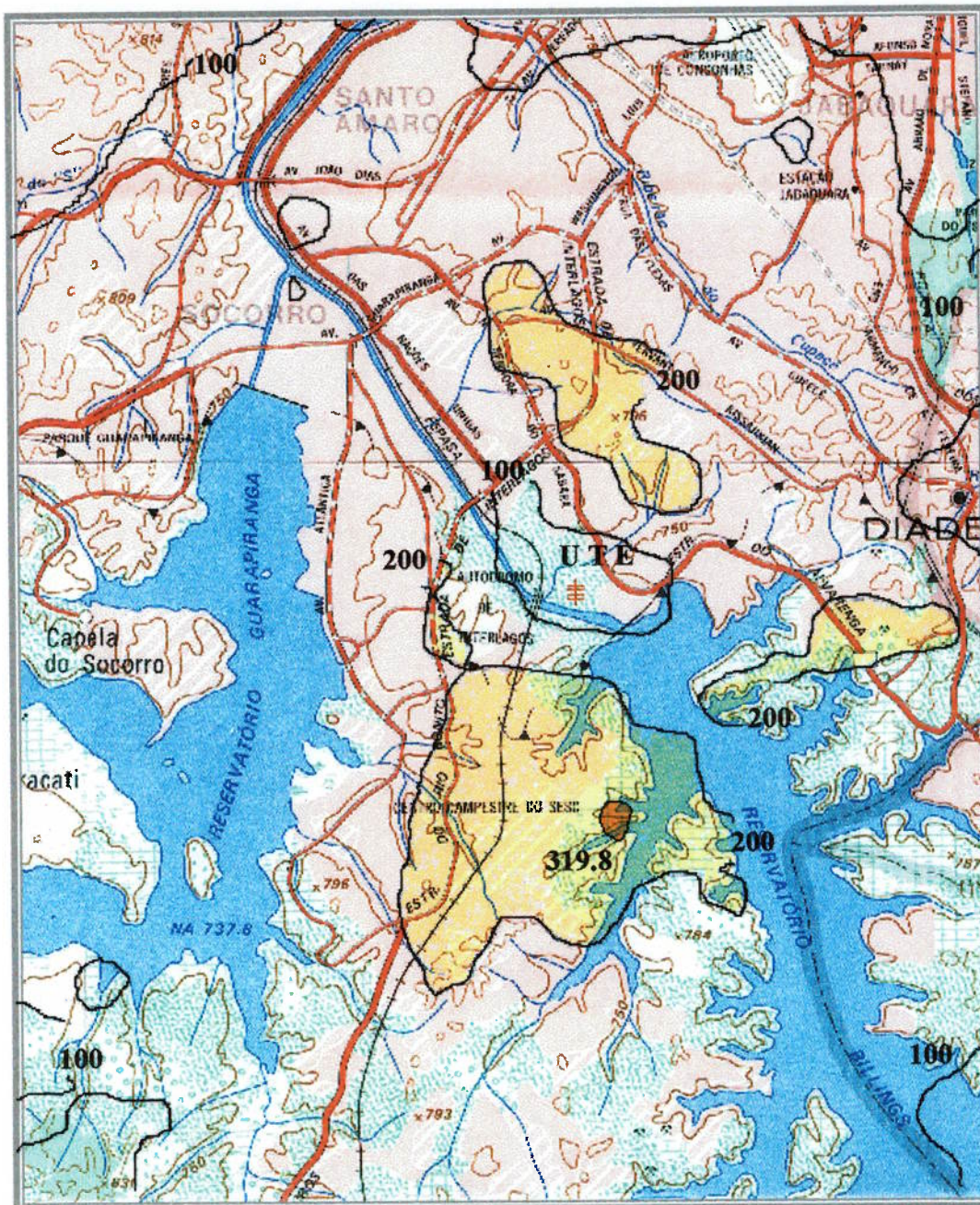


Figura 43 – NO<sub>x</sub>: Plotagem de curvas de iso-concentração sobre mapa topográfico, relevo natural, arq.met.1997

#### **4.1. Análise dos Resultados da Modelagem**

A análise dos resultados da modelagem será efetuada, considerando-se os seguintes aspectos:

- Resultados das modelagens para terreno plano utilizando-se os arquivos meteorológicos de 1997 e 1998, comparativamente, com os resultados obtidos pela Consultora utilizando como dados meteorológicos o “dia mais crítico”.
- Análise dos resultados da modelagem para terreno plano, comparativamente com relevo (arquivo topográfico),
- Avaliação dos resultados comparativamente aos Padrões Nacionais de Qualidade do Ar – PNQA, definidos pela Resolução CONAMA N° 03 de 28/06/90,
- Análise dos resultados das modelagens, utilizando-se os arquivos meteorológicos de 1997 e 1998,
- Análise do período do ano em que ocorreram as maiores concentrações,
- Distribuição dos poluentes na área geográfica de influência da Termelétrica. Análise das áreas mais atingidas,
- Análise das alturas de mistura utilizadas pela consultora, comparativamente, com as fornecidas pelos primeiros 30 dias de 1997 e 1998.

##### **4.1.1. Comparação entre os Resultados da Consultora e do Estudo de Caso**

As diferenças entre a simulação efetuada pela Consultora e pelo Estudo de Caso, consistem, basicamente, em:

- A Consultora utilizou topografia plana em sua modelagem, isto é, não considerou o perfil topográfico da área de influência da Usina Termelétrica. Para a modelagem do Estudo de Caso foi elaborado um arquivo topográfico, conforme mencionado no Item 3.2.1.4.

- Relativamente aos dados meteorológicos, no Estudo de Caso foram utilizados Arquivos Meteorológicos dos anos de 1997 e 1998, compatíveis com os dados utilizados pela Consultora, relativos à Estação de Congonhas, conforme mencionado no Item 3.2.1.3; enquanto que a Consultora utilizou o que definiu como “Dia Crítico para a Dispersão Atmosférica”, constando a velocidade e direção do vento, a altura da camada de mistura, a temperatura, as categorias de estabilidade de Pasquill, a pressão atmosférica, a umidade do ar e o grau de precipitação, conforme apresentado na Tabela XXX.

Em termos de resultados das simulações, de uma forma geral, para todos os poluentes, como a Consultora efetuou as suas modelagens utilizando como arquivo meteorológico o “Dia mais Crítico” e terreno plano; os valores das maiores concentrações ocorreram sempre nas modelagens do Estudo de Caso, utilizando-se os Arquivos Meteorológicos de 1997 e 1998; como pode ser verificado através do ANEXO III.

#### **4.1.1.1 Modelagem com Arquivo Meteorológico e “Dia Mais Crítico”**

A Tabela XLI apresenta os resultados do Estudo de Caso das modelagens dos poluentes NO<sub>x</sub>, CO e TOC (Hidrocarbonetos) para terreno plano utilizando-se os arquivos meteorológicos de 1997 e 1998, comparativamente, com os resultados destes mesmos poluentes, obtidos pela Consultora, que utilizou o “dia mais crítico” como dados meteorológicos. Nestas simulações de terreno plano, a diferença básica entre os INPUTS destas modelagens é a utilização do “dia mais crítico” pela Consultora e os Arquivos Meteorológicos no Estudo de Caso.

A Coluna (%) nesta Tabela representa a relação entre (Consultora/Estudo de Caso), para as correspondentes simulações de 2 ou 4 chaminés.

Amostragem: 1º maior valor - 1 hora - Modelagem Plana/97 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

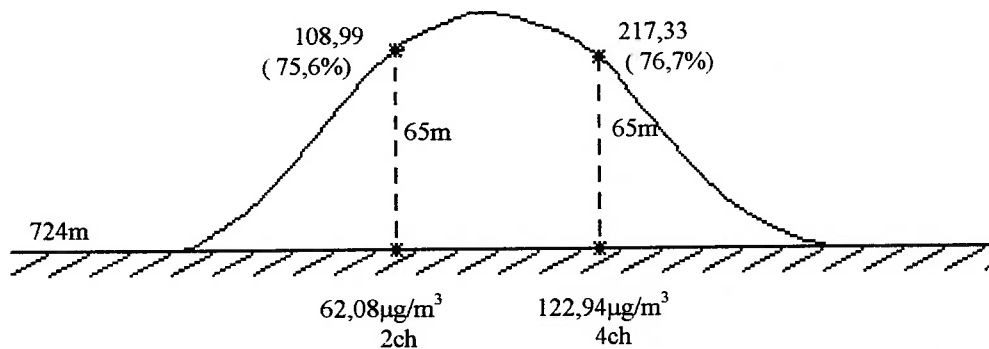


Figura 44 - Resultados das simulações do Estudo de Caso, para NOx, em **topografia plana**, Arquivo Meteorológico de 1997 e os correspondentes resultados utilizando-se relevo; num mesmo receptor.

Amostragem: 1º maior valor - 1 hora - Modelagem Relevo/97 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

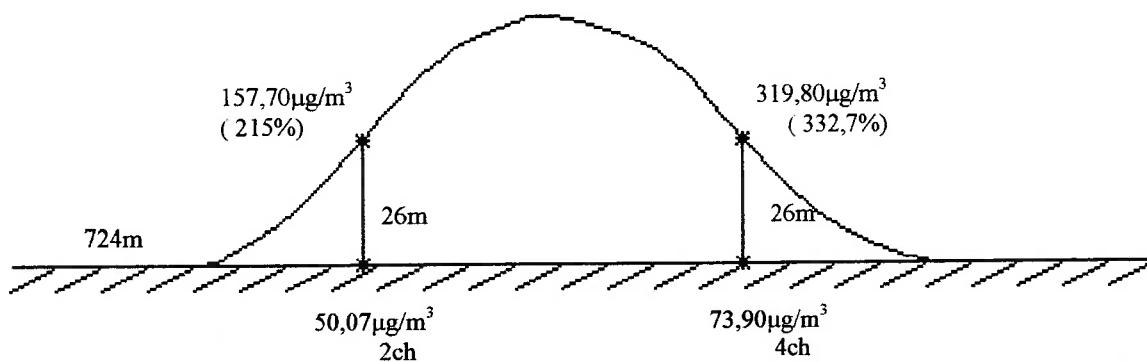


Figura 45 - Resultados das simulações do Estudo de Caso, para NOx, em **topografia com relevo**, Arquivo Meteorológico de 1997 e os correspondentes resultados utilizando-se terreno plano; num mesmo receptor.



Tabela XLI: Resultados comparativos de simulações com dados meteorológicos do “Dia mais Crítico” e com Arquivos Meteorológicos de 1997 e 1998.

PERIODO DE AMOST.	MAIORES CONCENTRAÇÕES ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )										PNQA $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	CONSULTORA		ESTUDO DE CASO								
			ARQ. METEOROL. 97				ARQ. METEOROL. 98				
	PLANO		PLANO				PLANO				
	2 CH.	4 CH.	2 CH.	%	4 CH.	%	2 CH.	%	4 CH.	%	
<b>ÓXIDOS DE NITROGÊNIO</b>											
1º Maior valor 1 hora	85,01	170,02	62,08	37,0	122,94	38,3	61,73	37,7	122,80	38,5	320,00
Média 24 horas	12,25	24,50	13,27	-7,7	25,44	-3,7	18,22	-32,8	36,42	-32,7	-----
Média Anual	N/D	N/D	2,43	---	4,81	---	2,34	---	4,71	---	100,00
<b>MONÓXIDO DE CARBONO</b>											
1º Maior valor 1 hora	14,80	29,60	10,80	37,0	21,40	38,3	10,74	37,8	21,37	38,5	40.000
1ª Maior Média 8 horas	4,80	9,60	5,22	-8,0	10,40	-7,7	7,75	-38,0	15,47	-37,9	10.000
<b>HIDROCARBONETOS – TOC</b>											
1ª Maior Média 3 horas	1,41	2,82	2,98	-52,7	5,94	-52,5	3,00	-53,0	5,98	-52,8	160

Verifica-se que para as concentrações do “1º Maior Valor – 1 hora”, a modelagem com o “Dia mais Crítico” apresenta maiores valores, o que não ocorre para os demais períodos de amostragem, quando as maiores concentrações ocorrem quando da utilização dos arquivos meteorológicos de 1997 e 1998.

#### 4.1.1.2 Modelagem com terreno Plano e com Relevo Natural

As Figuras 44 a 47 apresentam para o poluente NOx, no mesmo ponto, os resultados das modelagens do Estudo de Caso, utilizando-se os arquivos meteorológicos de 1997 e 1998, nos casos de terreno plano e com relevo.

Analisando-se estas Figuras, constata-se que a modelagem com o relevo natural conduz a maiores valores de concentração, compatíveis com os aspectos teóricos.

Esta constatação também ocorreu no Workshop – Geração Termelétrica a Gás Natural, cujo Relatório do Grupo de Trabalho de Qualidade do Ar considerou que: “A descrição climatológica, meteorológica e topográfica deve ser feita de forma detalhada, objetivando sempre a criação da base de dados que será aplicada na modelagem de dispersão atmosférica”.

Amostragem: 1º maior valor - 1 hora - Modelagem Plana/98

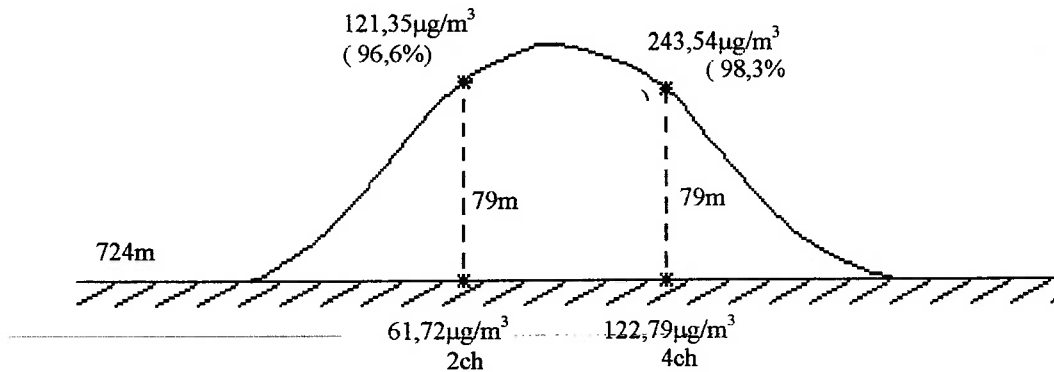


Figura 46 - Resultados das simulações do Estudo de Caso, para NOx, em **topografia plana**, Arquivo Meteorológico de 1998 e os correspondentes resultados utilizando-se relevo; num mesmo receptor.

