

LEONEL BALTAZAR DUARTE CANELAS
Engenheiro Químico-Industrial

DISPERSÃO DE GASES POLUENTES
NA ÁREA DE SINES

AVALIAÇÃO E CALIBRAÇÃO DE UM
MODELO MATEMÁTICO GAUSSIANO

Dissertação especialmente escrita para efeitos da prestação de
provas de Doutoramento na Faculdade de Ciências e Tecnologia
da Universidade Nova de Lisboa.

LISBOA
1983

ÍNDICE GERAL

	Pág.
AGRADECIMENTO	ix
SUMÁRIO	xi
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 Uma Filosofia de Acção	2
1.2 A Poluição Atmosférica no Contexto do Dilema Desenvolvimento Industrial - - Qualidade de Vida	5
1.3 Possíveis Soluções do Problema	8
1.4 A Posição de Portugal	11
1.5 Os Modelos Matemáticos de Simulação e a Área Industrial de Sines	14
1.5.1 A Área Urbano-Industrial de Sines ..	14
1.5.2 Uma Estratégia de Planeamento e Controlo	15
1.5.3 A Necessidade de Aplicação de Modelos Matemáticos de Simula- ção da Poluição Atmosférica	16

	Pág.
CAPÍTULO 2 - OBJECTIVOS E ÂMBITO DESTA DISSERTAÇÃO	18
2.1 Objectivos	19
2.2 Oportunidade e Eventual Interesse do Trabalho	21
2.3 Acções Desenvolvidas e Investigação Realizada	24
 CAPÍTULO 3 - POLUENTES ATMOSFÉRICOS	 26
3.1 Principais Poluentes Atmosféricos	27
3.2 Efeitos na Atmosfera	28
3.3 Efeitos nos Materiais	29
3.4 Efeitos na Vegetação, Cereais e Florestas ...	32
3.5 Efeitos Biológicos	38
3.6 Efeitos na Saúde Humana	42
 CAPÍTULO 4 - OS MODELOS MATEMÁTICOS DE SIMULAÇÃO DO TRANSPORTE E DIFUSÃO DE POLUENTES NA ATMOSFERA	 49
4.1 Preâmbulo	50
4.2 A Equação da Difusão e Transporte de Poluentes	52
4.2.1 Modelos Gaussianos	54
4.2.2 Modelos Numéricos do Tipo K Constante.	55
4.2.2.1 Modelos Tipo Caixa (Box models)	58
4.2.3 Modelos Estatísticos	59

	Pág.
4.3 A Formulação Gaussiana do Transporte e Difusão de Gases na Atmosfera	64
4.3.1 Características Essenciais e Expressões Analíticas	64
4.3.2 Os Valores de σ_y e σ_z e a Estabilidade da Atmosfera. Classes de Estabilidade	68
4.3.3 As Equações de Elevação da Pluma	73
4.3.3.1 A Expressão de Holland	74
4.3.3.2 As Expressões de Briggs	75
4.3.3.3 As Expressões de Bringfelt...	78
4.3.3.4 As Expressões de Montgomery e Colaboradores	79
4.3.4 Correções para a Velocidade do Vento em Altitude e Tempo de Amostragem..	81
4.3.5 Concentração Máxima a Nível do Solo ..	82
4.3.6 Cenários com Inversões	84
4.3.7 Modificações para Adaptação ao Cálculo de Concentrações Anuais	85
4.3.8 Outras Expressões Gaussianas	87
4.4 Os Modelos Gaussianos	89
4.4.1 Estado Actual dos Conhecimentos	89
4.4.1.1 Modelo CRSTER	92
4.4.1.2 Modelo MPTEP	94

	Pág.
4.4.1.3 Modelo RAM	95
4.4.1.4 Modelo ISC	98
4.4.1.5 Modelo CDM	104
4.4.1.6 Modelo TCM	107
4.4.1.7 Modelo APMAX	109
4.4.1.8 Modelo PTMTP	110
4.4.1.9 Modelo PTMAX	110
4.4.1.10 Modelo TEM	110
4.4.1.11 Modelo PAL	112
4.4.1.12 Outros Modelos	113
4.4.2 Selecção do Modelo a Utilizar	114
CAPÍTULO 5 - TEXAS CLIMATOLOGICAL MODEL - T.C.M.	118
5.1 O Algoritmo; Pressupostos e Modificações para Rapidez de Cálculos	119
5.2 Os Coeficientes de σ_2	131
5.3 Função de Frequências Meteorológicas	133
5.4 Velocidades de Vento	134
5.5 Equações de Elevação da Pluma	136
5.6 Taxa de Decomposição do Poluente	138
5.7 Os Valores Numéricos do Factor K	140
5.8 Fontes Dispersas numa Área	144
5.9 Fontes Pontuais Tipo "Flare"	145
5.10 Os Inputs Necessários para Aplicação e Avaliação do T.C.M.	147

	Pág.
CAPÍTULO 6 - DETERMINAÇÃO DOS NÍVEIS DE CONCENTRAÇÕES DE DIÓXIDO DE ENXOFRE NO AR AMBIENTE	149
6.1 Rede de "Monitoring"	150
6.2 Aparelhagem de Investigação das Concentrações..	154
6.2.1 Instrumentos de Medida de Dióxido de Enxofre	155
6.2.2 Calibradores e Tubos de Permeação	162
6.3 Programa de "Monitoring"	165
6.4 Resultados das Medições de Concentrações e Parâmetros Meteorológicos	168
 CAPÍTULO 7 - TECNOLOGIAS E PROCESSOS FABRIS DA ÁREA DE SINES	 196
7.1 Malha Industrial	197
7.2 Refinaria e Central Térmica	198
7.3 Complexo Petroquímico	207
 CAPÍTULO 8 - CARACTERIZAÇÃO QUANTITATIVA DAS EMISSÕES INDUSTRIAIS DE DIÓXIDO DE ENXOFRE. INVENTÁRIO DE EMISSÕES	 213
8.1 Emissões da Refinaria	214
8.1.1 Condições de Exploração	214
8.1.2 Inventário Quantitativo das Emissões de SO ₂ da Refinaria	221

	Pág.
8.2 Emissões do Complexo Petroquímico	228
8.2.1 Condições de Exploração	228
8.2.2 Inventário Quantitativo das Emissões de SO ₂ do Complexo Petroquímico	237
8.3 Input Global para o Modelo TCM	242
 CAPÍTULO 9 - SIMULAÇÕES MATEMÁTICAS COM O MODELO DE TRAN <u>S</u> PORTE E DIFUSÃO DE GASES	 256
9.1 Investigação das Concentrações Previstas pelo Texas Climatological Model, através de um Computador UNIVAC 1100	257
9.1.1 Apuramento Metodológico	257
9.1.2 Criação de Novas Funções de Frequências para as Quatro Estações do Ano em Sines O Programa STARCAN	259
9.2 Output do Computador	270
9.3 Resultados Finais das Simulações Matemáticas ..	275
 CAPÍTULO 10 - AVALIAÇÃO E CALIBRAÇÃO DO TEXAS CLIMATOLO- GICAL MODEL	 279
10.1 O Problema de Avaliação e Validação dos Mode- los de Simulação do Transporte e Difusão de Gases na Atmosfera	280

	Pág.
10.2 Investigações Anteriores	284
10.2.1 Investigação de Koch e Fisher (138) em Nova York	285
10.2.2 Investigação de Braig (139) em Frankfurt	285
10.2.3 Investigação de Porter e Christian- sen (110) em Frankfurt	285
10.2.4 Investigação de Prahm e Christensen (140) em Copenhaga	288
10.3 A investigação de Sines de 1979 a 1982	290
10.3.1 As Observações Experimentais	291
10.3.2 O Inventário de Emissões	292
10.3.3 As Simulações com o TCM. Utilização de Alguns Apuramentos Metodológicos.	293
10.3.3.1 Correções de Cotas, Rela- tivas aos Receptores	294
10.3.3.2 Utilização de um Novo Con- junto de Dados Meteorolôgi- cos mais Adaptados à Real- dade de Sines	294
10.3.3.3 Utilização da Metodologia Sugerida pelo Texas Air Control Board para Simula- ção da "Flare"	295
10.3.3.4 A Localização das Estações de Medida em Relação aos Emissores	296
10.3.4 Comparação dos Resultados Observa- dos Experimentalmente com os Resul- tados Previstos pelo TCM. Avaliação e Calibração do Modelo ...	298

	Pág.
CAPÍTULO 11 - CONCLUSÕES. CONSIDERAÇÕES FINAIS	324
11.1 Conclusões	325
11.2 Considerações Finais	329
Anexo I - Outras Expressões Gaussianas do Transporte e Difusão de Gases	332
Anexo II - Análise Matemática da Sensibilidade da Concentração aos Diversos Parâmetros da Expressão Gaussiana	334
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	340
ÍNDICE DE FIGURAS	355
ÍNDICE DE QUADROS	359
ÍNDICE DE AUTORES	365

AGRADECIMENTO

A realização deste trabalho não teria sido possível sem o apoio e o estímulo de pessoas e instituições que não poderíamos deixar de referir.

Ao Senhor Engenheiro António da Silva Martins, primeiro Director do Gabinete da Área de Sines, a expressão da nossa admiração pela visão larga e esclarecida que revelou e o nosso agradecimento pelo apoio decidido que quis e soube dar ao autor e à equipa que lançou naquela área as acções preliminares de controlo e preservação do Ambiente - e de que esta tese acaba por ser um dos resultados.

Ao Professor José Filipe dos Santos Oliveira agradecemos profundamente o incentivo e o apoio - valiosos e constantes - para a elaboração desta dissertação, sem os quais ela não teria sido realizada.

Ao Professor Luís Soares Barreto exprimimos o nosso recohecimento pelo tempo connosco dispendido e em particular pelo apoio, esclarecida orientação e múltiplos conselhos que nos transmitiu.

Aos Drs. Calejo Monteiro e Ana Morais e Engenheiros Francisco Barracha e Lopes Rosa muito em especial, e a toda a equipa que, desde 1974, colaborou connosco com amizade e dedicação - com destaque para o Engenheiro João Távora - o nosso agradecimento pela valiosa colaboração prestada.

Referimos também a abertura e as facilidades concedidas pelos Conselhos de Cerência do Gabinete da Área de Sines, Pe-

trogal E.P. e Companhia Nacional de Petroquímica, E.P. na realização desta dissertação. Em particular salientamos o apoio dos Senhores Engenheiros Carlos Capelão, Martins Lindo e Vanda de Carvalho facultando-nos dados tecnológicos e achegas importantes no decurso de diálogos sobre os processos fabris.

A Mr. Richard Porter, Dr. Joseph Pennington e Mr. Donald Walters do Texas Air Control Board e da United States Environmental Protection Agency, a nossa gratidão pelo tempo conosco dispendido nos seus departamentos nos Estados Unidos e pelo muito que nos ensinaram com os seus conselhos.

Ao reitor do College of Engineering da Universidade do Texas, Dr. Ernest Gloyna e ao Dr. Davis Ford da mesma Universidade a gratidão pelo apoio recebido durante a nossa estadia na Universidade do Texas e que se vem consolidando na Amizade que nos liga há vários anos.

A expressão do nosso reconhecimento, também à finalista do Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Nova de Lisboa, Maria Manuela Brito, pela preciosa ajuda na revisão dos cálculos, das fórmulas e do texto.

Finalmente, não esqueceremos a Sr^a D. Maria Isabel Lucas, pela paciência e pela lucidez com que decifrou os originais e os conseguiu transformar neste trabalho.

SUMÁRIO

A utilização dos modernos modelos matemáticos, para simulação do transporte e difusão de gases poluentes na atmosfera, é hoje um método de fundamental importância para a previsão das concentrações destes ao nível do solo, bem como das alturas das chaminés industriais necessárias à garantia de níveis não prejudiciais ou perigosos para o ambiente e para as populações.

Neste trabalho, analisam-se alguns dos modelos actualmente disponíveis e selecciona-se um, com características de base adequadas à modelização do transporte e dispersão de dióxido de enxofre emitido na área urbano-industrial de Sines.

Durante quatro anos, de 1979 a 1982, investigam-se qualitativa e quantitativamente as emissões deste poluente; analisam-se as suas concentrações medidas ao nível do solo, em três modernas estações instaladas, e também os processos industriais e os dados meteorológicos existentes.

Elabora-se uma nova função de frequências meteorológicas mais adaptada à região e modelizam-se cerca de 55 000 situações diferentes que são ponderadas e agrupadas num conjunto de 96 situações trimestrais.

Comparam-se os resultados previstos nas simulações com os observados experimentalmente, calibra-se o modelo e avalia-se o seu grau de adequação à modelização da área.

Estabelecem-se as conclusões da investigação efectuada; efectuam-se recomendações como contributo para um mais realismo

ta e preciso dimensionamento das alturas das dispendiosas -
mas necessárias - chaminés a instalar nas futuras indústrias
para garantia de adequada dispersão dos poluentes até níveis
que assegurem a preservação do ambiente na região.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Discutem-se, neste capítulo, os aspectos mais relevantes da problemática geral da poluição atmosférica associados ao desenvolvimento industrial.

Apontam-se caminhos de possível solução e procura-se definir a situação actual do País neste domínio.

Salienta-se a necessidade e im-portância da aplicação dos modelos de simulação ao transporte e difusão de poluentes atmosféricos numa situação concreta de desenvolvimento urbano-indus-trial.

CAPÍTULO 1

1.1 Uma Filosofia de Acção

É tempo de reconhecermos que o "problema da poluição" não se resolve simplesmente pela eliminação das descargas de efluentes ou pela remoção máxima tecnologicamente possível. A verdade é que os aspectos económicos, que os mais generosos ecologistas tentam ignorar, são parâmetros inegavelmente importantes da actual realidade diária e, portanto, têm de ser considerados também com os problemas de controlo da poluição. "Soluções" simplistas, que ignorem as relações causa-efeito e as realidades económicas duma situação, estão condenadas ao fracasso.

O tratamento do problema deve equacionar as diferentes variáveis envolvidas e permitir uma decisão em termos de alternativas com significado.

Torna-se, assim, necessária, uma análise cuidadosa das consequências das acções propostas, quer em termos ecológicos quer económicos. As decisões fundamentais têm de ser tomadas, a cada momento aos vários níveis dos departamentos governamentais, no sentido de reordenar prioridades numa direcção ou noutra.

A nível regional, as populações perguntarão mais tarde ou mais cedo se o seu dinheiro deve ser gasto a melhorar a qualidade do ar ambiente e do rio que atravessa a vila ou a melhorar a escola local. Obviamente, cada indivíduo pode conferir uma prioridade elevada à qualidade do ambiente. Contudo, essa posição não elimina decisões difíceis em relação a necessidades alternativas como o caso anterior revela.

CAPÍTULO 1

Esta perspectiva não significa que se tenha substituído o valor das belezas e qualidade de vida pelo do investimento financeiro. Significa, apenas, a necessidade de um equilíbrio contínuo entre as posições extremas dos ecologistas mais fervorosos e dos industrialistas radicais.

Não deve haver dúvidas que o País como um todo, deve envolver-se - e parece estar a querer envolver-se - no processo de adopção duma saudável filosofia de qualidade de vida. Há um reconhecimento crescente do valor dos recursos do solo da água e do ar da nação e do papel que estes recursos devem desempenhar.

Uma filosofia, contudo, é um caminho e deve ser submetida aos testes de utilidade operacional.

É neste ponto que a análise dos sistemas e modelos matemáticos para a gestão da qualidade da água e do ar é necessária para fornecer as bases racionais de decisão, face a diferentes alternativas de acção.

Também aqui, não há necessidade de se cair num estéril e extremado racionalismo, que falharia seguramente devido à sua incapacidade de descrever emoções básicas do homem. Beleza, cor, forma e vida não são susceptíveis de quantificação. Existem contudo, aspectos do problema da qualidade do ar que são passíveis de análise quantitativa. O objectivo da análise de sistemas e dos modelos matemáticos é precisamente esse: evidenciar as variáveis mais importantes desse problema e as suas interacções, explicitando, então, com clareza as várias soluções possíveis.

De facto, é a falta de análise racional e científica destes problemas que tem conduzido, um pouco por toda a parte,

CAPÍTULO 1

a níveis de qualidade de ar pobres. Muitas vezes, energias e verbas são empregues em casos que só marginalmente alteram o ambiente quando poderiam ser melhor utilizadas em situações onde pequenas reduções na carga poluente do efluente produziriam ganhos ecológicos sensíveis, e isto porque se adopta a "sensibilidade empírica" em vez da análise científica.

Estas situações devem ser ultrapassadas através do recurso a métodos de análise de sistemas e de modelos de simulação.

O objectivo, contudo, não deve ser apenas a simples análise de computador, com fanática devoção à quantificação, mas antes uma avaliação serena de causas e efeitos, ponderando custos e benefícios em termos de engenharia ambiental.

Os modelos matemáticos, encarados nesta óptica, podem contribuir para a adopção de soluções e esquemas científicos de controlo do ambiente*.

Os resultados numéricos que tais modelos proporcionam, quando associados a um diálogo construtivo entre os intervenientes nos processos de decisão, podem levar-nos longe na tentativa de atingir os objectivos desejados da qualidade do ar.

Foi pois, dentro destes pressupostos que procurámos elaborar a presente dissertação.

* Prof. R. Thomann

CAPÍTULO 1

1.2 A Poluição Atmosférica no Contexto do Dilema Desenvolvimento Industrial - Qualidade de Vida

Os poluentes atmosféricos são produzidos por um número excessivo de indústrias e de pessoas concentradas em áreas demasiado pequenas em que vivem e nas quais se movem demasiadas viaturas, utilizando demasiada energia e requerendo múltiplos produtos.

As sociedades procuram naturalmente produzir os alimentos, vestuário e outros bens essenciais e de consumo, servindo-se de conversões da energia solar e dos recursos naturais da terra, tais como a água, os minerais e os combustíveis. Só que, todas estas conversões apresentam algo de comum: é que nenhuma resulta 100% completa, gerando todas elas sub-produtos de pouco valor ou mesmo indesejáveis. Entre estes, contam-se os poluentes atmosféricos.

Causaram cerca de 500 milhões de dólares de prejuízos à agricultura só nos Estados Unidos da América em 1976. Teremos de adicionar a este valor os enormes prejuízos resultantes da deterioração nos materiais: metais, plásticos, borracha, cuja vida útil é diminuída e cujos custos de manutenção são elevados.

Mas, mais importantes são as perturbações que os poluentes atmosféricos causam na saúde humana e que vão desde as perturbações ópticas e olfactivas, às múltiplas afecções das vias respiratórias e dos pulmões com aumento de mortalidade, para além dos efeitos cancerígenos da inalação e exposição a gases tóxicos.

CAPÍTULO 1

Efectivamente, se por um lado o crescimento e a concentração industrial procuram proporcionar aos membros duma comunidade uma melhoria de Qualidade de Vida, a verdade é que, se não forem devidamente planeados e controlados, lhes vêm a acarretar, na prática, perturbações gravosas à saúde e ao Ambiente que os rodeia.

Estes factos, concretos e palpáveis, foram a pouco e pouco alertando as populações, os cientistas, os políticos e os legisladores; o Mundo tomou consciência de que não pode mais continuar a usar descontroladamente, a atmosfera, os rios e os oceanos, como enormes campos de despejo dos subprodutos da dita civilização avançada.

Chegámos ao fim duma época em que o Homem acreditou, efectivamente, que a capacidade de recepção, diluição e transformação no meio ambiente, eram suficientes para nunca ser alterada a variável chave - o equilíbrio global do ambiente. O equilíbrio ambiental está, no entanto, a ser alterado por toda a parte onde as concentrações urbanas e industriais, não planeadas, se implantaram.

Com que custos globais?

Para além dos outros já referidos, o da preservação da saúde de cada cidadão vai ter certamente muito peso à medida que as pessoas forem ganhando consciência de que a poluição atmosférica contribui de uma forma geralmente lenta mas constante, para a sua destruição.

O que fazer então?

CAPÍTULO 1

Duas posições extremas se definiram nos últimos anos:

- a) a dos defensores da protecção do meio ambiente a todo o custo, parando o próprio desenvolvimento industrial;
- b) a dos defensores intransigentes do crescimento industrial desenfreado.

Desde já, uma afirmação clara sobre este ponto controverso: nem uns, nem outros parecem ter razão. Os segundos polarizam a questão num per capita constantemente acrescido, esquecendo-se de integrar os custos elevados desta opção em termos de saúde e de qualidade do ambiente. Os primeiros, ao tentarem parar o desenvolvimento industrial para salvaguardarem bens fundamentais, limitam, extraordinariamente, o âmbito de uma qualidade de vida por que lutam.

Assim, hoje em dia, vem-se afirmando cada vez mais uma nova posição, dentro da qual nos enquadramos, que não vê a qualidade de vida e o desenvolvimento industrial como conceitos incompatíveis. Tentaremos, a seguir, apresentar as razões que fundamentam esta posição.

CAPÍTULO 1

1.3 Possíveis Soluções do Problema

Os engenheiros ambientais dispõem, hoje em dia, de cinco instrumentos fundamentais de acção, no sentido de conter as concentrações de poluentes, em áreas urbanas e industriais, dentro de limites aceitáveis do ponto de vista da saúde das populações e da protecção do ambiente. São eles: o planeamento industrial e logístico; a realização de estudos prévios sobre o impacte ambiental produzido pela instalação de novas indústrias; o emprego de dispositivos de remoção; as modificações processuais; a utilização de modelos matemáticos de simulação com a correspondente instalação de chaminés altas.

Na realidade, a elaboração prévia de estudos de impacte ambiental permite a avaliação criteriosa de múltiplos aspectos do problema de entre os quais se destacam como exemplos:

- . quantidades e tipos de poluentes a emitir; custo de equipamentos de remoção
- . consideração de duas ou mais localizações alternativas
- . consideração de modificações processuais que não afetem seriamente a rendibilidade dos investimentos
- . análise de custos ambientais versus benefícios económicos
- . cálculo dos níveis máximos de concentrações de poluentes.

Com base nestes estudos podem-se então empreender acções tais como:

CAPÍTULO 1

- a) Utilização de combustíveis mais limpos: caso típico do teor de enxofre no fuel de queima; que pode oscilar entre 0,5% e 5%.
- b) Utilização, em zonas sensíveis, de modificações tecnológicas e processuais que levam à descarga de menores quantidades de poluentes: exemplo representativo é o da indústria de cloro/soda onde as células podem ser de mercúrio (com descargas deste poluente) ou de diafragma.
- c) Modificações na localização das unidades industriais no sentido de evitar sobreposição de "picos" de concentração, previsíveis com modelos matemáticos da simulação do transporte e dispersão dos poluentes.
- d) Utilização de chaminés altas, especialmente em zonas ainda não poluídas de modo significativo, para proporcionarem mais tempo de transporte e portanto de difusão e diluição dos poluentes antes de atingirem o solo e as populações.

O cálculo da altura destas chaminés efectua-se através dos modelos matemáticos.
- e) Utilização de dispositivos de remoção dos poluentes, tais como filtros, precipitadores electrostáticos, "scrubbers", unidades de Claus, etc., que removem os poluentes principais antes da descarga dos gases pelas chaminés.
- f) Planeamento regional cuidado com criação de zonas verdes - tampão, sempre que possível entre os núcleos habitacionais e as indústrias ou complexos industriais. Encaminhamento das unidades industriais mais

CAPÍTULO 1

poluentes, mesmo com sistemas de actuação incluídos, para zonas mais descongestionadas, ou menos poluídas, ou menos povoadas.

Finalmente, uma consideração criteriosa das condicionantes industriais, permite, através de um diálogo construtivo e de uma imprescindível análise económica, chegar às soluções finais de menor custo social global. Entre tais condicionantes contam-se, entre outros, a tecnologia, as necessidades de abastecimento de água e de matéria prima, a energia e o escoamento de produtos.

A experiência recente de países europeus e dos E.U.A. prova que efectivamente este tipo de actuação é possível e desejável, quer para o prosseguimento do desenvolvimento industrial quer para a preservação do ambiente. Ao fim e ao cabo, pretende-se uma combinação óptima das duas realidades, que se podem fundir em algo de mais valioso para os membros da comunidade e que é afinal, a "Qualidade de Vida".

CAPÍTULO 1

1.4 A Posição de Portugal

Portugal, país em vias de desenvolvimento, com uma indústria de dimensão ainda reduzida face aos colossos industriais, tem já problemas de poluição atmosférica graves embora em locais e eixos específicos:

Lisboa/Barreiro, Estarreja, Seixal/Setúbal, Sines e outros, nomeadamente os das celulosas e cimenteiras e os da indústria têxtil etc. dispersos pelo País. A fig. 1.1, sem pretender ser exaustiva, indica a localização de algumas produções poluentes do País.

Pode, contudo, afirmar-se que, salvo nas zonas do Barreiro e de Estarreja - áreas extensas já fortemente poluídas, na maioria dos outros casos os níveis mais elevados de poluição atmosférica ocorrem pontualmente em regiões pouco extensas e bem delimitadas.

Daí que, para estas últimas, o nosso país esteja ainda em excelentes condições de aplicar o processo porventura mais económico em termos de população e ambiente - a dispersão de poluentes - com emissões efectuadas através de altas chaminés.

Retira-se assim proveito da capacidade de transporte e difusão da atmosfera diluindo-se os poluentes até níveis aceitáveis.

É óbvio que os problemas ambientais são complexos e as análises terão de ser feitas caso a caso pois este método apresenta também inconvenientes e não constitui panaceia universal.

CAPÍTULO 1

No entanto, em relação quer às modificações processuais quer à queima de combustíveis mais limpos, quer ainda à utilização de equipamentos de remoção, a experiência mostra que a dispersão apresenta, em muitos casos, vantagens econômicas significativas.

O País poderá assim beneficiar da exploração das potencialidades daquela estratégia e da sua utilização ponderada.

Foi, sobretudo por essas razões econômicas e na sequência de cálculos e estimativas de custo feitas, que desde a primeira hora do planejamento do Complexo de Sines se passou a dedicar uma atenção e um esforço muito intenso ao cálculo científico de alturas das chaminés industriais e das concentrações de poluentes ao nível do solo, através dos modelos de simulação da dispersão.

Vejamos em que condições.

CAPÍTULO 1

1.5 Os Modelos Matemáticos de Simulação e a Área Industrial de Sines

1.5.1 A Área Urbano-Industrial de Sines

O chamado Complexo Industrial de Sines e a área de actuação da sua entidade coordenadora estendem-se numa área de cerca de 40 000 hectares, com centro geográfico em Sines.

A ideia força da concepção inicial (20) consistiu no lançamento dum pólo de desenvolvimento industrial e urbano, situado entre Lisboa e o Algarve, alicerçado num porto de águas particularmente profundas e num conjunto de indústrias pesadas, tirando partido da localização estratégica privilegiada de Sines face às rotas de transporte do petróleo de então.

Estava-se em 1970, época de crescimento florescente da economia mundial com o canal do Suez encerrado e a construção de grandes petroleiros (até 500 000 tdw) que praticavam a rota do Cabo.

Admitiu-se que Sines se poderia transformar num grande entreposto de "transshipment" de ramas, e decidiu-se a implantação duma refinaria de petróleo, complexo petroquímico (11 fábricas), siderurgia, complexo adubeiro e complexo de aproveitamento das pirites alentejanas.

Como necessário suporte, iniciou-se a construção duma nova cidade em Santo André, aproximadamente 15 km a Norte da pequena vila de Sines, e prevista para 100 000 habitantes. Nunca em Portugal, nos tempos modernos, se perspectivara a construção dum empreendimento de tal dimensão (21,22).

CAPÍTULO 1

1.5.2 Uma Estratégia de Planeamento e Controlo

A tremenda concentração de indústrias de base, a sua assinalável dimensão e as características poluentes de algumas delas, levaram muito justamente a Direcção do Gabinete da Área de Sines a compreender a importância, a absoluta necessidade e a urgência de pensar e agir com segurança e profundidade relativamente ao controlo e preservação do Ambiente na Área de Sines, desde a primeira hora.

Foi sob o seu impulso que uma equipa de técnicos - à qual tivemos o gosto de pertencer e, mais tarde, de dirigir - começou a identificar as quantidades globais de poluentes atmosféricos a emitir pelo complexo quando completo e, desde o início, a procurar encontrar através dum correcto e atempado planeamento, os efeitos em termos de concentrações a nível do solo dessas emissões (23).

Tal trabalho passou pela definição dos "standards" de ar ambiente para a Área de Sines (neste momento ainda os únicos existentes no País*) no sentido de explicitar os níveis considerados como não causando perturbações ao ambiente ou às populações da Área.

* D.L. 57/79 de 29 Março, I Série, D.R. e Despacho Normativo 168/81 de 6 de Julho, I Série D.R.

CAPÍTULO 1

1.5.3 A Necessidade de Aplicação de Modelos Matemáticos de Simulação da Poluição Atmosférica

A complexidade e dimensão dum estudo que pudesse garantir o cumprimento e não violação desses standards no conjunto de toda a Área e das indústrias que integrava, apontava desde logo para a necessidade de utilização dos modelos matemáticos da simulação da dispersão e transporte dos poluentes atmosféricos na Área de Sines, como instrumento de planeamento integrado de enorme utilidade. Foi a primeira experiência prática de aplicação de modelos gaussianos em Portugal (24, 25, 26), tanto quanto sabemos.

Assunto complexo, de facetas múltiplas, em que se empenhou o autor desta dissertação, desde 1974.

Esta dissertação corresponde assim à concretização dum projecto nosso quando, em 1977, nos Estados Unidos da América, frequentámos o curso de Master of Science on Environmental Health Engineering na Universidade do Texas em Austin e tomávamos contacto intenso com o Texas Air Control Board. Tal projecto visava a possibilidade de um dia se vir a verificar a validade das hipóteses e dos algoritmos de simulação da poluição, utilizados na Área de Sines.

Para além dos largos recursos materiais e humanos que se juntaram a esforços individuais, foram precisos 7 anos para recolha e tratamento de adequados dados experimentais.

Este estudo representa apenas um pequeno passo dos muitos que já foram dados desde 1974. Talvez dos mais compensadores, pois permitirá finalmente formular por um lado conclusões e por outro, propostas de melhoria.

CAPÍTULO 1

Outros passos se lhe deverão seguir na pesquisa constante - à medida que mais dados se possuírem - das soluções cientificamente mais rigorosas e pragmaticamente mais úteis quer ao planeamento e controlo de poluição na Área de Sines quer à sua possível extrapolação ao País.

CAPÍTULO 2

OBJECTIVOS E ÂMBITO DESTA DISSERTAÇÃO

Definem-se os objectivos da dissertação.

Discute-se a sua oportunidade e interesse; caracteriza-se o âmbito industrial da sua realização.

Sumarizam-se as acções desenvolvidas e a investigação realizada em ordem a alcançar os objectivos propostos.

CAPÍTULO 2

2.1 Objectivos

Os objectivos principais desta investigação são:

- a) a produção duma análise crítica detalhada sobre a situação das concentrações de dióxido de enxofre na área de Sines durante os últimos quatro anos, 1979-82;
- b) o aprofundamento da análise dos processos, funcionamento e taxas de operação das indústrias, para cálculo mais rigoroso das suas emissões de SO_2 ;
- c) a análise do "state-of-the art" da simulação da dispersão de gases poluentes, com selecção de um modelo, moderno, que reúna características preliminares adequadas aos condicionalismos globais da área em estudo;
- d) a investigação de cerca de 25 000 dados relativos à direcção e velocidade dos ventos em Sines durante os anos de 1978 a 1982, com a elaboração das novas componentes da função de frequências de um programa meteorológico do tipo STAR;
- e) a calibração dum modelo matemático de simulação da dispersão do dióxido de enxofre (SO_2) na atmosfera da área industrial de Sines, com base em determinações experimentais efectuadas durante os anos de 1979 a 1982;
- f) o desenvolvimento e explicitação ao longo dos vários capítulos de uma metodologia que permita a efectivação desta e de novas calibrações do modelo, à medida que se dispnha dum maior número de dados meteorológicos característicos da área.

CAPÍTULO 2

- g) a avaliação da "performance" do modelo através da comparação entre os valores de concentração de SO_2 determinados experimentalmente e os previstos pelo modelo;
- h) a formulação de conclusões e recomendações - sempre que possível com carácter explícito e quantitativo - para a previsão mais rigorosa, das alturas das chaminés das indústrias a instalar no futuro na área, e das concentrações de SO_2 a observar ao nível do solo.

CAPÍTULO 2

2.2 Oportunidade e Eventual Interesse do Trabalho

Em nossa opinião, a Área Industrial de Sines reúne, neste momento, algumas condições internacionalmente originais para a realização dum trabalho deste tipo.

Com efeito, uma das múltiplas dificuldades com que, a nível internacional se depara a utilização, calibração e avaliação dos modelos de simulação, reside na complexidade e densidade dos conjuntos urbanos e industriais já instalados. Tal situação leva a que um inventário completo e rigoroso das emissões seja extremamente difícil de realizar.

Entre outros factores, as peculiaridades de cada indústria, as taxas de funcionamento, as paragens e as emissões fugitivas constituem limitações adicionais do rigor do inventário e, conseqüentemente, o dos valores estimados pelos modelos.

A comparação destes com os valores observados através de medições, é pois, severamente limitada pelos erros do inventário feito.

Este facto pode explicar, em parte, por que razão existem relativamente poucos estudos de avaliação de modelos e raros de validação definitiva aceites pelas agências de controlo do ambiente, apesar de a simulação matemática constituir, desde há muito, uma técnica sistematicamente utilizada nos países industriais que dispõem, aliás, de uma larga diversidade de modelos.