Amostragem: 1º maior valor - 1 hora - Modelagem Relevo/98

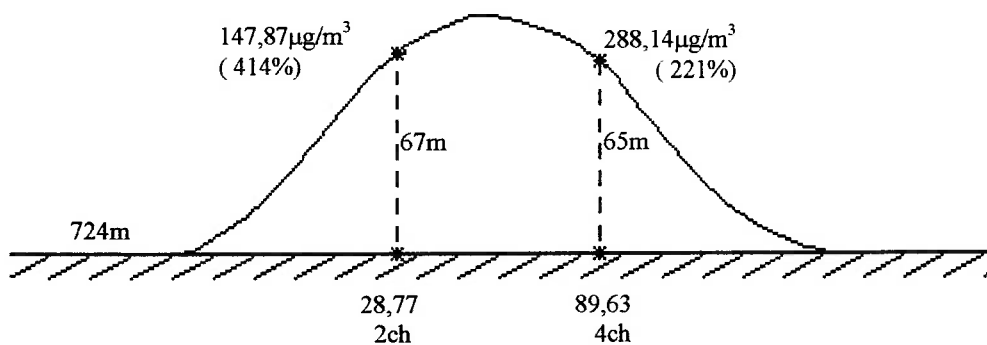


Figura 47 - Resultados das simulações do Estudo de Caso, para NOx, em **topografia com relevo**, Arquivo Meteorológico de 1998 e os correspondentes resultados utilizando-se relevo; num mesmo receptor.

#### 4.1.2. Resultados das Simulações Comparativamente ao PNQA

Neste item serão analisados os resultados das simulações da dispersão dos poluentes efetuadas pela Consultora e no Estudo de Caso, comparativamente com ao PNQA.

##### a) Óxidos de Nitrogênio - NOx

###### ➤ 1º Maior Valor – 1 hora

A Consultora, embora tenha utilizado na simulação, como dados meteorológicos aqueles correspondentes ao “Dia mais Crítico”, utilizou também terreno plano, que relativamente ao terreno com topografia fornece menores valores de concentração. Entretanto, analisando-se estes valores  $85,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$  e  $170,02 \mu\text{g}/\text{m}^3$  – ANEXO I, constata-se que os mesmos são altos, em relação ao PNQA ( $320,00 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

No Estudo de Caso, constata-se que todas as simulações apresentam valores altos, apresentando-se como mais críticos os resultados dos arquivos topográficos com relevo, dos anos de 1997 e 1998, com concentrações de  $319,80 \mu\text{g}/\text{m}^3$  e  $288,14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectivamente.

No caso dos Receptores Discretos - Figura 35, constata-se que a maior concentração média horária (1º Maior valor-1 hora) de valor de  $319,80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , ocorre na região do SESC INTERLAGOS; enquanto que nos demais receptores discretos o valor das concentrações é menor, embora ainda alto, relativamente ao Padrão Primário do PNQA.

###### ➤ Média Anual

Nas simulações efetuadas pelo Estudo de Caso verifica-se, através da Figura 29 e ANEXO III, que os valores da Média Anual são baixos; bem como, o maior valor encontrado –  $6,34 \mu\text{g}/\text{m}^3$  está bastante aquém do limite estabelecido pelo Padrão Primário do PNQA ( $100,00 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). A Consultora não simulou esta condição.

**b) Monóxido de Carbono - CO****➤ 1º Maior Valor – 1 hora**

Através da Figura 30 verifica-se que o maior valor de concentração obtido nas simulações é de  $55,67 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , estando o mesmo muito abaixo do Padrão Primário do PNQA ( $40.000,00 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

**➤ 1ª Maior Média – 8 horas**

Considerando-se o maior valor de concentração obtido nas simulações -  $28,31 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , constata-se que o mesmo está abaixo do Padrão Primário do PNQA ( $10.000,00 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

**c) Dióxido de Enxofre - SO<sub>2</sub>****➤ Média de 24 horas**

Através da Figura 31 verifica-se que o maior valor da concentração Média de 24 horas, obtido nas simulações, é de  $4,21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , estando o mesmo abaixo do Padrão Primário do PNQA ( $365,00 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

**➤ Média Anual**

Sendo o maior valor da concentração Média Anual, de  $0,41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , constata-se que o mesmo está abaixo do Padrão Primário do PNQA ( $80,00 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

**d) Partículas Totais em Suspensão - PTS****➤ Média de 24 horas**

Através da Figura 32 verifica-se que o maior valor da concentração Média de 24 horas, obtido nas simulações, é de  $2,71 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , estando o mesmo abaixo do Padrão Primário do PNQA ( $240,00 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).



➤ Média Anual

Considerando-se que o maior valor de concentração Média Anual, obtido nas simulações é de  $0,30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , constata-se que o mesmo está muito abaixo do Padrão Primário do PNQA ( $80,00 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

**e) Compostos Orgânicos Voláteis - VOC**

Não há Padrão Nacional para este poluente.

➤ 1º Maior Valor – 1 hora

Através da Figura 33, constata-se que o maior valor de concentração para o “1º Maior Valor – 1 hora”, obtido nas simulações, é de  $4,80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

➤ Média de 24 horas

Neste caso, através do ANEXO III, verifica-se que o maior valor da concentração Média de 24 horas, obtido nas simulações, é de  $0,86 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

➤ Média Anual

Verifica-se que o maior valor de concentração Média Anual é de  $0,10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

**f) Compostos Orgânicos Totais - TOC – (Hidrocarbonetos)**

➤ 1ª Maior Média – 3 horas.

Da análise da Figura 34, constata-se que o maior valor de concentração para o “1ª Maior Média – 3 horas”, obtido nas simulações, é de  $11,92 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , valor abaixo do limite indicado nesta Tabela como referência, o qual foi utilizado por algum tempo, pela USEPA, que é de  $160,00 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

É importante salientar, que nos valores de concentrações apresentados, para todos os poluentes, não está sendo considerada a carga poluente previamente existente no local, ou seja a poluição de fundo, a qual é decorrente das fontes de emissão

existentes, principalmente; as industriais, comerciais e as veiculares. Da análise efetuada nestes valores, constata-se que somente o NOx torna-se um poluente crítico, pois o mesmo no caso do 1º Maior Valor – 1 hora, é praticamente, igual ao Padrão Primário do PNQA.

#### 4.1.3. Análise comparativa dos Resultados das modelagens Efetuadas com os Arquivos Meteorológicos de 1997 E 1998

Para efetuar-se esta análise, os resultados das modelagens, para 2 e 4 chaminés, efetuadas com os Arquivos Meteorológicos de 1997 e 1998 foram tabulados, constatando-se que:

- a) Considerando-se todos os poluentes, em aproximadamente 76% dos casos, as concentrações decorrentes da modelagem com o arquivo meteorológico de 1997 são maiores que com o de 1998,
- b) Na análise dos diversos períodos de amostragem, abrangendo todos os poluentes; bem como, considerando-se os receptores genéricos e os discretos, tem-se os resultados apresentados na Tabela XLII.

Tabela XLII - Distribuição percentual dos resultados dos arquivos meteorológicos de 1997 e 1998, em função dos períodos de amostragem.

AMOSTRAGEM	MAIORES VALORES (%)	
	Arq. Met. 97	Arq. Met. 98
1º Maior Valor - 1 hora	73,3	26,7
Média - 3 horas	60	40
Média - 8 horas	80	20
Média - 24 horas	56,2	43,8
Média Anual	0,0	100,0

- c) No caso do poluente mais crítico, o NOx, constata-se que para o “1º Maior Valor – 1 hora”, em 70% dos casos, os resultados das concentrações com o Arquivo Meteorológico de 1997 são maiores que com o de 1998.

Tabela XLIII - Distribuição percentual dos resultados do NO<sub>x</sub>, referente aos arquivos meteorológicos de 1997 e 1998, em função do período de amostragem.

AMOSTRAGEM	MAIORES VALORES (%)	
	ARQ.MET. 97	ARQ.MET. 98
1º Maior Valor - 1 hora	70,0	30,0
Média - 24 horas	40,0	60,0
Média Anual	0,0	100,0

#### 4.1.4. Período de Ocorrência das Maiores Concentrações

As Tabelas XLIV e XLV, apresentam os dias e horários em que ocorreram as maiores concentrações para as amostragens “1º Maior Valor – 1 hora” para os poluentes NO<sub>x</sub> e CO; bem como “1ª Maior Média – 3 horas” para o TOC e “1ª Maior Média – 8 horas” para o CO. Analisando-se estas Tabelas constata-se que:

- (a) As datas e horários em que ocorreram as maiores concentrações para as amostragens “1º Maior Valor – 1 hora” são iguais para os poluentes NO<sub>x</sub> e CO,
- (b) As concentrações dos “1<sup>os</sup> Maiores Valores – 1 hora” ocorreram no período noturno, entre as 20h de um dia e as 08h do dia seguinte, com uma maior frequência entre as 20h e as 03h,
- (c) As concentrações referentes à “1ª Maior Média – 3 horas”, também ocorreram no período noturno, entre as 21h de um dia e as 09h do dia seguinte, com maior frequência entre as 24h e as 06h,
- (d) Para as concentrações referentes à “1ª Maior Média – 8 horas”, as mesmas também ocorreram no período noturno, entre as 24h de um dia e as 08h do dia seguinte, com maior frequência às 08h,
- (e) As concentrações dos “1<sup>os</sup> Maiores Valores – 1 hora” ocorreram com maior frequência nos meses de fevereiro (15), dezembro (9); e março, abril, agosto com 4 ocorrências cada.

Na mesma simulação (Arquivo Meteorológico e relevo), os resultados das concentrações para 2 e 4 chaminés ocorreram no mesmo dia e local, nas seguintes porcentagens:

“1<sup>os</sup> Maiores Valores – 1 hora” : 85%

“1<sup>a</sup> Maior Média – 3 horas” : 90%

“1<sup>a</sup> Maior Média – 8 horas” : 100%

Para as simulações efetuadas com o Arquivo Meteorológico de 1997, as concentrações dos “1<sup>os</sup> Maiores Valores – 1 hora”, em cada receptor discreto ocorreram nos mesmos dias e horários; exceto no caso do Shopping Jardim Sul, no qual os resultados para 2 chaminés foram iguais, tanto para relevo plano como natural; o mesmo acontecendo para 4 chaminés,

Já no caso do Arquivo Meteorológico de 1998, as concentrações dos “1<sup>os</sup> Maiores Valores – 1 hora”, em cada receptor discreto ocorreram nos mesmos dias e horários; exceto no caso do SESC Interlagos, no qual os resultados para 2 e 4 chaminés foram iguais, tanto para relevo plano como natural.

Tabela XLIV - Período do ano (data e horário) em que ocorreram os "1<sup>os</sup> Maiores Valores - 1 Hora" para o NO<sub>x</sub> e CO.

POL.	PERÍODO DE AMOST.	DATAS							
		MODELAGEM							
		ARQ. METEOROL. 97				ARQ. METEOROL. 98			
		PLANO		TOPOG.		PLANO		TOPOG.	
		2 CH.	4 CH.	2 CH.	4 CH.	2 CH.	4 CH.	2 CH.	4 CH.
NO <sub>x</sub>	<b>RECEPTORES GENÉRICOS - 1<sup>o</sup> MAIOR VALOR - 1 HORA</b>								
		06/10 03 h	06/10 03 h	24/12 02 h	24/12 02 h	09/12 02 h	09/12 02 h	08/12 23 h	20/02 23 h
	<b>RECEPTORES DISCRETOS - 1<sup>o</sup> MAIOR VALOR - 1 HORA</b>								
	Congonhas	24/02 06 h	24/02 06 h	24/02 06 h	24/02 06 h	25/08 20 h	25/08 20 h	25/08 20 h	25/08 20 h
	Santo Amaro	21/03 06 h	21/03 06 h	21/03 06 h	21/03 06 h	08/02 23 h	08/02 23 h	08/02 23 h	08/02 23 h
	Shopping J. Sul	13/04 21 h	28/04 01 h	13/04 21 h	28/04 01 h	03/02 01 h	03/02 01 h	03/02 01 h	03/02 01 h
	SESC Interlagos	24/12 02 h	24/12 02 h	24/12 02 h	24/12 02 h	01/02 22 h	01/02 22 h	08/06 08 h	08/06 08 h
CO	<b>RECEPTORES GENÉRICOS - 1<sup>o</sup> MAIOR VALOR - 1 HORA</b>								
		06/10 03 h	06/10 03 h	24/12 02 h	24/12 02 h	09/12 02 h	09/12 02 h	08/12 23 h	20/02 23 h
	<b>RECEPTORES DISCRETOS - 1<sup>o</sup> MAIOR VALOR - 1 HORA</b>								
	Congonhas	24/02 06 h	24/02 06 h	24/02 06 h	24/02 06 h	25/08 20 h	25/08 20 h	25/08 20 h	25/08 20 h
	Santo Amaro	21/03 06 h	21/03 06 h	21/03 06 h	21/03 06 h	08/02 23 h	08/02 23 h	08/02 23 h	08/02 23 h
	Shopping J. Sul	13/04 21 h	28/04 01 h	13/04 21 h	28/04 01 h	03/02 01 h	03/02 01 h	03/02 01 h	03/02 01 h
	SESC Interlagos	24/12 02 h	24/12 02 h	24/12 02 h	24/12 02 h	01/02 22 h	01/02 22 h	08/06 08 h	08/06 08 h

Tabela XLV - Período do ano (data e horário) em que ocorreram os “1ª Maior Média – 8 Horas” para o CO e a “1ª Maior Média – 3 Horas” para o TOC.