Do nosso ponto de vista, a Área de Sines, reuniu - e reúne ainda - um conjunto de condições e factores favoráveis ao

CAPÍTULO 2

desenvolvimento deste estudo, os quais devem ser aqui referidos:

- a) Área relativamente plana;
- b) Área de características rurais na fase inicial do projecto, com pouca ou nenhuma contaminação de indústria nas vizinhanças;
- c) Apenas uma (1979), e, depois, duas unidades industriais significativas a funcionar, no período a que este estudo se reporta (1979-1982);
- d) Poucas empresas - duas empresas públicas, - e grande cooperação da parte destas para a elaboração dum inventário de emissões rigoroso;
- e) Existência duma rede de "monitoring" dotada de pessoal treinado e de equipamentos modernos e adequados;
- f) Total abertura e cooperação entre os técnicos do Gabinete da Área de Sines e o autor.

Sem menosprezar a existência destas condições favoráveis, o aspecto mais determinante da escolha do tema proposto para estudo, reside, todavia, no potencial contributo que, num futuro imediato, os resultados desta investigação possam dar a um planeamento e controlo mais rigoroso da poluição na Área de Sines.

Efectivamente, a calibração dum modelo e a avaliação dos seus desvios e "performance" geral - quando os resultados por ele previstos são comparados, como nos capítulos seguintes, com os verdadeiros valores observados experimentalmente, - significam uma delimitação e quantificação do "valor" das suas previsões,

CAPÍTULO 2

o que permitirá - espera-se - calcular, com maior confiança e rigor, as alturas das chaminés das indústrias que, de futuro se irão ainda instalar em Sines.

Se tivermos presente que o custo das chaminés industriais sobe exponencialmente (e na ordem dos milhares de contos) com a sua altura - e sabendo que, dum modo geral, os modelos tendem a fazer previsões sobredimensionadas quando não calibrados e avaliados - concluiremos das eventuais possibilidades de poupança para o País que a avaliação poderá trazer, sem prejuízos para o ambiente.

Só agora foi possível dispôr dum número estatisticamente válido, de dados meteorológicos e de medições de concentrações de dióxido de enxofre ao nível do solo para se empreender esta investigação, sem prejuízo de no futuro - e à medida que novos dados se conseguem - prosseguir e aumentar o rigor das investigações.

CAPÍTULO 2

2.3 Acções Desenvolvidas e Investigação Realizada

A investigação realizada desenrola-se de acordo com as acções que se enunciam seguidamente: após medição procede-se à recolha e tratamento de cerca de 105 000 (cento e cinco mil) valores de concentrações de dióxido de enxofre - 4 anos x 365 dias/ano x 24 horas/dia -, para além da medição de milhares de valores de parâmetros meteorológicos (direcção e velocidade de vento).

Investigam-se e calculam-se depois para 16 trimestres, as taxas mássicas de emissão das indústrias, entre vários outros parâmetros processuais.

Reformula-se o programa de frequências das ocorrências de direcção, velocidade de ventos e classes de estabilidade da atmosfera (STAR) para 576 situações meteorológicas diferentes e para as situações de Primavera, Verão, Outono e Inverno, criando-se-lhe nova expressão mais adequada a Sines - STARCAN.

Selecciona-se um modelo gaussiano eficiente, rápido, e preliminarmente adaptado às características do terreno de Sines e seu complexo urbano-industrial.

Constroem-se cenários de 55 296 situações diferentes com o modelo matemático, correspondendo a combinações de 6 classes de velocidade de vento com 16 classes de direcção de vento e com 6 classes de estabilidade durante 4 anos, considerando os 4 trimestres por ano em 3 estações de medida com 2 meteorologias do programa STAR ($6 \times 16 \times 6 \times 4 \times 4 \times 3 \times 2 = 55\ 296$).

Tais situações foram aglomeradas, após ponderação, através das respectivas probabilidades de ocorrência em 96 situa-

CAPÍTULO 2

ções trimestrais de concentrações médias ao longo de 4 anos.

Comparam-se os resultados, calibra-se o modelo, avalia-se a sua performance e por último estabelecem-se conclusões e recomendações.

Toda esta investigação é descrita nos capítulos 4 a 11. Antes porém, não podemos deixar de aflorar no capítulo seguinte, embora sumariamente, a importância e alguns efeitos dos poluentes atmosféricos.

CAPÍTULO 3

POLUENTES ATMOSFÉRICOS

Mencionam-se os mais importantes poluentes atmosféricos e explicitam-se os seus efeitos principais na atmosfera, nos materiais, na vegetação, biológicos e na saúde humana.

Indicam-se em termos quantitativos as gamas de concentração em que se tornam perigosos e referem-se valores estimados para os prejuízos materiais por eles causados às comunidades.

CAPÍTULO 3

3.1 Principais Poluentes Atmosféricos

Dióxido de Enxofre (SO_2), Poeiras (partículas em suspensão) e Óxidos de Azoto ($\text{NO}/\text{NO}_x/\text{NO}_2$) são considerados, hoje, os mais importantes poluentes atmosféricos. Isso explica-se, talvez, pelo facto de serem resultantes da maioria dos processos urbanos e industriais, nomeadamente do mais importante: a queima de combustíveis.

Ozono (O_3), hidrocarbonetos (não metânicos), em especial aromáticos policíclicos, monóxido e dióxido de carbono, metais pesados e compostos orgânicos tóxicos (V.C.M, Acrilonitrilo, etc), formam a segunda classe de poluentes preocupantes.

É muito vasta a bibliografia sobre efeitos dos poluentes atmosféricos, quer quanto a livros quer a revistas da especialidade (1, 2).

Não deixaremos, contudo, de aflorar sumariamente alguns efeitos significativos de vários poluentes, para, em seguida, tratarmos com um pouco de detalhe o poluente específico a que esta tese dará mais atenção - o dióxido de enxofre, SO_2 .

CAPÍTULO 3

3.2 Efeitos na Atmosfera

Os poluentes atmosféricos podem provocar significativas variações nas propriedades da atmosfera podendo referir-se como exemplos, apenas entre outros, os seguintes: a presença de partículas em suspensão (poeiras) afecta claramente a visibilidade (3); o dióxido de azoto absorvendo radiação visível na zona do azul-verde é responsável, a partir de determinadas concentrações, pelo aparecimento da cor castanho-amarelado tão frequente em atmosferas industriais e urbanas (4, 5); a existência de largo número de partículas em suspensão, representa a presença de outros tantos núcleos activos, nos quais a água que na atmosfera sofre condensação se vai subdividir, sendo conhecido e provado que núvens constituídas por gotas elementares menores geram com maior dificuldade precipitação (6,7).

CAPÍTULO 3

3.3 Efeitos nos Materiais

No que respeita à deterioração dos materiais e estruturas, os mecanismos de actuação dos poluentes atmosféricos verificam-se sob a forma de fenómenos de abrasão, deposição, remoção, reacção química e corrosão. A presença habitual de humidade no ar acelera estes mecanismos.

Nos edifícios e monumentos antigos, a erosão por partículas e ácidos é lenta, mas bem visível com os anos; a corrosão é nítida nos metais ferrosos e não ferrosos sujeitos a concentrações atmosféricas de SO_2 , e portanto, de H_2SO_4 ; a lã e o nylon sofrem quebra das suas fibras e o algodão também por despolimerização da celulose (1); a borracha, parte, quando sujeita a tensões em presença de ozono (múltiplos relatórios do Statewide Air Pollution Research Center, California U.S.A.); as pinturas e tintas com base de chumbo são afectadas pelo anidrido sulfuroso, perdendo a cor; os corantes têxteis são deteriorados pela acção do dióxido de azoto (1).

O Quadro 3.I sumariza alguns destes efeitos.

Barret and Waddel (8) calcularam os custos dos danos causados nos materiais pela poluição atmosférica e das medidas de protecção que se tomam (incluindo pintura) nos Estados Unidos da América, avaliando-os em 4,0 biliões de dólares, no ano de 1970.

O dióxido de enxofre teria sido responsável por 1,8 biliões, os oxidantes e NO_2 por 1,6 biliões e as poeiras por 0,6 biliões.

CAPÍTULO 3

QUADRO 3.I - EFEITOS DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS
NOS MATERIAIS

<u>Material</u>	<u>Efeitos</u>	<u>Poluentes</u>	<u>Outros factores</u>
Metais	Corrosão	SO ₂ , gases ácidos	Humidade, Temperatura
Materiais de construção	Descoloração Erosão	SO ₂ , gases ácidos, partículas	Humidade
Pinturas	Descoloração e quebras	SO ₂ , SH ₂ , partículas	Humidade
Lã, Têxteis Papel	Redução de tensão e resistência	SO ₂ , gases ácidos	Humidade, radiação
Borracha	Enfraquecimento da elasticidade. Rotura	Ozono, oxidantes	Radiação
Corantes Cerâmica	Perda de propriedades Polimento, brilho	NO ₂ , oxidantes, SO ₂ Gases ácidos	Radiação Humidade

CAPÍTULO 3

Alguns cálculos recentes apontam para pouco menos do do bro actualmente. A ordem de grandeza dos números dispensa comentários adicionais sobre o problema da poluição atmosférica nos materiais.

CAPÍTULO 3

3.4 Efeitos na Vegetação, Cereais e Florestas

Os efeitos da poluição atmosférica na vegetação, cereais e florestas, embora provocados por poluentes de tipos muito diversos, são os seguintes:

- a) Morte dos tecidos;
- b) Redução ou eliminação da clorofila nas folhas;
- c) Anormalidades no crescimento;
- d) Redução de crescimento.

O ozono e o PAN (peroxy acetyl nitrate) provocam significativas marcas nas folhas, reduções de crescimento a partir de certas concentrações e períodos de exposição, e completa destruição de culturas sensíveis àqueles agentes tais como a da batata, soja, tomate e tabaco, entre outras.

Ao dióxido de enxofre são particularmente sensíveis o pinheiro, a maçã, o trigo e o algodão. Para além destes, os ácidos clorídrico, cloro, fluoretos, anidrido sulfuroso, amônia e mercúrio contam-se entre os poluentes atmosféricos que mais danos causam à flora (9, 10).

O Quadro 3.II procura sumarizar quantitativamente os aspectos acima indicados.

Outros efeitos do dióxido de enxofre estão quantificados no Quadro 3.III.

Relativamente aos oxidantes, os efeitos negativos no crescimento das plantas são bem perceptíveis no Quadro 3.IV.

CAPÍTULO 3

QUADRO 3.II - EFEITOS DO OZONO, DIÓXIDO DE ENXOFRE E
AZOTO, NA VEGETAÇÃO

Gamas de Concentrações de Poluentes que provocam 5% de
danos no crescimento de diversas espécies

Poluente	Tempo (horas)	Concentrações (ppm)		
		Vegetação sensível	Vegetação intermédia	Vegetação resistente
Ozono	0,5 horas	0,20-0,35	0,30-0,55	≥ 0,50
	1	0,10-0,25	0,20-0,35	≥ 0,30
	2	0,07-0,20	0,15-0,30	≥ 0,25
	4	0,05-0,15	0,12-0,26	≥ 0,23
	8	0,03-0,12	0,10-0,22	≥ 0,20
Dióxido de Enxofre	0,5	1,0-4,0	3,5-10	≥ 9,0
	1	0,5-2,5	2,0-7,5	≥ 7,0
	2	0,3-2	1,5-5,0	≥ 4,5
	4	0,15-1,25	1,0-3,5	≥ 3,0
	8	0,10-0,75	0,5-2,0	≥ 1,5
Dióxido de Azoto	0,5	6,0-12	10-25	≥ 20
	1	3,0-10	9,0-20	≥ 18
	2	2,5-7,5	7,0-15	≥ 13
	4	2,0-6,0	5,0-12	≥ 10
	8	1,5-5,0	4,0-9,0	≥ 8

CAPÍTULO 3

QUADRO 3.III - EFEITOS DO SO₂ EM PINHEIROS DO CANADÁ

Concentração máxima em 1/2 hora (ppm)	Concentração média (ppm)	Perda média em volume da árvore (White Pine, Ontário)
3,64	0,216	-1,3%
1,24	0,105	-0,6%

QUADRO 3.IV - EFEITOS DOS OXIDANTES (OZONO) NA VEGETAÇÃO

<u>Espécie</u>	<u>Local</u>	<u>Concentração</u> (pphm*)	<u>Duração</u> <u>do Teste</u>	<u>Efeito (% de re-</u> <u>dução ao cresci-</u> <u>mento normal)</u>
Limão	California	> 10	Estação crescimento	42%
Laranja	California	> 10	" "	54%
Uvas	California	> 25	Estação crescimento	12% -1º ano 61% -2º " 47% -3º "
Tabaco	Carolina do Norte	5-10	" "	30% (peso das folhas)
Milho	California	20-35	" "	5% (destruídos)

* pphm (parts per hundred million)

CAPÍTULO 3

Finalmente para o dióxido de enxofre e os óxidos de azoto, os dados contidos nas figuras 3.1 e 3.2 são significativos.

Em termos aproximados pensa-se que os custos por danos directos à vegetação orçam actualmente nos E.U.A. por cerca de US\$ 700 000 000, embora este número não tome em consideração as inibições de crescimento e a redução de rendimento das plantações.

Descrições adicionais e pormenorizadas dos efeitos dos poluentes atmosféricos na vegetação, bem como múltiplas referências a este assunto podem ser encontrados em Stern, Vol. II págs. 157 a 229 (1).

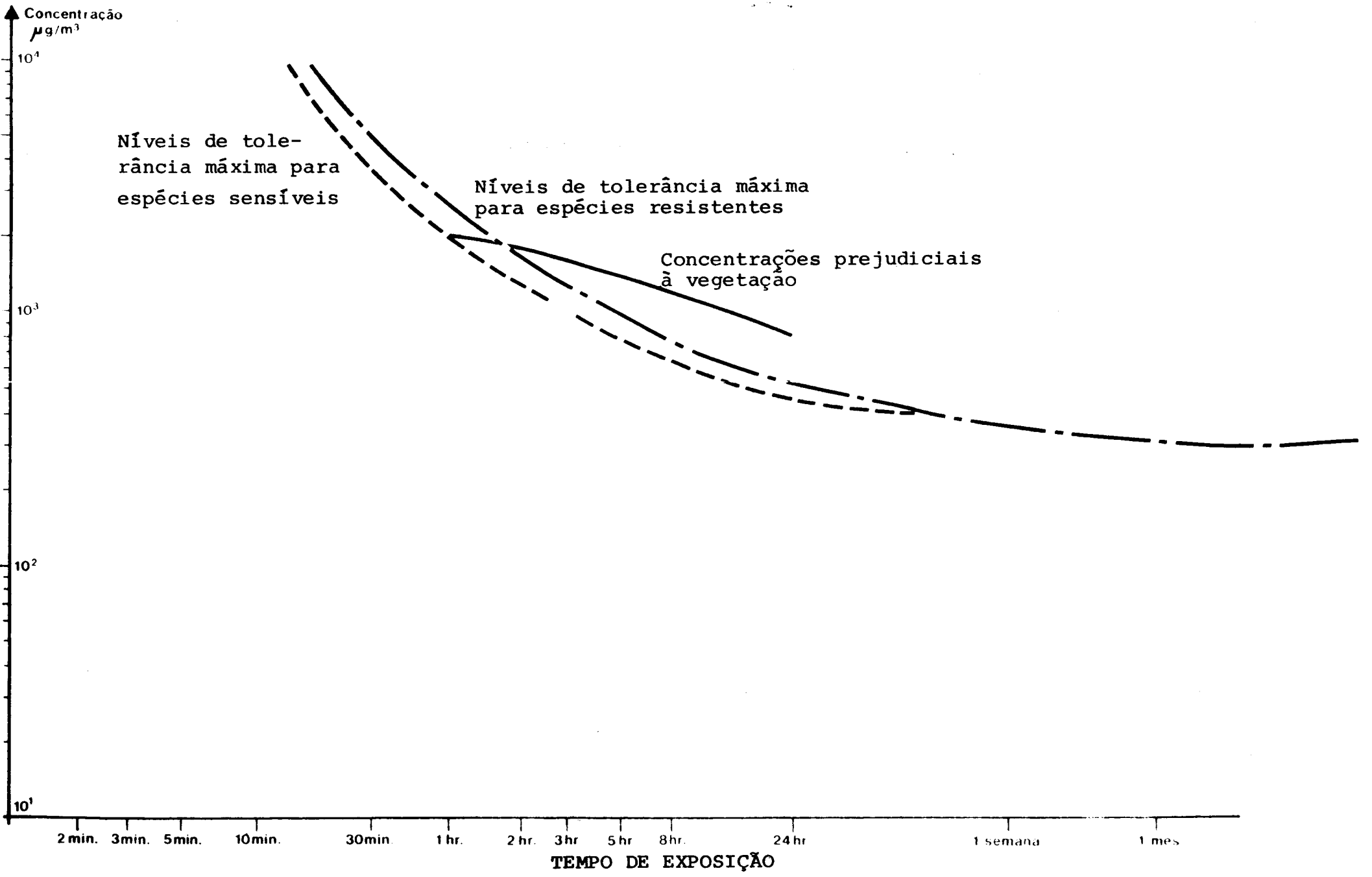


Figura 3.1 - EFEITOS DO DIÓXIDO DE ENXOFRE NA VEGETAÇÃO

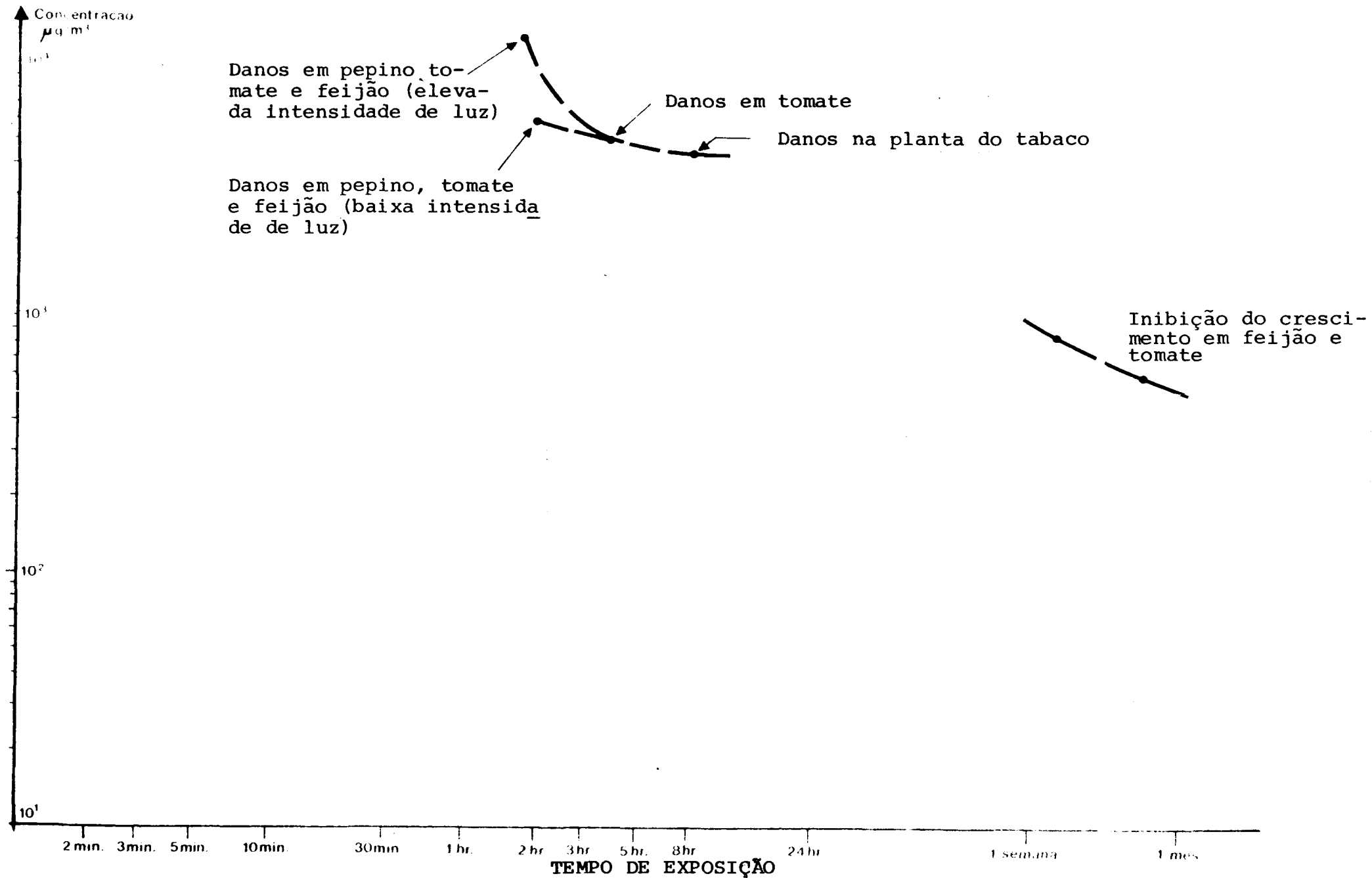


Figura 3.2 - EFEITOS DO NO₂ NA VEGETAÇÃO

CAPÍTULO 3

3.5 Efeitos Biológicos

Esta área dos efeitos biológicos e sua relação com a saúde humana tem sido certamente a de mais difícil estudo uma vez que, ao facto das possibilidades de experimentação em seres humanos serem nulas ou muito reduzidas, acresce que a validade de extrapolação de resultados de observações e testes em animais para o comportamento de seres humanos é, em muitos casos questionável ou tem de ser sujeita a rigorosa análise crítica.

Apesar destas dificuldades, a área dos efeitos biológicos não deixa de ser o centro do problema da poluição atmosférica, pois, acima de tudo, as pessoas procuram estar atentas ao que, a curto ou longo prazo, afecte a sua saúde.

De facto a ocorrência de episódios dramáticos, pontualmente, ao longo das três últimas décadas e com certa regularidade, alertou a opinião pública para os problemas da poluição atmosférica duma forma mais viva. O caso de Los Angeles com dias de visibilidade reduzida ou quase nula - partículas e nevoeiro fotoquímico (ozono, PAN etc.) - com o aparecimento de edemas pulmonares e de desmaios provocados pela simples permanência na rua de algumas horas foi, e continua a ser marcante.

Outros casos onde significativos aumentos de mortalidade ocorreram, devido à formação de altas concentrações por efeito de situações meteorológicas anormalmente adversas (inversões baixas durante vários dias, regra geral) - constituem outros tantos pontos de meditação para acções futuras - Donora, Pensylvania 1948 (11); Poza Rica, México, 1950 (12); Londres 1952 (13); Episódio Mundial Nov, Dez 1962 (14, 15); Tokyo, Japão, 1970 (16) para só referir alguns clássicos e não falar de situações mais recentes em Atenas, 1979 e em Espanha (Ma-

CAPÍTULO 3

drid) 1981.

Para situar um pouco o dramatismo destas situações vale a pena transcrever uma curta descrição do episódio de Donora (1)

"The fog closed over Donora on the morning of Tuesday, October 26. The weather was raw, cloudy and dead calm, and it stayed that way as the fog piled up all that day and the next. By thursday, it had stiffened adhesively into a motionless clot of smoke. That afternoon it was just possible to see across the street, and except for the stacks, the mills had vanished, the air begun to have a sickening smell, almost a taste. It was the bitter sweet reek of sulphur dioxide. Everyone who was out that day remarked on it but no one was much concerned. The smell of sulphur dioxide, a scratchy gas given off by burning coal and melting ore, is a normal concomitant of any durable fog in Donora. This time it meerely seemed more penetrating than usual".

Cerca de metade das 14 000 pessoas que habitavam o vale, ficaram doentes.

Tosse e irritações sérias dos olhos, nariz, garganta e pulmões foram os sintomas mais vulgares. Vinte mortes ocorreram no terceiro dia do episódio.

Como se referiu anteriormente, apesar de existirem poluentes de efeitos mais perigosos - casos dos V.C.M., Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos que são cancerígenos, por exemplo - a verdade é que se torna mais útil o estudo dos efeitos provocados pelo ozono, óxidos de azoto e em especial pelo óxido de enxofre, já que a presença destes poluentes é

CAPÍTULO 3

muito mais vulgar e constante na maioria das situações de poluição urbana e industrial. Por isso - e no sentido de não alongar o texto - apenas sobre estes, nos vamos debruçar.

Actualmente continua a verificar-se uma acumulação de provas de que, do ponto de vista biológico, o ozono é um gás extremamente tóxico. Estudos laboratoriais sobre animais provaram que a morte por edema pulmonar ocorre quando expostos à concentração de 15-30 ppm ou superior, durante apenas algumas horas. Estudos de patologia indicaram que o ozono perturba todos os níveis dos brônquios causando lesões microscópicas mesmo a baixas concentrações da ordem de 0,25 ppm, durante poucas horas.

A resistência de pulmões de animais ("guinea pigs") não pareceu alterada com concentrações de 0,34 e 0,68 ppm, mas passou a 47% com 1,08 ppm e 1,35 ppm.

As taxas de actividade dos animais (ratos, por exemplo) baixam significativamente para concentrações de 0,1 a 1 ppm de ozono. Da mesma forma, se detectaram modificações na elasticidade dos pulmões de várias espécies de animais (1).

O Statewide Air Pollution Research Center, Riverside U.S.A. desenvolveu trabalho exaustivo, desde 1947, com os Prof. Hagen Smith e Pitts, sobre os mecanismos e efeitos do nevoeiro fotoquímico.

Elevado número de artigos e relatórios publicados documenta tais estudos.

No que concerne a efeitos biológicos dos óxidos de azoto, os resultados das várias investigações apresentam signi-

CAPÍTULO 3

ficativas diferenças fortemente dependentes do tempo de exposição e, em particular, da frequência e dos "picos" de concentração, o que, segundo alguns autores, sugere um mecanismo de regeneração dos tecidos.

Em todos os casos, contudo, se regista consenso sobre o aparecimento de enfisema pulmonar por exposição a este poluente.

Freeman e colaboradores (17) observaram lesões, quando da exposição contínua de ratos a NO_2 , tendo Port e Coffin (18) confirmado o facto para concentrações base de 0,5 ppm com um impulso sobreposto de 1 ppm cada hora.

Concentrações do mais vulgar poluente atmosférico (SO_2) têm de ser pelo menos 100 vezes superiores aos valores normais do ambiente para causar a morte a pequenos animais; concentrações 50 vezes superiores às médias de um ambiente pouco poluído produzem ligeiras perturbações.

Como se disse, a mortalidade por exposição a este poluente está, assim, mais associada a efeitos de médio/longo prazo, do tipo hemorragias dos pulmões, congestão, edemas pulmonares e outros.

As formas de actuação mais perigosas em animais parecem decorrer da formação de ácido sulfúrico, na presença de humidade.

Demonstrou-se já que o SO_2 influencia o desenvolvimento de cancro do pulmão em ratos, nomeadamente em associação com o benzopireno (19).

CAPÍTULO 3

3.6 Efeitos na Saúde Humana

Um adulto necessita de cerca de 14 kg de ar por dia, menos de 1,5 kg de alimentos e menos de 2 kg de água. Pode sobreviver 5 semanas sem alimentos e 5 dias sem água, mas todavia menos de 5 minutos sem ar.

A penetração constante do ar até ao interior dos pulmões confere aos poluentes atmosféricos uma importância especial, justificando a necessidade de lhes prestar a devida atenção.

Os seus efeitos nos seres humanos são os seguintes:

- Morte;
- Doenças crónicas, encurtamento da vida, perturbação do crescimento;
- Alteração de importantes funções fisiológicas, tais como transporte do oxigénio pela hemoglobina, actividade sensorial e outras funções do sistema nervoso;
- Redução de "performance" em actividades desportivas, condução de veículos, etc.;
- Armazenagem de materiais tóxicos no corpo humano;
- Desconforto geral e mau estar geral, incómodo devido a cheiros desagradáveis, redução de visibilidade.

As perturbações provocadas por inalação de partículas (as de dimensão inferior a 5μ penetram no trajecto pulmonar até aos alvéolos), de SO_2 , NO_x , compostos orgânicos, metais pesados e hidrocarbonetos, traduzem-se num aumento sensível, no homem, das afecções cardiovasculares, edemas pulmonares, enfisemas, câncer e bronquite.

CAPÍTULO 3

As figuras 3.3 e 3.4 apresentam os níveis considerados perigosos para actuação do NO_2 e de Partículas.

A extensão dos efeitos depende, naturalmente, de cada poluente e de múltiplos factores mas, em especial, aumenta com a presença simultânea de vários poluentes. Manifesta-se, assim, o chamado efeito de sinergia: dois poluentes atmosféricos presentes no mesmo local simultaneamente causam muito maiores danos do que a soma dos respectivos efeitos quando presentes isoladamente.

Não parecendo necessário alongar, no âmbito deste estudo, a descrição de efeitos de outros poluentes atmosféricos, já que o mesmo se refere, em particular, ao dióxido de enxofre, analisam-se, de seguida, e com mais pormenor, os efeitos deste poluente no homem.

O dióxido de enxofre é responsável por severas reduções no funcionamento normal dos pulmões com exposições entre dois e cinco p.p.m. ou, em alguns casos, no desenvolvimento de ataques de asma em pessoas anteriormente sãs (1).

Excessos, para além da média, de ocorrências de problemas respiratórios crónicos têm sido evidenciados em populações sujeitas a maiores concentrações (1).

O balanço final de todos os estudos toxicológicos efectuados sobre os efeitos do SO_2 no Homem, levou à fixação dum nível máximo de $13\ 000\ \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$, durante um período máximo de exposição de 8 horas para trabalhadores saudáveis em ambientes industriais.

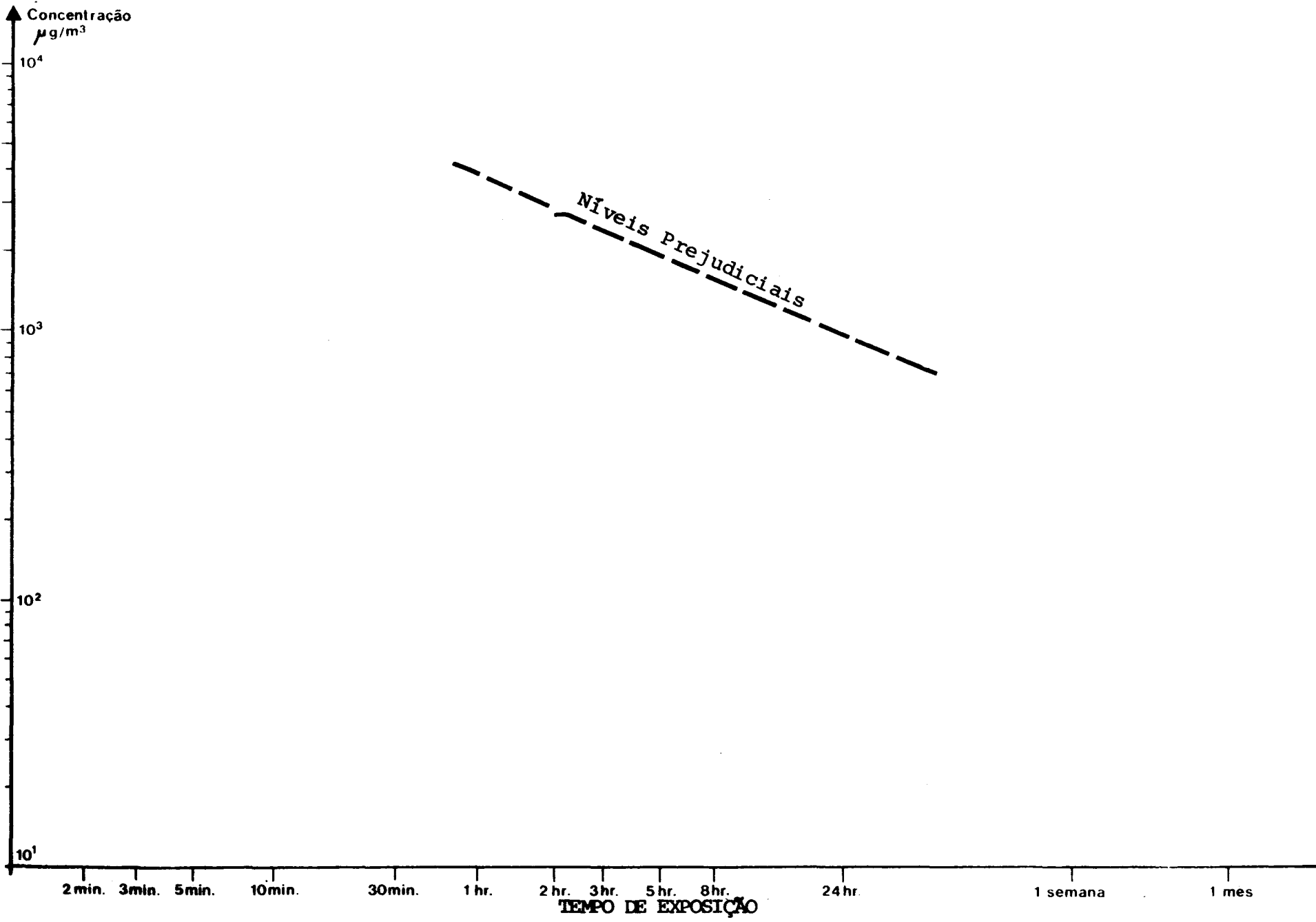


Figura 3.3 - EFEITOS DO NO₂ NA SAÚDE HUMANA

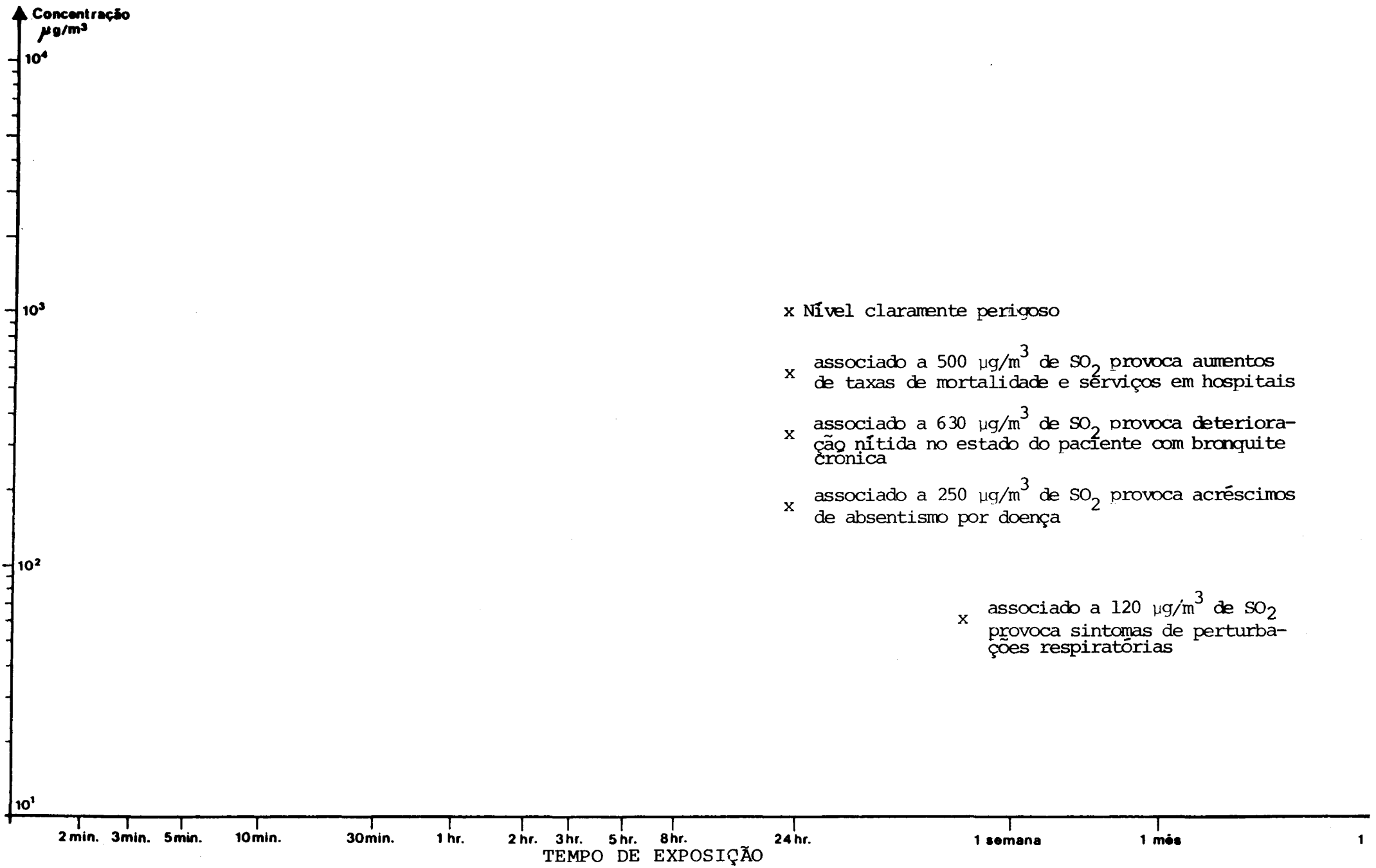


Figura 3.4 - EFEITOS DAS PARTÍCULAS EM SUSPENSÃO NA SAÚDE HUMANA

CAPÍTULO 3

Todavia, se estiverem presentes teores de poeiras em suspensão superiores a $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a tolerância mesmo por parte de pessoas saudáveis é substancial e rapidamente diminuída.

De acordo com os estudos epidemiológicos realizados, pode-se constatar que, a média de concentrações diárias de SO_2 , à qual as pessoas que sofrem de bronquite crônica são sensíveis, é de cerca de $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$, embora só quando associadas a teores de fumos que excedam os $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

A terminar, identificamos algumas zonas de efeitos críticos do SO_2 .

QUADRO 3.V - ZONAS DE EFEITOS CRÍTICOS DO DIÓXIDO DE ENXOFRE

- Detecção de sabor	$825 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (intervalo de percepção calculado em $500-1050 \mu\text{g}/\text{m}^3$)
- Detecção de odor	$1375 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (intervalo de percepção calculado em $1000-1750 \mu\text{g}/\text{m}^3$)
- Detecção pelos brônquios em indivíduos saudáveis	$4400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (para alguns minutos)
- Aumento dos níveis de aceleração de respiração e pulsação	$2750 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (10 minutos)
- Nível acima do qual podem ocorrer afecções brônquicas em pacientes que já sofram de bronquite (valores médios diários)	$500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (associadas a $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de poeiras)

CAPÍTULO 3

A Figura 3.5 representa graficamente o Quadro 3.V.

Finalmente, o capítulo ficaria incompleto se não referíssemos ainda os "standards" para o ar ambiente adoptados, por exemplo, pela Comunidade Económica Europeia (CEE) e pelo Gabinete da Área de Sines (GAS), para o dióxido de enxofre:

QUADRO 3.VI - STANDARDS DE AR AMBIENTE PARA O SO₂

	Período de amostragem	Concentração Máxima	Concentrações associadas de Partículas em Suspensão
C.E.E	1 ano	80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (mediana das médias diárias)	> 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (mediana das médias diárias)
	1 ano	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (mediana das médias diárias)	< 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (mediana das médias diárias)
	24 horas	250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (média aritmética)	> 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (média aritmética)
	24 horas	350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (média aritmética)	< 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (média aritmética)
	Inverno (Out. a Março)	130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (mediana das médias diárias)	> 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (mediana das médias diárias do Inverno)
	Inverno (Out. a Março)	180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (mediana das médias diárias)	< 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (mediana das médias diárias do Inverno)
G.A.S	1 ano	80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Valor anual da média aritmética dos valores de 24 horas)	—
	24 horas	250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (a não exceder em 98% dos períodos de 24 horas)	—

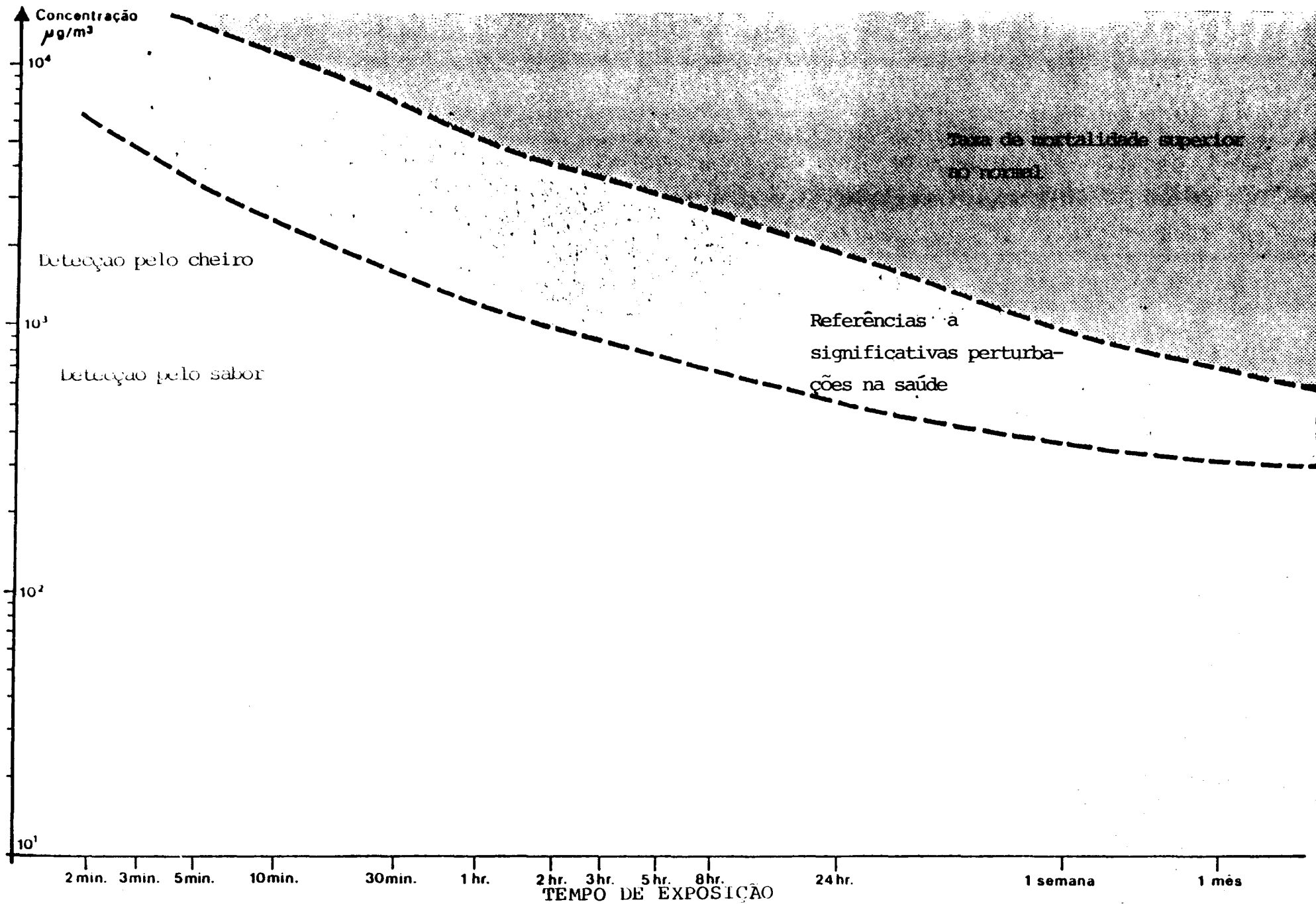


Figura 3.5 - EFEITOS DO DIÓXIDO DE ENXOFRE NA SAÚDE HUMANA

CAPÍTULO 4

OS MODELOS MATEMÁTICOS DE SIMULAÇÃO DO TRANSPORTE E DIFUSÃO DE POLUENTES NA ATMOSFERA

Neste capítulo, efectua-se a análise da importante equação de transporte e difusão de gases.

Apresentam-se os principais tipos de modelos não gaussianos.

Analisa-se com detalhe toda a formulação gaussiana, seus pressupostos e implicações.

Passam-se em revista os mais recentes e conceituados modelos gaussianos.

Finalmente, caracterizam-se os mais importantes e selecciona-se aquele que reúne as características visivelmente mais adequadas aos objectivos desta investigação.

CAPÍTULO 4

4.1 Preâmbulo

Os modelos matemáticos de simulação entraram, a partir dos anos 70, no dia a dia da tomada de decisões ambientais e tecnológicas.

As decisões que restringiram o uso incontrolado dos hidrocarbonetos clorofluorados praticamente em todos os países industrializados, foram largamente baseadas nas simulações em computador com modelos dos processos químicos e dinâmicos que mostraram a provável destruição ou redução da camada de ozono que protege a Terra.

Estudos muito intensos, com modelos, decorrem actualmente para completo esclarecimento do "efeito de estufa" que as emissões de CO₂ - com aumento da sua concentração na atmosfera - poderiam estar a causar na elevação progressiva e global da temperatura da Terra.

Os efeitos previsíveis por instalação de novas indústrias são sistemática e obrigatoriamente simulados segundo, por exemplo, a legislação americana e doutros países.

A Academia das Ciências dos Estados Unidos da América focava: "há uma decalagem de cerca de 15 anos entre as emissões de hidrocarbonetos clorofluorados e a destruição ou redução da camada de ozono, ou seja, a menor espessura de ozono ocorrerá somente 15 anos após cessarem as emissões; por isso nós não podemos "arriscar" a experiência para ver uma eventual catástrofe. Uma decisão tem de ser tomada apesar da informação ser, hoje em dia, parcial".

Os modelos dão um contributo de grande importância para estas tarefas (34).

CAPÍTULO 4

As decisões têm de ser tomadas antes da instalação das fábricas e, com ajuda dos modelos, minimizam-se os riscos de gastar milhares de contos com equipamento de controlo de poluição e só depois verificar que, apesar disso, os efeitos na qualidade do ar da região são eventualmente inaceitáveis.

Mas é na efectivação de previsões e simulações para cálculo de concentrações ao nível do solo dos poluentes atmosféricos e para determinação de alturas das chaminés que as garantam com elevada probabilidade, que os modelos ganharam uma importância crucial. Existe, assim, um consenso internacional de que, apesar dos modelos matemáticos de simulação fazerem previsões de concentrações, geralmente com erros desde 30% até ao factor 2 e, por vezes, até ao factor 10, não existem actualmente nem se perspectivam melhores métodos alternativos para as suas úteis previsões. Há pois que prosseguir e generalizar a sua utilização sem prejuízo dos necessários esforços e investigação para melhorar a qualidade das suas aproximações e em especial o rigor dos parâmetros neles utilizados.

CAPÍTULO 4

4.2 A Equação da Difusão e Transporte de Poluentes

Para encontrarmos a equação de difusão e transporte dos poluentes temos de ter presente que a superfície da Terra exerce atrito sobre a atmosfera, o qual influencia a velocidade do vento até à altura de cerca de um quilómetro.

Do mesmo modo se verificam variações de temperatura e turbulência durante o dia, em especial até ao extremo desta camada. É nesta zona que ocorrem os fenómenos de transporte e difusão de poluentes (36) que nos interessa analisar.

Assumamos então que a variável A - por exemplo concentração dum poluente - é a soma dum valor médio \bar{A} e duma flutuação turbulenta A' :

$$A = \bar{A} + A'$$

Se $\bar{A}' = 0$ e $\bar{\bar{A}} = \bar{A}$ e considerarmos a equação de continuidade para A :

$$\frac{dA}{dt} = \frac{\partial A}{\partial t} + u \frac{\partial A}{\partial x} + v \frac{\partial A}{\partial y} + w \frac{\partial A}{\partial z} = B+S \quad (4.1)$$

em que B representa os efeitos externos, S as fontes internas e u, v, w as componentes de velocidade segundo os eixos coordenados x, y, z , sendo w a vertical; e se assumirmos que a atmosfera é incompressível então,

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4.2)$$

CAPÍTULO 4

e por substituição de variáveis e cálculo da média vem,

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{A}}{dt} &= \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{A}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{A}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{A}}{\partial z} = \\ &= \bar{B} + \bar{S} - \frac{\partial}{\partial x} (\overline{u'A'}) - \frac{\partial}{\partial y} (\overline{v'A'}) - \frac{\partial}{\partial z} (\overline{w'A'}) \end{aligned} \quad (4.3)$$

onde $\overline{u'A'}$ é o fluxo de A na direcção de x devido a flutuações turbulentas.

Vulgarmente considera-se que o fluxo turbulento pode ser proporcional ao gradiente médio, isto é:

$$\overline{w'A'} = -K \frac{\partial \bar{A}}{\partial z}$$

em que K é o chamado coeficiente de difusão.

O sinal negativo provém de se considerar que o fluxo se verifica dos maiores para os menores valores de A.

Então se a variável A fôr a concentração média C dum poluente obtém-se, por substituição, a equação geral de difusão:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} &= S + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (4.4)$$

É importante focar, contudo, que certas escalas de tempo e de espaço estão implícitas nesta equação.

CAPÍTULO 4

As componentes médias da velocidade do vento u , v , w , respectivamente na direção do eixo dos xx , dos yy e dos zz , bem como a concentração média C , representam médias referidas a um intervalo de tempo e de espaço.

As flutuações de velocidade com o tempo e espaço, menores que esses intervalos, são consideradas turbulências e implicitamente incluídas nos coeficientes K . Contudo, como a prática demonstra, a difusão de uma pluma depende do tamanho desta, o que contradiz a equação de difusão que usa K constantes. Assim, a equação de difusão só é válida se o tamanho da pluma for superior ao das turbulências dominantes para que toda a turbulência implícita nos K tome parte na difusão.

Por isso, quando a fonte emissora está perto do terreno os redemoinhos turbilhonares têm dimensões seguramente menores que a da pluma, mas nas emissões de altas chaminés a equação de difusão só deve ser usada quando o poluente já esteja espalhado várias centenas de metros (28).

É da equação base de difusão que, com premissas e tratamentos diferentes, resulta uma enorme diversidade de modelos de simulação do transporte e difusão de poluentes.

4.2.1 Modelos Gaussianos

Os mais importantes, mais usados e generalizadamente aceites são os modelos gaussianos.

Neles se assume que a emissão do poluente é constante; a sua concentração é independente do tempo, $\frac{\partial C}{\partial t} = 0$; a velocidade do vento e os coeficientes de difusão não são

CAPÍTULO 4

função da posição; a difusão na direcção do vento (eixo dos xx) é insignificante comparada com o transporte médio nessa direcção e que a direcção do vento e sua velocidade são constantes para o período de cálculo da concentração média.

Deste conjunto de pressupostos resulta uma solução para a equação de difusão com a tão famosa expressão analítica:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \cdot \left\{ \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z-H}{\sigma_z} \right)^2 \right] + \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z+H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right\} \quad (4.5)$$

Pela sua importância fundamental será adiante analisada com grande profundidade em toda a sua simbologia e em especial consequências, no parágrafo 4.3.

Antes porém de entrarmos nesse assunto que é a base de toda esta dissertação valerá a pena que, sem nos alongarmos demasiado, façamos alguns breves comentários a outros tipos de modelos também designados muitas vezes como modelos numéricos (27).

4.2.2 Modelos Numéricos do Tipo K Constante

A equação geral da difusão (4.4) apresentada, é impossível de resolver analiticamente para formas funcionais gerais de K , u , v e w .

CAPÍTULO 4

Por isso se utilizam métodos numéricos aproximados na sua integração.

Assim e nesta óptica de Fick ("K models" na nomenclatura anglo-saxónica) em que K é considerado como constante, três tipos de aproximações são utilizados.

Na formulação Euleriana, um sistema de coordenadas fixo, ou malha, é aplicado a toda a região em estudo (multibox models). A concentração do poluente em cada quadrado da malha é então calculada através da resolução da equação por meio de métodos numéricos, em computador, para uma série de intervalos de tempo. Nas quadrículas da malha que contenham fontes emissoras, é adicionado um termo ao membro direito da equação de difusão.

Esta aproximação, é particularmente adequada a situações onde existe uma multiplicidade de fontes emissoras ou para as quais é necessário prever a concentração para toda uma região.

Na formulação Lagrangiana o sistema de coordenadas move-se com os ventos locais médios. Esta aproximação é adequada para modelar o transporte a longas distâncias ou quando há interesse em conhecer o efeito numa região específica ou lugar de recepção. Embora poupando tempo de computador o método pode levar a resultados difíceis de interpretar, uma vez que o sistema de coordenadas é distorcido quando roda e gira com o vento.

Uma subclasse destes modelos Lagrangianos os "modelos de trajectória" aplicam a formulação Lagrangiana a uma só célula que se move e por isso evitam a distorção (38).

CAPÍTULO 4

A última formulação dos modelos complexos é chamada "particle in cell" e representa uma aproximação híbrida entre a Euleriana e Lagrangiana. Nesta, as emissões das fontes poluidoras estão divididas em células Lagrangianas individuais sendo cada uma delas marcada num sistema fixo de coordenadas.

A concentração do poluente é então calculada em cada quadrícula pela contagem do número de células presentes nela (35).

Em síntese, poderíamos dizer que enquanto o modelo gaussiano parte de certas premissas, já referidas, que o levam à solução analítica de equação de difusão, 4.5, os modelos numéricos calculam a solução numérica da equação integrando-a caso a caso e a cada instante ao longo do tempo (27).

Estes modelos são complexos e traçam pois o movimento da pluma ao longo do espaço e do tempo seguindo variações da velocidade do vento, direcção e estabilidade; o modelo gaussiano usa uma estatística no sentido de que se alicerça numa descrição global da direcção e velocidade do vento para chegar à previsão da evolução da pluma como um todo, em condições estacionárias.

Uma vez que os modelos numéricos aplicam a equação de difusão em cada ponto do espaço, ao longo de uma série de intervalos no tempo (27, 28) eles necessitam de informação - muito mais detalhada e em muito maior quantidade - sobre direcção e velocidade do vento para cada ponto da malha. Um mapa de ventos para cada ponto da malha é, pois, necessário (37).

CAPÍTULO 4

Infelizmente essa informação é rara ou mesmo inexistente na grande maioria das situações da vida prática, o que, associado aos elevados custos em tempo de computador, confere tão pouca aplicação e uma menor popularidade a estes modelos.

Apesar destes factos, é, em particular para certas situações especiais onde os modelos gaussianos não são aplicáveis (terreno com elevações significativas) que os modelos numéricos são úteis e constituem a classe de simulações mais moderna e sofisticada.

4.2.2.1 Modelos Tipo Caixa (Box Models)

Nestes modelos as emissões numa área são assumidas como constantes ao longo duma distância Δx . O poluente está uniformemente distribuído numa faixa entre o solo e a altura z_i da camada de mistura. Assume-se que a velocidade u do vento é constante dentro da faixa e pode-se admitir que a altitude da camada de mistura aumenta com o tempo $\left(\frac{\partial z_i}{\partial t}\right)$ como geralmente acontece durante o nascer do dia (39).

Designemos por C_b e C_a as concentrações do poluente antes de entrar na "caixa" e dentro dela; então a equação de continuidade será para este caso:

$$\Delta x z_i \frac{\partial C}{\partial t} = \Delta x Q_a + u z_i (C_b - C) + \Delta x \frac{\partial z_i}{\partial t} (C_a - C) \quad (4.6)$$

Variação da concentração com o tempo	=	Fonte Emissora	+	Variação devida a transporte horizontal	+	Variação devida a aumento da camada de mistura e trans- porte vertical
--	---	-------------------	---	---	---	---

CAPÍTULO 4

Se se assumir que $\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial z_i}{\partial t} = 0$, isto é estacionariedade e que a concentração de base era nula então:

$$C = \frac{\Delta x}{z_i} \frac{Q_a}{u} \quad (4.7)$$

Este modelo é por vezes utilizado como técnica preliminar de análise numa região. O exemplo mais característico e aplicado de "box model" é o ATDL "Atmospheric Turbulence and Diffusion Lab" (33, 41).

A sua aplicação tem sido feita ao cálculo da concentração em cidades.

4.2.3 Modelos Estatísticos

Nas camadas da atmosfera situadas até algumas centenas de metros da superfície e em especial durante o dia, a velocidade turbulenta duma partícula $v'(t)$ está relacionada com a sua velocidade $v'(t + \Delta t)$ para intervalos de tempo até alguns minutos, sendo idênticas para intervalos da ordem do segundo.

Se se definir um coeficiente de autocorrelação

$$R(\Delta t) = \frac{\overline{v'(t) v'(t + \Delta t)}}{\sigma_v^2} \quad (4.8)$$

para um pequeno intervalo de tempo tenderá para 1 e para maiores intervalos tenderá para zero.

Sendo v' a velocidade da partícula quando se move, es

CAPÍTULO 4

te sistema pode ser designado por sistema Lagrangiano de movimento.

Ao contrário, as velocidades registadas num anemómetro (referencial fixo) são chamadas de tipo Euleriano (40).

O célebre teorema de Taylor da difusão (1921), das partículas duma fonte emissora contínua, (29), assume que se y for o desvio que sofre uma partícula perpendicularmente à direcção do vento devido a uma velocidade turbulenta v' após o tempo t , e se for \bar{y}^2 ou σ_y^2 o desvio padrão dum largo número de valores de y então a sua taxa de variação com o tempo é

$$\frac{d \sigma_y^2}{dt} = \frac{d \bar{y}^2}{dt} = 2y \frac{dy}{dt} = 2y \bar{v}' =$$

$$= 2 \int_0^t \overline{v'(t) v'(t+t')} dt' \quad (4.9)$$

Se a turbulência fôr homogênea (não varia no espaço) e estacionária (não varia no tempo) então por substituição vem

$$\sigma_y^2 = 2 \sigma_v^2 \int_0^t R(t') dt' dt \quad (4.10)$$

conhecida por equação de Taylor. Poderemos, usando aproximações simples calcular o comportamento de σ_y^2 para pequenos e grandes intervalos de tempo.

$$\text{Se } \Delta t \rightarrow 0 \quad R(t) \rightarrow 1 \quad \text{e} \quad \sigma_y^2 \approx \sigma_v^2 t^2 \quad (4.11)$$

ou σ_y proporcional a t

$$\text{Se } \Delta t \rightarrow \infty \quad \int_0^t R(t') dt' = T \quad \text{em que } T \quad (4.12)$$

CAPÍTULO 4

é uma constante designada de "escala de tempo" e

$$\sigma_y^2 \approx 2 \sigma_v^2 T t \quad \text{ou} \\ \sigma_y \text{ proporcional a } t^{1/2} \quad (4.13)$$

Assim, à medida que o tempo de deslocação para uma pluma aumenta, a taxa de difusão diminui. Os movimentos das partículas são inicialmente lineares com o tempo porque as partículas "lembram-se" (28) da sua velocidade inicial. Mas, à medida que o tempo passa elas "esquecem" os movimentos iniciais e tudo se reduz a um problema do tipo de Monte Carlo com σ_y proporcional a $t^{1/2}$. Efectivamente partículas "sem memória" sofrem apenas difusão molecular.

Esta é a base dos modelos estatísticos.

Então o caminho de cada partícula pode ser descrito por uma função estatística, na medida em que são iguais as probabilidades de em cada instante se deslocarem para a esquerda ou para a direita da linha da direcção do vento (aproximação do chamado método de Monte Carlo).

Se n fôr o número de deslocações na direcção do vento e m na direcção perpendicular, a probabilidade de encontrar uma partícula é dada por:

$$P(n,m) = \left(\frac{2}{\pi n} \right)^{1/2} \exp \left(- \frac{m^2}{2n} \right) \quad (4.14)$$

À medida que n cresce a solução tende para uma curva gaussiana com $\sigma^2 = n$; como n é proporcional ao tempo o resultado dum puro modelo Monte Carlo é σ ser proporcional a $t^{1/2}$

CAPÍTULO 4

como dissemos atrás (28).

Sutton resolveu a equação de Taylor assumindo

$$R(t) = \left(\frac{v}{v + \frac{\sigma_y^2}{2} t} \right)^n \quad 0 < n < 1 \quad (4.15)$$

e que v é a viscosidade; o resultado foi

$$\begin{aligned} \sigma_y^2 &= \frac{2 v^n}{(1-n)(2-n) \sigma_{v'}^2} (\sigma_{v'}^2 t)^{2-n} = \\ &= \frac{1}{2} C_y^2 (ut)^{2-n} \end{aligned} \quad (4.16)$$

em que C_y^2

é o famoso coeficiente de difusão de Sutton (30,31). Este método foi aplicado generalizadamente até à substituição pelos factores de Pasquill-Gifford mais simples, adiante referidos.

Com o advento rápido dos modernos e potentes computadores de hoje, podem calcular-se milhares de trajectórias de partículas bem como a estatística (por exemplo σ_y) da sua distribuição.

Esta é uma técnica potencialmente poderosa para avaliação da difusão e transporte em regimes não uniformes e não estacionários de vento ou turbulência pois os cálculos de difusão ficam ligados e assentam nas características de base da turbulência.

Na prática, deslocações Δt de alguns segundos, são usadas no modelo e assumindo a seguinte equação:

$$x(t) = x(t - \Delta t) + u \Delta t \quad (4.17)$$

CAPÍTULO 4

em que $u = \bar{u} + u'$.

Por sua vez a componente turbulenta u' é a soma duma componente correlacionada e duma componente aleatória (Monte Carlo),

$$u'(t) = u'(t-\Delta t)R(\Delta t) + u'' \quad (4.18)$$

em que a componente aleatória u'' tem distribuição gaussiana com média zero e variância

$$\sigma_{u''}^2 = \sigma_{u'}^2 [1 - R^2(\Delta t)] \quad (4.19)$$

Esta relação é necessária para conservar a energia $\sigma_{u'}^2$, de uma deslocação para a outra. O coeficiente de autocorrelação é uma variável Lagrangiana.

Este método já foi aplicado com sucesso (32) mas é sobretudo adequado para situações particularmente difíceis tais como em terreno irregular.

Outros casos de aplicação e desenvolvimento de modelos estatísticos vêm sendo referenciados na bibliografia (100, 101, 102, 105).

CAPÍTULO 4

4.3 A Formulação Gaussiana do Transporte e Difusão de Gases na Atmosfera4.3.1 Características Essenciais e Expressões Analíticas

Analiseemos os chamados modelos gaussianos, que, reunindo um conjunto de características notáveis se tornam indiscutivelmente de grande valor, sendo no momento actual os que ocupam posição mais destacada em relação a todos os outros.

Deste modo:

- a) Correspondem a uma solução analítica da equação de dispersão, para u e K constantes.
- b) Produzem resultados que estão de acordo com os valores observados, tanto quanto os outros modelos.
- c) A expressão analítica que exprime a concentração do poluente é de manuseamento relativamente simples.
- d) São consistentes com a natureza aleatória da turbulência.

Por isso receberam generalizada aceitação por parte dos investigadores, engenheiros ambientais, agências internacionais de controlo da poluição e das próprias empresas industriais que os podem aplicar com o mesmo rigor, mais facilidade e menores custos que aos modelos numéricos.

Veamos a sua expressão analítica mais geral. A concentração C dum gás, no ponto de coordenadas x, y, z , devido às

CAPÍTULO 4

emissões duma chaminé com uma altura efectiva de emissão H (figuras 4.1 e 4.2) é dada por:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi \sigma_y \sigma_z u} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \cdot \left\{ \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z-H}{\sigma_z} \right)^2 \right] + \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z+H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right\} \quad (4.20)$$

em que:

Q - é o caudal mássico, constante, da emissão do gás.

u - é a velocidade média do vento (constante), na direcção do eixo coordenado xx .

σ_y e σ_z - são os desvios padrão da distribuição de concentração C (gaussianas) da pluma, respectivamente na direcção horizontal perpendicular à do vento e na direcção vertical.

H - é a altura efectiva de emissão; soma da altura real da chaminé h com a elevação da pluma Δh .

Admite-se que existe total reflexão da pluma quando toca o terreno, isto é, não há deposição nem reacção química com o terreno. O último termo traduz a reflexão assumindo uma fonte emissora, imagem, a uma distância H , abaixo do terreno. A equação pressupõe que na direcção do vento a componente de transporte é muito superior à de difusão e portanto esta é desprezável.