POL.	PERÍODO DE AMOST.	DATAS							
		MODELAGEM							
		ARQ. METEOROL. 97				ARQ. METEOROL. 98			
		PLANO		TOPOG.		PLANO		TOPOG.	
		2 CH.	4 CH.	2 CH.	4 CH.	2 CH.	4 CH.	2 CH.	4 CH.
CO	<b>RECEPTORES GENÉRICOS – 1ª MAIOR MÉDIA – 8 HORAS</b>								
		04/12 08 h	04/12 08 h	10/10 08 h	10/10 08 h	15/08 08 h	15/08 08 h	15/08 08 h	15/08 08 h
	<b>RECEPTORES DISCRETOS – 1ª MAIOR MÉDIA – 8 HORAS</b>								
	Congonhas	05/12 08 h	05/12 08 h	05/12 08 h	05/12 08 h	02/01 24 h	02/01 24 h	02/01 24 h	02/01 24 h
	Santo Amaro	21/03 08 h	21/03 08 h	21/03 08 h	21/03 08 h	02/05 08 h	02/05 08 h	02/05 08 h	02/05 08 h
	Shopping J. Sul	19/03 08 h	19/03 08 h	19/03 08 h	19/03 08 h	02/05 08 h	02/05 08 h	02/05 08 h	02/05 08 h
SESC Interlagos	24/12 08 h	24/12 08 h	24/12 08 h	24/12 08 h	05/02 08 h	05/02 08 h	05/02 08 h	05/02 08 h	
TOC	<b>RECEPTORES GENÉRICOS – 1ª MAIOR MÉDIA – 3 HORAS</b>								
		04/12 03 h	04/12 03 h	29/04 03 h	04/12 03 h	27/01 03 h	27/01 03 h	27/01 03 h	27/01 03 h
	<b>RECEPTORES DISCRETOS – 1ª MAIOR MÉDIA – 3 HORAS</b>								
	Congonhas	24/02 06 h	24/02 06 h	24/02 06 h	24/02 06 h	02/01 24 h	02/01 24 h	02/01 24 h	02/01 24 h
	Santo Amaro	23/03 06 h	23/03 06 h	23/03 06 h	23/03 06 h	02/05 06 h	02/05 06 h	02/05 06 h	02/05 06 h
	Shopping J. Sul	09/11 03 h	09/11 03 h	09/11 03 h	09/11 03 h	01/09 21 h	01/09 21 h	02/09 03 h	01/09 21 h
SESC Interlagos	04/02 06 h	04/02 06 h	04/02 06 h	04/02 06 h	05/02 06 h	05/02 06 h	08/06 09 h	08/06 09 h	

#### 4.1.5. Análise das áreas mais atingidas

A Figura 48, apresenta a distribuição geográfica dos pontos de maior concentração para o caso mais crítico, que é o “1º Maior Valor – 1 hora” do poluente NOx. As abcissas correspondem às coordenadas das plantas da EMPLASA.

Em cada ponto nesta figura, são indicados o arquivo meteorológico utilizado (97 ou 98), modelagem efetuada considerando-se o relevo natural do terreno (R), ou com o terreno plano (P); bem como são indicados entre parêntesis, se os resultados se referem a 2 ou 4 chaminés.

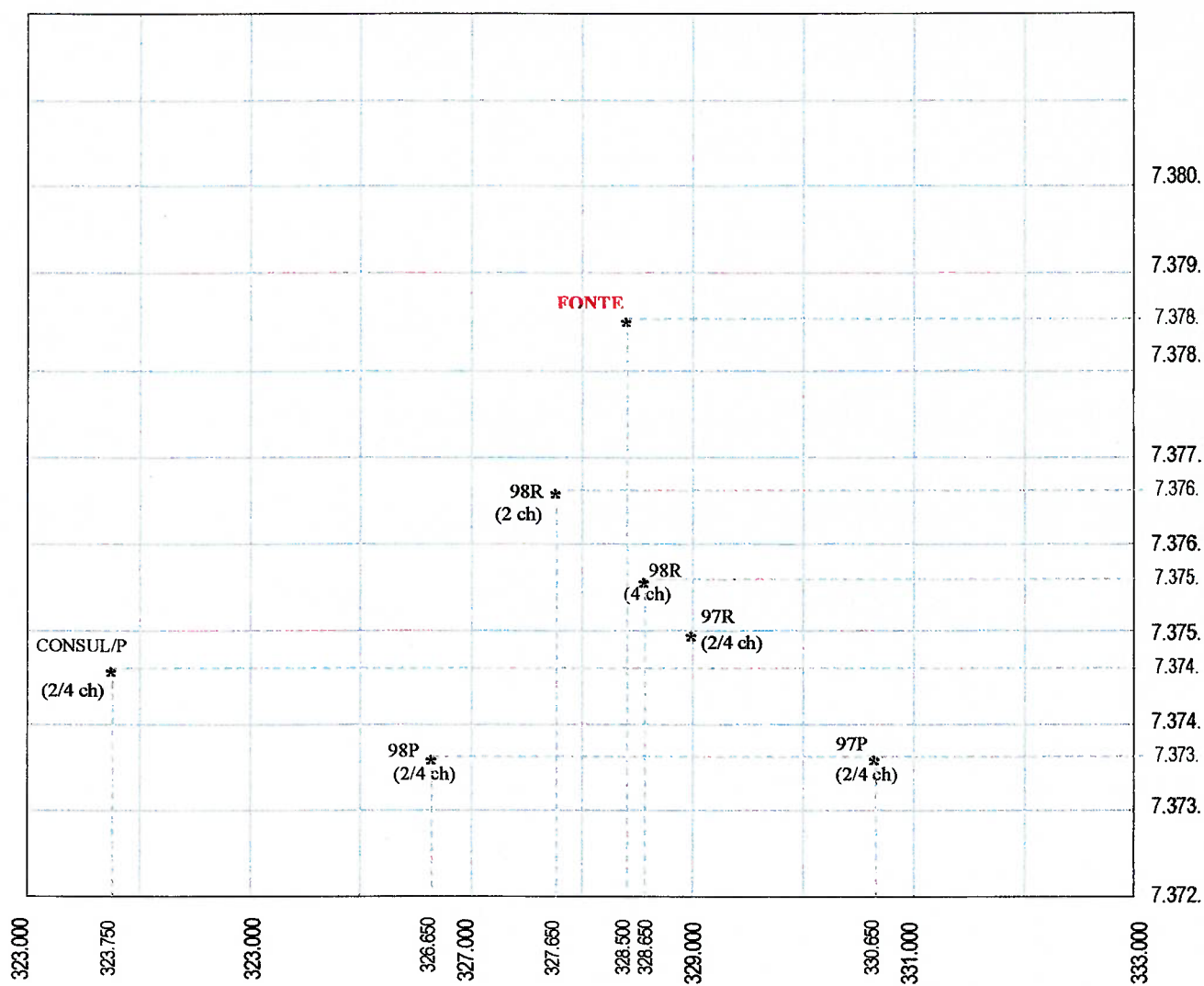


Figura 48 - Distribuição geográfica dos pontos de amostragem “1º Maior Valor – 1 hora” do poluente NOx, para todas as modelagens efetuadas pela Consultora e Estudo de Caso.

Analisando-se as Figura 48, verifica-se que nas modelagens considerando o relevo natural (R), as maiores concentrações ocorrem mais próximas da fonte, que no caso da consideração do relevo plano (P).

A Tabela XLVI apresenta os locais atingidos como resultado de cada uma das modelagens para o NO<sub>x</sub> – “1º Maior Valor – 1 hora”, bem como a distância de cada local atingido à fonte e ao ponto resultante da simulação da Consultora. Contata-se que os pontos de maiores concentrações, no caso de terreno plano, ocorrem a distâncias da fonte entre 5 e 6 Km; enquanto que no caso do relevo natural, estas distâncias diminuem para entre 1,8 e 3,4 Km.

Tabela XLVI - Locais atingidos pelas maiores concentrações de NO<sub>x</sub>, para as amostragens de “1º Maior Valor - 1 hora”.

MODELAGEM	LOCAIS ATINGIDOS	DISTÂNCIA (Km)	
		CONSULT.	FONTE
<b>1. CONSULTORA</b>			
a) Dia mais crítico (2 e 4 chaminés)	• Reservatório da Represa de Guarapiranga, 400m a leste da Ilha do Eucalipto.	---	6,0
<b>2. ESTUDO DE CASO</b>			
a) Arq. Met.-97 - PLANO (2 e 4 chaminés)	• Reservatório da Represa Billings.	6,9	5,0
b) Arq. Met.-97 - RELEVO (2 e 4 cham.)	• SESC INTERLAGOS - Centro Campestre José Papa Júnior.	5,2	3,4
c) Arq. Met.-98 - PLANO (2 e 4 cham.)	• Jardim Edwirges, próximo à Estrada de Ferro da "CPTM", aprox. 200m.	3,0	5,0
d) Arq. Met.-98 - RELEVO (2 cham.)	• Próximo à Estação Jurubatuba da " Cia. Paulista de Trens Metropolitanos - CPTM".	4,4	1,8
e) Arq. Met.-98 - RELEVO (4 cham.)	• Aprox. 800m ao norte do SESC INTERLAGOS - Centro Campestre José Papa Júnior.	5,0	2,6



#### 4.1.6. Análise das Alturas de Mistura

A Tabela XLVII - apresenta dados comparativos dos parâmetros meteorológicos da modelagem da Consultora (dia mais crítico) com os do Estudo de Caso, relativos às primeiras 24 h dos meses de janeiro, dos Arquivos Meteorológicos de 1997 e 1998.

Tabela XLVII - Quadro comparativo dos parâmetros meteorológicos.

HORA	PARÂMETRO METEOROLÓGICO											
	Veloc. Vento (m/s)			Temperatura (K)			Categoria Estabilidade			Altura de Mistura (m)		
	CONS	97	98	CONS	97	98	CONS	97	98	CONS	97	98
01	0,5	4,120	2,58	290	293,1	295,9	F	E	D	200	733,8	780,6
02	0	3,605	2,58	290	293,1	295,9	F	E	E	200	587,6	469,6
03	0	3,090	2,58	290	293,1	295,9	F	F	E	200	547,7	469,6
04	0	2,575	2,58	290	293,1	295,9	F	F	E	200	547,7	488,8
05	0	2,575	2,58	290	292,0	295,9	F	F	E	200	548,2	504,0
06	0,6	2,575	1,54	290	292,0	295,9	F	E	D	200	548,2	792,8
07	0,5	3,090	2,58	290	292,6	295,9	F	D	D	200	1050,7	902,8
08	0	2,575	2,06	292	294,3	295,9	F	C	C	200	993,7	876,9
09	0	2,575	2,58	292	295,9	298,1	F	B	B	200	1087,1	1127,8
10	0,9	2,575	3,09	292	297,0	299,8	D	B	B	600	1182,9	1368,7
11	2,6	3,605	1,54	292	298,1	302,0	D	B	B	600	1535,2	1119,5
12	3,3	5,150	2,06	292	299,3	303,1	D	C	C	600	1794,1	1317,0
13	2,8	6,180	0,00	292	298,7	304,3	D	C	B	600	2117,9	1218,5
14	2,2	5,665	3,09	292	299,3	304,3	B	C	C	800	1955,3	1688,2
15	2,3	6,180	7,72	292	299,3	300,9	B	D	D	800	2112,4	2605,5
16	AUS	7,725	4,12	292	298,1	300,9	B	D	C	800	2600,4	1463,7
17	AUS	8,240	3,09	292	297,0	300,4	B	D	B	800	2760,5	1842,7
18	0	7,725	2,06	292	295,9	300,9	B	D	C	800	2583,2	1687,6
19	0	6,180	2,06	292	295,4	300,0	B	D	C	800	2065,9	1686,0
20	0	5,665	2,06	290	294,3	300,4	E	D	D	400	2323,1	1752,2
21	0	5,665	2,06	290	293,1	300,4	E	D	E	400	1832,2	501,5
22	0	5,665	2,06	290	293,7	298,7	E	D	E	400	1832,2	537,6
23	0	5,665	1,54	290	293,1	298,1	E	D	G	400	1832,2	463,2
24	0	5,150	1,03	290	292,0	298,1	E	D	G	400	1655,8	359,5

Embora os dados de 1997 e 1998 refiram-se às primeiras 24 horas do ano, analisando-se os dados desta Tabela XLVII, podem ser feitas as seguintes constatações:

- Considerando-se que a Consultora utilizou os parâmetros meteorológicos referentes ao “dia mais crítico”, conclui-se que os dados da “Altura de Mistura”

são bem inferiores aos obtidos pelo Estudo de Caso, utilizando os Arquivos Meteorológicos de 1997 e 1998,

- Em apenas uma situação, às 24h, a “Altura de Mistura” da Consultora foi menor que a do Estudo de Caso,
- Ocorrem diferenças bastante significativas, como por exemplo às 09:00h , situação em que o Estudo de Caso (1998), é superior na ordem de 470%,
- Quanto à Classe de Estabilidade das primeiras 24h dos anos de 1997 e 1998, verifica-se que em aprox. 42% dos casos as mesmas coincidem, em 46% as classes divergem em apenas um grau de categoria, sendo sempre adjacentes uma à outra; e somente em 12 %, as classes divergem em mais de um grau de categoria.