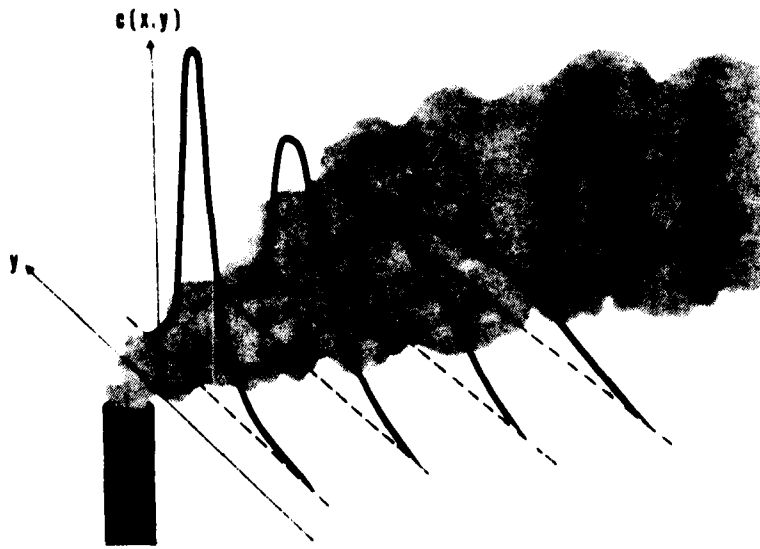


Figura 4.1 - DISTRIBUIÇÃO GAUSSIANA DA CONCENTRAÇÃO SEGUNDO O EIXO DOS YY

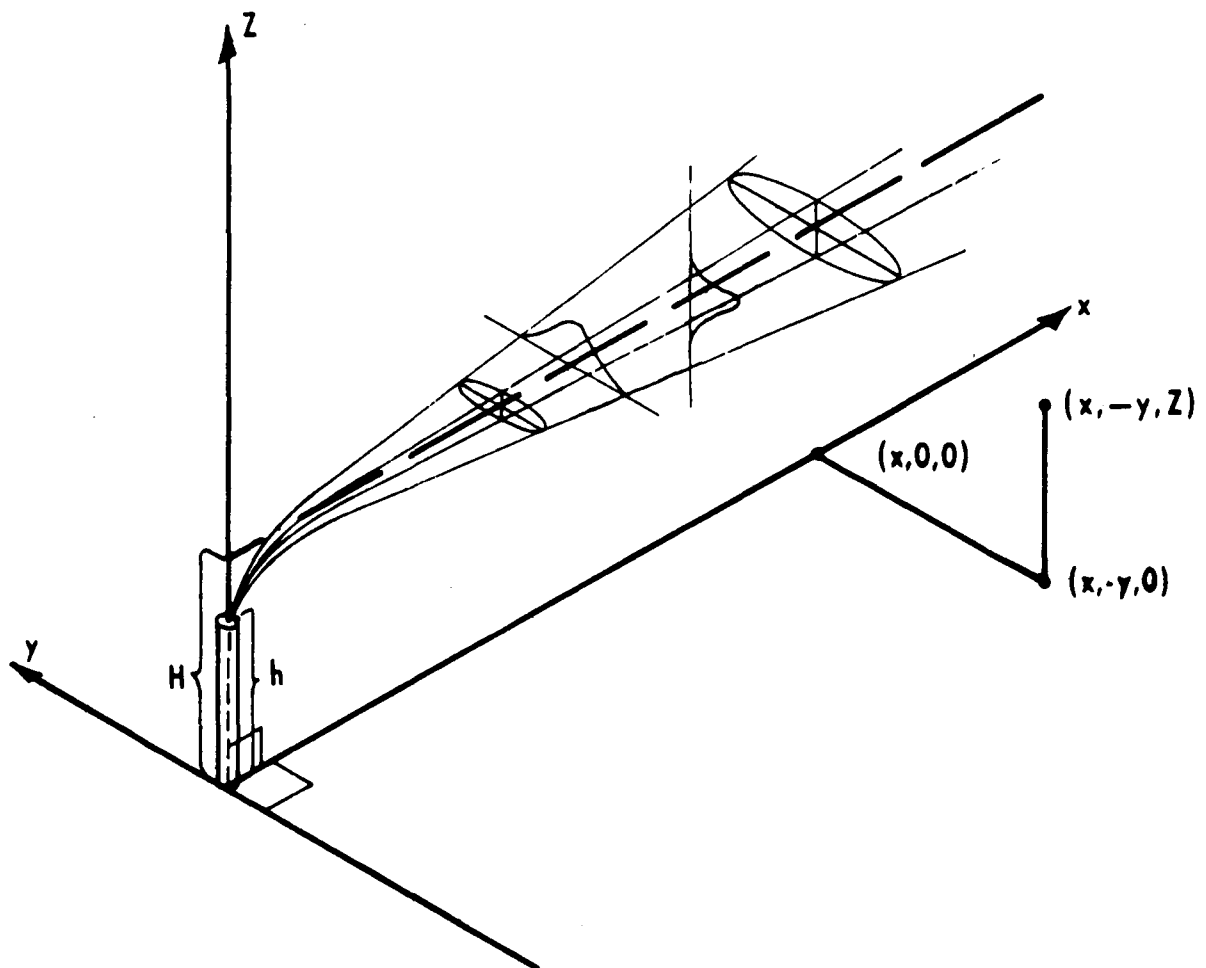


Figura 4.2 - DISTRIBUIÇÃO DA CONCENTRAÇÃO SEGUNDO OS EIXOS DOS YY E DOS ZZ. DIRECÇÃO DO VENTO SEGUNDO O EIXO DOS XX

CAPÍTULO 4

C é, naturalmente, a concentração média do gás para o mesmo intervalo de tempo a que são referidos os σ .

Para concentrações ao nível do solo ($z = 0$) a equação transforma-se em

$$C(x, y, 0, H) = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \quad (4.21)$$

largamente utilizada nos problemas práticos onde se pretendem conhecer as concentrações a que os cidadãos estão expostos.

Se se pretender a concentração ao longo da direcção do vento ($y = 0$) então a equação vem,

$$C(x, 0, 0, H) = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \quad (4.22)$$

Finalmente para um emissor a nível do solo sem elevação da pluma ($H = 0$),

$$C(x, 0, 0, 0) = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \quad (4.23)$$

A equação é o resultado do trabalho desenvolvido durante décadas por investigadores diversos de entre os quais é importante e justo salientar as contribuições de Sutton, Briggs, Pasquill, Gifford, Hanna e Turner (30,42,43,44,45, 46,47,48,49,50 e 51).

CAPÍTULO 4

4.3.2 Os Valores de σ_y e σ_z e a Estabilidade da Atmosfera. Classes de Estabilidade.

Analisemos os parâmetros da equação.

Os valores σ_y e σ_z , variam obviamente com a estrutura turbulenta da atmosfera, altitude, rugosidade do terreno tempo de amostragem para o qual a concentração é estimada, velocidade do vento e distância à fonte emissora do poluente.

A estrutura turbulenta da atmosfera e a velocidade do vento são consideradas nas chamadas classes de estabilidade de Pasquill - Gifford (52, 53, 54), Quadro 4.I, e os efeitos da distância, nos gráficos apresentados a seguir nas figuras 4.3, 4.4 e 4.5.

A classe de estabilidade A corresponde à maior instabilidade da atmosfera e a classe F à maior estabilidade. A classe D é a de estabilidade neutra e pode ser tomada com condições de nuvens de dia ou de noite, independentemente da velocidade do vento.

Esta classificação da estabilidade da atmosfera, é baseada na reacção duma parcela de ar deslocada adiabaticamente na direcção vertical. Do 1º princípio da Termodinâmica,

$$0 = C_p dT - \frac{1}{\rho} dp \quad (4.24)$$

e da chamada equação hidrostática (28) $\frac{\partial p}{\partial z} = - \rho g$ (4.25)

$$\text{vem } \left(\frac{dT}{dz} \right)_{ad} = - \frac{g}{C_p} = - \frac{0,98^\circ\text{C}}{100 \text{ m}} \quad (4.26)$$

QUADRO 4.1
CLASSES DE ESTABILIDADE

Velocidade do vento à super_ fície (10m), m/s	DIA			NOITE	
	Radiação Solar			Ligeiramente nublado ou 4/8 nuvens baixas	≤3/8 nuvens
	Forte	Moderada	Fraca		
< 2	A	A-B	B		
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

A classe D deve ser usada com nuvens durante a noite.

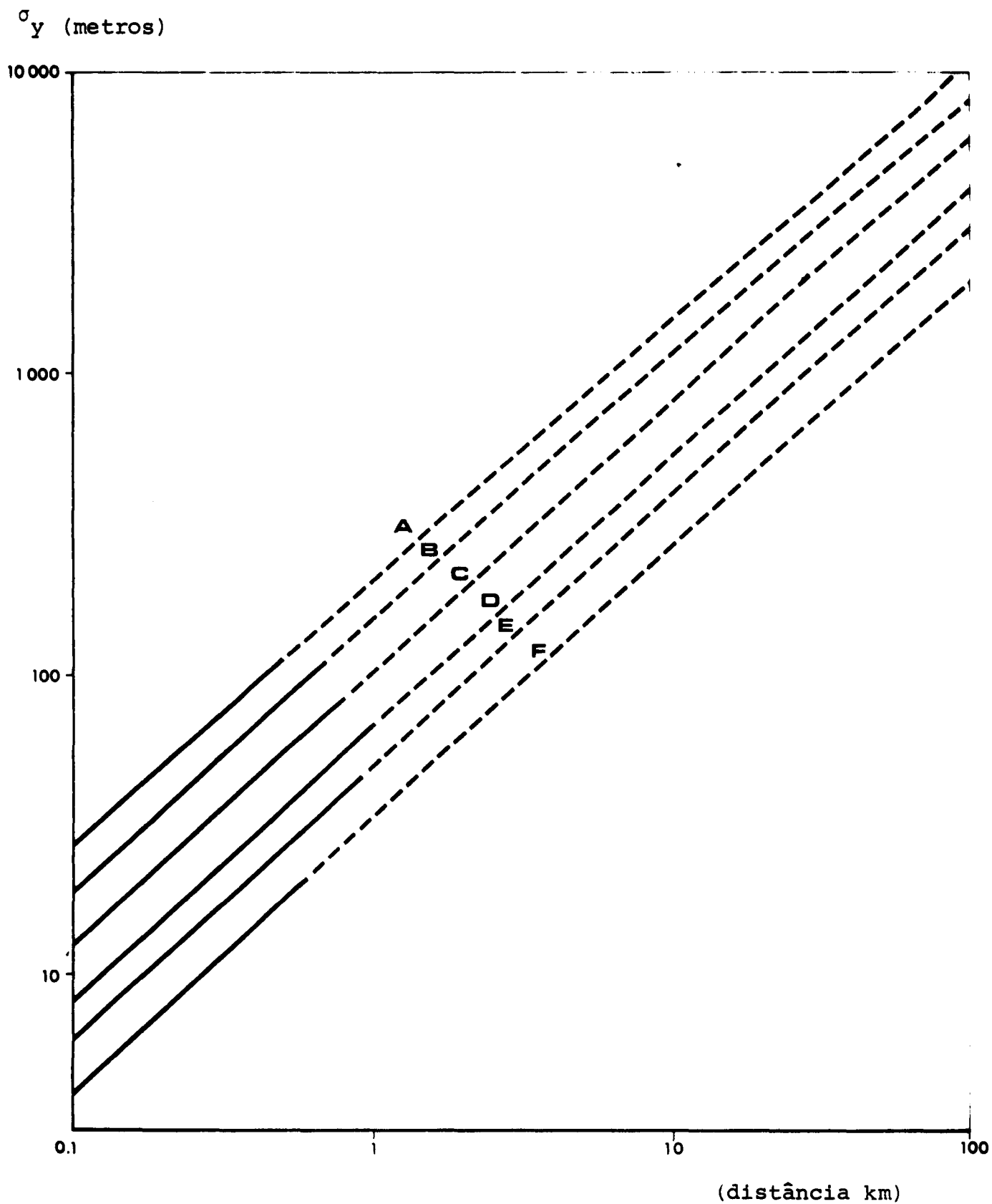


Figura 4.3 - OS VALORES DE σ_y

σ_z (metros)

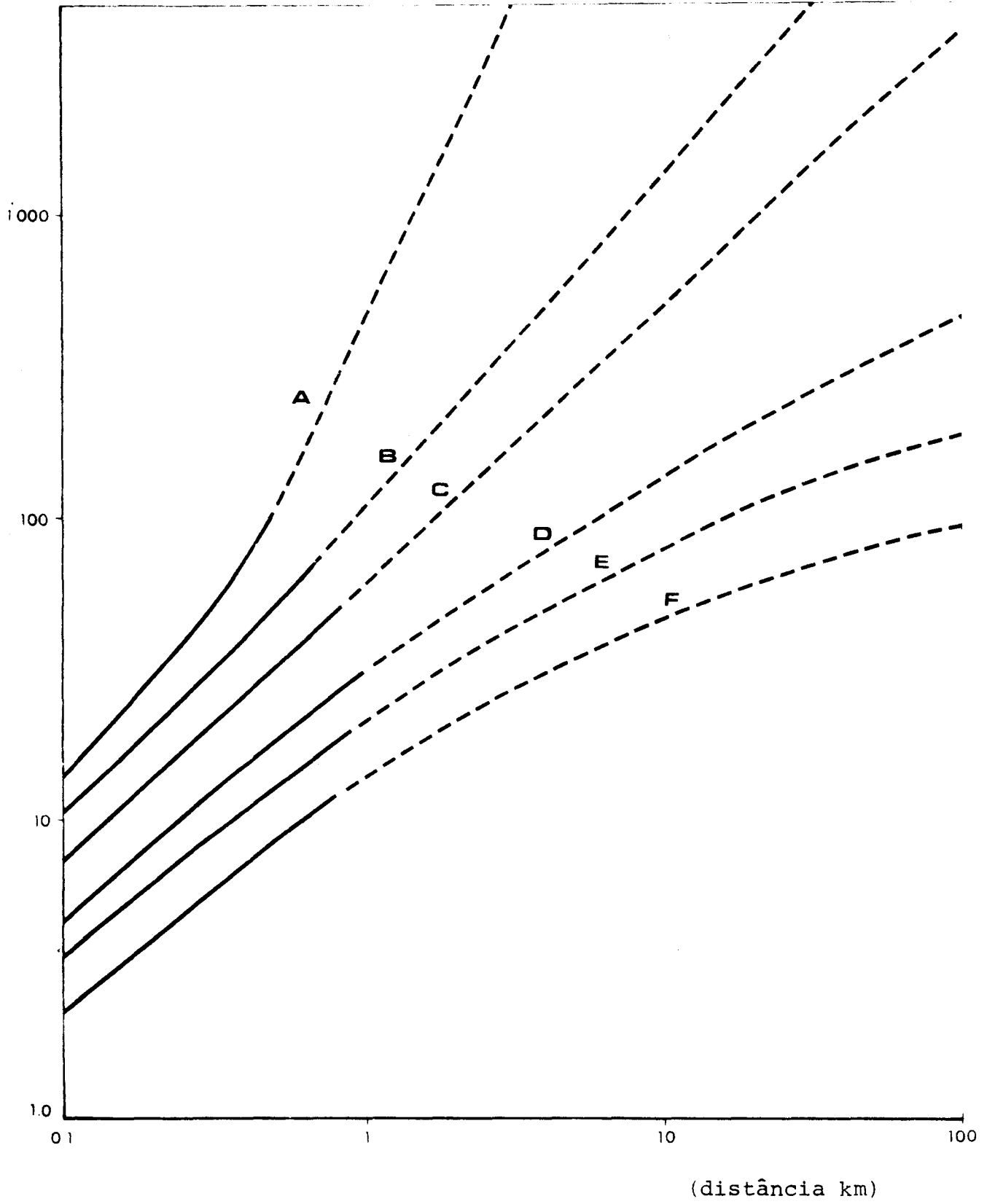


Figura 4.4 - OS VALORES DE σ_z

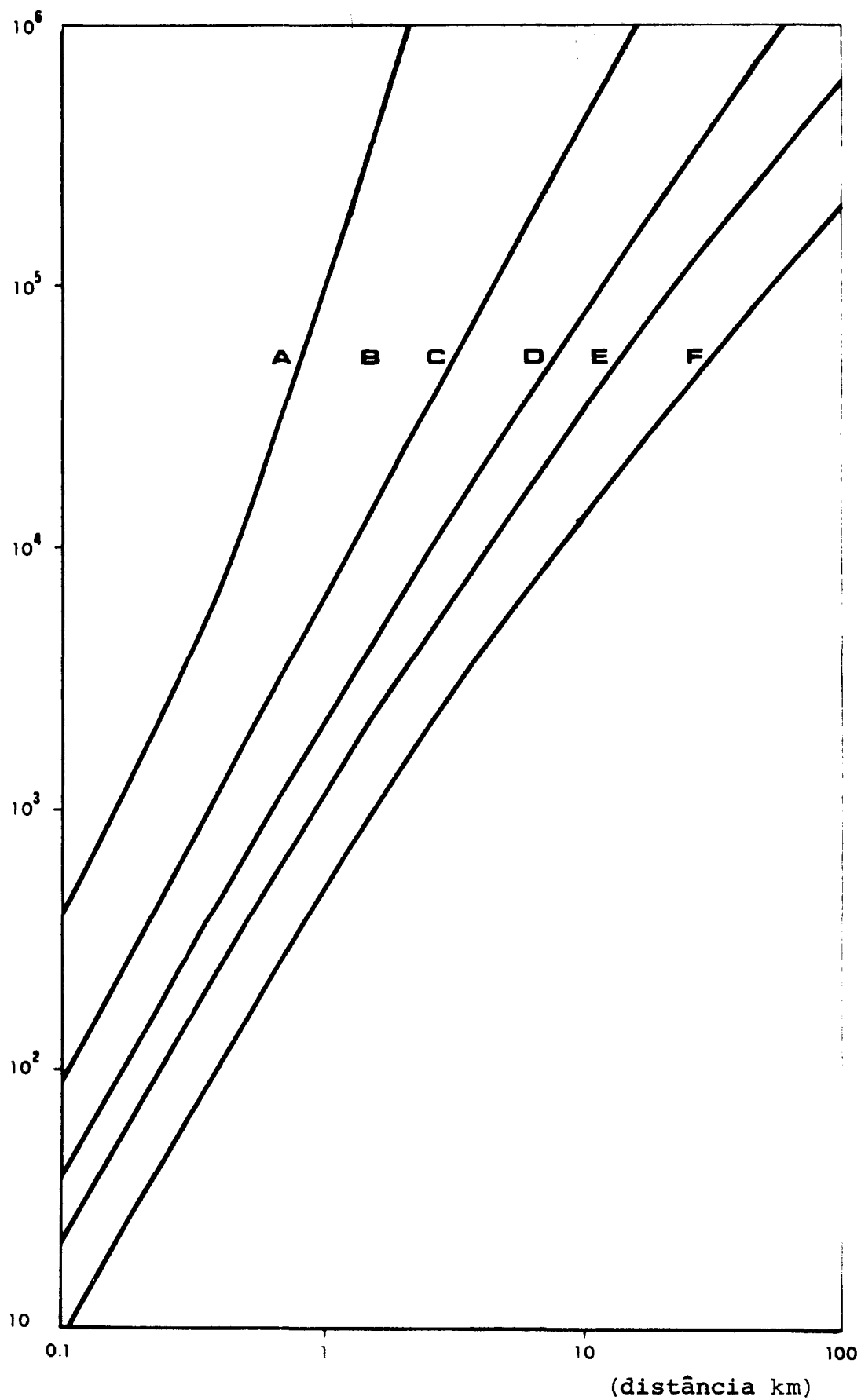


Figura 4.5 - OS VALORES DE $\sigma_y \times \sigma_z$

CAPÍTULO 4

ou seja, a temperatura decresce cerca de 1° C por cada 100 metros.

É claro que se encontram na atmosfera diferentes gradientes, mas os meteorologistas definiram os seguintes como base de classificação de estabilidade da atmosfera:

$$\text{Instável se } \frac{\partial T_e}{\partial z} < - 0.98^\circ \text{C}/100\text{m}$$

$$\text{Neutra se } \frac{\partial T_e}{\partial z} = -0.98^\circ \text{C}/100\text{m}$$

$$\text{Estável se } \frac{\partial T_e}{\partial z} > - 0.98^\circ \text{C}/100\text{m}$$

em que T_e é a temperatura da atmosfera.

Note-se ainda que os valores expressos pelas figuras relativas aos parâmetros σ_y e σ_z tiveram uma larga base experimental (52, 53, 54).

4.3.3 As Equações de Elevação da Pluma

Do mesmo modo, vejamos como se calcula a última variável ainda não debatida da fórmula: H , altura efectiva de emissão.

Como referido anteriormente $H = h + \Delta h$ em que h é a altura física do topo da chaminé e Δh a elevação da pluma.

A elevação de uma pluma na atmosfera é devida a dois efeitos: momento cinético e flutuação térmica.

O momento cinético característico da pluma é, natural

CAPÍTULO 4

mente, função do diâmetro do topo da chaminé e da velocidade dos gases expelidos.

A flutuação térmica depende da quantidade de calor associada aos gases da pluma e da diferença entre a temperatura destes e a do ar ambiente.

As expressões de cálculo de elevação da pluma são pois do tipo genérico:

$$\Delta h = C_1 \frac{V_s d}{u} + C_2 \frac{C_3 Q_h}{u^4} \quad (4.27)$$

em que C_1 , C_2 , C_3 e C_4 são constantes;

V_s é a velocidade de saída dos gases da chaminé;

d é o diâmetro da chaminé;

Q_h é a taxa de emissão de calor associada aos gases;

u é a velocidade do vento.

4.3.3.1 A Expressão de Holland

A primeira expressão para cálculo da elevação da pluma, generalizadamente aplicada em muitos modelos, foi a de Holland (1)

$$\Delta h = 1,5 \frac{V_s d}{u} + \frac{4 \cdot 10^{-5} Q_h}{u} \quad (4.28)$$

em que Δh se exprime em metros,

V_s se exprime em m/s,

d se exprime em m,

Q_h se exprime em cal/seg.

CAPÍTULO 4

O primeiro termo traduz a influência do momento cinético da pluma e o segundo termo o contributo da sua componente de energia térmica.

Está hoje provado que esta expressão calcula valores muito inferiores aos da elevação real e deve ser multiplicada - para se aproximar deles - no mínimo pelo factor 2.

Sem prejuízo de existirem outras expressões, que analisaremos adiante, talvez que a formulação mais vulgarmente utilizada, hoje em dia, seja a de Briggs.

4.3.3.2 As Expressões de Briggs

Através duma análise dimensional conclui-se que

$$\Delta h = \left[\frac{12,17 F_m x}{u^2} + \frac{12,17 F^2}{2 u^3} \right]^{1/3} \quad (4.29)$$

em que F_m designa a componente mecânica e F a térmica.

Porque na generalidade das plumas o efeito dominante é o térmico - pelo menos nas zonas importantes para cálculo da máxima concentração ao nível do solo - a expressão de Briggs leva-nos à forma mais actual e generalizada das equações de elevação de plumas

$$\Delta h = k_1 Q_h^a x^b u^c \quad (4.30)$$

$$\Delta h = k_1 F^a x^b u^c \quad (4.31)$$

em que K_1 , a , b , c são constantes;

Q_h a taxa de emissão de calor;

F o fluxo;

x a distância ao local de emissão;

u a velocidade do vento.

CAPÍTULO 4

Briggs utiliza a seguinte expressão para o fluxo

$$F = \frac{1}{\rho_a} (r^2 V_s \rho_e) \left(g \frac{T_s - T_a}{T_s} \right) \quad (4.32)$$

em que ρ_e densidade do efluente;
 ρ_a densidade do ar ambiente;
 T_s temperatura dos gases da chaminé;
 T_a temperatura do ambiente;
 r raio da chaminé

Se conservadoramente considerarmos $\rho_e = \rho_a$ então

$$F = g V_s r^2 \left(\frac{T_s - T_a}{T_s} \right) \quad (4.33)$$

Através de múltiplas observações e ensaios experimentais, Briggs chegou às seguintes expressões para cálculo da elevação da pluma em função da distância à fonte emissora:

$$\text{Para } x < x^* \quad \Delta h(x) = 1,6 F^{1/3} u^{-1} x^{2/3} \quad (4.34)$$

$$\text{Para } x > x^* \quad \Delta h(x) = 1,6 F^{1/3} u^{-1} x^{*2/3} \left[\frac{2}{5} + \frac{16x}{25x^*} + \frac{11}{5} \left(\frac{x}{x^*} \right)^2 \right] \cdot \left(1 + \frac{4}{5} \frac{x}{x^*} \right)^{-2} \quad (4.35)$$

* Briggs considera que a turbulência da atmosfera desempenha uma acção de particular relevo a partir da distância definida por x^* .

CAPÍTULO 4

em que $x^* = 0,52 F^{2/5} h^{3/5}$ (h < 1000 ft) (4.36)

e $x^* = 33 F^{2/5}$ (h > 1000 ft) (4.37)

exprimindo-se x^* em (ft), F em ($\text{ft}^4 \text{sec}^{-3}$) e h em (ft).

Se expressarmos x^* em (m) e F em ($\text{m}^4 \text{seg}^{-3}$) e h em (m) será

$$x^* = 2,16 F^{2/5} h^{3/5} \quad h < 305 \text{ m} \quad (4.38)$$

$$x^* = 67 F^{2/5} \quad h > 305 \text{ m} \quad (4.39)$$

Como fórmulas para a elevação final da pluma, Briggs indica:

- para condições neutras ou instáveis $\Delta h = 1,6 F^{1/3} u^{-1} (3x^*)^{2/3}$ (4.40)

e em particular para centrais térmicas

$$\Delta h = 1,6 F^{1/3} u^{-1} (10h)^{2/3} \quad (4.41)$$

- para condições meteorológicas estáveis:

$$\Delta h = 2,6 \left(\frac{F}{us} \right)^{1/3} \quad (4.42) \quad \text{em que } s = \frac{g}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (4.43)$$

representando θ a temperatura potencial e g o valor da ace-

CAPÍTULO 4

leração da gravidade.

Uma detalhada fundamentação dos aspectos teóricos que conduziram a estas formulações, efectuada através das equações de fluxo de momento e de flutuação e dos princípios de conservação, pode ser encontrada por exemplo em 44 e 55.

De entre os outros trabalhos sobre este assunto são de salientar os seguintes.

4.3.3.3 As Expressões de Bringfelt

As expressões sugeridas são:

$$\Delta h = 103 Q_h^{0,39} u^{-1} \quad x = 250 \text{ m} \quad (4.44)$$

$$\Delta h = 167 Q_h^{0,36} u^{-1} \quad x = 500 \text{ m} \quad (4.45)$$

$$\Delta h = 224 Q_h^{0,34} u^{-1} \quad x = 1\ 000 \text{ m} \quad (4.46)$$

exprimindo-se Δh em (m), Q_h em (MW) e u em (m seg^{-1}).

Este autor confirmou a expressão de Briggs (4.30) para experimentações efectuadas na Suécia chegando ao valor 1,7 e 1,8 em vez do 1,6 utilizado por Briggs.

Para a elevação final da pluma este autor sugere

$$\Delta h = \left(\frac{3,61}{\alpha^2} \right)^{1/3} \left(\frac{F}{su} \right)^{1/3} \quad (4.47)$$

sendo $\alpha = 0,53$ para condições estáveis e $\alpha = 0,52$ para grande estabilidade de atmosfera.

CAPÍTULO 4

4.3.3.4 As Expressões de Montgomery e Colaboradores

Após intensas investigações sobre as emissões das centrais térmicas de Tennessee Valley Authority foram produzidas as seguintes expressões:

Estabilidade neutra ($-0,17 < \frac{\partial \theta}{\partial z} < 0,16$, média = 0,05)

$$\Delta h (x) = 2,50 x^{0,56} F^{1/3} u^{-1} (x < 3 000m) \quad (4.48)$$

Estabilidade moderada ($0,16 < \frac{\partial \theta}{\partial z} \leq 0,70$, média=0,43)

$$\Delta h (x) = 3,75 x^{0,49} F^{1/3} u^{-1} (x < 2 800m) \quad (4.49)$$

Estabilidade forte ($0,70 < \frac{\partial \theta}{\partial z} < 1,87$, média = 1,06)

$$\Delta h (x) = 13,8 x^{0,26} F^{1/3} u^{-1} (x < 1 960m) \quad (4.50)$$

Para a elevação final Montgomery e Carpenter indicam

$$\Delta h = 114 C_1 F^{1/3} u^{-1} \quad (4.51)$$

$$\text{em que } C_1 = 1,58 - 0,414 \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (4.52)$$

sendo $\frac{\partial \theta}{\partial z}$ o gradiente de temperatura potencial ($^{\circ}\text{C}/100\text{m}$)

As investigações realizadas sobre o assunto são muito extensas procurando-se no quadro 4.II sumarizar os resultados de apenas alguns desses estudos.

Conhecidas assim as características da emissão poluente -V,T- e as da chaminé e ar ambiente - D,u,h,T_A- é possível

QUADRO 4.II

RELAÇÃO ENTRE VALORES OBSERVADOS E CALCULADOS COM DIFERENTES EQUAÇÕES DE ELEVACÃO DA PLUMA

Formula	Argonne I & II			Duisberg, Gernsheim & Harwell			Lakeview & TVA-Gallatin, Paradise, Widows Creek			Bringfeld			All Stations Combined		
	Unstable & Neutral	Stable	All	Unstable & Neutral	Stable	All	Unstable & Neutral	Stable	All	Unstable & Neutral	Stable	All	Unstable & Neutral	Stable	All
1. Holland	5.87	3.98	5.33	2.34	2.59	2.37	1.00	.60	.95	2.02	2.10	2.04	2.99	3.05	3.00
2. Stumke	2.68	1.65	2.39	.74	.74	.74	.77	.43	.73	.62	.87	.67	1.18	1.14	1.17
3. Concawe #1	2.74	1.78	2.46	.74	.76	.74	.75	.44	.71	.60	.72	.62	1.19	1.20	1.19
4. Concawe #2	1.67	1.07	1.50	.68	.71	.69	.82	.48	.78	.53	.65	.56	.91	.85	.90
5. Lucas, Moore, and Spurr	.18	.11	.16	.28	.29	.28	.57	.32	.54	.21	.25	.21	.28	.21	.27
6. Rauch	.54	.33	.48	.80	.84	.81	1.64	.93	1.56	.60	.71	.62	.81	.60	.78
7. Stone & Clark	.23	.14	.20	.30	.32	.31	.58	.33	.55	.24	.28	.25	.31	.23	.30
8. Bryant-Davidson	7.44	3.66	6.36	6.80	6.51	6.76	3.34	1.79	3.15	6.05	4.34	5.72	6.55	4.72	6.25
9. ASME Momentum Sources	8.18	4.02	6.99	8.91	8.09	8.81	4.30	2.33	4.06	8.04	6.01	7.64	8.23	5.68	7.80
10. ASME Neutral and Unstable	27.63	12.78	23.38	1.22	1.41	1.24	.29	.17	.28	1.27	.67	1.15	7.17	6.46	7.05
11. ASME Stable		.76	.76		.70	.70		.92	.92		.89	.89		.76	.76
12. Moses & Carson All Data	2.66	1.63	2.36	1.12	1.18	1.13	1.27	.70	1.20	.87	.98	.89	1.47	1.34	1.45
13. Moses & Carson Unstable	.89	.54	.79	.46	.48	.46	.48	.27	.46	.36	.39	.36	.56	.48	.54
14. Moses & Carson Neutral	2.37	1.44	2.10	1.06	1.11	1.06	1.17	.65	1.11	.82	.92	.84	1.35	1.22	1.33
15. Moses & Carson Stable	5.03	3.09	4.47	1.55	1.66	1.57	1.90	1.05	1.79	1.23	1.42	1.26	2.36	2.26	2.34
16. Briggs	.66	1.57	.92	.83	.95	.84	.74	.72	.74	.67	.89	.71	.77	1.21	.84
17. Csanady	16.58	7.67	14.02	.73	.84	.74	.17	.10	.17	.76	.40	.69	4.30	3.87	4.23
Observed Rise (M)															
Mean	9	7	8	40	37	40	198	160	193	30	53	35	48	33	45
Standard Dev.	7	5	7	19	15	19	107	106	107	28	40	32	63	48	61
No. of Cases	117	47	164	311	41	352	51	7	58	33	8	41	512	103	615

Fonte: Engineering Science Inc.

CAPÍTULO 4

calcular a elevação da pluma Δh .

4.3.4. Correcções para a Velocidade do Vento em Altitude e Tempo de Amostragem

Convém agora referir alguns aspectos necessários à correcta interpretação e utilização da equação gaussiana:

- a) A velocidade do vento u , como é sabido, aumenta em altitude.

Assim, às velocidades conhecidas e geralmente medidas a 10 metros de altura terá de se aplicar um factor correctivo para a sua determinação na altura do topo da chaminé.

- b) Se se pretender o valor de concentração média do poluente para um intervalo de tempo diferente do respeitante ao valor para que os σ se referem, terá de ser usado um factor correctivo uma vez que a concentração média devida a uma unidade fabril não é a mesma para uma hora, para um dia ou para um ano. Naturalmente que há um efeito de amortecimento e quanto maior o período de amostragem menor a concentração média detectada devido, entre outros, às diferentes direcções de vento.

Turner (51) sugere que

$$C_s = C_k \left(\frac{t_k}{t_s} \right)^p \quad (4.53) \text{ em que}$$

C_s é a concentração média para o período de tempo s

C_k é a concentração média para o período de tempo k

CAPÍTULO 4

t_k e t_s , são os períodos de tempo.

p é um coeficiente com valores entre 0,17 e 0,20 que conduz ao Quadro 4.III.

QUADRO 4.III

• RELAÇÃO CONCENTRAÇÃO/TEMPO DE AMOSTRAGEM

Tempo de amostragem Relação entre a concentração calculada e a concentração para 3 minutos

3 minutos	1,00
15 minutos	0,82
1 hora	0,61
3 horas	0,51
24 horas	0,36

4.3.5 Concentração Máxima a Nível do Solo

Indicados e analisados os métodos de cálculo das variáveis da equação gaussiana e alguns cuidados na sua utilização, debrucemo-nos agora sobre a forma da sua expressão analítica que, como referido, traduz o transporte e difusão dum poluente e, ao fim ao cabo, a sua dispersão.

CAPÍTULO 4

A concentração a nível do solo é

$$C = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \exp\left[-\frac{H^2}{2\sigma_z^2}\right] \quad (4.54)$$

Como se vê a equação traduz uma evolução de tipo gaussiano quer na direcção do eixo dos yy (perpendicular à direcção do vento) quer na direcção dos zz (vertical).

Por outro lado pode-se observar que a concentração do poluente será muito pequena junto à chaminé, crescerá até um máximo e decrescerá a partir desse ponto no eixo dos xx .

Uma vez que os "standards" que regulam os níveis de poluição aceitável pelas comunidades, são expressos em termos de máximo, convém-nos averiguar qual a distância para a qual a equação gaussiana nos prevê a máxima concentração dum poluente.

Se diferenciarmos a equação e igualarmos a zero obtemos o valor da distância x , onde se verifica a máxima concentração.

$$\text{Quando } \sigma_y \approx \sigma_z, \text{ essa distância é aquela onde } 2\sigma_z^2 = H^2 \quad (4.55)$$

sendo aí

$$C_{\text{máxima}} = \frac{2Q}{\pi H^2 e u} \frac{\sigma_z}{\sigma_y} \quad (4.56)$$

em que e é a base dos logaritmos neperianos 2,71828.

CAPÍTULO 4

É importante reparar que a $C_{\text{máxima}}$ é inversamente proporcional ao quadrado da altura efectiva. Pequenos aumentos da altura física da chaminé e portanto de H têm repercussão inversa ao quadrado de H o que baixa pois sensivelmente a $C_{\text{máxima}}$.

Este aspecto pela sua notoriedade deve estar sempre bem presente em qualquer análise duma situação prática.