#### **4.2. Comentários ao Modelo – ISCST-3**

Neste tópico serão abordados os aspectos relativos ao processo de modelagem, considerando comentários quanto à aplicabilidade de uma pluma Gaussiana, as hipóteses estabelecidas no seu equacionamento, bem como a precisão e incerteza envolvidas nos resultados da modelagem.

##### **4.2.1. Hipóteses Estabelecidas no Equacionamento da Pluma Gaussiana**

No desenvolvimento da aplicação da Equação Gaussiana para aplicação a uma pluma de poluentes, foram utilizadas as seguintes hipóteses:

##### **Taxa de Emissão Contínua**

As emissões de poluente ocorrem continuamente, não havendo variação da massa emitida por unidade de tempo (vazão em massa constante).

##### **Conservação da massa**

É assumido, também, que toda massa que sai da fonte se conserva (conservação da massa), permanecendo na atmosfera durante o transporte do poluente, desde a fonte até ao receptor. Nenhum material é removido através de reações químicas, nem precipita no solo por ação da gravidade ou movimentos de turbulência. Supõem-se

que qualquer deposição de poluente junto ao solo, através de redemoinhos de turbulência, será novamente lançado para a atmosfera através de outros redemoinhos turbulentos subsequentes. Isto é chamado de reflexão turbulenta. Há reflexão total da pluma na superfície da terra, ou seja, não há deposição, nem reação na superfície.

### **Regime Permanente**

O modelo Gaussiano assume que a emissão e as condições meteorológicas permanecem inalteradas com o decorrer do tempo e portanto, também, todos os parâmetros meteorológicos importantes no processo; pelo menos no período de transporte do poluente, desde a fonte até ao receptor.

### **Velocidade do vento**

A direção e a velocidade do vento são consideradas constantes, desde a fonte até ao receptor. A direção "X", do sistema triortogonal de estudo da modelagem, é considerada na direção do vento. Não são consideradas as velocidades nas direções "Y" e "Z".

### **Distribuição das Concentrações na Horizontal e Vertical**

É feita a hipótese da conservação da massa, na seção transversal da pluma e que a mesma tem uma distribuição Gaussiana nas direções transversais ao percurso do poluente (horizontal - "Y" e vertical - "Z"); e por conseqüência, o perfil de concentração do poluente, a qualquer distância da fonte, nas direções horizontal e vertical, pode ser representado por uma distribuição Gaussiana.

Para qualquer distância da fonte, a concentração máxima sempre ocorre no centro da pluma.

### **Velocidade e Altura da Pluma**

Quando a pluma penetra na atmosfera, se eleva até alcançar uma certa altura de equilíbrio horizontal. Com isso, a altura do centro da pluma permanece constante na direção predominante do vento, adotada como constante na trajetória da pluma.

### **Coefficientes de Dispersão**

Os coeficientes de dispersão turbulenta são considerados constantes no tempo e no espaço; isto é, a turbulência atmosférica, é considerada constante ao longo do deslocamento da pluma.

### **Poluente Inerte**

O poluente é inerte, não ocorrendo reações durante o processo de transporte e dispersão do poluente na atmosfera.

### **Forma da Pluma**

A pluma expande-se de forma cônica, ao longo do seu deslocamento.

#### **4.2.2. Precisão e Incertezas Envolvidas na Modelagem**

Vários estudos tem sido efetuados para avaliar a precisão e incertezas envolvidas na modelagem; entretanto muitos usuários desconhecem parcial ou totalmente esta questão, bem como as hipóteses feitas para o desenvolvimento da Equação Gaussiana, e erradamente acreditam que os resultados obtidos na modelagem são bastante precisos.

Nas incertezas dos resultados apresentados pelos Modelos Gaussianos, além das hipóteses feitas para o desenvolvimento da Equação Gaussiana, incorporam-se, também, os métodos para a obtenção de certos parâmetros utilizados na modelagem, os quais também estão sujeitos a várias incertezas. Assim os resultados das concentrações "C", obtidos através da modelagem, devem ser considerados como "a melhor estimativa", pois estão sujeitos a várias incertezas, principalmente, quanto à:

### **Vento**

Pequenos erros na definição da direção do vento, principalmente, nas condições estáveis, quando a pluma do poluente é relativamente mais estreita, pode-se incorrer em erros do local de ocorrência das maiores concentrações. Esta também é a principal razão pela qual as medições de campo apresentam pequena relação com os resultados do modelo.

A velocidade do vento aumenta com a altura, em função disso a sua estimativa à altura de emissão do poluente pode acarretar erros da ordem de 10 a 15%. (Turner, 1994)

### **Estabilidade atmosférica,**

A correta determinação da classe de estabilidade atmosférica no centro da pluma, requer a exata estimativa da elevação da pluma e a exata relação entre a velocidade do vento e a altitude; entretanto os parâmetros meteorológicos variam no tempo e no espaço.

Além disso, deve-se considerar que as estimativas da estabilidade da atmosfera adotadas (Pasquill-Turner), não levam em consideração a estrutura vertical da Camada Limite Planetária, ocasionando uma sub-estimação (super-estimação) da estabilidade atmosférica para condições convectivas (estáveis). (Oliveira, 1992)

É importante salientar que quando se utilizam as classes de estabilidade de Pasquill-Turner e os parâmetros de dispersão de Pasquill-Gifford, está sendo considerado que a atmosfera tem apenas seis classes de estabilidade, estanques; quando na realidade a mesma é contínua, não havendo esta estratificação em apenas seis classes. Realizando-se simulações com alterações na classe de estabilidade, verificam-se resultados muito diferentes, principalmente para receptores mais distantes. (Turner, 1994)

### **Elevação da pluma,**

Para estimar a elevação da pluma acima da chaminé, utilizam-se as equações de Briggs; bem como a velocidade do vento no ponto de lançamento e os parâmetros da torre e de lançamento do poluente; podendo ocorrer erros da ordem de 20 a 25%. (Turner, 1994)

### **Coefficientes de Dispersão**

Os modelos de dispersão gaussiana utilizam os coeficientes de dispersão obtidos, experimentalmente, por Pasquill, para a área rural em terreno plano e para deslocamentos da pluma a baixa altura, junto à superfície, bem como receptores

próximos (até 800m) e junto ao solo. Entretanto a difusão difere, substancialmente para fontes e receptores na superfície e em níveis elevados.

Verificam-se maiores erros nos parâmetros de dispersão  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$ , nas classes de estabilidade extremas (A e F) e para receptores mais distantes. Em alguns casos o  $\sigma_z$  estimado pode divergir de um fator 2 do real. As incertezas nas estimativas de  $\sigma_y$  são, em geral, menores que as de  $\sigma_z$ . (Turner, 1994)

Vários pesquisadores tem questionado a adequação dos coeficientes de dispersão de Pasquill ao atual estado da arte, considerando os avanços que tem sido obtidos no estudo da turbulência, dispersão e micrometeorologia, como abordado na referência (Venkatram, 1996).

Estes assuntos tem sido bastante discutidos, e vários estudos tem sido efetuados para avaliar a precisão dos modelos, particularmente, com respeito à confiabilidade das concentrações de curto período, os quais confirmam o que tem sido dito por especialistas em dispersão atmosférica, durante algum tempo (USEPA, 40 CFR, 1999)

- Os modelos são mais confiáveis para estimar concentrações de longo período, do que para estimar concentrações de curto período,
- Os modelos são, razoavelmente, mais precisos para o cálculo de altas concentrações. Por exemplo, para altas concentrações são verificados erros da ordem de 10 a 40%; bem abaixo do fator de precisão 2 (200%), reconhecido para estes modelos.

Os resultados das modelagens tem sido considerados cada vez mais confiáveis, fundamentando os órgãos reguladores sobre o licenciamento de novas fontes de poluição; bem como, quanto a requisitos de controle das fontes de poluição existentes. Em muitas situações, tais como, a análise de uma nova fonte de poluição, não existe uma alternativa prática. Portanto é óbvia a necessidade de se conhecer a precisão dos modelos e como tais incertezas nas estimativas de concentrações afetam as decisões do órgão regulador do meio ambiente.

Segundo a USEPA, (40CFR, 1999) há a necessidade de incorporar tais informações em seus procedimentos regulatórios e tem patrocinado Workshops com a finalidade da discussão das precisões e incertezas dos modelos, objetivando a incorporação destes conceitos em seus procedimentos regulatórios; entretanto no momento, as informações técnicas são incompletas, bem como não está claro e procedimentado, como os agentes poderiam usar tais informações em suas decisões. Em função disto não há no momento, nenhuma orientação específica, quanto à consideração das incertezas nas tomadas de decisão de seus órgãos regulatórios.

Ainda segundo a USEPA, (40CFR, 1999), no momento, a continuidade do uso dos modelos como "*a melhor estimativa*" é aceitável e consistente com as necessidades de ações para a manutenção da qualidade do ar.

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Da análise dos resultados das concentrações dos poluentes, comparativamente aos Padrões Primário do PNQA; o NO<sub>x</sub> apresenta valores muito próximos do limite estabelecido, concluindo-se que o mesmo é o poluente mais crítico para o caso das usinas termelétricas.

Na comparação com os resultados da Consultora, verifica-se de forma geral, que para todos os poluentes, os valores das maiores concentrações ocorreram sempre nas modelagens do Estudo de Caso, utilizando-se a topografia natural e os arquivos meteorológicos.

A modelagem deve ser efetuada utilizando-se a topografia natural do terreno e arquivos de dados meteorológicos (no mínimo dos 3 anos anteriores), objetivando uma melhor representatividade da topografia e do clima local, resultando na “melhor estimativa” das concentrações dos poluentes.

Os resultados da modelagem representam concentrações aditivas às existentes, ou seja à poluição de fundo, havendo portanto a necessidade de obtenção dos valores desta poluição de fundo, para cada poluente, para então se obter a poluição final nos receptores.

Uma vez que estudos realizados apontam que menos de 50% do NO<sub>x</sub> é convertido em NO<sub>2</sub>; e que alguns órgãos ambientais, no seu processo de análise para efeito de licenciamento, consideram todo o NO<sub>x</sub> sendo convertido para NO<sub>2</sub>, conclui-se que esta consideração é bastante conservativa, sendo recomendável a execução de estudos nas diversas regiões industrializadas do país, objetivando a obtenção de parâmetros que permitam uma análise mais realista, durante os processos de licenciamento efetuados pelos órgãos ambientais.

Os órgãos de meio ambiente devem fazer gestões junto a entidades governamentais, objetivando a elaboração de uma “Rede Nacional de Dados Meteorológicos”, abrangendo as principais regiões industrializadas do País. Assim, além do conhecimento do comportamento meteorológico, de forma sistematizada; estes dados



podem ser processados, gerando um arquivo meteorológico devidamente formatado para entrada nos modelos de dispersão. Atualmente, estes dados são coletados na rede mundial, por empresas internacionais, e após a devida formatação, vendidos no país.

Os resultados obtidos através da utilização de modelos computacionais, apesar das limitações e incertezas e das condições de contorno adotadas em sua aplicação; são uma importante ferramenta para os órgãos de meio ambiente; quando da tomada de decisões relativas ao licenciamento de novos empreendimentos de usinas termelétricas. Por esta razão, cuidados especiais devem ser tomados com os dados de entrada na modelagem, principalmente, localização da fonte, dados de emissão, características geométricas da fonte, arquivo topográfico e arquivo meteorológico; de tal forma que refinando-se estes dados, restem apenas as incertezas inerentes ao modelo.

Espera-se que este trabalho seja uma contribuição acadêmica e aos órgãos ambientais, e que o mesmo possa ser utilizado como referência nos próximos estudos para licenciamento ambiental de usinas termelétricas.

## ANEXO - I

<b>USINAS TERMELÉTRICAS PROGRAMA PRIORITÁRIO</b>		
<b>USINAS EM OPERAÇÃO / TESTES</b>		
<b>USINAS</b>	<b>POT (MW)</b>	<b>LOCALIZAÇÃO</b>
TERMOCEARA	270,00	CEARA
FAFEN	54,00	BAHIA
IBIRITE	690,00	MINAS GERAIS
JUIZ DE FORA	103,00	MINAS GERAIS
ELETROBOLT	350,00	RIO DE JANEIRO
MACAÉ MERCHANT	870,00	RIO DE JANEIRO
NOVA PIRATININGA	600,00	SÃO PAULO
TERMONORTE I E II	404,00	RONDÔNIA
ARJONA	120,00	MATO G. SUL
CANOAS (REFAP)	500,00	RIO G. SUL
<b>USINAS EM CONSTRUÇÃO</b>		
FORTALEZA	307,00	CEARA
TERMOAÇU	325,00	RIO G. NORTE
TERMOPERNAMBUCO	500,00	PERNAMBUCO
TERMOBAHIA	450,00	BAHIA
CAMAÇARI	300,00	BAHIA
TERMORIO	1036,00	RIO DE JANEIRO
NORTE FLUMINENSE	778,00	RIO DE JANEIRO
ARAUCARIA	480,00	PARANA
CORUMBA	90,00	MATO G. SUL
TRES LAGOAS	240,00	MATO G. SUL
<b>USINAS COM OBRAS NÃO INICIADAS</b>		
COTEMINAS	90,00	RIO G. NORTE
PARAIBA	150,00	PARAIBA
BONGI	150,00	PERNAMBUCO
TERMOALAGOAS	150,00	ALAGOAS
TERMOSERGIPE	90,00	SERGIPE
NORTE CAPIXABA	250,00	ESPIRITO SANTO
S. GONÇALO (reativação)	193,00	RIO DE JANEIRO
CAMPOS (ampliação)	80,00	RIO DE JANEIRO
STA CRUZ (ampliação)	350,00	RIO DE JANEIRO
PARACAMBI	500,00	RIO DE JANEIRO
CCBS (Cubatão)	440,00	SÃO PAULO
DUKE ENERGY (D1)	500,00	SÃO PAULO

ANHANGUERA	270,00	SÃO PAULO
DSG - PAULÍNIA II	552,00	SÃO PAULO
TERMOGAÚCHA	500,00	RIO G. SUL
CAMPO GRANDE	237,00	MATO G. SUL
DSG - MIRIM	890,00	SÃO PAULO
<b>NOVAS USINAS A SEREM INCLUÍDAS</b>		
CARIOBA II	945,00	SÃO PAULO
RIBEIRÃO MOINHO	520,00	SÃO PAULO
<b>TOTAL GERAL</b>	<b>15.324,00</b>	

<b>USINAS TERMELÉTRICAS PROGRAMA EMERGENCIAL</b>		
<b>USINAS DISPONÍVEIS PARA OPERAÇÃO</b>		
<b>USINAS</b>	<b>POT (MW)</b>	<b>LOCALIZAÇÃO</b>
NAZÁRIA	13,10	PIAUI
MARAMBAIA	13,00	PIAUI
ALTOS	13,00	PIAUI
CAMPO MAIOR	13,00	PIAUI
ARACATI	11,40	CEARA
J. DO NORTE	13,15	CEARA
MARANGUAPE	16,00	CEARA
CAUCAIA	13,15	CEARA
D. IND. I	20,80	CEARA
D. IND. II	20,00	CEARA
PARAIPABA	12,80	CEARA
BATURITÉ	11,40	CEARA
ENGUIA PECÉM	13,15	CEARA
CRATO	13,10	CEARA
JABOTI	12,80	CEARA
COLUNA	9,60	CEARA
IGUATU	13,15	CEARA
AQUIRAZ	14,00	CEARA
PACAJUS	9,60	CEARA
CAGECE	11,40	CEARA
PARNAMIRIM	93,00	RIO G. DO NORTE
TEP	48,00	RIO G. DO NORTE
GIASA	18,00	PARAIBA
PRAZERES	4,92	PERNAMBUCO
IPOJUCA	4,92	PERNAMBUCO
RIO FORMOSO	4,20	PERNAMBUCO
JB	18,00	PERNAMBUCO
SUAPE	4,92	PERNAMBUCO
PORTO	4,92	PERNAMBUCO
CABO	4,92	PERNAMBUCO
RIO CLARO	168,00	ALAGOAS
PERI-PERI	15,50	ALAGOAS

MARITUBA	15,50	ALAGOAS
POLO	15,50	ALAGOAS
JARDIM	60,00	SERGIPE
CARRAPICHO	18,60	SERGIPE
LAGARTO	14,40	SERGIPE
BAHIA I -CAMAÇARI	30,60	BAHIA
JAGUARARI	100,40	BAHIA
CARAPINA	40,00	ESPÍRITO SANTO
PONTA DO UBÚ	36,00	ESPÍRITO SANTO
CIVIT	20,00	ESPÍRITO SANTO
TUBARÃO	40,00	ESPÍRITO SANTO
XAVANTES	48,00	GOIÁS
ARJONA (UNID.4 E 5)	68,41	MATO G. DO SUL
COCAL (1º TESTE)	18,30	SÃO PAULO
PIE-RP (1º TESTE)	4,66	SÃO PAULO
<b>USINAS EM TESTE</b>		
PETROLINA FASE 1	64,00	PERNAMBUCO
TERMOCABO	48,00	PERNAMBUCO
NE GENERATION	190,00	BAHIA
COCAL (2º TESTE)	2,70	SÃO PAULO
PIE-RP (2º TESTE)	15,34	SÃO PAULO
SETE LAGOAS	64,00	MINAS GERAIS
<b>USINAS EM IMPLANTAÇÃO</b>		
BREITENER	153,75	CEARA
PB II	40,00	CEARA
JOÃO PESSOA I	48,42	PARAÍBA
JOÃO PESSOA II	13,25	PARAÍBA
ITAENGA	20,00	PERNAMBUCO
PETROLINA FASE II	64,00	PERNAMBUCO
DAIA	44,08	GOIÁS
AURELIANO CHAVES	192,00	MINAS GERAIS
<b>TOTAL GERAL</b>	<b>2146,81</b>	

## ANEXO – II

**MEMORIAL DE CÁLCULO DA EMISSÃO DOS POLUENTES, A PARTIR DOS  
FATORES DE EMISSÃO CONSTANTES NO COMPILATION AP-42 (EPA)  
ITEM 3.1- STATIONARY GAS TURBINES**

De acordo com este documento, através das Tabelas 3.1-1 e 3.1-2a , temos os seguintes “Fatores de Emissão” para Turbinas a Gás Natural:

POLUENTE	MÉTODO DE CONTROLE	FATOR DE EMISSÃO	
		lb/10 <sup>6</sup> scf	Kg/10 <sup>6</sup> Nm <sup>3</sup>
NO <sub>x</sub>	S/Controle	326,4	5826,2
CO	S/Controle	83,64	1493,0
SO <sub>2</sub>	S/Controle	(c)	166,0
VOC <sup>(a)</sup>	S/Controle	2,1	37,5
TOC	S/Controle	11,2	200,0
MP total <sup>(b)</sup>	Injeção de vapor d'água	6,7	119,6

## NOTAS:

- (a) – Valor calculado: VOC = THC – Metano  
 (b) – Valor calculado: MP total = MP(condensável) + MP(filtrável)  
 (c) – A Portaria ANP N° 104, de 08/07/02, no Quadro I do Anexo, estabelece que o enxofre total máximo é 70 mg/m<sup>3</sup>.

## 1. FATORES DE EMISSÃO – TRANSFORMAÇÃO DE UNIDADES:

Tem-se que:

$$\begin{aligned}
 1 \text{ lb} &= 0,454 \text{ Kg} \\
 1 \text{ m}^3 &= 35,31 \text{ cf} \\
 1 \text{ cf} &= 0,02832 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

**a) Conversão de: lb/10<sup>6</sup> scf ⇒ Kg/10<sup>6</sup> Nm<sup>3</sup>**

Portanto:

$$1 \frac{\text{lb}}{10^6 \text{scf}} = 0,454 \frac{\text{Kg}}{10^6 \text{scf}} = 0,454 \frac{\text{Kg}}{10^6 \text{s} \cdot 0,02832 \text{m}^3} = 16,031 \frac{\text{Kg}}{10^6 \text{sm}^3}$$

Tem-se que:

- Condições Standard: 20 °C ; 1 atm
- Condições Normais: 0 °C ; 1 atm

Assim tem-se:

◆ Nas condições Standard:  $P \cdot V_S = n \cdot R \cdot T_S$

◆ Nas condições Normais:  $P \cdot V_N = n \cdot R \cdot T_N$

Dividindo-se a equação.....pela equação....., tem-se:

$$\frac{V_S}{V_N} = \frac{T_S}{T_N}$$

E portanto:

$$V_S = V_N \frac{T_S}{T_N} = V_N \frac{(273 + 20)}{273} = 1,073 V_N$$

Ou seja,  $1 \text{ Sm}^3 = 1,073 \text{ Nm}^3$

Então tem-se:

$$1 \frac{\text{lb}}{10^6 \text{scf}} = 16,031 \frac{\text{Kg}}{10^6 \text{sm}^3} = 16,031 \cdot 1,073 \frac{\text{Kg}}{10^6 \text{Nm}^3} = 17,20 \frac{\text{Kg}}{10^6 \text{Nm}^3}$$

E portanto:

$$1 \frac{\text{lb}}{10^6 \text{scf}} = 17,20 \frac{\text{Kg}}{10^6 \text{Nm}^3}$$

**b) Fator de Correção do Poder Calorífico: FCPC**

- Os Fatores de Emissão do AP-42 estão referidos a um Poder Calorífico Superior (PCS) de 1020 BTU/scf a 60 °F (15,56 °C).
- Do site da COMGAS obtém-se para o gás natural de seu fornecimento, Poder Calorífico Superior (PCS) de 9958 Kcal/Nm<sup>3</sup>.

O FCPC é dado por:

$$\frac{PCS_{GÁS}}{PCS_{EPA}}$$

Transformando para a mesma base, considerando:

Tem-se que:

$$\begin{aligned} 1 \text{ Kcal} &= 3,969 \text{ BTU} \\ 1 \text{ m}^3 &= 35,31 \text{ cf} \\ 1 \text{ cf} &= 0,02832 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Então tem-se:

$$PCS = 1020 \frac{\text{BTU}}{\text{scf}} = \frac{1020 \text{ Kcal}}{3,969 \text{ scf}} = \frac{1020}{3,969 \cdot 0,02832} \frac{\text{Kcal}}{\text{sm}^3}$$

$$PCS = 9075 \frac{\text{Kcal}}{\text{sm}^3}$$

$$V_S = V_N \frac{T_S}{T_N} = V_N \frac{(273+15,56)}{273} = 1,057 V_N$$

$$PCS = 9075 \frac{\text{Kcal}}{\text{sm}^3} = 9075 \cdot 1,057 \Rightarrow PCS = 9592,3 \frac{\text{Kcal}}{\text{Nm}^3}$$

Portanto:

$$FCPC = \frac{9958,0}{9592,3} = 1,038$$

E assim o Fator de Emissão torna-se:

$$1 \frac{\text{lb}}{10^6 \text{scf}} = 17,20 \cdot 1,038 = 17,85 \frac{\text{Kg}}{10^6 \text{Nm}^3}$$

## 2. ESTIMATIVA DA EMISSÃO DOS POLUENTES, POR CHAMINÉ, A PARTIR DO FATOR DE EMISSÃO:

### 2.1. CONSUMO DE COMBUSTÍVEL – INFORMAÇÕES DA CONSULTORA:

$$Q_C = 36230 \text{ Nm}^3/\text{h} \text{ (por chaminé)}$$

### 2.2. ESTIMATIVÃ DAS EMISSÕES

$$\text{a) NO}_x \Rightarrow \text{FE} = 5826,2 \text{ Kg}/10^6 \text{ Nm}^3$$

Emissão:

$$Q_{\text{NO}_x} = 5826,2 \cdot \frac{36230}{10^6} = 211,1 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} = 211,1 \cdot \frac{1000 \text{ g}}{3600 \text{ s}} = 58,6 \frac{\text{g}}{\text{s}}$$

Portanto:

$Q_{\text{NO}_x} = 58,6 \text{ g/s}$
--------------------------------------

$$\text{VALOR DA CONSULTORA: } Q_M = 25,33 \text{ g/s}$$

Embora a Consultora tenha mencionado no EIA/RIMA, que seu valor corresponde à não existência de controle, este valor apresentado pela mesma deve estar baseado em algum tipo de controle, minimizando o valor da emissão do poluente.



Por exemplo, se considerarmos injeção de vapor d'água, como método de controle, temos como fator de emissão do AP-42:

$$FE = 1,3 E(-1) \text{ lb/MMBTU} \Rightarrow 132,6 \text{ lb}/10^6 \text{ scf} \Rightarrow 2367,0 \text{ Kg}/10^6 \text{ Nm}^3$$

E portanto a emissão neste caso será:

$$Q_{\text{NOx}} = 2367,0 \cdot \frac{36230}{10^6} = 85,8 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} = 85,8 \cdot \frac{1000 \text{ g}}{3600 \text{ s}} = 23,8 \frac{\text{g}}{\text{s}}$$

Este valor é próximo do estimado pela Consultora.

$$\text{b) CO} \Rightarrow FE = 1493,0 \text{ Kg}/10^6 \text{ Nm}^3$$

Emissão:

$$Q_{\text{CO}} = 1493,0 \cdot \frac{36230}{10^6} = 54,1 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} = 54,1 \cdot \frac{1000 \text{ g}}{3600 \text{ s}} = 15,0 \frac{\text{g}}{\text{s}}$$

Portanto:

$Q_{\text{CO}} = 15,0 \text{ g/s}$
------------------------------------

VALOR DA CONSULTORA:  $Q_M = 4,41 \text{ g/s}$

Considerando a existência de controle através da injeção de vapor d'água, temos como fator de emissão do AP-42:

$$FE = 30,6 \text{ lb}/10^6 \text{ scf} \Rightarrow 546,2 \text{ Kg}/10^6 \text{ Nm}^3$$

E portanto a emissão neste caso será:

$$Q_{\text{CO}} = 546,2 \cdot \frac{36230}{10^6} = 19,8 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} = 19,8 \cdot \frac{1000 \text{ g}}{3600 \text{ s}} = 5,5 \frac{\text{g}}{\text{s}}$$

Valor próximo do estimado pela Consultora.

c) SO<sub>2</sub>

A Portaria ANP N° 104, de 08/07/02, no Quadro I do Anexo, estabelece que o enxofre total máximo é 70 mg/m<sup>3</sup> (base 20 °C e 1 atm.).