Torna-se importante que foquemos - entre os múltiplos aspectos possíveis, dois casos importantes na prática e as suas consequências ao nível da expressão analítica da equação gaussiana. O da existência duma inversão de temperatura numa dada região, que conduz, como é sabido, aos episódios mais dramáticos em termos de poluição atmosférica e violação de "standards" de ar ambiente, e o caso da expressão que a fórmula assume para cálculo de concentrações para longos períodos de tempo (trimestral, anual).

Comecemos então pela primeira destas situações.

4.3.6. Cenários com Inversões

No primeiro caso - inversão - existe uma camada de ar estável sobre uma camada de ar instável e portanto a difusão é restringida.

Consideremos que a altura da base da camada estável (inversão) é L .

Para uma altura $2,15 \sigma_z$ acima do eixo da pluma a concentração é cerca de $1/10$ da do centro da pluma. É razoável

CAPÍTULO 4

admitir que neste "momento" começa a haver interferência da distribuição de concentração com a inversão. É usual, então, deixar que σ_z aumente com a distância e atinja um valor $L/2,15$ ou $0,47L$.

A esta distância x_L a pluma ainda tem uma distribuição gaussiana na vertical. Se a pluma evoluir até $2x_L$ é então agora razoável admitir que ficou uniformemente distribuída entre a superfície do terreno e a inversão, isto é, a sua concentração já não varia em altitude.

Então para distâncias superiores a $2x_L$ e em situação de inversão a expressão de concentração passa a ser

$$C(x,y,z,H) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \sigma_y L u} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right) \quad (4.57)$$

para qualquer altura Z entre 0 e L e para $x > 2x_L$ sendo x_L a distância em que $\sigma_z = 0,47L$.

Para distâncias entre x_L e $2x_L$ a concentração poderá ser interpolada aproximadamente.

4.3.7 Modificações para Adaptação ao Cálculo de Concentrações Anuais

Uma outra situação em que a equação gaussiana é extremamente útil, é para o cálculo de concentrações anuais ou semestrais muitas vezes exigidas pelas legislações dos países.

CAPÍTULO 4

Se considerarmos uma fonte emissora de poluente que emite a uma taxa constante e dispusermos das frequências de observações de direcção e velocidade de vento (rosa dos ventos) bem como das frequências observadas para cada classe de estabilidade, e assumirmos logicamente que as velocidades do vento se distribuem aleatoriamente dentro de cada sector, dos 16 em que dividimos os 360° , então será possível admitir também que nestas condições práticas a concentração do poluente será uniforme para cada sector na horizontal. A equação gaussiana fica então

$$C = \frac{2Q}{\sqrt{2\pi} \sigma_z u \left(\frac{2\pi x}{16}\right)} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \quad (4.58)$$

ou

$$C = \frac{2,03 Q}{\sigma_z u x} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \quad (4.59)$$

A concentração média anual numa região pode agora ser obtida para um dado sector de direcção, somando todas as concentrações e pesando cada uma delas de acordo com a sua frequência para uma velocidade de vento e classe de estabilidade.

A concentração média será então:

$$C(x, \theta) = \sum_S \sum_N \left\{ \frac{2 Q f(\theta, S, N)}{\sqrt{2\pi} \sigma_{zs} u_N \frac{2\pi x}{16}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{H_u}{\sigma_{zs}} \right)^2 \right] \right\} \quad (4.60)$$

em que

$f(\theta, S, N)$ é a frequência no período em estudo em que o vento sopra na direcção θ para a estabilidade S e classe de velocidade N .

CAPÍTULO 4

σ_{zs} é o parâmetro de difusão vertical à distância x e para a classe S

u_N é a velocidade de vento representativa da classe N

H_u é a altura efectiva da chaminé para a velocidade de vento u_N .

4.3.8 Outras Expressões Gaussianas

Para finalizar este ponto 4.3 deve-se referir ainda que múltiplos investigadores produziram diferentes equações de tipo gaussiano que pelo facto de serem menos utilizadas não devem deixar de ser pelo menos referidas, o que fazemos no Anexo I.

Da mesma forma, as considerações que viemos efectuando nestas últimas dezenas de páginas poderiam ser estendidas em muitos aspectos, tantas são as "nuances" dos modelos gaussianos e a complexidade das variáveis envolvidas.

De facto, estamos a tentar simular o que se passa num meio tão complexo e variável como é a atmosfera. Daí as múltiplas facetas do problema e a exaustiva análise e estudo que vem recebendo internacionalmente. Não nos querendo alongar mais, deixamos indicados apenas como exemplos para além dos já citados, e sem a pretensão de serem exaustivos, alguns artigos em que se alicerçou a exposição anterior e onde se poderá encontrar, embora de forma dispersa, um maior desenvolvimento dos assuntos. São de focar em particular as conferências organizadas pela American Meteorological Society e pelo Committee on Challenges of Modern Society da NATO onde estão publicadas abundantes informações sobre as actividades de mode

CAPÍTULO 4

lização e difusão de poluentes quer na Europa, quer no Canadá, Japão e Estados Unidos, (56,57,58, 59, 60, 61, 62, 63,64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73).

CAPÍTULO 4

4.4 Os Modelos Gaussianos

4.4.1 Estado Actual dos Conhecimentos

Donald Walters e Bruce Turner dizem frequentemente a quem os visita nos seus gabinetes em Research Triangle Park, U.S.E.P.A., que o problema actual não se põe em termos de desenvolver novos modelos mas escolher os melhores, de entre os vários já produzidos, em aperfeiçoar os existentes, e em particular, procurar validá-los através de métodos cada vez mais rigorosos em termos de inventário de emissões, dados meteorológicos mais precisos e variáveis de difusão adaptadas às regiões em estudo.

É bastante extensa a literatura sobre os mais modernos modelos produzidos para diversos poluentes e diferentes condições, sem ter a preocupação de a mencionar de modo exaustivo, citam-se algumas obras de maior interesse e que são referidas nos números 74 a 108, da bibliografia.

Para efeitos de análise neste estudo, seleccionámos os modelos que, não sendo apenas aplicações ou estudos pontuais, já foram ou estão a ser generalizadamente utilizados em estudos de planeamento, de qualidade do ar e de impacte ambiental. Os modelos seleccionados têm, também, sido objecto de análise por parte de diversas equipas de investigadores, durante vários meses, em organismos oficiais dos E.U.A. e de outros países. Neste domínio o maior esforço de investigação e desenvolvimento parece vir dos Estados Unidos da América quer pelo número de investigadores envolvidos (largas centenas, em Research Triangle Park) quer pelo nível qualitativo dos trabalhos produzidos.

CAPÍTULO 4

Embora com diferentes graus de profundidade, a nossa análise incidirá sobre os seguintes modelos:

MODELO: CRSTER
MPSTER
RAM
ISC
CDM
TCM
APMAX
PTMTP
PTMAX
TEM
PAL
APRAC
HIWAY
CALINE 3
EKMA
VALLEY
MESOGRID
MESOPUF
MESOPLUM

Estes modelos cobrem uma larga zona de aplicações a: diferentes poluentes; vários períodos de amostragem; diversos tipos de terreno; diferentes quantidades de informação

CAPÍTULO 4

meteorológica conhecida e diferentes exigências de tempo de computador, entre outros aspectos.

Para não alongar a exposição focar-nos-emos nos modelos referentes ao dióxido de enxofre, que constituem o objetivo principal do nosso trabalho, analisando resumidamente as características e utilidade dos restantes.

Com base na análise efectuada, procuraremos seleccionar o modelo mais adequado às características e objectivos de planeamento da Área de Sines, sendo a sua "performance" geral investigada nos capítulos seguintes.

Ainda no sentido de não alongar a exposição procuraremos sujeitar a análise dos modelos ao seguinte esquema-tipo geral:

- a) Poluentes a que o modelo se aplica e tipo de regiões.
- b) Número de fontes e tipo.
- c) Períodos de concentração previsíveis.
- d) Equações utilizadas.
- e) Input necessário.
- f) Output .
- g) Outras considerações.

CAPÍTULO 4

4.4.1.1 Modelo CRSTER (1977)

Utilizado para SO_2 ou Partículas em Suspensão.

É recomendável a sua aplicação (em áreas de características predominantemente rurais) às emissões dum só chaminé, ou de várias chaminés (até 19), situadas razoavelmente perto umas das outras, pertencentes, por exemplo, a uma mesma unidade fabril.

Neste momento, surge como o modelo mais testado pela U.S.E.P.A. e, por isso, como modelo de referência aprovado para este tipo de situações.

O modelo trata um só poluente inerte, utiliza formulação gaussiana para condições estacionárias e pode ser aplicado, também, a zonas urbanas. Calcula concentrações médias máximas para períodos de 1 hora e 24 horas, até um ano.

Considera automaticamente variações de cota do terreno.

As equações usadas são:

$$C = \frac{Q}{2 \pi u \sigma_y \sigma_z} g_1 g_3 \quad \text{para } \sigma_z \leq 1,6L \quad (4.61)$$

e

$$C = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} u L \sigma_y} g_1 \quad \text{para } \sigma_z > 1,6L \quad (4.62)$$

em que

L = altitude da camada de mistura

H = altura da chaminé + elevação da pluma

- diferença de cota entre o receptor e a base

CAPÍTULO 4

da chaminé.

$$g_1 = \exp \left[- \frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \quad (4.63)$$

$$g_3 = \sum_{n = -\infty}^{+\infty} \exp \left\{ \left[- \frac{1}{2} \left(\frac{2nL-H}{\sigma_z} \right)^2 \right] + \exp \left[- \frac{1}{2} \left(\frac{2nL+H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right\} \quad (4.64)$$

Os inputs necessários ao programa são:

taxas de emissão; altura física da chaminé; velocidade de saída dos gases da chaminé; dados meteorológicos horários incluindo direcção e velocidade do vento, temperatura e cobertura de núvens e finalmente a altura diária da camada de mistura.

Os outputs são:

concentrações máxima e segunda maior durante o ano para cada local de recepção (receptor) referidos a 1h, 3h e 24 horas;

média aritmética anual para cada receptor; a mais alta concentração diária durante uma hora e 24 horas, para toda a zona de recepção.

O modelo não é aplicável a fontes emissoras em linha ("line sources", tipo estradas) ou fontes espalhadas numa área ("area sources", por exemplo uma povoação ou cidade).

Utiliza a formulação de Briggs e torna nula a concentração à superfície no caso da altura efectiva da pluma exce-

CAPÍTULO 4

der a altitude da camada da mistura.

São utilizados os coeficientes σ_y e σ_z indicados por Turner e já atrás apontados, no cálculo da dispersão horizontal e vertical.

Não considera reacções químicas nem deposição e assume reflexão total no solo e em inversões. A altitude da camada de mistura acompanha as variações de topografia do terreno e é calculada de hora a hora por interpolação dos resultados de duas radiossondagens diárias.

O modelo só trata um poluente por cada simulação.

4.4.1.2 Modelo MPTER - Multiple Point Gaussian Algorithm with Terrain Adjustments (1980)

Utilizado para SO_2 ou partículas em suspensão e dum modo geral para poluentes não reactivos.

Particularmente adequado para áreas rurais com chaminés afastadas entre si ou múltiplas chaminés.

Concentrações médias horárias são calculadas através da equação gaussiana para condições estacionárias.

As equações usadas são:

$$C = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} g_1 g_3 \quad \text{para } \sigma_z \leq 1,6L \quad (4.65)$$

$$C = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} u L \sigma_y} g_1 \quad \text{para } \sigma_z > 1,6L \quad (4.66)$$

CAPÍTULO 4

em que L , g_1 , g_3 têm as mesmas expressões utilizadas no CRSTER.

Difere do CRSTER na medida em que necessita da taxa de emissão, altura física da chaminé, velocidade de saída dos gases, diâmetro interno e temperatura dos gases, para cada chaminé.

O terreno não pode ter altitudes superiores à do topo de qualquer chaminé.

É aplicável apenas a fontes pontuais e áreas rurais.

Só trata um poluente por cada simulação.

Pode usar um termo de degradação da concentração do poluente, expresso através de uma exponencial negativa.

Em todos os restantes aspectos, é semelhante ao modelo CRSTER.

Para uma só fonte emissora, os resultados são análogos aos do CRSTER.

4.4.1.3 Modelo RAM

Gaussian Plume Multiple Source Air Quality Algorithm (1978)

Adequado para SO_2 , partículas e poluentes relativamente conservativos.

Utilizado preferencialmente em regiões urbanas para cálculo de concentrações horárias ou diárias de múltiplas fontes emissoras quer pontuais quer distribuídas em área. Os

CAPÍTULO 4

cálculos são executados para cada hora. Emprega a equação gaussiana para estação estacionário.

Considera a contribuição de fontes distribuídas em área através da expressão

$$C_{\text{Área}} = \frac{q}{u} \int_{x_1}^{x_2} f dx \quad (4.67)$$

que é calculada por métodos numéricos e em que

q é a taxa de emissão por unidade de área e

u é a velocidade média do vento.

- a) Para condições meteorológicas estáveis f assume a forma:

$$f = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_z} g_2 \quad (4.68)$$

sendo o cálculo das concentrações devidas a fontes pontuais efectuado através de

$$C_{\text{fontes pontuais}} = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} g_1 g_2 \quad (4.69)$$

- b) Para condições neutras ou instáveis e $\sigma_z < 1,6L$ usa as expressões:

$$f = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_z} g_3 \quad e \quad C_{\text{fontes pontuais}} = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} g_1 g_3 \quad (4.70) \quad (4.71)$$

CAPÍTULO 4

c) Para condições neutras ou instáveis e $\sigma_z > 1,6L$ utiliza as expressões:

$$f = \frac{1}{L} \quad \text{e} \quad C_{\text{fontes pontuais}} = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} uL \sigma_y} g_1 \quad (4.73)$$

(4.72)

Para os três casos anteriores g_1 , g_2 e g_3 são calculados através de:

$$g_1 = \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \quad (4.74)$$

$$g_2 = \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z-H}{\sigma_z} \right)^2 \right] + \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z+H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \quad (4.75)$$

$$g_3 = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left\{ \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z-H+2nL}{\sigma_z} \right)^2 \right] + \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z+H+2nL}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right\}^* \quad (4.76)$$

Input necessário para as fontes pontuais: localização das chaminés; taxas de emissão; alturas físicas; velocidades de saída dos gases; diâmetro interno das chaminés; temperatura de saída dos gases.

Input necessário para as fontes distribuídas em área: localização; dimensões; taxas de emissão e alturas de emissão.

* O programa de cálculo do computador soma para $n=0$, depois $n=\pm 1$, $n=\pm 2$, ..., até que o termo adicionado seja tão pequeno, que possa ser desprezado.

CAPÍTULO 4

Output: concentrações médias horárias e até 24 horas para cada receptor.

Só aplicável a terreno relativamente plano.

Pode usar coeficientes de dispersão de Turner ou de outros autores.

Permite o uso de um termo de degradação da concentração do poluente, expresso através de uma exponencial negativa.

Nos restantes aspectos é semelhante aos modelos anteriores, CRSTER e MPTER.

4.4.1.4 Modelo I S C

Industrial Source Complex Model (1979)

Adequado para SO_2 , partículas e poluentes não muito reativos.

Particularmente indicado para simular situações industriais complexas com vários tipos de fontes emissoras: pontuais, distribuídas em área, distribuídas em linha.

Pode considerar deposição de partículas e remoção por edificações.

Calcula concentrações para períodos de 1 hora, 24 horas e um ano.

Utiliza equações gaussianas com estado estacionário.

Aplicável a terreno relativamente plano.

CAPÍTULO 4

Equações adoptadas para previsões de concentrações relativas a períodos curtos:

- a) para cada chaminé e para cada hora a concentração é calculada nos pontos de coordenadas (x,y) tal que

$$C(x,y) = \frac{KQ}{\pi \bar{u} \{h\} \sigma_y \sigma_z} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \quad (4.77)$$

Termo Vertical Termo de Decompo-
sição do Poluente

- b) para fontes distribuídas em área a concentração será

$$C(x,y) = \frac{KQ_A x_0}{\sqrt{2\pi} \bar{u} \{h\} \sigma_z} \left\{ \text{Termo Vertical} \right\} \left\{ \text{erf} \left(\frac{x'_0/2+y}{\sqrt{2} \sigma_y} \right) + \right. \\ \left. + \text{erf} \left(\frac{x'_0/2 - y}{\sqrt{2} \sigma_y} \right) \right\} \left\{ \text{Termo de Decomposição} \right\} \quad (4.78) \\ \text{do Poluente}$$

A deposição de partículas na n - ésima classe de velocidade de deposição, ou dum poluente gasoso com velocidade de deposição nula V_{sn} e um coeficiente de reflexão γ_n é dada por:

$$DEP_n(x,y) = \frac{KQ_\tau (1 - \gamma_r) \phi_n}{2\pi \sigma_y \sigma_z x} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \exp \left[-\psi x/\bar{u} \{h\} \right] \\ \left\{ \left[\bar{b}H + (1-\bar{b}) V_{sn} x/\bar{u} \{h\} \right] \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{H-V_{sn} x/\bar{u} \{h\}}{\sigma_z} \right)^2 \right] + \right.$$

CAPÍTULO 4

$$\begin{aligned}
& + \sum_{i=1}^{\infty} \left[\gamma^{i-1} \left[\bar{b} (2iH_m - H) - (1 - b) V_{sn} x/\bar{u} \{h\} \right] \right. \\
& \quad \exp \left[- \frac{1}{2} \left(\frac{2iH_m - H + V_{sn} x/\bar{u} \{h\}}{\sigma_z} \right)^2 \right] + \\
& \quad + \gamma^i \left[\bar{b} (2iH_m + H) + (1 - \bar{b}) V_{sn} x/\bar{u} \{h\} \right] \\
& \quad \left. \exp \left[- \frac{1}{2} \left(\frac{2iH_m + H - V_{sn} x/\bar{u} \{h\}}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right] \quad (4.79)
\end{aligned}$$

O parâmetro Q representa a quantidade total de material emitido durante o período de tempo τ , para o qual o cálculo da deposição foi efectuado.

Para emissões distribuídas em área a primeira linha da equação atrás referida é modificada para

$$\begin{aligned}
C_{\ell} \{r, \theta\} = \frac{2K}{\sqrt{2\pi} r \Delta \theta'} \sum_{i,j,k} \left[\frac{Q_{i,k,\ell} f_{i,j,k,\ell}}{\bar{u}_{i,k} \{h\} \sigma_{z;k}} S\{\theta\} V_{i,k,\ell} \right. \\
\left. \exp \left[-\psi r/\bar{u}_{i,k} \{h\} \right] \right] \quad (4.80)
\end{aligned}$$

em que

$Q_{i,k,\ell}$ = taxa de emissão do poluente:

para a classe de velocidade de vento i

para a classe de estabilidade k

para a estação do ano ℓ

CAPÍTULO 4

$f_{i,j,k,\ell}$ = frequência da ocorrência de:

classe de velocidade de vento i
 classe de direcção de vento j
 classe de estabilidade k
 e estação do ano ℓ

$\Delta\theta'$ = largura do sector em radianos

$S\{\theta\}$ = função de amortecimento

$\bar{u}_{i,k}\{h\}$ = velocidade média do vento para a altura da chaminé h, relativa a classe de velocidade de vento i e classe de estabilidade k

$\sigma_{z;k}$ = desvio padrão da distribuição vertical de concentração (m) para a classe de estabilidade k.

$V_{i,k,\ell}$ = Termo vertical para:

classe de velocidade de vento i
 classe de estabilidade k
 e estação do ano ℓ

Ψ = coeficiente de decomposição

A deposição, em cada estação do ano, no ponto (r, θ) será

$$DEP_{\ell,n}\{r, \theta\} = \frac{K (1 - \gamma_n) \phi_n}{\sqrt{2\pi} r^2 \Delta\theta'} \sum_{i,j,k} \left[\frac{Q_{\tau;i,k,\ell} f_{i,j,k,\ell}}{\sigma_{z;k}} \right. \\ \left. \exp \left[-\Psi \frac{r}{\bar{u}_{i,k}\{h\}} \right] S\{\theta\} \right. \\ \left. \left\{ \left[\bar{b}_k H_{i,k,\ell} + (1 - \bar{b}_k) v_{sn} \frac{r}{\bar{u}_{i,k}\{h\}} \right] \right\} \right]$$

CAPÍTULO 4

$$\begin{aligned}
& \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{H_{i,k,\ell} - v_{sn} r / \bar{u}_{i,h} \{h\}}{\sigma_{z;k}} \right)^2 \right] + \\
& + \sum_{a=1}^{\infty} \left[\gamma^{a-1} \left[\bar{b}_k \left(2aH_{m;i,k,\ell} - H_{i,k,\ell} \right) - \right. \right. \\
& \left. \left. - (1 - \bar{b}_k) v_{sn} r / \bar{u}_{i,k} \{h\} \right] \right. \\
& \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{2aH_{m;i,k,\ell} - H_{i,k,\ell} + v_{sn} r / \bar{u}_{i,k} \{h\}}{\sigma_{z;k}} \right)^2 \right] + \\
& \left. + \gamma^a \left[\bar{b}_k \left(2aH_{n;i,k,\ell} + H_{i,k,\ell} \right) + (1 - \bar{b}_k) v_{sn} r / \bar{u}_{i,k} \{h\} \right] \right. \\
& \left. \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{2aH_{m;i,k,\ell} + H_{i,k,\ell} - v_{sn} r / \bar{u}_{i,k} \{h\}}{\sigma_{z;k}} \right)^2 \right] \right] \right] \right] \\
& \hspace{15em} (4.81)
\end{aligned}$$

em que $Q_{v,i,k,\ell}$ representa o valor do produto do tempo total da estação pela taxa de emissão $Q_{i,k,\ell}$, para as classes de velocidade e estabilidade, respectivamente "i" e "k". Será assim:

$$\begin{aligned}
DEP_{\ell,n} \{r, \theta\} = & \frac{K (1 - \gamma_n) \phi_n x_0^2}{\sqrt{2\pi} R^2 \Delta\theta} \sum_{i,j,k} \left[\frac{Q_{A^+;i,k,\ell} f_{i,j,k,\ell}}{\sigma_{z;k}} \right. \\
& \left. \exp \left[-\psi r / \bar{u}_{i,k} \{h\} \right] S\{\theta\} \dots \right] \quad (4.82)
\end{aligned}$$

CAPÍTULO 4

em que $Q_{At,i,k,\ell}$ = representa o valor do produto do tempo total da estação do ano ℓ pela taxa de emissão por unidade de área, para a classe de velocidade do vento i e classe de estabilidade k .

Input necessário ao modelo: localização das fontes emissoras; taxas de emissão; coeficiente de decomposição do poluente, altura da fonte; alturas de chaminés; velocidades de saída de gases de chaminés; diâmetros internos; temperaturas de saída dos gases; distribuição de dimensões das partículas com as correspondentes velocidades de deposição; coeficientes de reflexão do terreno; dimensões de edifícios adjacentes às emissões; medições horárias de direcção e velocidade de vento, temperatura e cobertura de nubes; camada de mistura diária

Para previsões semestrais/anuais: programa STAR, altura da camada de mistura para a manhã e a tarde e temperatura média do ar.

Output: Valor das concentrações ou deposições para qualquer intervalo de tempo.

Indicação do valor da concentração mais elevada e segunda mais elevada.

O modelo é usado para terreno relativamente plano, emissões pontuais, de linha ou distribuídas em área. Só aplicável para receptores no terreno cuja altitude não exceda as alturas de quaisquer chaminés.

O modelo considera deposição de partículas e pode usar

CAPÍTULO 4

um termo de degradação da concentração do poluente; a taxa de reflexão na superfície é seleccionável; a de reflexão na inversão é considerada perfeita, salvo se a pluma a transpuser por via da sua elevação.

Nos restantes aspectos aplicam-se as considerações do CRSTER.

4.4.1.5 Modelo C D MClimatological Dispersion Model (1973)

Adequado para SO_2 e partículas ou poluentes não reactivos.

Aplica-se para cálculo de, concentrações sazonais ou anuais, devidas a múltiplas fontes pontuais e distribuídas em área.

Equações utilizadas:

$$C_{\text{fonte pontual}} = \frac{16}{2\pi} \sum_{n=1}^N \sum_{\ell=1}^6 \sum_{m=1}^6 Q_n \phi_{k\ell m} S_{\ell m}(c_n) / c_n \quad (4.83)$$

$$C_{\text{área}} = \frac{16}{2\pi} \int \left[\sum_{k=1}^{16} q_k(\rho) \sum_{\ell=1}^6 \sum_{m=1}^6 \phi_{k\ell m} S_{\ell m}(\rho) \right] d\rho \quad (4.84)$$

$$\text{com } q_k(\rho) = \int_{\text{sector } K} Q(\rho, \theta) d\theta \quad (4.85)$$

CAPÍTULO 4

$$S_{\ell m}(\rho) = \frac{2}{\sqrt{2\pi} \sigma_z u} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \exp \left[-\frac{0,692 \rho}{u_{\ell} T_{1/2}} \right]$$

para $\sigma_z < 0,8L$ (4.86)

$$S_{\ell m}(\rho) = \frac{1}{u_{\ell} L} \exp \left[-\frac{0,692 \rho}{u_{\ell} T_{1/2}} \right]$$

para $\sigma_z > 0,8L$ (4.87)

$\sigma_z = a\rho^b$; a, b = funções da classe de estabilidade e distância (ρ) à chaminé

k_n = sector da direcção do vento apropriado à fonte pontual n

Q_n = taxa de emissão da fonte pontual n

r_n = distância do receptor à fonte n

q_k = taxa de emissão da área k

r = distância do receptor à fonte distribuída em área

θ = ângulo coordenadas polares centradas no receptor)

ℓ = classe de velocidade do vento

m = classe de estabilidade de Pasquill

$\phi(k, \ell, m)$ = função de frequências conjuntas

z = altura do receptor

u_{ℓ} = velocidade do vento

L = altitude da camada de mistura à tarde

CAPÍTULO 4

- $T_{1/2}$ = intervalo de tempo ao fim do qual a concentração do poluente passa a metade
- H = altura efectiva de emissão, da distribuição de fontes poluidoras, isto é, a altura média das emissões de áreas no sector de vento k a uma distância radial ρ do receptor.

Input necessário: taxas médias de emissão; alturas de emissão; diâmetro interno das chaminés; velocidade e temperatura de saída dos gases; programa STAR** com frequências de direcção, velocidade e classes estabilidade. Altura média da camada de mistura durante a manhã e durante a tarde; temperatura média do ar.

Output: concentrações médias mensais, trimestrais ou anuais*.

Aplicável a terreno relativamente plano, e zonas urbanas.

Trata dois poluentes na mesma simulação.

Usa só a fórmula de Briggs para condições neutras/instáveis. Se a altura efectiva da pluma é superior à de inversão, assume concentrações zero no solo. Não calcula elevação de pluma para as fontes distribuídas em área.

A velocidade do vento é ajustada à altura da chaminé.

Admite distribuição uniforme do vento em 16 sectores e

* O CDMQC já pode calcular concentrações para 1 h e 24 horas

** O programa STAR foi desenvolvido pelo National Weather Service, U.S.A.

CAPÍTULO 4

considera 6 classes de velocidade de vento e 6 classes de estabilidade da atmosfera. Utiliza coeficientes de dispersão de Turner. Usa um termo de degradação do poluente.

Assume reflexão total no solo, bem como no topo da camada de mistura até ao local em que $\sigma = 0,8L$, considerando a concentração uniforme em altura para além desta distância.

4.4.1.6 Modelo T.C.M.Texas Climatological Model (1975)

Adequado para SO_2 , partículas e poluentes não reactivos.

Particularmente indicado para previsões trimestrais ou anuais de múltiplas fontes pontuais ou em área e múltiplos receptores em zonas urbanas ou rurais.

Utiliza a equação gaussiana e pressupõe condições estacionárias.

Aplica-se a áreas relativamente planas.

As equações utilizadas são:

$$C_p(k, r) = \frac{32 \times 10^6 Q}{(2\pi)^{3/2} \rho} \left\{ \frac{\phi(k, m)}{U^*(H, m) \sigma_z(m)} \exp \left[- \frac{H^2}{2 \sigma_z^2(m)} \right] \right\} \quad (4.88)$$

em que

Q = taxa de emissão

r = distância da fonte emissora ao receptor

CAPÍTULO 4

- $\Phi(k,m)$ = função de frequências meteorológicas
 k = índice de direcção do vento
 m = índice da classe de estabilidade
 $U^*(H,m)$ = média ponderada de velocidade de vento para a classe de estabilidade m à altura efectiva da chaminé H
 $\sigma_z(m) = a(m) \rho^{b(m)}$ = desvio padrão da distribuição de concentração na direcção vertical
 H = altura efectiva da chaminé

A equação para cálculo da concentração do poluente na quadrícula de ordem i , devida a uma área de emissão traduz-se do seguinte modo:

$$C = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{Q(\Delta x/2)^{1-b(m)}}{U^*(m) a(m) [1-b(m)]} \left[(2i+1)^{1-b(m)} - (2i-1)^{1-b(m)} \right] \Phi(k,m) \quad (4.89)$$

em que

$a(m)$ e $b(m)$ = funções da classe de estabilidade de Pasquill

Δx = espaçamento de malha do receptor.

Input necessário: localização dos emissores; taxas de emissão; parâmetros de chaminés; velocidades e temperaturas dos gases; programa meteorológico STAR.

Output: concentrações médias trimestrais ou anuais em diversos formatos; concentração máxima em cada cenário considerado; lista dos 5 maiores "culpados" das concentrações em cada receptor.

CAPÍTULO 4

Utiliza várias formulações de Briggs para diferentes características das plumas.

Trata dois poluentes em cada simulação.

A velocidade do vento é ajustada para a altura da chaminé. Aplica as classes de estabilidade de Pasquill e pode utilizar um termo de degradação dos poluentes. Assume perfeita reflexão no terreno e despreza o efeito do topo da camada de mistura.

A velocidade do vento é uniforme em cada sector ($22,5^\circ$).

Gasta muito menos tempo de computador que o C.D.M..

Pode simular fachos industriais ("flare").

4.4.1.7 Modelo A P M A X (1974)

Adequado para SO_2 e partículas em suspensão.

Utilizado no cálculo de concentrações máximas provenientes de fontes pontuais múltiplas para regiões rurais ou urbanas para períodos de 1 hora a 24 horas.

Utiliza a equação gaussiana para condições estacionárias:

$$C(x, y, z, H) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \cdot \left\{ \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z - H}{\sigma_z} \right)^2 \right] + r \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z + H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right\} \quad (4.90)$$

* r, é o coeficiente de reflexão

CAPÍTULO 4

Calcula as concentrações ao nível do solo para 576 situações meteorológicas diferentes, seleccionando automaticamente os seus valores máximos.

Através das frequências de ocorrência determina os máximos possíveis nas condições meteorológicas da zona e períodos de tempo em análise.

4.4.1.8 Modelo P T M T P (1969)

Adequado para SO₂ ou partículas em suspensão.

Diferindo apenas do APMAX, no facto de ser o utilizador que tem de lhe seleccionar as condições meteorológicas que conduzem aos máximos; só pode calcular as concentrações para 25 receptores enquanto o APMAX chega facilmente às centenas.

É mais antigo e cientificamente menos avançado que o APMAX.

4.4.1.9 Modelo P T M A X

Opera exactamente nas mesmas condições do PTMTP mas só para uma fonte emissora pontual.

4.4.1.10 Modelo T.E.M.

Texas Episodic Model (1975)

Adequado para SO₂ e partículas em suspensão.

Calcula concentrações provenientes de fontes múltiplas em zonas rurais ou urbanas para períodos de 1 hora até 24 horas.

CAPÍTULO 4

Utiliza a formulação gaussiana para estado estacionário

$$C(x,y,0,H) = \frac{10^6 Q}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \quad (4.91)$$

A equação de concentração do poluente na quadrícula de ordem i , abaixo de fonte distribuída em área é:

$$C = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{Q (\Delta x/2)^{1-b(S)}}{U_0 a(S) [-b(S)]} \left[(2i+1)^{1-b(S)} - (2i-1)^{1-b(S)} \right] \quad (4.92)$$

mantendo os símbolos significado idêntico ao referido para o T.C.M. com S a designar a classe de estabilidade do vento considerada.

Input necessário: localização das fontes emissoras; taxas de emissão e alturas de emissão; diâmetro das chaminés; temperatura dos gases e sua velocidade de saída; velocidade do vento, direcção e estabilidade; coeficiente da decomposição; factor de penetração na inversão e altitude desta.

Output: pode ser expresso de várias formas:

- a) lista de concentrações,
- b) concentrações num mapa geográfico
- c) lista de "culpados" (contribuição percentual das 5 maiores fontes responsáveis pela poluição em cada receptor)
- d) concentração máxima.

CAPÍTULO 4

Utiliza a formulação de Briggs com grande precisão das situações (destrinça "momentum" e "buoyancy") para fontes pontuais mas não para fontes distribuídas em área.

Assume reflexão perfeita no solo e topo da camada de mistura salvo a partir de $\sigma_z = 0,47L$.

É aplicável em terreno plano e encerra a possibilidade de simulação das emissões de fachos ("flare").

4.4.1.11 Modelo P.A.L

Point Area and Line Sources (1978)

Adequado para SO_2 ou partículas ou poluentes conservativos.

Particularmente útil para problemas com fontes múltiplas dos diversos tipos: pontuais, em linha e em área.

Utiliza a formulação gaussiana e calcula concentrações para 1 hora até 24 horas em complexos industriais. Utiliza meteorologia horária até períodos de 24 horas.

Está a ser revisto para incorporar factores de de posição de partículas e poder efectuar previsões sazonais e anuais.