Assim, considerando que a densidade relativa do gás natural é (site da COMGAS):

$$\rho = 0,602 \text{ (Ar = 1)}$$

E que a massa específica do ar (livro Davis e Cornwell) é:

$$\rho_{\text{ar}} = 1,185 \text{ kg/m}^3, \text{ nas condições de 298 K e 1 atm}$$

Tem-se:

$$\rho_{\text{ar}} = 1,185 \cdot \frac{298}{273} \Rightarrow \rho_{\text{ar}} = 1,29 \frac{\text{Kg}}{\text{Nm}^3}$$

Assim, tem-se:

$$\rho_{\text{gás}} = 1,29 \cdot 0,602 \Rightarrow \rho_{\text{gás}} = 0,777 \frac{\text{Kg}}{\text{Nm}^3}$$

Temos que:

$$C_S = 70 \text{ mg/m}^3 \Rightarrow C_S = 70 \cdot 1,073 \Rightarrow C_S = 75,11 \text{ mg/Nm}^3$$

Em termos de porcentagem de enxofre no gás temos:

$$C_S = 75,11 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \cdot \frac{1}{0,777} \frac{\text{Nm}^3}{\text{Kg}} = 96,7 \frac{\text{mg}}{\text{Kg}} \Rightarrow C_S = 96,7 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Kgs}}{\text{KgGAS}}$$

E portanto

$$96,7 \cdot 10^{-6} \text{Kg}_S \Leftrightarrow 1 \text{Kg}_{\text{GAS}}$$

$$M_{(S)} \Leftrightarrow 10^6 \text{Kg}_{\text{GAS}}$$

Portanto:

$$M_{(S)} = 96,7 \frac{\text{Kg}_S}{10^6 \text{Kg}_{\text{GAS}}}$$

Então tem-se:

$$S (\%) = \frac{9670}{10^6} \cong 0,0097 \Rightarrow S (\%) = 0,0097 \%$$

**Do AP-42, tem-se:**

$$\mathbf{FE = 0,94 \cdot S(\%) \text{ lb/MMBtu} \Rightarrow}$$

$$\Rightarrow \mathbf{FE = 0,94 \cdot 1020 \cdot S(\%) \text{ lb}/10^6 \text{ scf} \Rightarrow \mathbf{FE = 958,8 \cdot S(\%) \text{ lb}/10^6 \text{ scf}}$$

$$\text{Então: } \mathbf{FE = 958,8 \cdot (0,0097) \Rightarrow \mathbf{FE = 9,3 \text{ lb}/10^6 \text{ scf}}$$

Conversão de:  $\text{lb}/10^6 \text{ scf} \Rightarrow \text{Kg}/10^6 \text{ Nm}^3$

$$\mathbf{FE = 9,3 \cdot 17,85 \Rightarrow \mathbf{FE = 166,0 \text{ Kg}/10^6 \text{ Nm}^3}$$

Sendo  $Q_C = 36230 \text{ Nm}^3/\text{h}$  (por chaminé); a emissão neste caso será:

$$Q_{\text{SO}_2} = 166,0 \cdot \frac{36230}{10^6} = 6,0 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} = 6,0 \cdot \frac{1000 \text{ g}}{3600 \text{ s}} = 1,67 \frac{\text{g}}{\text{s}}$$

A Consultora não considerou esta emissão em sua modelagem.

$$\mathbf{d) \text{ VOC} \Rightarrow \mathbf{FE = 37,5 \text{ Kg}/10^6 \text{ Nm}^3}$$

Emissão:

$$Q_{\text{VOC}} = 37,5 \cdot \frac{36230}{10^6} = 1,36 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} = 1,36 \cdot \frac{1000 \text{ g}}{3600 \text{ s}} = 0,38 \frac{\text{g}}{\text{s}}$$

Portanto:

$$Q_{\text{VOC}} = 0,38 \text{ g/s}$$

A Consultora não considerou esta emissão em sua modelagem.

**e) TOC  $\Rightarrow$  FE = 200,0 Kg/10<sup>6</sup> Nm<sup>3</sup>**

Emissão:

$$Q_{\text{TOC}} = 200,0 \cdot \frac{36230}{10^6} = 7,25 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} = 7,25 \cdot \frac{1000 \text{ g}}{3600 \text{ s}} = 2,0 \frac{\text{g}}{\text{s}}$$

Portanto:

$$Q_{\text{TOC}} = 2,0 \text{ g/s}$$

A Consultora considerou taxa de emissão de 1,26 g/s.

**f) MP TOTAL  $\Rightarrow$  FE = 119,6 Kg/10<sup>6</sup> Nm<sup>3</sup>**

Emissão:

$$Q_{\text{MP}} = 119,6 \cdot \frac{36230}{10^6} = 4,33 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} = 4,33 \cdot \frac{1000 \text{ g}}{3600 \text{ s}} = 1,2 \frac{\text{g}}{\text{s}}$$

Portanto:

$$Q_{\text{MP}} = 1,2 \text{ g/s}$$

A Consultora não considerou esta emissão em sua modelagem.

## QUADRO RESUMO

POLUENTE	METODO CONTROLE	FAT. EMISSÃO Kg/10 <sup>6</sup> Nm <sup>3</sup>	ESTIMATIVA - EMISSÃO (g/s)		
			CONSULTORA	AP-42	
				S/CONT	C/CONT
NO <sub>x</sub>	S/Controle	5826,2	25,33	58,6	20,7
CO	S/Controle	1493,0	4,41	15,0	4,80
SO <sub>2</sub>	S/Controle	166,0	(c)	1,67	(d)
VOC <sup>(a)</sup>	S/Controle	37,5	(c)	0,38	(d)
TOC	S/Controle	200,0	1,26	2,0	(e)
MP total <sup>(b)</sup>	Injeção de vapor d'água	119,6	(c)	1,2	(d)

## NOTAS:

- (a) – Valor calculado: VOC = THC – Metano  
 (b) – Valor calculado: MP total = MP(condensável) + MP(filtrável)  
 (c) – A Consultora não considerou esta emissão em sua modelagem.  
 (d) – Não foi feita a avaliação com controle porque não há informação suficiente para fazer a comparação.  
 (e) – O AP-42 não apresenta Fatores de Emissão para a situação sem controle, como indicado pela Consultora.

## MODELAGEM DO ESTUDO DE CASO

TAXAS DE EMISSÕES (g/s)	
Poluente	Valor
NO <sub>x</sub>	25,33 (*)
CO	4,41 (*)
SO <sub>2</sub>	1,67 (**)
VOC	0,38 (**)
TOC	1,26 (*)
MP total	1,20 (**)

(\*) – Valores da Consultora

(\*\*) – Valores estimados no Estudo de Caso, a partir do AP-42

RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO NOX - TOPOGRAFIA - METEOROLOGIA/07

NOX-97-1H-TOPOG

\*\*\* THE SUMMARY OF HIGHEST 1-HR RESULTS \*\*\*

\*\* CONC OF NOX IN MICROGRAMS/M\*\*3 \*\*

GROUP ID	DATE	AVERAGE CONC (YYMMDDHH)	RECEPTOR (XR, YR, ZELEV, ZFLAG)	NETWORK	OF TYPE	GRID-ID
SRCGP1	HIGH 1ST HIGH VALUE IS	<b>157.70343</b>	ON 97122402: AT ( 329000.00,	7375000.00,	804.00,	0.00) DC NA
	HIGH 2ND HIGH VALUE IS	142.06595	ON 97120324: AT ( 329650.00,	7375750.00,	791.00,	0.00) GC UCARTI
	HIGH 3RD HIGH VALUE IS	141.69550	ON 97042822: AT ( 329650.00,	7375750.00,	791.00,	0.00) GC UCARTI
	HIGH 4TH HIGH VALUE IS	139.92570	ON 97042902: AT ( 329650.00,	7375750.00,	791.00,	0.00) GC UCARTI
	HIGH 5TH HIGH VALUE IS	128.35632	ON 97062220: AT ( 327650.00,	7376750.00,	791.00,	0.00) GC UCARTI
	HIGH 6TH HIGH VALUE IS	128.05501	ON 97061324: AT ( 327650.00,	7376750.00,	791.00,	0.00) GC UCARTI
ALL	HIGH 1ST HIGH VALUE IS	<b>319.80731</b>	ON 97122402: AT ( 329000.00,	7375000.00,	804.00,	0.00) DC NA
	HIGH 2ND HIGH VALUE IS	289.53677	ON 97120324: AT ( 329650.00,	7375750.00,	791.00,	0.00) GC UCARTI
	HIGH 3RD HIGH VALUE IS	288.76648	ON 97042822: AT ( 329650.00,	7375750.00,	791.00,	0.00) GC UCARTI
	HIGH 4TH HIGH VALUE IS	269.52988	ON 97042902: AT ( 329650.00,	7375750.00,	791.00,	0.00) GC UCARTI
	HIGH 5TH HIGH VALUE IS	252.52007	ON 97101002: AT ( 327650.00,	7376750.00,	791.00,	0.00) GC UCARTI
	HIGH 6TH HIGH VALUE IS	251.55911	ON 97101005: AT ( 327650.00,	7376750.00,	791.00,	0.00) GC UCARTI

\*\*\* THE SUMMARY OF MAXIMUM ANNUAL ( 1 YRS) RESULTS \*\*\*

\*\* CONC OF NOX IN MICROGRAMS/M\*\*3 \*\*

GROUP ID	AVERAGE CONC	RECEPTOR (XR, YR, ZELEV, ZFLAG)	OF TYPE	GRID-ID	NETWORK
SRCGPI	1ST HIGHEST VALUE IS	3.22270 AT ( 328650.00, 7379750.00,	0.00)	GC	UCART1
	2ND HIGHEST VALUE IS	2.88435 AT ( 327650.00, 7381750.00,	0.00)	GC	UCART1
	3RD HIGHEST VALUE IS	2.88176 AT ( 327650.00, 7380750.00,	0.00)	GC	UCART1
	4TH HIGHEST VALUE IS	2.60585 AT ( 328650.00, 7380750.00,	0.00)	GC	UCART1
	5TH HIGHEST VALUE IS	2.56941 AT ( 327650.00, 7379750.00,	0.00)	GC	UCART1
	6TH HIGHEST VALUE IS	2.44952 AT ( 328650.00, 7376750.00,	0.00)	GC	UCART1
	7TH HIGHEST VALUE IS	2.32368 AT ( 327650.00, 7383750.00,	0.00)	GC	UCART1
	8TH HIGHEST VALUE IS	2.20009 AT ( 327650.00, 7382750.00,	0.00)	GC	UCART1
	9TH HIGHEST VALUE IS	2.13766 AT ( 326650.00, 7381750.00,	0.00)	GC	UCART1
	10TH HIGHEST VALUE IS	2.10702 AT ( 329650.00, 7375750.00,	0.00)	GC	UCART1
ALL	1ST HIGHEST VALUE IS	6.34041 AT ( 328650.00, 7379750.00,	0.00)	GC	UCART1
	2ND HIGHEST VALUE IS	5.68189 AT ( 327650.00, 7380750.00,	0.00)	GC	UCART1
	3RD HIGHEST VALUE IS	5.63637 AT ( 327650.00, 7381750.00,	0.00)	GC	UCART1
	4TH HIGHEST VALUE IS	5.26597 AT ( 327650.00, 7379750.00,	0.00)	GC	UCART1
	5TH HIGHEST VALUE IS	5.09282 AT ( 328650.00, 7376750.00,	0.00)	GC	UCART1
	6TH HIGHEST VALUE IS	5.08530 AT ( 328650.00, 7380750.00,	0.00)	GC	UCART1
	7TH HIGHEST VALUE IS	4.49172 AT ( 327650.00, 7383750.00,	0.00)	GC	UCART1
	8TH HIGHEST VALUE IS	4.35854 AT ( 329650.00, 7375750.00,	0.00)	GC	UCART1
	9TH HIGHEST VALUE IS	4.31384 AT ( 327650.00, 7382750.00,	0.00)	GC	UCART1
	10TH HIGHEST VALUE IS	4.23870 AT ( 326650.00, 7381750.00,	0.00)	GC	UCART1

\*\*\* THE SUMMARY OF HIGHEST 24-HR RESULTS \*\*\*

□

\*\* CONC OF NOX IN MICROGRAMS/M\*\*3 \*\*

GROUP ID	AVERAGE CONC (YYMMDDHH)	RECEPTOR (XR, YR, ZELEV, ZFLAG)	OF TYPE	GRID-ID
SRCGPI	HIGH 1ST HIGH VALUE IS	28.75685c ON 97042924: AT ( 329650.00, 7375750.00,	0.00)	GC UCART1
ALL	HIGH 1ST HIGH VALUE IS	57.20308c ON 97042924: AT ( 329650.00, 7375750.00,	0.00)	GC UCART1

\*\*\* THE 1ST HIGHEST 1-HR AVERAGE CONCENTRATION VALUES FOR SOURCE GROUP: SRCGP1 \*\*\*

INCLUDING SOURCE(S): STCK1 , STCK2 ,

DISCRETE CARTESIAN RECEPTOR POINTS

CONC OF NOX IN MICROGRAMS/M\*\*3

X-COORD (M)	Y-COORD (M)	CONC (YYMMDDHH)	X-COORD (M)	Y-COORD (M)	CONC (YYMMDDHH)
331000.00	7386000.00	53.09491 (97022406)	325300.00	7383000.00	58.07329 (97032106) □□
322800.00	7385500.00	50.97988 (97041321)	329000.00	7375000.00	157.70345 (97122402)

\*\*\* THE 1ST HIGHEST 1-HR AVERAGE CONCENTRATION VALUES FOR SOURCE GROUP: ALL \*\*\*

INCLUDING SOURCE(S): STCK1 , STCK2 , STCK3 , STCK4 ,

\*\*\* DISCRETE CARTESIAN RECEPTOR POINTS \*\*\*

\*\* CONC OF NOX IN MICROGRAMS/M\*\*3 \*\*

X-COORD (M)	Y-COORD (M)	CONC (YYMMDDHH)	X-COORD (M)	Y-COORD (M)	CONC (YYMMDDHH)
331000.00	7386000.00	106.91264 (97022406)	325300.00	7383000.00	115.83954 (97032106)
322800.00	7385500.00	102.14033 (97042801)	329000.00	7375000.00	319.80731 (97122402)



PERIODO DE AMOST.	CO - MAIORES CONCENTRAÇÕES ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )											PNQA  $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	CONSULTORA		ESTUDO DE CASO									
			ARQ. METEOROL. 97				ARQ. METEOROL. 98					
			PLANO		RELEVO		PLANO		RELEVO			
2 CH.	4 CH.	2 CH.	4 CH.	2 CH.	4 CH.	2 CH.	4 CH.	2 CH.	4 CH.	2 CH.	4 CH.	
<b>CONCENTRAÇÕES NOS RECEPTORES GENÉRICOS</b>												
<b>1º Maior valor 1 hora</b>	14,80	29,60	10,80	21,40	27,45	55,68	10,74	21,37	25,74	50,16	40.000	
<b>1ª Maior média 8 horas</b>	4,80	9,60	5,22	10,40	11,04	23,20	7,75	15,47	14,07	28,31	10.000	
<b>CONCENTRAÇÕES NOS RECEPTORES DISCRETOS</b>												
<b>CONGONHAS</b>												
<b>1º Maior valor 1 hora</b>	N/D	2,0	6,58	13,29	9,24	18,61	3,95	7,98	5,55	11,17	40.000	
<b>1ª Maior média 8 horas</b>	N/D	N/D	1,22	2,43	1,70	3,37	0,87	1,77	1,20	2,44	10.000	
<b>SANTO AMARO</b>												
<b>1º Maior valor 1 hora</b>	N/D	2,0	7,96	15,92	10,11	20,17	8,05	16,10	10,21	20,37	40.000	
<b>1ª Maior média 8 horas</b>	N/D	N/D	3,25	6,68	4,12	8,44	3,18	6,27	4,01	7,90	10.000	
<b>SHOPPING CENTER JARDIM SUL</b>												
<b>1º Maior valor 1 hora</b>	N/D	2,0	6,37	12,79	8,88	17,78	6,43	12,53	8,92	17,37	40.000	
<b>1ª Maior média 8 horas</b>	N/D	N/D	2,33	4,61	3,40	6,72	1,46	3,04	2,39	4,88	10.000	
<b>SESC INTERLAGOS</b>												
<b>1º Maior valor 1 hora</b>	N/D	14,0	9,98	19,82	27,46	55,68	8,33	16,44	21,99	45,53	40.000	
<b>1ª Maior média 8 horas</b>	N/D	N/D	3,09	6,11	8,47	17,10	2,79	5,62	6,72	13,78	10.000	

PERIODO DE AMOST.	SO <sub>2</sub> - MAIORES CONCENTRAÇÕES (µg/m <sup>3</sup> )										PNQA  µg/m <sup>3</sup>
	CONSULTORA		ESTUDO DE CASO								
			ARQ. METEOROL 97				ARQ. METEOROL 98				
	PLANO		RELEVO		PLANO		RELEVO				
2 CH.	4 CH.	2 CH.	4 CH.	2 CH.	4 CH.	2 CH.	4 CH.	2 CH.	4 CH.		
<b>CONCENTRAÇÕES NOS RECEPTORES GENÉRICOS</b>											
<b>Média 24 horas</b>	N/D	N/D	0,87	1,66	1,80	3,59	1,04	2,09	2,05	4,21	365
<b>Média Anual</b>	N/D	N/D	0,16	0,31	0,21	0,41	0,15	0,30	0,19	0,38	80
<b>CONCENTRAÇÕES NOS RECEPTORES DISCRETOS</b>											
<b>CONGONHAS</b>											
<b>Média 24 horas</b>	N/D	N/D	0,158	0,306	0,203	0,403	0,135	0,275	0,187	0,379	365
<b>Média Anual</b>	N/D	N/D	0,016	0,032	0,019	0,038	0,005	0,010	0,006	0,012	80
<b>SANTO AMARO</b>											
<b>Média 24 horas</b>	N/D	N/D	0,435	0,867	0,541	1,076	0,568	1,115	0,715	1,401	365
<b>Média Anual</b>	N/D	N/D	0,073	0,145	0,085	0,171	0,057	0,113	0,065	0,129	80
<b>SHOPPING CENTER JARDIM SUL</b>											
<b>Média 24 horas</b>	N/D	N/D	0,272	0,539	0,422	0,832	0,244	0,514	0,389	0,802	365
<b>Média Anual</b>	N/D	N/D	0,038	0,076	0,069	0,138	0,031	0,061	0,051	0,103	80
<b>SESC INTERLAGOS</b>											
<b>Média 24 horas</b>	N/D	N/D	0,400	0,805	0,930	1,901	0,506	1,023	1,068	2,191	365
<b>Média Anual</b>	N/D	N/D	0,056	0,115	0,088	0,181	0,042	0,086	0,069	0,141	80



PERÍODO DE AMOST.	PTS - MAIORES CONCENTRAÇÕES ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )										PNQA $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	CONSULTORA		ESTUDO DE CASO								
			ARQ. METEOROL 97				ARQ. METEOROL 98				
			PLANO		RELEVO		PLANO		RELEVO		
2 CH.	4 CH.	2 CH.	4 CH.	2 CH.	4 CH.	2 CH.	4 CH.	2 CH.	4 CH.		
<b>CONCENTRAÇÕES NOS RECEPTORES GENÉRICOS</b>											
<b>Média 24 horas</b>	N/D	N/D	0,63	1,21	1,36	2,71	0,86	1,73	0,89	1,67	240
<b>Média Anual</b>	N/D	N/D	0,12	0,23	0,15	0,30	0,11	0,22	0,14	0,28	80
<b>CONCENTRAÇÕES NOS RECEPTORES DISCRETOS</b>											
<b>CONGONHAS</b>											
<b>Média 24 horas</b>	N/D	N/D	0,121	0,234	0,157	0,314	0,105	0,214	0,103	0,194	240
<b>Média Anual</b>	N/D	N/D	0,013	0,025	0,015	0,029	0,004	0,008	0,005	0,009	80
<b>SANTO AMARO</b>											
<b>Média 24 horas</b>	N/D	N/D	0,332	0,663	0,414	0,823	0,438	0,861	0,271	0,508	240
<b>Média Anual</b>	N/D	N/D	0,055	0,111	0,065	0,130	0,043	0,086	0,049	0,098	80
<b>SHOPPING CENTER JARDIM SUL</b>											
<b>Média 24 horas</b>	N/D	N/D	0,216	0,429	0,334	0,659	0,196	0,414	0,219	0,407	240
<b>Média Anual</b>	N/D	N/D	0,030	0,060	0,055	0,110	0,024	0,048	0,040	0,081	80
<b>SESC INTERLAGOS</b>											
<b>Média 24 horas</b>	N/D	N/D	0,302	0,607	0,704	1,437	0,377	0,762	0,461	0,886	240
<b>Média Anual</b>	N/D	N/D	0,042	0,085	0,066	0,135	0,032	0,065	0,052	0,106	80

PERÍODO DE AMOST.	VOC - MAIORES CONCENTRAÇÕES ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )										PNQA $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	CONSULTORA		ESTUDO DE CASO								
			ARQ. METEOROL. 97				ARQ. METEOROL. 98				
			PLANO		RELEVO		PLANO		RELEVO		
2 CH.	4 CH.	2 CH.	4 CH.	2 CH.	4 CH.	2 CH.	4 CH.	2 CH.	4 CH.		
<b>CONCENTRAÇÕES NOS RECEPTORES GENÉRICOS</b>											
<b>1º Maior valor 1 hora</b>	N/D	N/D	0,93	1,84	2,37	4,80	0,93	1,84	2,22	4,32	---
<b>Média 24 horas</b>	N/D	N/D	0,20	0,38	0,43	0,86	0,27	0,55	0,28	0,53	---
<b>Média Anual</b>	N/D	N/D	0,04	0,07	0,05	0,10	0,04	0,07	0,04	0,09	---
<b>CONCENTRAÇÕES NOS RECEPTORES DISCRETOS</b>											
<b>CONGONHAS</b>											
<b>1º Maior valor 1 hora</b>	N/D	N/D	0,57	1,15	0,80	1,60	0,34	0,69	0,48	0,96	---
<b>Média 24 horas</b>	N/D	N/D	0,04	0,07	0,05	0,10	0,03	0,07	0,03	0,06	---
<b>Média Anual</b>	N/D	N/D	0,004	0,008	0,005	0,009	0,001	0,003	0,001	0,003	---
<b>SANTO AMARO</b>											
<b>1º Maior valor 1 hora</b>	N/D	N/D	0,69	1,37	0,87	1,74	0,69	1,39	0,88	1,76	---
<b>Média 24 horas</b>	N/D	N/D	0,11	0,21	0,13	0,27	0,14	0,27	0,09	0,16	---
<b>Média Anual</b>	N/D	N/D	0,02	0,04	0,02	0,04	0,01	0,03	0,02	0,03	---
<b>SHOPPING CENTER JARDIM SUL</b>											
<b>1º Maior valor 1 hora</b>	N/D	N/D	0,55	1,10	0,76	1,53	0,55	1,08	0,77	1,50	---
<b>Média 24 horas</b>	N/D	N/D	0,07	0,14	0,11	0,21	0,06	0,13	0,07	0,13	---
<b>Média Anual</b>	N/D	N/D	0,01	0,02	0,02	0,03	0,01	0,02	0,01	0,03	---
<b>SESC INTERLAGOS</b>											
<b>1º Maior valor 1 hora</b>	N/D	N/D	0,86	1,71	2,37	4,80	0,72	1,42	1,90	3,92	---
<b>Média 24 horas</b>	N/D	N/D	0,10	0,19	0,22	0,45	0,12	0,24	0,15	0,28	---
<b>Média Anual</b>	N/D	N/D	0,01	0,03	0,02	0,04	0,01	0,02	0,02	0,03	---



PERIODO DE AMOST.	TOC - MAIORES CONCENTRAÇÕES ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )										REF.  $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	CONSULTORA		ESTUDO DE CASO								
			ARQ. METEOROL 97				ARQ. METEOROL 98				
	PLANO		RELEVO		PLANO		RELEVO				
2 CH.	4 CH.	2 CH.	4 CH.	2 CH.	4 CH.	2 CH.	4 CH.	2 CH.	4 CH.		
<b>CONCENTRAÇÕES NOS RECEPTORES GENÉRICOS</b>											
<b>1ª Maior Média 3 horas</b>	1,41	2,82	2,98	5,94	5,46	10,83	3,00	5,98	5,95	11,92	160
<b>CONCENTRAÇÕES NOS RECEPTORES DISCRETOS</b>											
<b>CONGONHAS</b>											
<b>1ª Maior Média 3 horas</b>	N/D	0,2	0,63	1,27	0,88	1,77	0,62	1,26	0,87	1,77	160
<b>SANTO AMARO</b>											
<b>1ª Maior Média 3 horas</b>	N/D	0,2	1,33	2,65	1,70	3,37	1,15	2,32	1,46	2,92	160
<b>SHOPPING CENTER JARDIM SUL</b>											
<b>1ª Maior Média 3 horas</b>	N/D	0,2	1,11	2,23	1,59	3,17	0,92	1,83	1,27	2,49	160
<b>SESC INTERLAGOS</b>											
<b>1ª Maior Média 3 horas</b>	N/D	1,8	1,33	2,71	3,27	6,79	1,36	2,78	3,50	7,33	160

**LISTA DE REFERÊNCIAS**

- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Portarias Interministeriais, do MME, SNE, DNAEE E RESOLUÇÕES DA ANEEL.** Período de Jan. 1987 a Ago. 2000. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em:17/07/01.
- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Mercado de Energia.** Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em:22/10/02.
- ASSUNÇÃO, J.V. **Dispersão Atmosférica.** Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo. 19p. 1995.
- BEYCHOK, M.R. **Error Propagation in Air Dispersion Modeling.** Disponível em: <[www.air-dispersion.com/feature.html](http://www.air-dispersion.com/feature.html)>. Acesso em: 29/04/02.
- BRAGA, B. et al. **Introdução à Engenharia Ambiental.** 1ª Edição. São Paulo. Prentice Hall. 2002. 305p. ISBN 85-97918-05-2.
- CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Relatório de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo – 2001.** São Paulo. CETESB. 2002. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br>>. Acesso em: 06/09/01.
- CUNHA, F. J. Aspectos Técnicos de Projetos de Geração Termelétrica a Gás Natural. in. Workshop – Geração Termelétrica a Gás Natural. 25-28/06/01. Porto Alegre. R.S.
- DAVIS,M.L.; CORNWELL,D.A. **Introduction to Environmental Engineering.** Third Edition. Boston. McGraw-Hill. 1998. 919p. ISBN 0-07-015918-1.
- DIXON, J. et al. **Sensitivity of Nitrogen Dioxide Concentrations to Oxides of Nitrogen Controls in the United Kingdom.** Atmospheric Environment v.35, p.3715-3728. 2001.
- ELETRORÁS. **Instrumentos Legais de Interesse de Empreendimentos Elétricos.** Rio de Janeiro. Mar. 1999. Disponível em: <<http://www.eletroras.gov.br>>. Acesso em: 23/06/99.
- ELETRORÁS. COMITÊ TÉCNICO PARA ESTUDOS DE MERCADO. **Projeção do Mercado e da Carga Própria de Energia Elétrica. Relatório Síntese 2000-2010.** Dez/2000. Disponível em: <<http://www.eletroras.gov.br>>. Acesso em: 04/06/01.
- EMPLASA-Empresa Metropolitana de Planejamento da Grande São Paulo S/A. **Levantamento Aerofotogramétrico. Plantas de Articulação.** São Paulo, S.P. Escala 1:10.000. 2002.
- ESCOLA POLITÉCNICA DA USP. Serviço de Bibliotecas. **Diretrizes para Apresentação de Dissertações e Teses.** 2ª ed. São Paulo. 2001. 39p.