CAPÍTULO 4

4.4.1.12 Outros Modelos

Analisados os principais modelos aplicáveis à simulação do dióxido de enxofre importa referir ainda aqui, de modo muito sumário, os restantes, remetendo a explicitação dos seus detalhes para a bibliografia.

A simulação da dispersão de monóxido de carbono e de poluentes produzidos pelo tráfego consegue-se com a ajuda dos modelos HIWAY; APRAC e CALINE 3 (27, 85, 89).

A do dióxido de azoto (NO_2) é efectuada com o CDM.

Para o ozono utiliza-se o modelo EKMA, entre outros (85, 87, 133, 134).

Para a simulação do transporte de SO_2 e sulfatos a grandes distâncias (maiores que 50 km) utilizam-se o MESOGRID; o MESOPLUM e o MESOPUFF (90).

Finalmente para regiões com irregularidades topográficas, o VALLEY (27,85,133) é, entre outros, o de utilização mais consagrada.

CAPÍTULO 4

4.4.2 Seleccção do Modelo a Utilizar

A selecção do modelo a utilizar nesta investigação tem de ter em conta, naturalmente, os objectivos que se pretendem atingir.

Como já foi referido, pretendem-se simular as emissões industriais da Área de Sines e averiguar da "performance" do modelo utilizado.

A envolvente geral do processo de selecção passa, sobretudo, pelas características industriais e topográficas da Área, mas também pelas limitações decorrentes dos dados disponíveis da meteorologia e de emissões (trimestrais) pela aparelhagem de medida das concentrações, e, finalmente, pelas características específicas dos próprios modelos.

Da reflexão sobre estes parâmetros e da explicitação das suas características na Área deverão sair, pois, os critérios condicionantes da selecção.

Os aspectos mais relevantes parecem-nos ser os seguintes:

- a) Trata-se duma área relativamente plana em termos topográficos;
- b) Existe um número relativamente grande de fontes emissoras de poluentes, - significativas em dimensão - com instalação prevista para um futuro mais ou menos próximo;
- c) Não se dispõe de frequências de ocorrência de classes de estabilidade específicas da Área, nem aí existem

CAPÍTULO 4

medições suficientes das características de difusão atmosférica;

- d) É passível de ser produzido um elaborado inventário de emissões trimestrais e anuais, mas não horárias;
- e) Foram efectuadas medições em contínuo de concentrações de dióxido de enxofre durante quatro anos, em três estações de medida;
- f) Há disponibilidade de aparelhagem moderna e rigorosa, calibrada e explorada por pessoal treinado;
- g) O modelo deve ser capaz de simular os valores das concentrações trimestrais e anuais com base no inventário trimestral realizável para comparação com as medições experimentais efectuadas pela aparelhagem.

Com base nestes factos, façamos então a triagem e selecção, através dos modelos apresentados, o que nos encaminhará para a selecção do modelo a adoptar.

O CRSTER, já testado nos E.U.A., é um modelo que no futuro reunirá condições para se revelar de grande interesse na simulação parcial da área de Sines, em particular de algum complexo fabril (tem como limitação a proximidade necessária das 19 chaminés que trata). De momento é excluído, dado que não se dispõe de meteorologia horária nomeadamente no que respeita a cobertura de núvens e camada de mistura.

Os MPTER e RAM só calculam concentrações horárias e diárias.

CAPÍTULO 4

O I.S.C. necessita de cobertura horária de núvens e alturas de camada de mistura diárias que neste momento não existem, nem provavelmente existirão a curto prazo para a Área de Sines, dados os elevados custos das operações que exigem.

O C.D.M. e o T.C.M. têm ambos, à partida, condições de responder adequadamente aos factores condicionantes atrás indicados e, por isso, podem ser utilizados com o maior interesse.

O APMAX, PTMTP, PTMAX, TEM e PAL, não fazem previsões trimestrais ou anuais; os restantes não se aplicam à simulação de SO_2 .

Verificamos, assim, que a Área de Sines, como aliás a maior parte das regiões industriais construídas de raiz, não dispõem - por agora - de inventário de emissões horário ou diário, nem cobertura de núvens ou altura da camada de mistura, o que, não impossibilitando a sua utilização, inibe a avaliação de modelos para previsões de 1h ou 24 horas.

Com base ainda na análise anterior resta-nos, pois, decidir sobre os modelos CDM e TCM.

De acordo com a caracterização feita, tais modelos não são substancialmente diferentes, quer na formulação quer nos resultados.

A grande diferença reside no muito menor tempo de computador gasto pelo TCM, para além da utilização que faz de equações de elevação da pluma mais rigorosas.

CAPÍTULO 4

Por estas razões, em particular pela sua capacidade de simular fachos industriais, e, também, pelos custos a envolver num esforço de simulação como o requerido para ensaiar e avaliar a "performance" dum modelo durante 4 anos, - caso presente, - optámos pelo TCM.

Assim, com os objectivos indicados, tendo em conta as limitações apontadas, as interessantes disponibilidades referidas e as características actuais e futuras da Área de Sines, o modelo que sobressaiu como reunindo - à partida, pelo menos - as melhores características para uma avaliação, foi o Texas Climatological Model - T.C.M..

Por isso, os próximos capítulos são constituídos pela sua análise e pelas investigações necessárias visando medir na prática a sua performance na Área de Sines, para o cálculo de concentrações de dióxido de enxofre ao nível do solo e previsão de alturas de chaminés que as garantam.

CAPÍTULO 5

TEXAS CLIMATOLOGICAL MODEL - T.C.M.

Investigam-se em pro
fundidade as caracter
ísticas e parâmetros
do algoritmo.

Avaliam-se os seus mé
tos de cálculo, pos
sibilidades e limita-
ções.

Perspectivam-se, os
parâmetros cujo conhe
cimento é necessário
para ensaiar a aplicaç
ão do modelo e a aval
iação da sua perfor-
mance.

CAPÍTULO 5

5.1 O Algoritmo; Pressupostos e Modificações para Rapidez de Cálculos

O Texas Climatological Model é um modelo concebido para calcular concentrações trimestrais e anuais, ao nível do solo, de poluentes relativamente estáveis na atmosfera.

O modelo, descrito em linguagem Fortran, baseia-se na equação gaussiana de transporte e difusão, utilizando a elaborada técnica concebida por Christiansen e Porter (109,110) que descreveremos adiante.

A sua característica fundamental é, nessas condições, a rapidez. Efectivamente, os tempos gastos em computador para análise dum mesmo sistema complexo mostram que o TCM é 30 a 400 vezes mais rápido que outros modelos climatológicos como por exemplo o CDM (110).

A análise em pormenor do programa Fortran propriamente dito sai fora do âmbito deste trabalho; é fundamental no entanto que procuremos avaliar e explicitar com precisão e pormenor os pressupostos meteorológicos, físicos, matemáticos e ambientais do modelo.

Os pressupostos básicos do algoritmo gaussiano para condições estacionárias são também no TCM observados, em particular:

- a) A taxa de emissão do poluente é suposta constante ao longo do tempo.
- b) A difusão ao longo da direcção em que sopra o vento é considerada negligível face à diluição devida ao transporte.

CAPÍTULO 5

- c) Os poluentes são transportados na direcção do vento a uma velocidade média que se assume constante nessa direcção, ao longo do espaço.
- d) A velocidade média do vento utilizada é a que supostamente se verifica à altura do topo da chaminé emissora.
- e) Não há mudança da direcção do vento na vertical.
- f) Os poluentes simulados comportam-se como gases que permanecem na atmosfera, seguindo as suas flutuações turbulentas.
- g) A pluma, é sempre reflectida pelo terreno, não se verificando desaparecimento do poluente quer devido a deposição quer a reacção química.
- h) Os poluentes são diluídos e dispersos através da turbulência da atmosfera e, em menor grau, devido a difusão molecular.

Vejamos então.

Assim, o modelo baseia-se na equação:

$$C(x,y,0,H) = \frac{Q}{\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp \left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2} \right] \exp \left[-\frac{H^2}{2\sigma_z^2} \right] \quad (5.1)$$

Coloquemos contudo a chaminé emissora no centro dum sistema de coordenadas polares, (figura 5.1) e assumamos que o vento sopra com um ângulo θ

CAPÍTULO 5

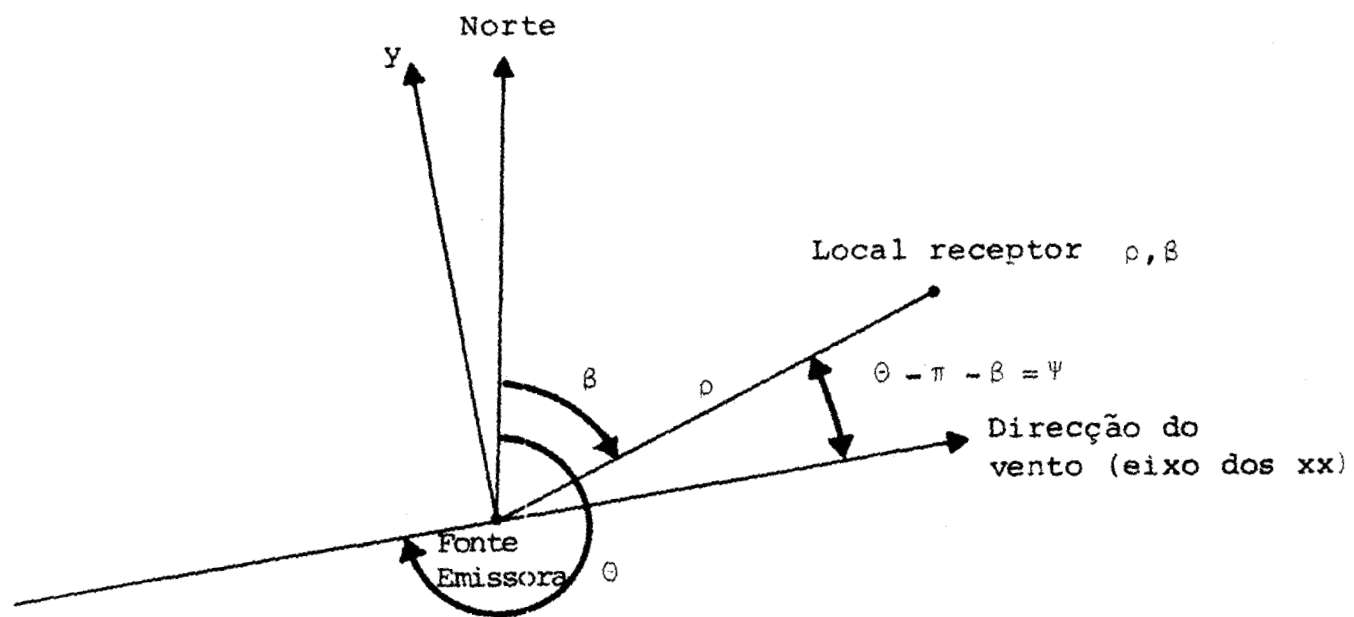


Figura 5.1 - SISTEMA DE COORDENADAS POLARES
USADO NO TCM

CAPÍTULO 5

Seja $f(\theta)$ a função de frequência da direcção θ do vento, em que $\int_{\theta}^{\theta+\epsilon} f(\theta)$, representa a probabilidade da direcção do vento se situar entre θ e $\theta+\epsilon$.

Seja β a largura angular da pluma (normalmente um pequeno ângulo) e esteja o receptor situado nas coordenadas (ρ, β) na direcção do vento e sob o eixo da pluma quando aquele sopra na direcção $\pi + \beta$ (fig. 5.2). O local receptor, recebe da fonte emissora, quando a direcção do vento estiver compreendida entre $\pi + \beta + \frac{\Delta}{2}$ e $\pi + \beta - \frac{\Delta}{2}$.

Sabendo-se que a relação entre o sistema de coordenadas rectilíneas, em que se apresentou atrás a equação gaussiana, e o de coordenadas polares é:

$$x = \rho \cos(\theta - \pi - \beta) \quad (5.2)$$

$$y = \rho \sin(\theta - \pi - \beta) \quad (5.3) \quad \text{vem}$$

$$C_{\text{média}} = \int_{\pi + \beta - \frac{\Delta}{2}}^{\pi + \beta + \frac{\Delta}{2}} C[\rho \cos(\theta - \beta - \pi), \rho \sin(\theta - \beta - \pi), z, R] f(\theta) d\theta \quad (5.4)$$

já que a utilização de diferentes limites de integração não mudaria o valor do integral visto o receptor não ser por esse facto mais afectado pela pluma.

$$\text{Façamos } \Psi = \theta - \beta - \pi \quad (5.5)$$

CAPÍTULO 5

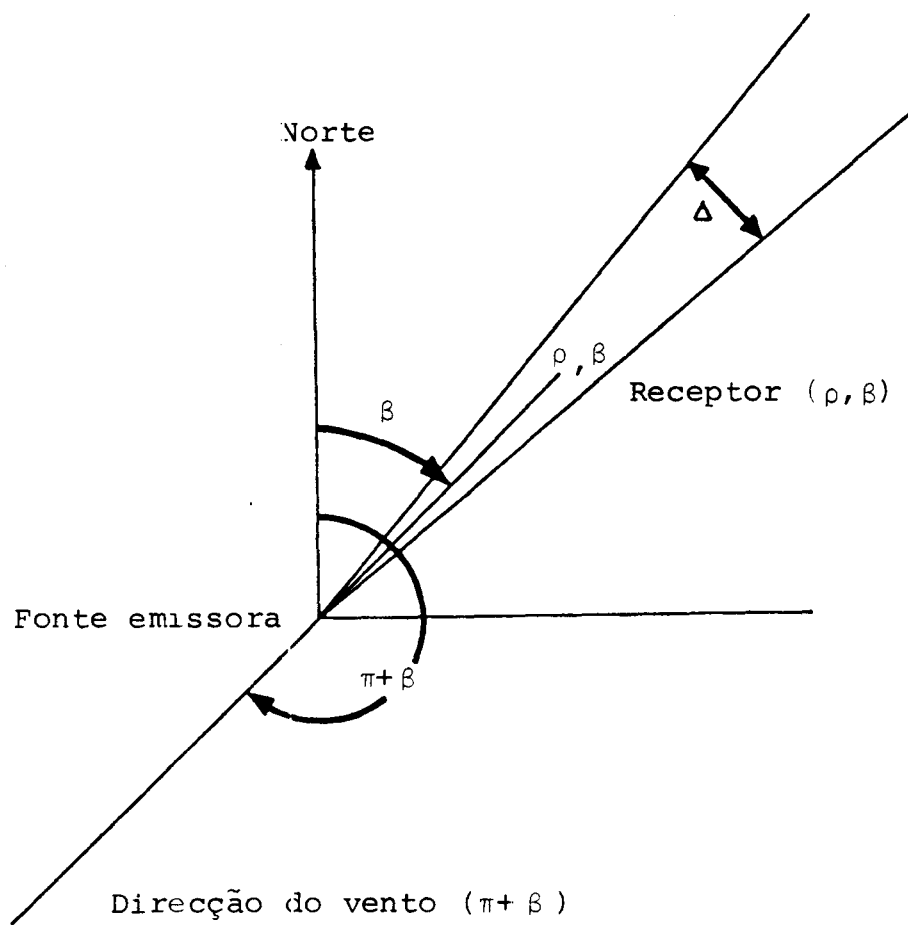


Figura 5.2 - LOCALIZAÇÃO DA FONTE EMISSORA E DO RECEPTOR EM COORDENADAS POLARES QUANDO O VENTO SOPRA DA DIRECÇÃO $\pi + \beta$

CAPÍTULO 5

Então

$$\theta = \psi + \beta + \pi \quad (5.6) \quad e$$

$$d\theta = d\psi \quad (5.7)$$

$$\text{Para } \theta = \pi + \beta + \frac{\Delta}{2} \quad \psi = \frac{\Delta}{2} \quad (5.8)$$

$$\text{e se } \theta = \pi + \beta - \frac{\Delta}{2} \quad \psi = -\frac{\Delta}{2} \quad (5.9)$$

$$\bar{C} = C_{\text{média}} = \int_{-\frac{\Delta}{2}}^{\frac{\Delta}{2}} C [\rho \cos \psi, \rho \sin \psi, z, H] f(\psi + \beta + \pi) d\psi \quad (5.10)$$

e substituindo o valor de C de (5.1) vem:

$$\begin{aligned} \bar{C} &= \int_{-\frac{\Delta}{2}}^{\frac{\Delta}{2}} \frac{Q}{\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp \left[-\frac{(\rho \sin \psi)^2}{2 \sigma_y^2} \right] \exp \left[-\frac{H^2}{2 \sigma_z^2} \right] f(\psi + \beta + \pi) d\psi \\ &= \frac{Q}{\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp \left[-\frac{H^2}{2 \sigma_z^2} \right] \int_{-\frac{\Delta}{2}}^{\frac{\Delta}{2}} \exp \left[-\frac{(\rho \sin \psi)^2}{2 \sigma_y^2} \right] f(\psi + \beta + \pi) d\psi \end{aligned} \quad (5.11)$$

Como ψ varia entre $-\frac{\Delta}{2}$ e $\frac{\Delta}{2}$, sendo Δ pequeno é

$$\psi \approx \sin \psi \quad e$$

$$\bar{C} = \frac{Q}{\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp \left[-\frac{H^2}{2 \sigma_z^2} \right] \int_{-\frac{\Delta}{2}}^{\frac{\Delta}{2}} \exp \left[-\frac{\rho^2 \psi^2}{2 \sigma_y^2} \right] f(\psi + \beta + \pi) d\psi \quad (5.12)$$

CAPÍTULO 5

Como ψ varia entre $-\frac{\Delta}{2}$ e $\frac{\Delta}{2}$ o valor $f(\psi+\beta+\pi)$ varia pouco, daí podermos substituir $f(\psi+\beta+\pi)$ por $f(\beta+\pi)$ resultando a expressão:

$$\bar{C} = \frac{Q}{\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp \left[-\frac{H^2}{2\sigma_z^2} \right] f(\beta+\pi) \int_{-\frac{\Delta}{2}}^{\frac{\Delta}{2}} \exp \left[-\frac{\rho^2 \psi^2}{2\sigma_y^2} \right] d\psi \quad (5.13)$$

Façamos $w = \frac{\rho\psi}{\sigma_y}$; então $dw = \frac{\rho}{\sigma_y} d\psi$ e $d\psi = \frac{\sigma_y}{\rho} dw$. Se $\psi = \frac{\Delta}{2}$, será $w = \frac{\rho\Delta}{2\sigma_y}$ e conseqüentemente

$$\begin{aligned} \bar{C} &= \frac{Q}{\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp \left[-\frac{H^2}{2\sigma_z^2} \right] f(\beta+\pi) \int_{-\frac{\rho\Delta}{2\sigma_y}}^{\frac{\rho\Delta}{2\sigma_y}} \left[\exp \left(-\frac{1}{2} w^2 \right) \right] \frac{\sigma_y}{\rho} dw \\ &= \frac{Q}{\pi u \sigma_z} \exp \left[-\frac{H^2}{2\sigma_z^2} \right] f(\beta+\pi) \int_{-\frac{\rho\Delta}{2\sigma_y}}^{\frac{\rho\Delta}{2\sigma_y}} \frac{1}{\sigma_y} \left[\exp \left(-\frac{1}{2} w^2 \right) \right] \frac{\sigma_y}{\rho} dw \\ &= \frac{Q}{\rho \pi u \sigma_z} \exp \left[-\frac{H^2}{2\sigma_z^2} \right] f(\beta+\pi) \int_{-\frac{\rho\Delta}{2\sigma_y}}^{\frac{\rho\Delta}{2\sigma_y}} \exp \left(-\frac{1}{2} w^2 \right) dw \end{aligned} \quad (5.14)$$

CAPÍTULO 5

Este integral é a função de probabilidade gaussiana, tendendo, por isso, para um, à medida que os limites do integral crescem. O valor de Δ , como já se disse, é pequeno mas, mesmo que aumentasse para além da largura da pluma, o valor de \bar{C} não mudava.

Então o valor do integral pouco varia com Δ e por isso pouco difere da unidade.

Nesse caso,

$$\bar{C} = \frac{2Q}{\sqrt{2\pi} \rho u \sigma_z} \exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma_z^2}\right) f(\beta+\pi) \quad (5.15)$$

Sendo o valor \bar{C} a concentração média no receptor para todas as direcções de vento, e uma vez que a largura da pluma é pequena, torna-se possível relacionar esta concentração média com a probabilidade de a direcção do vento ser, exactamente, $\theta = \beta + \pi$.

Ora, o valor da função de frequência $f(\theta)$ com $\theta = \beta + \pi$ representa, precisamente, a probabilidade do vento soprar nessa direcção.

Separaremos e enquadremos então em 16 classes de $22,5^\circ$ (16 sectores) todos os possíveis valores de θ . Supunhamos que $\beta + \pi$ se enquadra no sector K e que são iguais as probabilidades do vento soprar, em qualquer direcção, dentro do mesmo sector ($f(\theta)$ constante para cada sector). Seja $F(K)$ a probabilidade de ocorrência de direcção do vento no sector K , então:

CAPÍTULO 5

$$F(K) = \int_{\theta_K}^{\theta_K + \frac{2\pi}{16}} f(\theta) d\theta \quad (5.16)$$

e por ser assumido que $f(\theta)$ é constante entre θ_K e $\theta_K + \frac{2\pi}{16}$,

$$F(K) = f(\theta) \int_{\theta_K}^{\theta_K + \frac{2\pi}{16}} d\theta = \frac{2\pi}{16} f(\theta) \quad (5.17)$$

Com

$$\theta_K < \beta + \pi < \theta_K + \frac{2\pi}{16} \quad (5.18)$$

$$F(K) = \frac{2\pi}{16} f(\beta + \pi) \quad (5.19)$$

$$f(\beta + \pi) = \frac{16}{2\pi} F(K) \quad (5.20)$$

o que, por combinação, nos conduz a,

$$\bar{C} = \frac{32 Q}{(2\pi)^{3/2} \rho u \sigma_z} \exp\left(-\frac{H^2}{2 \sigma_z^2}\right) F(K) \quad (5.21)$$

e finalmente:

$$\bar{C} = \frac{32 Q}{(2\pi)^{3/2} \rho} \frac{F(K)}{u \sigma_z} \exp\left(-\frac{H^2}{2 \sigma_z^2}\right) \quad (5.22)$$

CAPÍTULO 5

Através da colheita sistemática de dados meteorológicos, é possível calcular a probabilidade de ocorrência de 576 situações meteorológicas representativas, resultantes da ocorrência de 16 classes de direcção de vento, 6 classes de velocidade de vento e 6 classes de estabilidade da atmosfera. Designemos então essa função de frequência conjunta por $\phi(k, \ell, m)$, em que k se refere à direcção, ℓ à velocidade e m à estabilidade.

Assim, a concentração média correspondente a todas as combinações da direcção de vento, velocidade de vento e classe de estabilidade, traduz-se por:

$$\bar{c} = \frac{32Q}{(2\pi)^{3/2}} \frac{1}{\rho} \sum_{\ell=1}^6 \sum_{m=1}^6 \frac{\phi(k, \ell, m)}{\sigma_z(\rho, m)} \exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma_z^2(\rho, m)}\right)$$

(5.23)

De notar que $\sigma_z(\rho, m)$ é função da distância e da classe de estabilidade, do mesmo modo que a direcção do vento k ainda está contida implicitamente na fórmula anterior pois não houve somatório em k .

Dado que a classe de estabilidade varia pouco com a velocidade - excepto para condições de núvens - e no sentido de simplificar o cálculo, substitui-se a velocidade do vento u pela velocidade ponderada para a adequada classe de estabilidade \underline{m} ,

$$U^*(m) = \frac{\sum_{k=1}^{16} \sum_{\ell=1}^6 \phi(k, \ell, m)}{\sum_{k=1}^{16} \sum_{\ell=1}^6 \frac{\phi(k, \ell, m)}{u_{\ell}}} \quad (5.24)$$

CAPÍTULO 5

em que a concentração \bar{c} é:

$$\begin{aligned} \bar{c} &= \frac{32Q}{(2\pi)^{3/2} \rho} \sum_{\ell=1}^6 \sum_{m=1}^6 \frac{\phi(k, \ell, m)}{U_m^* \sigma_z(\rho, m)} \exp\left(\frac{-H^2}{2\sigma_z^2(\rho, m)}\right) \\ &= \frac{32Q}{(2\pi)^{3/2} \rho} \sum_{m=1}^6 \frac{\sum_{\ell=1}^6 \phi(k, \ell, m)}{U_m^* \sigma_z(\rho, m)} \exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma_z^2(\rho, m)}\right) \\ &= \frac{32Q}{(2\pi)^{3/2} \rho} \sum_{m=1}^6 \frac{\phi(k, m)}{U_m^* \sigma_z(\rho, m)} \exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma_z^2(\rho, m)}\right) \quad (5.25) \end{aligned}$$

sendo $\phi(k, m)$ a probabilidade da direcção do vento estar no sector com a classe de estabilidade m ou seja

$$\phi(k, m) = \sum_{\ell=1}^6 \phi(k, \ell, m)$$

O T.C.M. utiliza, assim, a equação gaussiana, adaptando-a a previsões trimestrais e anuais:

$$\bar{c}(\rho, k) = \frac{32 \times 10^6 Q}{(2\pi)^{3/2} \rho} \sum_{m=1}^6 \frac{\phi(k, m)}{U^*(H, m) \sigma_z(m)} \exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma_z^2(m)}\right) \quad (5.26)$$

em que

Q é taxa de emissão do poluente em (gramas/segundo)

ρ é a distância da chaminé ao receptor (metros)

CAPÍTULO 5

$\phi(k,m)$ é a função de frequências meteorológicas

k é o índice relativo ao sector do vento que contém a linha de união entre a fonte e o receptor

m é o índice da classe de estabilidade atmosférica

$U^*(H,m)$ é a velocidade média do vento ponderada, para a classe de estabilidade m (metros/segundo)

$\sigma_z(m)$ é o desvio padrão da distribuição de concentração na vertical (metros)

CAPÍTULO 5

5.2 Os Coeficientes de σ_z

Os coeficientes σ_z empregues são os que têm por base as experimentações de Pasquill e Gifford (47,52) (efectuadas em regiões planas e de tipo rural) com as modificações sugeridas por Turner (51).

Utiliza-se a seguinte expressão analítica que reproduz os gráficos de Turner

$$\bar{\sigma}_z = a(m) \rho^{b(m)} \quad (5.27) \quad \text{em que}$$

$a(m)$ e $b(m)$ são funções da classe de estabilidade e , parcialmente, da distância à fonte emissora.

Os seus valores respectivos estão explicitados no quadro 5.I.

QUADRO 5.1
OS COEFICIENTES DE σ_2

Classe de Estabilidade	Distância (metros)			
	$0 < x \leq 5\,000$		$5\,000 < x$	
	a	b	a	b
A = 1	0,0002539	2,089	0,0002539	2,089
B = 2	0,04936	1,114	0,04936	1,114
C = 3	0,1014	0,926	0,1154	0,9109
DD = 4	0,2591	0,6869	0,7368	0,5642
DN = 5	0,2527	0,6341	1,297	0,4421
E e F	0,2017	0,6020	1,5763	0,3606

CAPÍTULO 5

5.3 Função de Frequências Meteorológicas

Se agruparmos os valores dos registos de velocidades do vento observadas durante anos, por 6 classes de velocidade, as direcções de vento observadas por 16 classes de direcção ($22,5^\circ$) e a estabilidade da atmosfera nas 6 classes de Pasquill, poderemos - através da frequência das observações - calcular uma função de frequências meteorológicas a qual nos indica a probabilidade de ocorrência de cada uma das 576 situações meteorológicas possíveis ($6 \times 16 \times 6$).

Para simplificação dos cálculos, uma vez que podem estar envolvidos dezenas de receptores, o T C M utiliza uma velocidade média ponderada para cada classe de estabilidade.

Por isso aquela velocidade é a utilizada para todos os sectores de direcção de vento dentro de cada classe de estabilidade. Daqui resulta uma enorme vantagem sem perda significativa de rigor pois a função de frequências passa a depender de 16 direcções de vento e 6 classes de estabilidade, abrangendo portanto 96 casos possíveis em vez dos 576. Tal função é designada por $\Phi(k,m)$.

Existem programas especiais para cálculo da função. O utilizado como input no T C M é o S T A R, propriedade do National Weather Service, U.S.A.

CAPÍTULO 5

5.4 Velocidades de Vento

As classes de velocidade do vento usadas são as seguintes:

	0-3 nós
	4-6 nós
Classes	7-10 nós
	11-16 nós
	17-21 nós
	> 21 nós

utilizando o programa, o valor médio de cada uma.

As designadas velocidades ao nível do solo, são regra geral medidas em aeroportos a 10 metros de altura.

O modelo corrige estas velocidades para a altura física do topo da chaminé - para cada classe de estabilidade - através da expressão,

$$U^*(H,m) = U^*(m) \left(\frac{H}{Z_0}\right)^p \quad (5.28)$$

em que

$U^*(H,m)$ é a velocidade média ponderada para a classe de estabilidade m , à altura física do topo da chaminé

$U^*(m)$ é a velocidade média ponderada à altura do anemômetro

Z_0 é a altura do anemômetro

CAPÍTULO 5

$p(m)$ é o coeficiente, função da estabilidade, respectivamente com os valores indicados no Quadro 5.II.

QUADRO 5.II

VALORES DO EXPOENTE DE CORRECÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO EM ALTITUDE, p , PARA AS DIFERENTES CLASSES DE ESTABILIDADE

	$p(m)$
A	0,10
B	0,15
C	0,20
DD	0,25
DN	0,25
E e F	0,30

Este procedimento deve-se ao facto conhecido da velocidade do vento aumentar em altitude, pelo que, caso não fosse adoptado, conduziria, em certos casos, a resultados distorcidos e excessivamente elevados para as concentrações previstas.

CAPÍTULO 5

5.5 Equações de Elevação da Pluma

O T.C.M. adopta uma muito completa formulação da elevação da pluma.

Se não esquecermos que - como se referiu no capítulo 4 - a concentração máxima dum poluente é inversamente proporcional ao quadrado da altura efectiva de emissão, logo reconheceremos a importância do maior rigor deste parâmetro.

As equações adoptadas variam bastante; consoante na pluma se verifica um predomínio da componente de momento ou da componente de flutuação assim são utilizadas diferentes equações para distintas condições de estabilidade (Quadro 5.III).

O modelo calcula a elevação pelas equações de flutuação e de momento, seleccionando a mais elevada como traduzindo o efeito dominante, na pluma, de uma sobre a outra.

A altura efectiva do chaminé é, pois, como anteriormente $H = h + \Delta h$.

CAPÍTULO 5

QUADRO 5.III

EQUAÇÕES DE ELEVAÇÃO DA PLUMA

	Atmosfera Estável	Atmosfera Neutra/Instável
Predomí- nio da Compo- nente de Flu- tuação ("Buoyan- cy Domina- ted")	$\Delta h(x) = 1,6F^{1/3} x^{2/3} u^{-1}$ <p>ou</p> $\Delta h_{MAX} = 2,6 (F/u_s)^{1/3}$ <p>em que</p> $s = 0,02g/T_A \text{ para esta-}$ bilidade E e F	$\Delta h(x) = 1,6F^{1/3} x^{2/3} u^{-1}$ <p>para $x < 3,5x^*$</p> <p>ou</p> $\Delta h_{MAX} = 1,6F^{1/3} (3,5x^*)^{2/3} u^{-1}$ <p>para $x > 3,5 x^*$</p> <p>em que</p> $x^* = 14F^{5/8} \quad \text{se } F < 55$ $x^* = 34F^{2/5} \quad \text{se } F > 55$
Predomí- nio da Compo- nente de Momen- to ("Momen- tum Domi- nated")	$\Delta h_{MAX} = 1,5 (VR)^{2/3} u^{-1/3} s^{-1/6}$	$\Delta h(x) = 3,78 \left[\frac{V^2}{u(V+3u)} \right]^{2/3} \left(\frac{xR^2}{2} \right)^{1/3}$ <p>ou</p> $\Delta h_{MAX} = 3VD/u$

sendo:

$$F = gVR^2 (T - T_A) / T$$

$$T = \text{Temperatura do emissor, } ^\circ K$$

$$T_A = \text{Temperatura ambiente, } ^\circ K$$

$$V = \text{Velocidade de saída da chaminé, m/s}$$

$$R = \text{Raio da chaminé, m}$$

$$D = \text{Diâmetro, m}$$

$$x = \text{distância do receptor à chaminé na direcção do vento, m}$$

$$u = \text{velocidade média do vento à altura do topo da chaminé, m/s}$$

$$g = \text{aceleração da gravidade, m/s}^2$$

$$\Delta h = \text{elevação da pluma, m}$$

$$\Delta h_{MAX} = \text{elevação final da pluma, m}$$

CAPÍTULO 5

5.6 Taxa de Decomposição do Poluente

Apesar de muitos modelos não o terem em consideração, o SO_2 sofre decomposição lenta na atmosfera e alguma deposição.

O modelo utiliza a seguinte expressão analítica para ter em conta este tipo de efeitos:

$$C_t = C_o \exp(-at) \quad (5.29)$$

em que

C_t = a concentração no momento t

C_o = a concentração inicial do poluente sem decomposição

a = constante

t = o tempo decorrido desde a emissão do poluente

Se definirmos, como é habitual, $t_{1/2}$ como o tempo necessário para o valor de concentração do poluente decair a metade devido apenas à sua decomposição, então:

$$a = \frac{0,692}{t_{1/2}} \quad \text{sendo } t = \frac{x}{u} \quad \text{vem}$$

$$C_t = C_o \exp\left(-\frac{0,692 x}{u t_{1/2}}\right) \quad (5.30)$$

$$\text{ou } D(\rho, H, m) = \exp\left(\frac{-0,692\rho}{U^*(H, m) t_{1/2}}\right) \quad (5.31)$$

CAPÍTULO 5

No T.C.M. o valor de $t_{1/2}$ é escolhido pelo utilizador com base no seu conhecimento.