- FRUEHAUF, G.L.C. **A Proporção NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>, Licenciamento Ambiental e Saúde Pública.** Global Conference ILIAPRA/ABEPPOLAR, São Paulo, 23-25 de outubro de 2002.
- GOLDEMBERG, J. **Projeto de Fornecimento de Instrumentos para a Elaboração de Matriz Energética Nacional.** Revista Economia & Energia, n.22, Set.-Out. 2000. ISSN 1518-2932. Disponível em: <[http://www.ecen.com/matriz/matriz2/projeto\\_me.htm](http://www.ecen.com/matriz/matriz2/projeto_me.htm)>. Acesso em: 16/09/01
- GUIMARÃES, E.T. **Sistemas de Cogeração.** Disponível em <<http://www.gasnet.com.br/>>. Acesso em 24/11/01.
- HERMAN, M.N. **Estimating Long Term Ground Level Concentrations of SO<sub>2</sub> from Short Term Peak Data.** Journal of the Air Pollution Control Association V. 30, n6, p.676-678. 1980.
- HIDRELÉTRICAS. **Estudo Mostra Potencial de Poluição.** Revista Saneamento Ambiental, n.83, dez./jan 2002.
- JAAKKO PÖYRY ENGENHARIA. **Relatório de Impacto Ambiental - RIMA da Central de Cogeração da Baixada Santista-CCBS.** São Paulo, Brasil. 2000.
- LORA, E.S. **Prevenção e Controle da Poluição nos Setores Energético, Industrial e de Transporte.** Brasília. ANEEL. 2000. ISBN 85 – 87491-04-0.
- MAIN ENGENHARIA S/A. **Relatório de Impacto Ambiental - RIMA das Unidades 5 e 6 da Usina Termelétrica de Piratininga.** São Paulo, Brasil. out. 1997.
- MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. **Balço Energético Nacional - 1970/1998.** Disponível em: < <http://www.mme.gov.br> >. Acesso em: 17/07/01
- MORGADO, R. R. **Experiências Recentes em Licenciamento Ambiental de Projetos de Geração Termelétrica a Gás Natural.** Workshop-Geração Termelétrica a Gás Natural. 25 a 28/06/01. Porto Alegre, Rio G. do Sul.
- NEGRI, J.C. **Modelo Preditivo da Emissão e Dispersão do NO<sub>x</sub> Gerado em Usinas Termoelétricas como Instrumento de Análise de Inserção e Capacidade de Suporte Regional da Qualidade do Ar.** 2002. 234p. Tese de Doutorado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo.
- OLIVEIRA, S.; SAGULA, M.A.L.A.; BRUNI, A.C. **Estudo Preliminar sobre Parâmetros Meteorológicos Críticos para Dispersão de Poluentes Utilizando a Sonda Acústica.** Revista DAE, v.44, n.137, p.154-164. 1984.
- OLIVEIRA, S. **O Efeito da Camada de Mistura na Poluição do Ar.** Revista Ambiente, v.3, n.1, p.46-51. 1989.

OLIVEIRA, A.P. **Estudo da Dinâmica da CLP em Regiões Tropicais e Subtropicais.** VII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, Mudanças Climáticas e Meio Ambiente, v.II, São Paulo, 1992. Anais. s.n. p.432.

PETROBRAS. **Balço Energético Nacional – 1970/1998.** Disponível em: <[www.petrobras.com.br/portugue/canalcli/book8.html](http://www.petrobras.com.br/portugue/canalcli/book8.html)>. Acesso em: 23/05/01.

RECHOME – **Tudo sobre Poluição Atmosférica.** 2002. Disponível em: <<http://www.terravista.pt/copacabana/3825/>>. Acesso em: 13/10/02

SALDIVA, P.H.N. **Efeitos dos Poluentes Sobre o Sistema Respiratório.** Laboratório de Poluição Atmosférica Experimental. Faculdade de Medicina da USP. Biblioteca da CETESB. 1991.

SEIBERT, et al. **Review and Intercomparison of Operational Methods for the determination of the Mixing Height.** Atmospheric Environmental, 34, p.1001-1027. 2002.

SHARAN, M.; SING, M.P.; YADAV, A.K. **Mathematical Model for Atmospheric Dispersion in Low Winds With Eddy Diffusivities as Linear Functions of Downwind Distance.** Atmospheric Environment V.30, n.7, p.1137-1145. 1996.

TURNER, D.B. **Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates: An Introduction to Dispersion Modeling.** Second Edition. Boca Raton. Lewis. 1994. 120 pag. ISBN I – 56670-023-X.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. **User's Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models. Volume I e Volume II.** 1995. Disponível em: <<http://www.epa.gov>>. Acesso em: 03/11/00.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. **Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume 1-Stationary Point and Areas Sources. Publication No. AP-42.** 2000. Disponível em: <<http://www.epa.gov>>. Acesso em: 09/09/02

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. **Appendix "W" to Part 51- Guideline on Air Quality Models - 40 CFR Ch. I (7-1-99 Edition).** Disponível em: <<http://www.epa.gov>>. Acesso em 27/10/02.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA. **National Ambient Air Quality Standards.** Disponível em: <<http://www.epa.gov>>. Acesso em: 13/02/01.

VENKATRAM, A. **An Examination of the Pasquill-Gifford-Turner Dispersion Scheme.** Atmospheric Environment V.30, n.8, p.1283-1290. 1996.



ZLATEV, Z. **Environmental Science and Technology Library: Computer Treatment of Large Air Pollution Models.** First Edition. London. Kluwer Academic Publishers. 1995. 358 pag. Volume 2. ISBN: 0-7923-3328-4.

#### **BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA (Complementar)**

ALSTOM. **Ammonia-Free Catalytic Absorption Systems for NO<sub>x</sub> Abatement.** Disponível em: <<http://www.apcnoxcontrol.com/sconox/docs/alstom.pdf>>. Acesso em: 20/09/02.

BORN ENVIRONMENTAL SERVICES, INC. USA. **Selective Catalytic Reduction.** Disponível em: <<http://www.bornenvironmental.com/scr.html>>. Acesso em: 22/09/02.

BROWN M.J.; ARYA,S.P. **Plume Descriptors Derived from a Non-Gaussian Concentration Model.** Atmospheric Environment v.31, n.2, p.183-189, 1997.

CAI,X.M. **Dispersion of a Passive Plume in na Idealised Urban Convective Boundary Layer: A Large-Eddy Simulation.** Atmospheric Environment 34, p.61-72, 2000. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/atmosenv>>. Acesso em: 23/08/02.

CALVERT, J.G. **SO<sub>2</sub>, NO and NO<sub>2</sub> Oxidation Mechanisms: Atmospheric Considerations.** Acid Precipitation Series, v.3. John I. Teasley, Series Editor.

CARVALHO, J.C.; VELHO, H.F.C.; DEGRAZIA,G.A. **Parametrização do Transporte Turbulento de Contaminantes na Camada Limite Convectiva.** In: XVIII CONGRESSO NACIONAL DE MATEMÁTICA APLICADA E COMPUTACIONAL, v.1, Curitiba, PR, 1995. Anais. s.n. p.278.

CATALYTICA ENERGY SYSTEMS. USA. **Xonon – How it Works.** Disponível em: <[http://www.catalyticaenergy.com/xonon/how\\_it\\_works.html](http://www.catalyticaenergy.com/xonon/how_it_works.html)>. Acesso em: 18/09/02.

CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Implementação de um Programa de Prevenção à Poluição.** Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br>>. Acesso em: 04/07/00

COOKE, R.M. **Uncertainty Modeling: Examples and Issues.** Safety Science, V. 26, n.1/2, p. 40 a 60, 1997.

CZARNECKI,L. et al. **SCONOX – Ammonia Free NO<sub>x</sub> Removal Technology For Gas Turbines.** Proceedings of 2000 International Joint Power Generation Conference, Miami Beach, Florida, July 23-26, 2000. Disponível em: <<http://asme.pinetec.com/ijpgc2000/data/pdfs/15032.pdf>>. Acesso em: 20/09/02.

DABBERDT, W.F.; MILLER, E. **Uncertainty, Ensembles and Air Quality Dispersion Modeling: Applications and Challenges.** Atmospheric Environment 34, p.4667-4673, 2000. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/atmosenv>>. Acesso em: 16/11/02

DEGRAZIA, G.A. et al. **Parâmetros de Dispersão em Camada Limite Convectiva.** In: VII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, Mudanças Climáticas e Meio Ambiente, v.II, São Paulo, SP, 1992. Anais. s.n. p.460.

ECOLOGY AND ENVIRONMENTAL, INC. **Relatório Ambiental Preliminar - RAP da Usina Termoeletrica de Jundiá da Bom Jardim Energética.** São Paulo, Brasil. Out. 1998.

EMEIS, S.M. **Numerical Dispersion Models for Emission Monitoring by Spectroscopic Remote Sensing Methods.** Proceedings of Spectroscopic Atmospheric Monitoring Techniques, LASER '97, München 19-20/06/1997, SPIE Vol. 3106, 120-127. ISBN 0-8194-2527-3.

FADIGAS, E.A.F.A. et al. **Estudo de Localização de Termoeletricas no Estado de São Paulo.** In: XV SNPTEE-SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 17 a 22/10/99, Foz do Iguaçu, Brasil. Anais. s.n.

GASSMANN, M.I.; MAZZEO, N.A. **Nocturnal Stable Boundary Layer Height Model and its Application.** Atmospheric Research 57, p.247-259, 2001. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/atmos>>. Acesso em: 05/05/02

JAAKKO PÖYRY ENGENHARIA. **Relatório Ambiental Preliminar - RAP da Termoeletrica Duke Energy 1 Brasil em Pederneiras.** São Paulo, Brasil. Mai. 2000.

JAAKKO PÖYRY ENGENHARIA. **Relatório Ambiental Preliminar - RAP da Termoeletrica ELETROGER – Central Termoeletrica do vale do Paraíba.** São Paulo, Brasil. Abr. 1999.

MASTERS, G.M. **Introduction to Environmental Engineering and Science.** Second Edition. New Jersey. Prentice Hall. 1997. ISBN 0-13-155384-4.

MPS-GESTÃO DA QUALIDADE E DO MEIO AMBIENTE. **Relatório Ambiental Preliminar - RAP da Termoeletrica da EnergyWorks do Brasil/ Rhodia em Paulínia.** São Paulo, Brasil. Jun. 2000.

NEGRI, J.C.; VIEIRA, S. **As Emissões de Poluentes nas Usinas Termoeletricas a Gás Natural: Um Estudo de Caso.** In: XV SNPTEE-SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 17 a 22/10/99, Foz do Iguaçu, Brasil. Anais. s.n.

- NEGRI, J.C.; VIEURA, S.; JUNIOR, S.O. **Avaliação Termoeconômica como Fator Comparativo entre Configurações de Usinas Termoelétricas.** In: XV SNPTEE-SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 17 a 22/10/99, Foz do Iguaçu, Brasil. Anais. s.n.
- NETO, E.C. et al. **Análise da Inserção de Usinas Termoelétricas no Sistema Integrado.** In: XIV SNPTEE-SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 1997, Belém, Pará, Brasil. Anais. s.n.
- NETO, A.J.S. et al. **Modelo de Análise para Seleção e Localização de Usinas Termelétricas - SAEGE.** In: XIV SNPTEE-SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 1997, Belém, Pará, Brasil. Anais. s.n.
- PETERSEN, R.L. et al. **Effect of a Nearby Hill on Good Engineering Practice Stack Height.** 86<sup>th</sup> Annual AWMA Conference, Denver, Colorado, June 14-18, 1993.
- PIELKE, R.A. **The Need to Assess Uncertainty in Air Quality Evaluations.** Atmospheric Environment V.32, n.8, p.1467-1468, 1998.
- PROJEC – PROJETOS E CONSULTORIA S/C LTDA. Projetos e Consultoria S/C Ltda. **Relatório Ambiental Preliminar - RAP da Termelétrica CVE – Soc. Valparaense de Energia Ltda.** São Paulo, Brasil. Ago. 2000.
- RABL, A.; SPADARO, J.V. **Damages and Costs of Air Pollution: An Analysis of Uncertainties.** Environmental International, V. 25, n.1, p. 29 a 46, 1999.
- RAMOS, D.S.; ENNES, S.A.W.; PAULA C.P. **Aspectos Práticos e Conceituais à Inserção de Usinas Termelétricas a Gás Natural no Parque Gerador Interligado Sul/Sudeste/Centro-Oeste Brasileiro.** In: XIV SNPTEE-SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 1997, Belém, Pará, Brasil. Anais. s.n.
- SCHLÜNZEN, K.H. **On the Validation of High-Resolution Atmospheric Mesoscale Models.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 67&68, p.479-492, 1997.
- SEWELL, G.H. **Administração e Controle da Qualidade Ambiental.** Trad. De Gildo Magalhães dos Santos Filho. São Paulo: E.P.U. – Editora Pedagógica e Universitária Ltda. 1978. 295p.
- SOUTH COAST AIR QUALITY MANAGEMENT DISTRICT. USA. **White Paper on Stabilization of NO<sub>x</sub> x RTC Prices.** Jan. 11, 2001. Disponível em: <<http://www.envinfo.com/Releases/NOxPaper.PDF>>. Acesso em: 22/09/02.
- STERN, A.C. **Air Pollution. Second Edition. New York. National Center for Air Pollution Control – United States.** 1968. 694 pag. Volume I e II.

SYSTEMS APPLICATIONS INTERNATIONAL. **Effect of Neglecting Elevated Terrain. Attachment 7.** Revised Final Report. February, 1998. Disponível em: <<http://www.epa.gov/cumulativeexposure/CEPppts/att/.pdf>>. Acesso em: 17/12/02.

ULKE, A.G. **New Turbulent Parameterization for a Dispersion Model in the Atmospheric Boundary Layer.** Atmospheric Environment 34, p.1029-1042, 2000. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/atmosenv>>. Acesso em: 19/09/01.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. **Guidance on the Application of Refined Dispersion Models for Air Toxics Releases.** Disponível em: <<http://www.epa.gov>>. Acesso em: 07/08/01