Para poupar tempo de computador, o T.C.M. tem previamente calculados estes valores para as 20 distâncias, ρ , diferentes (explicitadas no quadro 5.IV).

QUADRO 5.IV

VALORES DE ρ E H PARA OS QUAIS O TCM
TEM PREVIAMENTE CALCULADOS OS CORRES-
PONDENTES VALORES DE $t_{1/2}$ E K.

ρ (kilometros)	H (metros)
0,1	10
0,2	20
0,4	30
0,7	50
1,1	70
1,7	100
2,5	150
3,5	200
4,8	300
6,4	
8,3	
10,6	
13,3	
16,4	
20,0	
24,1	
28,7	
33,9	
39,7	
46,1	

CAPÍTULO 5

5.7 Os Valores Numéricos do Factor K

A introdução deste factor, é outro dos aspectos relevantes do T.C.M..

Seja definido K como:

$$K(\rho, H, m) = \frac{32 \times 10^6}{(2\pi)^{3/2} \sigma_z} \exp\left(-\frac{H^2}{2 \sigma_z^2}\right) \quad (5.32)$$

O T.C.M. tem também calculados previamente os valores desta expressão para 20 distâncias diferentes, ρ , e 9 valores de H, (quadro 5.IV).

Os valores de K calculados para 6 classes de estabilidade, constituem um total de

1080 combinações

Para valores de H menores que 10m e maiores que 300 m são usados respectivamente os valores de 10m e de 300m. Fontes situadas segundo a direcção do vento, a mais de 46,1km do receptor são desprezadas.

A concentração em cada receptor é calculada através da concentração devida ao primeiro emissor e sucessivamente adicionada das contribuições dos restantes.

A concentração num receptor, proveniente a uma fonte emissora é assim:

$$C(x, y) = Q \sum_{m=1}^6 \frac{K(\rho, H, m) \Phi(k, m) D(\rho, H, m)}{U^*(H, m)} \quad (5.33)$$

CAPÍTULO 5

Suponhamos, agora, que a fonte emissora pontual tem uma altura efectiva de 55 metros, se verifica uma classe C e o receptor está a 9km com um azimute de 37° .

Para essa distância ρ os K já calculados, situam-se em 8,3km e 10,6km e as alturas efectivas em 50m e 70 metros.

O valor de K é, então, interpolado entre K (11,4,3) e, K (11,5,3), K (12,4,3) e K (12, 5,3) para a classe C.

Uma vez que 37° se situa entre os $33,75^{\circ}$ e $56,25^{\circ}$ o sector de vento é o 3 (K = 3, Quadro 5.V e fig. 5.3).

O valor $\psi(3,3)$ é calculado. Os valores predeterminados de $D(\rho, H, m)$ e de $U^*(H, m)$ são finalmente usados na equação para cálculo da concentração. A contribuição das outras classes de estabilidade é determinada e adicionada em seguida. Um novo receptor é tomado e o cálculo repetido.

Quando todos os receptores estão calculados, o modelo passa a outra fonte e assim sucessivamente.

Só estes procedimentos, permitem ao T C M dispender apenas cerca de 11% do tempo gasto por outros modelos - caso do C D M - em passos equivalentes.

Por esta breve descrição se compreende que a simulação de múltiplos receptores e múltiplas fontes como no caso do planeamento da Área de Sines - 625 receptores regra geral e 15 fontes - a complexidade dos cálculos e o tempo de computador devem ser considerados.

CAPÍTULO 5

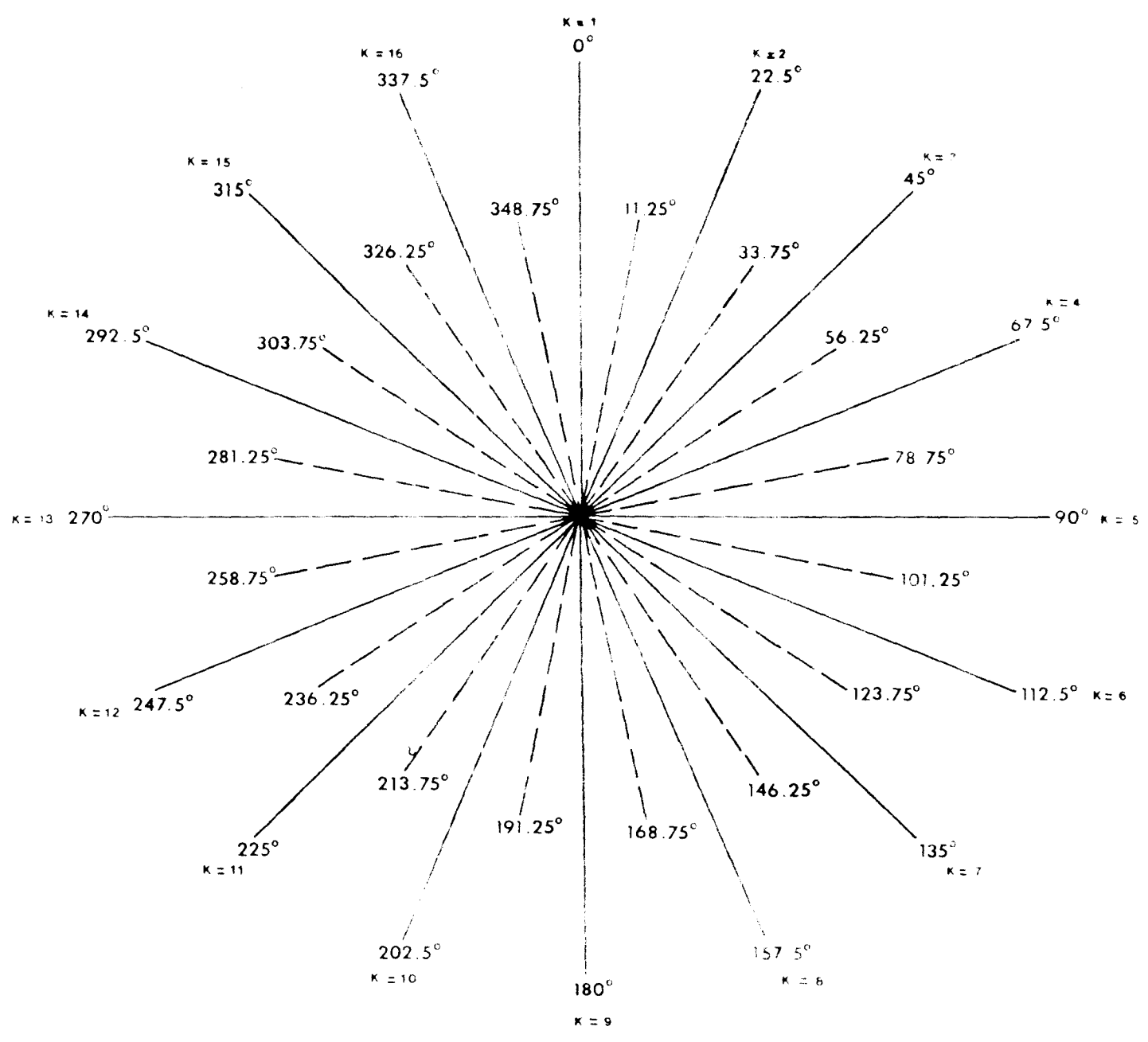
QUADRO 5.V

ÍNDICES DOS SECTORES DE DIRECÇÃO DE VENTO*

Sector de Direcção de Vento	Azimute	Índice k
348.75° - 11.25°	0°	1
11.25° - 33.75°	22.5	2
33.75° - 56.25°	45°	3
56.25° - 78.75°	67.5°	4
78.75° - 101.25°	90°	5
101.25° - 123.75°	112.5°	6
123.75° - 146.25°	135°	7
146.25° - 168.75°	157.5°	8
168.75° - 191.25°	180°	9
191.25° - 213.75°	202.5°	10
213.75° - 236.25°	225	11
236.25° - 258.75°	247.5°	12
258.75° - 281.25°	270°	13
281.25° - 303.75°	292.5°	14
303.75° - 326.25°	315°	15
326.25° - 348.75°	337.5°	16

* No caso particular das simulações efectuadas por nós no UNIVAC 1100 utilizado no CAS, e devido a razões de programação, o sector Norte é designado por k=9, o NNE por k=10 e assim sucessivamente, estando todavia ajustadas correspondentemente as frequências de ocorrência do vento.

CAPÍTULO I



----- Limites dos sectores
————— Direcção

Figura 5.3 - ÍNDICES DOS SECTORES DE DIRECÇÃO DO VENTO

CAPÍTULO 5

5.8 Fontes Dispersas numa Área

Para não alongar o capítulo omite-se o tratamento do TCM, às fontes dispersas em área, uma vez que não houve necessidade de as modelar na Área de Sines para efeitos deste estudo.

Em contrapartida, torna-se importante focar o comportamento do TCM no caso da simulação de fachos industriais ("flare"), uma vez que a refinaria de Sines possui umas unidades com emissões que, sendo significativas, não podem ser desprezadas.

CAPÍTULO 5

5.9 Fontes Pontuais Tipo "Flare"

Os "flare" são emissores de tipo pontual, com alturas elevadas, mas que não têm obviamente comportamento análogo ao das chaminés.

Efectivamente, no facho, a combustão de gases de processo ocorre no topo, junto à chama.

Nessas condições, não é possível calcular directamente valores correctos para velocidades de saída ou temperatura dos gases.

A aproximação usada no T.C.M. e inexistente noutros modelos, é muito curiosa e útil.

Como se explicitou no capítulo 4, um fluxo de flutuação (buoyancy) pode ser descrito por

$$F = \frac{g V D^2}{4} \left(\frac{T - T_A}{T} \right) \quad (5.34)$$

onde

T_A é a temperatura do ar ambiente

T é a temperatura da combustão

V é a velocidade de saída dos gases da combustão

D é o diâmetro

F é o fluxo

Nos fachos industriais, podemos assumir como boa aproximação que $T = 1000^\circ\text{C}$.

CAPÍTULO 5

Por outro lado, F varia pouco com T_A ; por exemplo entre $T_A = 0^\circ\text{C}$ e $T_A = 40^\circ\text{C}$, F varia aproximadamente 4%.

Mas Briggs provou e indicou que

$$F = 3,7 \times 10^{-5} q_n \quad (5.35)$$

em que

q_n é o calor libertado na "flare" em cal/seg, (excluído o calor de radiação)

Se igualarmos as expressões (5.34) e (5.35) de F , será:

$$3,7 \times 10^{-5} q_n = \frac{g V D^2}{4} \left(\frac{T - T_A}{T} \right) \quad (5.36)$$

Esta equação para $T_A = 35^\circ\text{C}$, $T = 1\ 000^\circ\text{C}$ e se $V = 20\text{m/s}$ fica

$$3,7 \times 10^{-5} q_n = \frac{9,8 \times 20 \times D^2}{4} \left(\frac{1273 - 308}{1273} \right) \quad (5.37)$$

e

$$D = \sqrt{q_n} \times 10^{-3} \quad (5.38)$$

sendo

$$q_n = q (1 - 0,048 \sqrt{MW}) \quad (5.39)$$

onde

q é o calor bruto libertado em cal/seg. e
 MW é o peso molecular médio "pesado" (em volume) com a composição de mistura

CAPÍTULO 5

5.10 Os Inputs Necessários para Aplicação e Avaliação do TCM

A finalizar, e como se depreende do que foi analisado nas páginas deste capítulo, o TCM necessita, por conseguinte de cinco grandes conjuntos de dados para poder ser avaliado na sua "performance" em determinada região:

- a) Investigação experimental sistemática, durante anos, dos níveis de concentrações do poluente em estudo.
- b) Investigação das tecnologias e processos industriais envolvidos na área em estudo.
- c) Investigação das emissões poluentes e elaboração do correspondente inventário de carácter quantitativo, rigoroso, para essas indústrias.
- d) Investigação, durante anos, dos parâmetros meteorológicos da área em estudo, e seu processamento estatístico adequado.
- e) Simulações exaustivas em computador para esses inventários de emissões e múltiplos cenários meteorológicos, durante vários anos.

Veremos, nos quatro capítulos seguintes, como tais aspectos e elementos foram investigados e calculados.

Assim os capítulos 6, 7 e 8 contemplam os aspectos focados respectivamente em a), b) e c). O capítulo 9, os focados em d) e e).

CAPÍTULO 5

Será através da comparação e análise detalhada dos resultados medidos experimentalmente com os previstos nas simulações matemáticas com o TCM, que se pode então efectivar a calibração e avaliação do modelo, no capítulo 10.

CAPÍTULO 6

DETERMINAÇÃO DOS NÍVEIS DE CONCENTRAÇÕES DE DIÓXIDO DE ENXOFRE NO AR AMBIENTE

Tendo em conta a necessidade, salientada no capítulo anterior, dum conhecimento profundo dos níveis de concentrações de dióxido de enxofre ao nível do solo, explicita-se agora, a metodologia usada durante quatro anos para se conseguir tais resultados.

Caracteriza-se a rede de "monitoring", a aparelhagem utilizada e descreve-se o programa geral de investigação das concentrações, bem como os meios humanos e materiais envolvidos.

CAPÍTULO 6

6.1 Rede de "Monitoring"

O estabelecimento duma rede de "monitoring" é, ainda hoje, obra complexa e dispendiosa em qualquer parte do Mundo. Mas mais difícil foi iniciá-la numa época (1972) em que, na instrumentação de investigação das concentrações de poluentes atmosféricos, se davam os primeiros passos com os chamados instrumentos de 1^a e 2^a geração.

Estes instrumentos, operando regra geral através da utilização de princípios colorimétricos, não estavam preparados em termos de sensibilidade e precisão para os baixos níveis de poluição existentes no ar ambiente em regiões pouco poluídas e destinavam-se sobretudo a atmosferas industriais.

A necessidade de utilizar reagentes cuja degradação por exposição continuada à luz era frequente, as constantes avarias que a sua tecnologia pouco desenvolvida e mal testada acarretava, o seu elevado tempo de resposta e a pouca reprodutibilidade de resultados, não eram aspectos a menosprezar.

Estes factos, acrescidos dum conhecimento limitado dos problemas de poluição atmosférica no País e associados a uma certa desorientação internacional na fixação e adopção de métodos válidos, não facilitaram o trabalho daqueles que, em Sines, desde 1972, tentavam implantar uma rede de medida e a quem é devida homenagem.

Foi graças a esse esforço que, em 1974/75, já estava construída, em Sines, uma estação de controlo da poluição,

CAPÍTULO 6

se encontravam definidos os locais para mais duas e acaba dos os respectivos projectos.

Em 1974/75, uma equipa de técnicos do Gabinete da Área de Sines, dirigida pelo autor, efectua as primeiras medições dos níveis de poluentes atmosféricos na área, embora pelos métodos referidos de 1^a geração.

Em 1976, estavam acabados os três edifícios para ins talação definitiva de outras tantas estações de controlo.

Inicia-se a especialização de pessoal no estrangeiro e, nos Estados Unidos da América procede-se à avaliação e selecção de aparelhagem moderna e eficiente.

Ao seleccionar em 1972 os locais da implantação das estações, procurou-se ter em conta a localização relativa da nova cidade de Santo André (a Norte de Sines) das vilas de Sines (a Oeste do Complexo Industrial) e de Santiago do Cacém (a Este), em relação às zonas de implantação do Porto de Sines e do Complexo, bem como as frequências dominantes de ocorrência nas direcções do vento. Foram eliminados locais onde a influência do tráfego ou de edifícios circunda ntes pudessem afectar as medições. Um número de quatro estações fixas (e uma móvel) pareceu razoável, face às características topográficas da área (dominantemente plana) e às disponibilidades do País.

A Área de Sines possui assim, uma rede de três estações há vários anos em funcionamento, e uma outra (Santiago do Cacém) cuja instalação e início de exploração se iniciou recentemente.

CAPÍTULO 6

A designada por Estação de Monte Velho situa-se cerca de 12 km ao Norte da Vila de Sines, (coordenadas 141,62; 123,58; 42,6) junto à cidade de Santo André e, com ela se determinam os níveis de poluição que atingem a cidade.

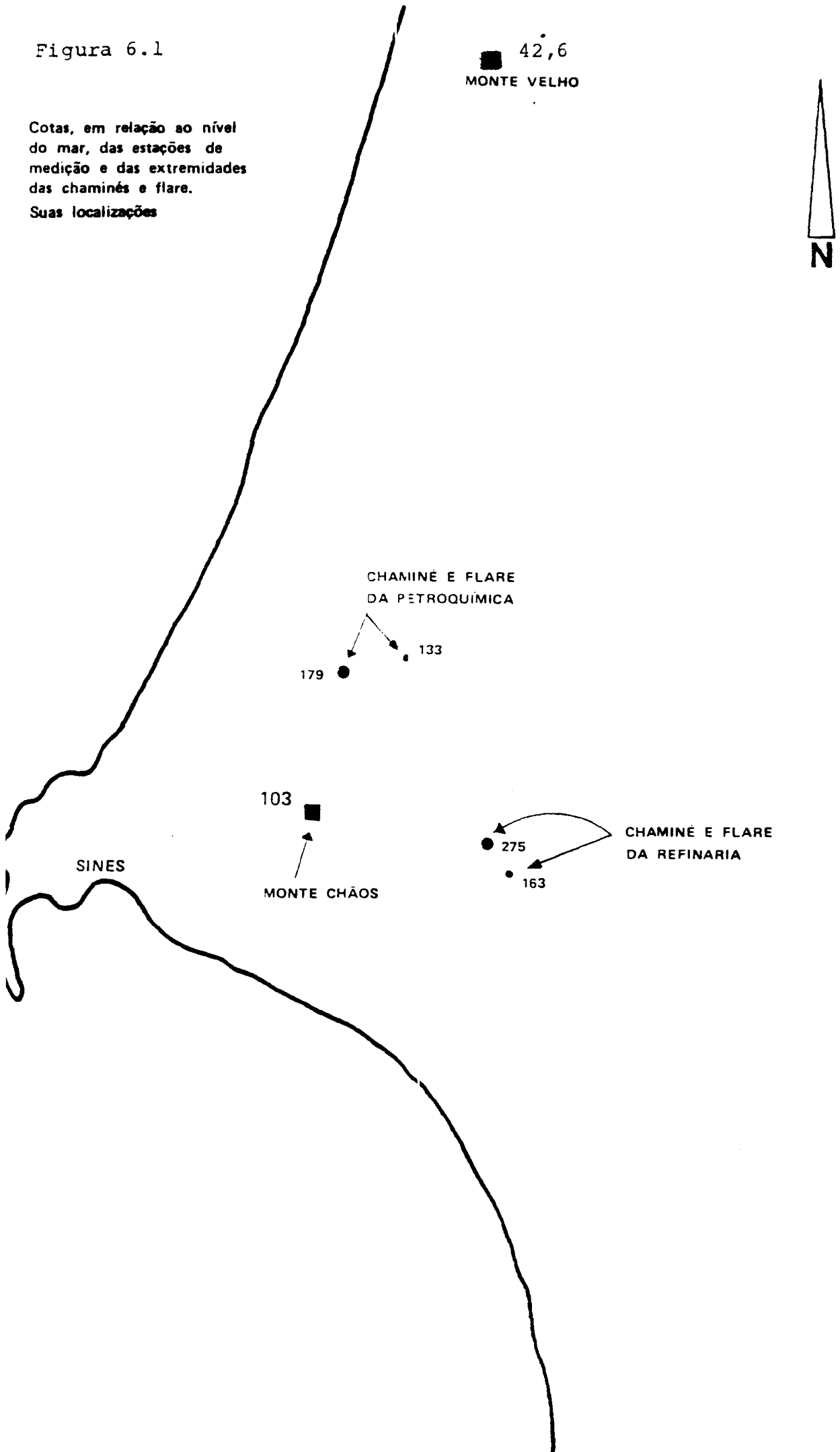
A designada por Estação de Monte Chãos fica junto da Vila de Sines (coordenadas 138,15; 109,94; 102,9) ligeiramente a Oeste em relação à "mancha" de indústria pesada (Refinaria, Petroquímica etc) e, com ela, se avaliam os níveis de poluição provenientes do complexo, com ventos dos quadrantes de Este a atingirem a Vila de Sines.

A designada por Estação da Sonega situa-se cerca de 15 km ao Sul de Sines (coordenadas 147,98; 100,62; 196) e procura-se, por seu intermédio calcular as concentrações de poluentes a Sul do Complexo, e que, arrastados pelos ventos dominantes, "saem" da Área de Sines (Figura 6.1).

A última estação, recentemente instalada, é a de Santiago do Cacém, situada junto a esta Vila, 11 km a Oeste/No roeste de Sines, e com ela se determinarão as concentrações que, predominantemente vindas do Complexo, afectarão Santiago.

Figura 6.1

Cotas, em relação ao nível do mar, das estações de medição e das extremidades das chaminés e flare.
Suas localizações



CAPÍTULO 6

6.2 Aparelhagem de Investigação das Concentrações

Aquando do estágio prolongado nos E.U.A., o autor e outros técnicos tiveram a ocasião de avaliar em profundidade as tecnologias e princípios adoptados nos aparelhos de medida da concentração de poluentes, nomeadamente através dos testes exaustivos desenvolvidos para a sua aprovação pela United States Environmental Protection Agency e por outras agências, tais como Texas Air Control Board e State-wide Air Pollution Research Center da Universidade da Califórnia.

Visando a avaliação da "performance" dos vários equipamentos o autor realizou estágios nesta última instituição, no Texas Air Control Board, na U.S.E.P.A. em Research Triangle Park, tendo também visitado redes de "monitoring" na Califórnia a as fábricas de alguns produtores. Com base nos elementos recolhidos e em critérios económicos, foram seleccionados os tipos dos equipamentos que hoje operam nas 3 estações:

- .3 instrumentos de medida em contínuo de concentração de dióxido de enxofre no ar ambiente, modelo 43, marca Thermo Electron com possibilidade de ligação a telemetria.
- .3 calibradores, por tubos de permeação, modelo 143, marca Thermo Electron.
- .3 instrumentos de medida em contínuo de concentração de NO_2 /NO/NOX no ar ambiente, modelo 14B/E, marca Thermo Electron com possibilidade de ligação a telemetria.
- .3 instrumentos de medida em contínuo de concentração de Ozono no ar ambiente, marca Dasibi Environmental Corp.

CAPÍTULO 6

- . 3 instrumentos de medida para hidrocarbonetos metânicos e não metânicos e de monóxido de carbono; marca Beckmann Instruments.
- . 1 Anemógrafo - marca VAISSALA - em Monte Chãos, para medição da direcção e velocidade de vento.
- . 1 Anemómetro - marca Fuess - em Monte Velho.
- . 1 Anemómetro simples, na Sonega.
- Medidores nas três estações de: temperatura, humidade, radiação solar e pressão atmosférica.
- Registadores acoplados aos diversos instrumentos.
- Múltiplos equipamentos acessórios: medidores de caudal, geradores de ar puro, garrafas de gases, etc.

Note-se que este esforço de apetrechamento tem sido intensificado e prosseguido com muito mérito, em minha opinião, pelos técnicos actualmente responsáveis pela rede.

6.2.1. Instrumentos de Medida de Dióxido de Enxofre

Os equipamentos que medem a concentração de SO_2 operam segundo o princípio da fluorescência ultravioleta pulsada, método aprovado oficialmente pela U.S.E.P.A.. Vejamos como.

O ar poluído com SO_2 é aspirado para uma câmara após remoção do vapor de água e sujeito a radiação ultra-violeta de comprimento de onda situado entre 230nm - 190nm.

Sabe-se que as moléculas de SO_2 são excitadas neste comprimento de onda, com poucas interferências de outras moléculas. Essa radiação é emitida por lâmpadas de longa duração,

CAPÍTULO 6

com elevada intensidade e pequeno consumo de energia.

As moléculas excitadas, ao regressarem ao seu estado fundamental, emitem radiação fluorescente, sendo esta medida e ampliada num fotomultiplicador e registada em gráfico. A intensidade de radiação emitida é proporcional à concentração de moléculas de SO_2 presentes na amostra. O método, além de proporcionar excelente sensibilidade, tem as grandes vantagens de ser praticamente independente do caudal de amostragem e de evitar o uso de reagentes e gases, caros e facilmente deterioráveis.

A reacção de excitação pode ser esquematizada através da expressão:



sendo a intensidade da luz ultravioleta, I_a , em qualquer ponto do sistema, dada por

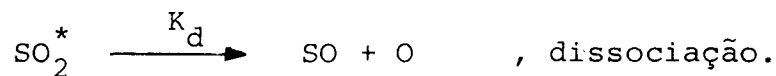
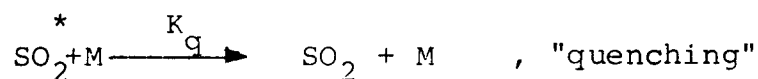
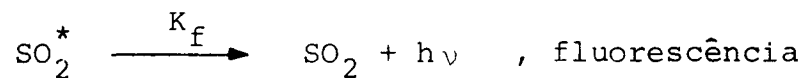
$$I_a = I_0 \left\{ 1 - \exp \left[-ax(\text{SO}_2) \right] \right\} \quad (6.1)$$

em que

- I_0 é a intensidade da luz incidente
- a é o coeficiente de absorção do SO_2
- x é o comprimento de onda
- (SO_2) é a concentração de SO_2 na amostra

CAPÍTULO 6

Posteriormente, as moléculas excitadas passam, por vários mecanismos de decomposição:



Combinando as expressões e mecanismos anteriores, a intensidade da luz fluorescente que chega ao detector é:

$$F = \frac{G K_f I_0 \left\{ 1 - \exp \left[-ax(\text{SO}_2) \right] \right\}}{K_f + K_d + K_q [\text{M}]} \quad (6.2)$$

em que K_f , K_d e K_q se referem às constantes de reacção dos respectivos processos;

G é um factor relativo ao formato da câmara de reacção e

M é característico do ar.

Quando a concentração de SO_2 é baixa (caso dos valores observados no ar ambiente) e o comprimento de onda da radiação de excitação é pequeno, a expressão transforma-se em:

$$F = \frac{G K_f I_0 ax (\text{SO}_2)}{K_f + K_d + K_q [\text{M}]} \quad (6.3)$$

ou

$$F = K (\text{SO}_2) \quad (6.4)$$

CAPÍTULO 6

Portanto a radiação fluorescente que chega ao detector é directamente proporcional à concentração do poluente (112).

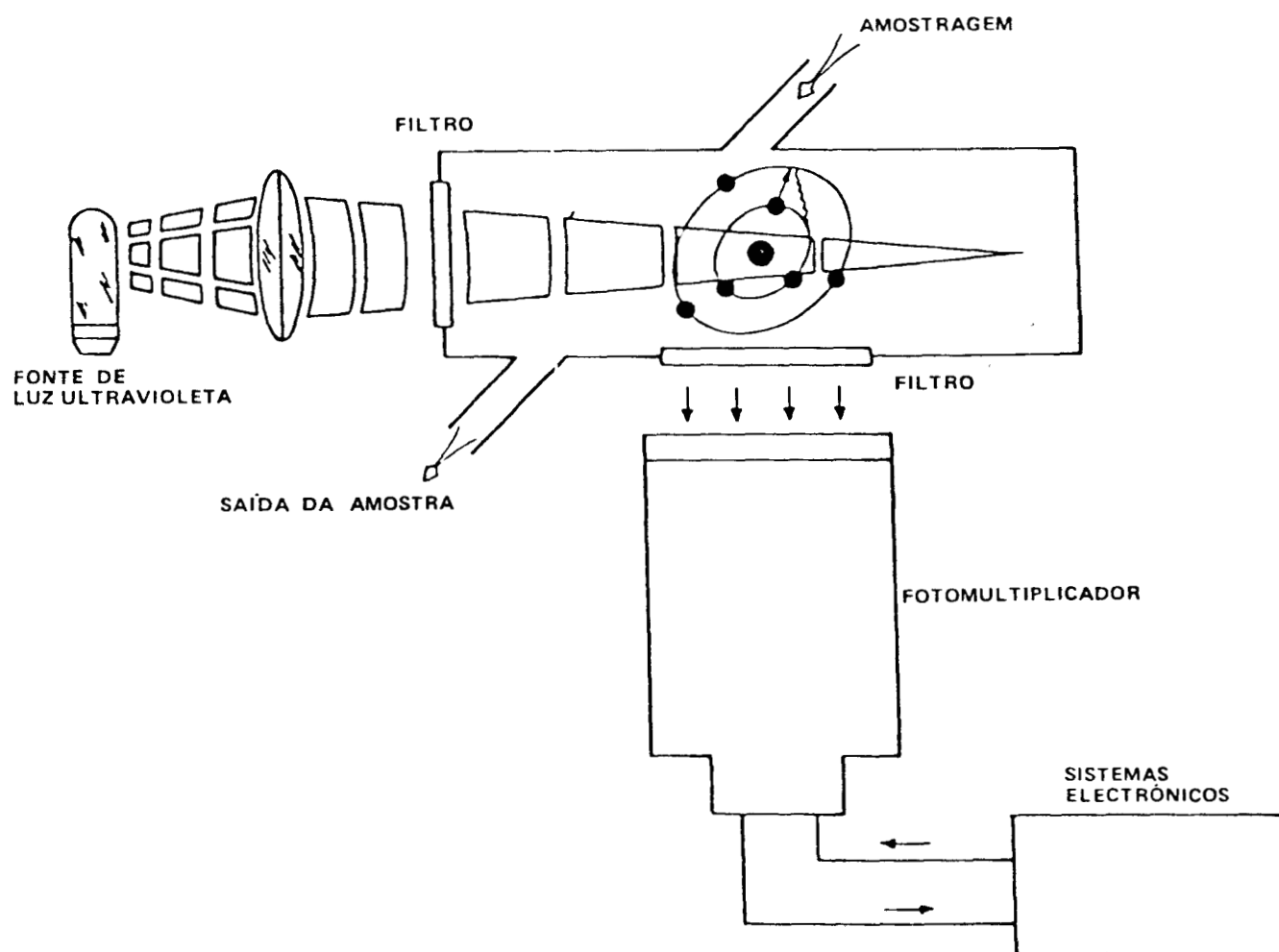
Nas figuras 6.2, 6.3 e 6.4 apresentam-se as partes relevantes dos equipamentos.

Estes aparelhos apresentam as seguintes "performances":

- Ruído de Fundo		0,001 p.p.m
- Limite de Detecção		0,002 p.p.m
- Variação do Zero (24 horas)		± 0,003 p.p.m
- Tempo de resposta		10 segundos
- Precisão		± 0,5%
- Interferências	O ₃	0,000 ppm
	H ₂ S	0,000 ppm
	NO ₂	0,000 ppm
	CO ₂	0,000 ppm
	CO	0,000 ppm
	C ₂ H ₄	0,000 ppm
	H ₂ O	0,000 ppm
	NO	0,005 ppm

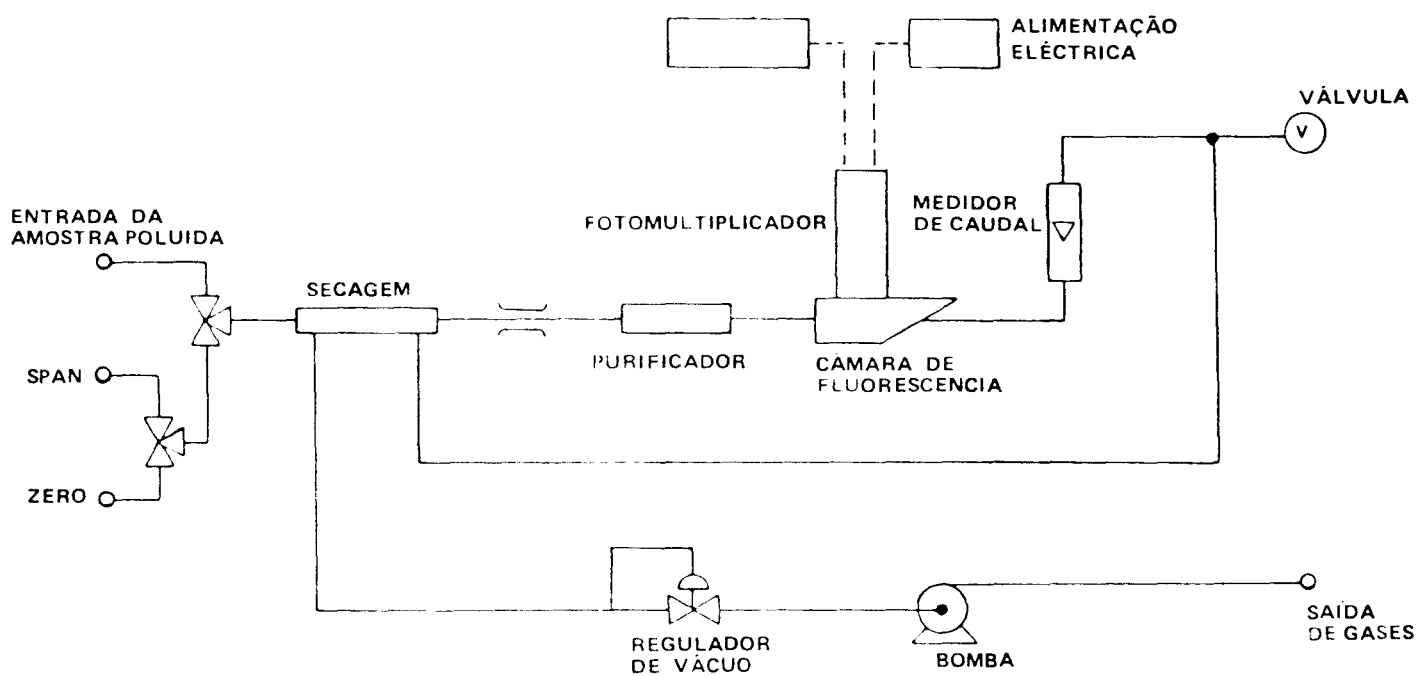
CAPÍTULO 6

Figura 6.2 - PRINCIPIO DE OPERAÇÃO DE UM
MEDIDOR DE SO_2 NO AR AMBIENTE



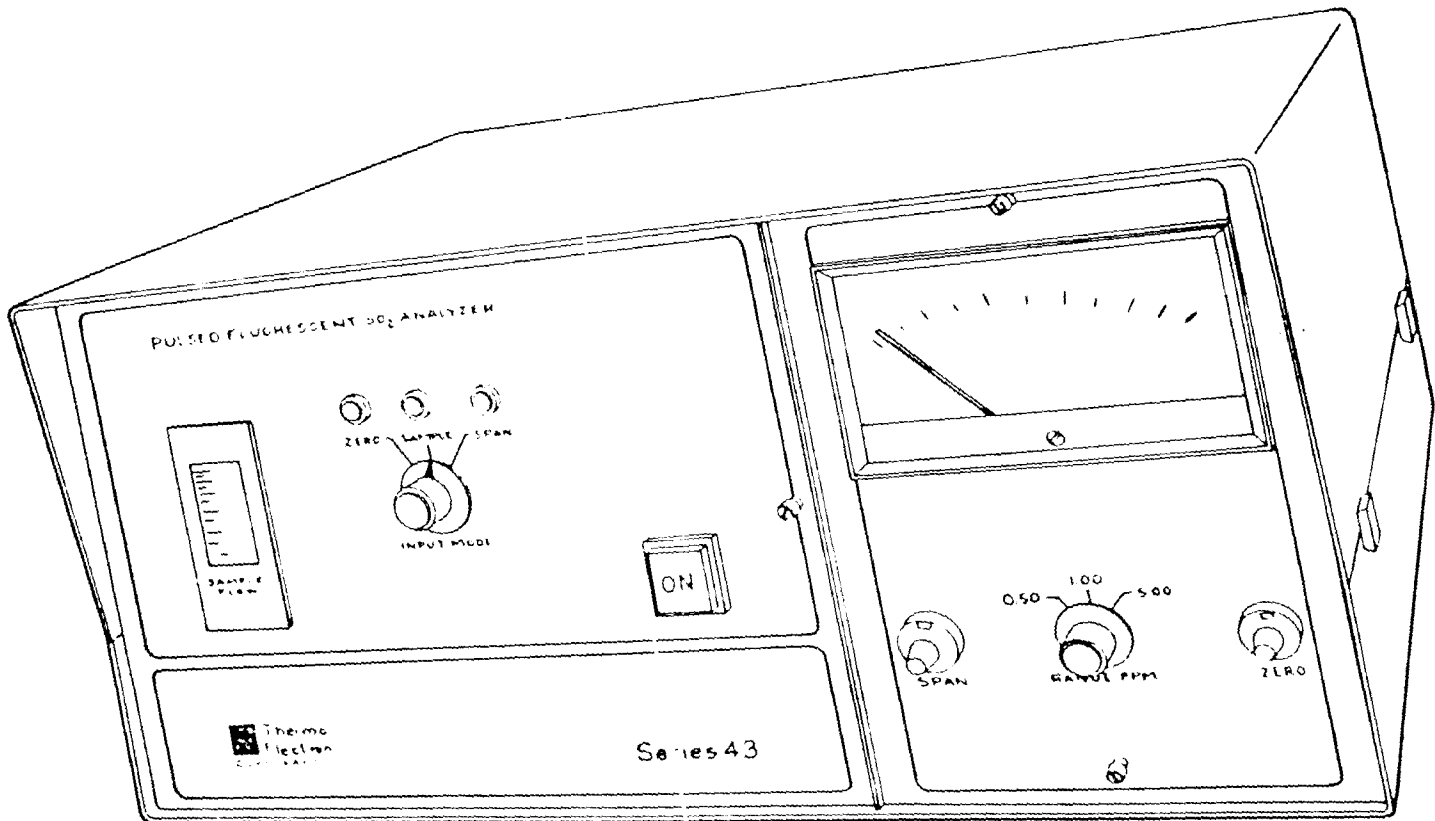
CAPÍTULO 6

Figura 6.3 - 'TRAJECTO DA AMOSTRA NO ANALISADOR



CAPÍTULO 6

Figura 6.4 - ANALISADOR DE SO₂



CAPÍTULO 6

6.2.2 Calibradores e Tubos de Permeação

Os calibradores estão essencialmente preparados para produzir ar isento de contaminações do poluente, e são dotados dum banho termostático de alta precisão que permite a correcta operação dos tubos de permeação.

Embora os mecanismos de permeação ainda não sejam hoje totalmente explicados, sabe-se no entanto que a taxa de permeação dum gás contido num tubo cilíndrico poroso, é proporcional à área do tubo de permeação e inversamente proporcional à espessura da sua parede e, por fim, inversamente proporcional ao diferencial da pressão de vapor entre as paredes interna e externa do tubo. Esta pressão, é função da temperatura do tubo de permeação variando, por conseguinte, a taxa de permeação com a temperatura (113, 114). A utilidade dos tubos de permeação reside, obviamente, na preparação dum gás com uma concentração rigorosamente conhecida em ordem a calibrar os instrumentos.

Para se poder converter a taxa de permeação de nanogramas por minuto para p.p.m., é necessário conhecer o caudal total de gás com o qual o SO_2 está a ser diluído após permeação. Este caudal tem de ser conhecido com rigor idêntico ao que é exigido na concentração a preparar. A temperatura T, a que se mede o gás, é também fundamental.

Assim, a constante de conversão é:

$$K(\text{nl/ng}) = \frac{22,40}{\text{MW}} \times \frac{273 + T}{273} \times \frac{760}{P} \quad (6.4)$$

em que MW: peso moléculas do gás
 T : temperatura em °C
 P : pressão absoluta em mmHg

CAPÍTULO 6

Se houver condições-padrão, $T = 25^{\circ}\text{C}$ e $P = 760\text{mm Hg}$,

$$K_o = \frac{24,45}{MW}$$

A concentração em ppm (vol/vol) será

$$C = \frac{R \times K_o}{Q_o} \quad (6.5)$$

em que R = taxa de permeação ng/min

K_o = constante para o gás em estudo ($\frac{24,45}{64}$ para SO_2)

Q_o = caudal total em ml/min em condições padrão,

sendo medido no rotâmetro do calibrador.

Se admitirmos que o período de tempo gasto na passagem do fluxo de gás pelo tubo de permeação, a temperatura constante, é suficientemente longo para originar uma perda de peso, podemos escrever

$$R = \frac{\text{Peso inicial} - \text{Peso final}}{\text{tempo}}$$

Assim, se o tubo de permeação foi adquirido como tendo uma taxa de permeação R_2 verificada para uma temperatura T_2 , é possível calcular uma taxa aproximada a outra temperatura, utilizando a expressão:

$$\log R_1 = \log R_2 - 2950 \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \quad (6.6)$$

CAPÍTULO 6

em que R_1 = taxa de permeação (ng/min) a uma temperatura T_1 ($^{\circ}$ K)

R_2 = taxa de permeação (ng/min) a uma temperatura T_2 ($^{\circ}$ C)

Esta equação não é exacta prevendo com precisão de 5% numa pequena zona de 10° C em relação à temperatura T_2 .

A equação mostra que só uma variação de 10° causa um aumento da taxa de permeação para o dobro; isto significa que, para termos uma taxa de permeação com erro máximo de 1% dum dado valor, teremos de controlar a temperatura na gama de $0,1^{\circ}$ C em torno da temperatura para a qual a taxa de permeação foi calculada.

O rigor do controlo de temperatura constitui pois, um índice significativo da qualidade do calibrador.

O modelo 143 tem uma precisão de 35° C \pm $0,1^{\circ}$ C, com caudal entre 2ℓ/min e 12ℓ/min (114).

CAPÍTULO 6

6.3 Programa de "Monitoring"

Os instrumentos de medição da concentração de dióxido de enxofre vêm operando em contínuo, 24 horas por dia, 365 dias por ano - salvo em períodos de avarias - durante, pelo menos, os últimos 4 anos.

O ajustamento a zero é rigorosamente feito com ar puro em dias alternados; o ajustamento do "span" executa-se para uma concentração de 0,45 ppm também em dias alternados pelo menos.

Calibrações completas são feitas, pelo menos, uma vez por mês.

O autor deslocou-se a Sines, amiudadas vezes, durante os últimos anos, analisando o funcionamento, verificando ajustamentos, calibrações e modo de operação, efectuando medições e cálculo de concentrações a partir dos registos, sempre com o excelente apoio e cooperação de responsáveis e operadores da rede do G.A.S., com quem debatemos questões científicas, e com a autorização do seu Conselho de Gestão.

Os dados meteorológicos relativos a direcção e velocidade do vento, durante os anos de 1978, 1979, 1980, 1981 e 1982 foram sistematicamente registados e as respectivas frequências parcialmente calculadas por direcção e velocidade de vento (125).

Os quilómetros de registos dos 3 medidores foram analisados tendo sido calculada a média horária nas 24 horas nas três estações e durante os 4 anos de 1979 - 1980 - 1981 - 1982, perfazendo um total aproximado de 105.120 valores (3 estações x 4 anos x 365 dias/ano x 24 horas/dia).

CAPÍTULO 6

Na realização de tão gigantesco trabalho, deve salientar-se toda a equipa que conduz a rede de controlo e também o Centro de Informática do GAS.

Com base nesses dados, calcularam-se médias diárias a partir das quais o autor pôde finalmente construir médias trimestrais e anuais para as três estações e para os quatro anos. Da mesma forma partindo dos cerca de 25 000 dados meteorológicos recolhidos pelo pessoal do GAS o signatário produziu os cerca de 2 800 valores - para as funções de frequência dum novo programa, para as quatro estações do ano, adaptado à meteorologia de Sines - STARCAN.

Na completa impossibilidade de inserir todos os dados observados, recolhidos e analisados (2 folhas/mês x 12 meses x 4 anos x 3 estações = 288 folhas) apresentam-se, seguidamente, apenas alguns exemplos dessas 288 folhas de dados e, em particular, os resultados finais, já tratados estatisticamente, e sumarizados em médias de concentrações mensais, trimestrais e anuais de SO_2 , para as várias estações e para os vários anos.

A consulta completa dos cerca de 105 000 valores de concentrações de dióxido de enxofre (e outros) poderá ser feita no GAS, que aliás tenciona publicar tais dados. Da mesma forma, o autor publicou, através do GAS a sua análise da meteorologia de Sines e componentes das funções de frequência do programa que desenvolveu - STARCAN (126).

Para se avaliar a dimensão do esforço de investigação envolvido poderá indicar-se que o custo actual das estações

CAPÍTULO 6

de medida do GAS incluindo edifício e aparelhos de medição de SO_2 e variáveis meteorológicas, deve rondar os 30 000 contos. O pessoal adstrito à rede - um engenheiro, 8 Técnicos e 4 Auxiliares técnicos - envolve um custo anual de cerca de 4 000 contos.

Os custos de manutenção e operação orçam os 300 contos/
/ano.

CAPÍTULO 6

6.4 Resultados das Medições de Concentrações e Parâmetros Meteorológicos

Os Quadros 6.I a 6.X constituem apenas exemplos das 288 folhas de dados observados durante 4 anos em três estações de medida das concentrações de dióxido de enxofre ($\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$).

Os quadros seguintes apresentam as médias aritméticas mensais (Quadros 6.XI a 6.XIV) trimestrais (Quadro 6.XV) e anuais (Quadro 6.XVI) das concentrações observadas de 1979 a 1982 na Área de Sines e calculados pelo autor, com base nos cerca de 105.000 dados referidos.

A figura 6.5 expressa graficamente os valores aproximados das concentrações trimestrais observadas nas três estações ao longo dos 4 anos.

QUADRO 6-I (Cont.)

SONEGA - AGOSTO 1979

HORA

DIA	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14
22	108,11	4,76	4,76	4,76	4,76	,00	,00	19,56	48,90	,00	4,76	4,76	4,76	,00	4,76
23	,00	,00	9,78	19,56	19,56	4,76	,00	19,56	19,56	19,56	19,56	19,56	9,78	9,78	48,90
24	9,78	9,78	19,56	48,90	19,56	19,56	,00	19,82	19,56	9,78	,00	,00	,00	,00	9,78
25	4,76	4,76	,00	4,76	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	4,76	4,76
26	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
27	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
28	6,87	6,87	6,87	6,87	13,74	6,87	6,87	10,31	10,31	10,31	13,74	6,87	,00	6,87	6,87
29	,00	,00	,00	6,87	,00	6,87	13,74	13,74	10,31	10,31	10,31	6,87	20,62	,00	20,62
30	10,31	6,87	,00	,00	6,87	6,87	,00	,00	,00	,00	13,74	20,62	,00	27,49	61,85
31	,00	,00	,00	,00	,00	,00	10,31	24,05	17,18	10,31	17,18	20,62	30,93	41,23	89,34

QUADRO 6-II
SONEGA - AGOSTO 1979

HORA

DIA	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	9,78	4,76	4,76	196,39	383,26	274,89	68,72	4,76	4,76
2	137,45	157,27	176,83	117,89	216,21	165,73	,00	,00	,00
3	157,27	255,33	196,39	282,82	383,26	303,97	,00	,00	,00
4	260,09	117,89	4,76	9,78	422,91	346,26	9,78	,00	,00
5	48,90	157,27	438,77	407,05	108,11	,00	,00	,00	,00
6	48,90	19,56	255,33	658,16	880,19	816,75	,00	,00	,00
7	9,78	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	196,39
8	,00	,00	356,83	274,89	108,11	9,78	,00	,00	,00
9	,00	4,76	,00	,00	,00	,00	,00	19,56	9,78
10	68,72	117,89	346,26	4,76	,00	,00	,00	,00	9,78
11	4,76	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
12	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
13	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
14	108,11	68,72	9,78	9,78	,00	,00	,00	,00	,00
15	,00	,00	4,76	,00	4,76	4,76	,00	,00	9,78
16	,00	,00	,00	4,76	,00	,00	,00	4,76	9,78
17	9,78	4,76	,00	,00	,00	,00	,00	4,76	4,76
18	4,76	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
19	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	4,76	,00
20	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	9,78	48,90
21	,00	,00	,00	,00	4,76	4,76	,00	282,82	343,62

QUADRO 6-II (Cont.)

SONEGA - AGOSTO 1979

HORA

DIA	15	16	17	18	19	20	21	22	23
22	,00	,00	4,76	,00	,00	,00	,00	,00	,00
23	19,56	117,89	108,11	,00	,00	,00	,00	,00	9,78
24	9,78	9,78	9,78	4,76	,00	,00	,00	9,78	9,78
25	4,76	*	*	*	*	*	*	*	*
26	*	*	*	*	*	*	*	*	*
27	*	*	,00	13,74	6,87	6,87	,00	6,87	,00
28	,00	6,87	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
29	17,18	20,88	20,62	20,62	24,05	,00	6,87	10,31	17,18
30	116,83	41,23	27,49	24,05	,00	,00	,00	,00	,00
31	54,98	48,11	123,70	109,96	10,31	10,31	,00	,00	6,87

QUADRO 6-III

MONTE VELHO - JULHO 80

HORA

DIA	0	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15
1																
2	6,87	6,87	6,87	6,87	6,87	6,87	,00	,00	6,87	27,49	34,36	34,36	27,49	27,49	13,74	
3	4,12	4,12	6,87	6,87	6,87	6,87	6,87	6,87	6,87	20,62	16,49	17,87	13,74	6,87	6,87	13,74
4	11,00	11,00	8,25	11,00	11,00	13,74	13,74	12,37	20,62	27,49	27,49	13,74	13,74	12,37	13,74	13,74
5	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74
6	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74	16,49
7	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74
8	16,49	16,49	16,49	16,49	16,49	20,62	26,11	27,49	34,36	20,62	17,87	16,49	16,49	16,49	16,49	16,49
9	,00	,00	,00	,00	,00	6,87	6,87	6,87	8,25	11,00	48,11	41,23	27,49	6,87	6,87	6,87
10	20,62	13,74	5,50	,00	,00	,00	,00	,00	,00	6,87	6,87	6,87	6,87	6,87	13,74	6,87
11	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74	12,37	8,25	11,00	11,00	12,37	6,87	6,87	*	*	61,85	6,87
12	6,87	6,87	6,87	6,87	6,87	4,12	,00	,00	,00	,00	6,87	6,87	13,74	13,74	6,87	6,87
13	6,87	6,87	6,87	4,12	5,50	5,50	4,12	,00	,00	,00	13,74	12,37	6,87	13,74	20,62	20,62
14	6,87	6,87	6,87	6,87	6,87	6,87	6,87	6,87	6,87	6,87	6,87	13,74	54,98	82,47	41,23	13,74
15	12,37	13,74	13,74	13,74	6,87	6,87	6,87	6,87	6,87	27,49	41,23	34,36	20,62	13,74	6,87	13,74
16	6,87	6,87	6,87	6,87	6,87	6,87	6,87	6,87	6,87	6,87	6,87	*	,00	,00	,00	,00
17	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	13,74	,00	26,11	17,87
18	,00	,00	,00	,00	20,62	6,87	6,87	6,87	6,87	6,87	27,49	20,62	16,49	20,62	13,74	16,49
19	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	6,87	6,87	13,74	13,74	6,87	6,87	13,74
20	6,87	16,49	13,74	13,74	13,74	,00	,00	,00	,00	,00	13,74	16,49	13,74	6,87	6,87	,00
21	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	27,49	13,74	4,12

QUADRO 6-III (Cont.)

MONTE VELHO - JULHO 80

HORA

DIA	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	12	14	15
22	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	13,74	11,00	13,74	13,74	13,74	13,74
23	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	41,23	61,85	151,19	48,11	41,23	13,74	6,87
24	,00	,00	,00	,00	,00	,00	13,74	6,87	4,12	4,12	13,74	13,74	6,87	6,87	6,87	6,87
25	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	6,87	6,87	6,87	6,87	6,87	6,87	4,12
26	,00	,00	,00	,00	,00	,00	5,50	6,87	5,50	13,74	13,74	13,74	6,87	6,87	,00	,00
27	6,87	4,12	6,87	4,12	,00	,00	,00	,00	,00	13,74	20,62	13,74	6,87	6,87	6,87	,00
28	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	13,74	6,87	,00	,00	,00	,00	,00
29	6,87	6,87	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
30	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
31	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00

QUADRO 6-IV

MONTE VELHO - JULHO 80

HORA

DIA	16	17	18	19	20	21	22	23
1	*	*	,00	,00	,00	,00	6,87	6,87
2	,00	12,37	6,87	6,87	6,87	6,87	6,87	6,87
3	8,25	11,00	11,00	9,62	6,87	6,87	6,87	6,87
4	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74
5	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74
6	16,49	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74	13,74	20,62
7	13,74	20,62	20,62	20,62	17,87	17,87	16,49	13,74
8	16,49	17,87	17,87	,00	,00	,00	,00	,00
9	*	6,87	6,87	6,87	6,87	6,87	6,87	13,74
10	6,87	6,87	6,87	12,37	13,74	11,00	61,85	27,49
11	6,87	6,87	6,87	6,87	6,87	13,74	34,36	6,87
12	6,87	6,87	6,87	6,87	13,74	20,62	41,23	26,11
13	34,36	13,74	13,74	6,87	6,87	6,87	6,87	6,87
14	6,87	6,87	6,87	6,87	6,87	6,87	6,87	6,87
15	12,37	6,87	6,87	6,87	6,87	6,87	6,87	6,87
16	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
17	13,74	6,87	6,87	6,87	6,87	,00	,00	,00
18	16,49	27,49	27,49	13,74	6,87	,00	,00	,00
19	20,62	,00	6,87	,00	,00	,00	,00	,00
20	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	13,74
21	,00	,00	,00	,00	12,37	,00	,00	,00

QUADRO 6-IV (Cont.)

MONTE VELHO - JULHO 80

HORA

DIA	16	17	18	19	20	21	22	23
22	*	6,87	6,87	6,87	6,87	6,87	5,50	,00
23	6,87	6,87	6,87	4,12	5,50	,00	,00	6,87
24	,00	,00	4,12	6,87	6,87	6,87	6,87	6,87
25	5,5	6,87	5,50	,00	,00	,00	,00	,00
26	,00	,00	6,87	6,87	4,12	4,12	,00	6,87
27	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
28	,00	,00	,00	,00	,00	6,87	6,87	6,87
29	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
30	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
31	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00

QUADRO 6-V

MONTE CHÃOS - JANEIRO 1981

HORA

DIA	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15
1	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	7,20	14,40	21,60	50,40	151,19	14,40	14,40	7,20
2	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	7,20	,00	,00	21,60	143,99	165,59	,00	,00	,00
3	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	*	*	*	*	14,40	,00	,00	14,40
4	7,20	28,80	21,60	7,20	7,20	7,20	7,20	,00	14,40	28,80	*	*	*	*	*	*
5	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	28,80	*	*	50,40	64,80	7,20
6	,00	,00	,00	,00	,00	93,59	57,60	50,40	50,40	43,20	107,99	36,00	,00	*	*	*
7	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	7,20	7,20	4,32	,00	,00
8	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	7,20	21,60	50,40	50,40	28,80
9	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	4,32	7,20	10,08	*	*	*	*	*	7,20
10	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	18,72	43,20	36,00	14,40	,00	,00	,00
11	5,76	,00	,00	7,20	28,80	4,32	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	5,76	28,80	15,84
12	4,32	,00	,00	,00	,00	,00	,00	7,20	7,20	7,20	28,80	*	,00	21,60	21,60	21,60
13	50,40	50,40	28,80	15,84	7,20	,00	4,32	7,20	4,32	,00	7,20	21,60	12,96	7,20	7,20	7,20
14	,00	,00	,00	,00	7,20	7,20	7,20	7,20	15,84	12,96	21,60	21,60	21,60	,00	,00	21,60
15	,00	4,32	7,20	7,20	7,20	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
16	*	*	*	*	*	*	*	*	*	,00	,00	*	*	14,40	,00	*
17	*	*	*	*	*	*	*	*	*	,00	,00	7,20	,00	,00	,00	,00
18	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	,00	,00	,00
19	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	*	,00	,00	,00	,00	,00	5,76	5,76
20	,00	,00	,00	,00	*	*	*	*	*	*	25,92	21,60	7,20	7,20	7,20	7,20

QUADRO 6-V (Cont.)

MONTE CHÃOS - JANEIRO 1981

HORA

DIA	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15
21	14,40	11,52	8,64	7,20	7,20	7,20	7,20	10,08	11,52	14,40	14,40	14,40	11,52	14,40	28,80	28,80
22	14,40	14,40	14,40	10,08	7,20	7,20	7,20	7,20	*	7,20	7,20	7,20	79,19	28,80	7,20	7,20
23	4,32	7,20	7,20	4,32	,00	4,32	,00	4,32	7,20	*	*	7,20	10,08	11,52	14,40	,00
24	,00	4,32	,00	,00	,00	,00	,00	,00	14,40	28,80	14,40	7,20	64,8	11,52	7,20	7,20
25	4,32	4,32	5,76	7,20	7,20	7,20	7,20	7,20	7,20	7,20	8,64	7,20	21,60	100,79	115,19	115,19
26	4,32	5,76	5,76	4,32	4,32	5,76	4,32	4,32	5,76	7,20	*	*	7,20	4,32	4,32	,00
27	7,20	7,20	4,32	,00	,00	4,32	4,32	4,32	7,20	8,64	18,72	21,60	14,40	12,96	14,40	28,80
28	151,19	64,80	7,20	4,32	5,76	7,20	7,20	7,20	18,72	7,20	7,20	4,32	,00	,00	,00	,00
29	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	5,76	5,76	*	*	*	*
30	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	*	*	*	4,32	,00	,00	11,52
31	,00	5,76	5,76	4,32	,00	,00	,00	,00	,00	,00	7,20	4,32	,00	,00	7,20	11,52

QUADRO 6 -VI
MONTE CHÃOS - JANEIRO 1981

HORA

DIA	16	17	18	19	20	21	22	23
1	4,32	,00	,00	,00	7,20	7,20	4,32	7,20
2	,00	7,20	7,20	,00	,00	,00	,00	,00
3	47,2	28,80	21,60	14,40	12,96	7,20	21,60	21,60
4	*	*	*	*	*	*	*	*
5	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
6	*	*	,00	,00	,00	,00	,00	,00
7	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
8	4,32	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
9	7,20	4,32	,00	,00	,00	,00	,00	,00
10	7,20	7,20	,00	,00	,00	,00	,00	,00
11	8,64	7,20	5,76	14,40	,00	,00	,00	28,80
12	21,60	21,60	14,40	21,60	14,40	7,20	28,80	57,60
13	7,20	7,20	4,32	12,96	17,28	,00	,00	,00
14	21,60	14,40	7,20	,00	7,20	7,20	7,20	7,20
15	,00	,00	*	*	*	*	*	*
16	,00	,00	,00	,00	*	*	*	*
17	,00	,00	,00	,00	21,60	14,40	21,60	*
18	,00	,00	,00	,00	7,20	7,20	,00	,00
19	4,32	8,64	7,20	7,20	14,40	23,04	14,40	12,96
20	11,52	15,84	11,52	7,20	7,20	21,60	30,24	28,80

QUADRO 6-VI (Cont.)
MONTE CHÃOS - JANEIRO 1981

HORA

DIA	16	17	18	19	20	21	22	23
21	33,12	27,36	21,60	21,60	21,60	18,72	14,40	14,40
22	5,76	12,96	7,20	17,28	14,40	4,32	4,32	,00
23	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
24	21,60	21,60	14,40	11,52	11,52	7,20	7,20	7,20
25	4,32	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
26	,00	43,20	14,40	7,20	4,32	,00	,00	,00
27	7,20	7,20	11,52	11,52	8,64	14,40	50,40	158,39
28	,00	4,32	*	*	*	*	*	*
29	4,32	4,32	,00	,00	,00	,00	,00	,00
30	5,76	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
31	7,20	,00	,00	5,76	11,52	10,08	12,96	11,52

QUADRO 6-VII
SONEGA JULHO 1981

HORA

Dia	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15
1	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	4,08	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	4,0
2	19,06	13,61	4,08	,00	,00	4,08	,00	,00	4,08	28,59	25,87	28,59	54,45	54,45	16,34	*
3	6,81	5,45	8,17	4,08	4,08	4,08	5,45	10,89	29,95	19,06	21,78	31,31	47,65	38,12	38,12	27,2
4	8,17	20,42	36,76	17,70	21,78	34,03	10,89	6,81	5,45	5,45	6,81	40,84	50,37	40,84	35,40	36,7
5	14,98	16,34	13,61	8,17	6,81	5,45	4,08	5,45	5,45	5,45	8,17	16,34	28,59	27,23	25,87	32,6
6	20,42	10,89	5,45	4,08	4,08	4,08	5,45	4,08	5,45	5,45	4,08	13,61	23,14	32,67	35,40	32,6
7	28,59	25,87	23,14	24,50	19,06	17,70	20,42	31,31	63,98	74,87	51,73	28,59	54,45	55,82	44,92	29,9
8	27,23	38,12	44,92	38,12	27,23	17,70	19,06	19,06	29,95	23,14	19,06	40,84	27,23	34,03	34,03	31,3
9	5,45	4,06	,00	10,89	,00	,00	,00	4,08	8,17	14,98	16,34	14,98	10,89	24,50	34,03	*
10	54,45	53,09	40,84	36,76	23,14	34,03	29,95	20,42	10,89	5,45	5,45	6,81	10,89	14,98	16,34	16,3
11	9,53	9,53	9,53	10,89	12,25	12,25	10,89	10,89	10,89	10,89	4,08	4,08	4,08	9,53	21,78	19,0
12	13,61	12,25	12,25	10,89	10,89	10,89	10,89	9,53	6,81	5,45	4,08	4,08	5,45	61,26	54,45	21,7
13	6,81	40,84	6,81	6,81	6,81	35,40	10,89	9,53	9,53	9,53	9,53	10,89	13,61	14,98	13,61	10,8
14	10,89	16,34	10,89	17,70	20,42	10,89	5,45	10,89	12,25	12,25	21,78	12,25	10,89	12,25	23,14	27,2
15	17,70	68,07	20,42	16,34	9,53	6,81	8,17	8,17	6,81	8,17	8,17	6,81	6,81	6,81	249,13	136,1
16	4,08	5,45	10,89	6,81	6,81	6,81	5,45	6,81	8,17	4,08	6,81	34,03	14,98	77,60	24,50	10,8
17	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	235,51	78,96	72,15	47,6
18	84,40	51,73	36,76	14,98	34,03	73,51	47,65	24,50	17,70	8,17	4,08	,00	,00	6,81	23,14	127,9
19	5,45	4,08	,00	,00	16,34	25,87	23,14	16,34	12,25	4,08	,00	,00	,00	,00	,00	,0
20	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	10,89	6,8

QUADRO 6-VII (Cont.)
SONEGA - JULHO 1981

HORA

Dia	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15
21	72,15	117,08	31,31	31,31	,00	,00	4,08	4,08	,00	,00	,00	,00	4,08	4,08	4,08	,0
22	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	9,53	54,45	104,82	133,41	57,18	43,56	40,84	24,50	*
23	10,89	10,89	17,70	20,42	6,81	133,41	112,99	32,67	29,95	23,14	24,50	27,23	17,70	17,70	47,65	13,6
24	85,77	29,95	8,17	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	12,25	13,61	100,7
25	10,89	4,08	,00	,00	,00	4,08	4,08	4,08	4,08	,00	,00	,00	,00	4,08	19,06	13,6
26	16,34	12,25	10,89	10,89	10,89	9,53	8,17	9,53	5,45	4,08	4,08	4,08	29,95	227,35	211,01	174,2
27	74,87	44,92	20,42	4,08	4,08	4,08	,00	,00	4,08	6,81	4,08	4,08	,00	,00	,00	4,0
28	54,45	13,61	9,53	36,76	34,03	17,70	16,34	17,70	8,17	4,08	*	*	*	*	*	*
29	38,12	47,65	54,45	,00	16,34	10,89	6,81	4,08	6,81	20,42	47,65	65,35	59,90	27,23	14,98	14,9
30	31,31	16,34	12,25	14,98	14,98	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	*
31	6,81	13,61	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,0

QUADRO 6-VIII
SONEGA - JULHO 1981

HORA

Dia	16	17	18	19	20	21	22	23
1	,00	6,81	17,70	24,50	31,31	24,50	21,78	21,78
2	6,81	123,88	10,89	23,14	12,25	6,81	6,81	13,61
3	57,18	61,70	108,19	16,34	6,81	5,45	6,81	6,81
4	47,65	78,96	27,23	12,25	5,45	6,81	10,89	12,25
5	62,62	44,92	9,53	9,53	9,53	16,34	40,84	39,48
6	*	*	6,81	9,53	10,89	12,25	13,61	28,59
7	23,14	12,25	9,53	68,07	13,61	4,08	4,08	13,61
8	50,37	40,84	57,18	65,35	36,76	10,89	,00	,00
9	*	31,31	40,84	29,95	10,89	5,45	6,81	47,65
10	16,34	17,70	16,34	16,34	27,23	35,40	27,23	14,98
11	23,14	23,14	14,98	17,70	17,70	36,76	27,23	14,98
12	20,42	57,18	34,03	16,34	14,98	29,95	12,25	6,81
13	20,42	68,07	76,24	31,31	17,70	9,53	10,89	10,89
14	13,61	17,70	23,14	27,23	25,87	27,23	23,14	20,42
15	13,61	9,53	9,53	8,17	4,08	,00	,00	4,08
16	*	*	*	*	*	*	*	*
17	54,45	54,45	337,62	78,96	43,56	29,95	40,84	81,68
18	54,45	20,42	24,50	23,14	29,95	40,84	27,23	12,25
19	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
20	10,89	10,89	29,95	6,81	5,45	74,87	176,98	163,36

QUADRO 6-VIII (Cont.)
 SONEGA - JULHO 1981

HORA

Dia	16	17	18	19	20	21	22	23
21	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
22	*	167,45	166,09	13,61	58,54	9,53	9,53	4,08
23	44,92	68,07	9,53	8,17	6,81	6,81	14,98	47,65
24	43,56	68,07	70,79	24,50	24,50	29,95	28,59	21,78
25	16,34	12,25	14,98	8,17	24,50	23,14	16,34	14,98
26	17,70	54,45	23,14	29,95	13,61	13,61	27,23	40,84
27	24,50	20,42	13,61	14,98	13,61	4,08	81,68	108,91
28	13,61	10,89	12,25	9,53	10,89	108,91	62,62	40,84
29	8,17	17,70	73,51	17,70	20,42	34,03	6,81	51,73
30	4,08	4,08	,00	4,08	4,08	4,08	4,08	5,45
31	,00	4,08	4,08	,00	,00	,00	,00	4,08

QUADRO 6-IX
SONEGA-FEVEREIRO -- 1982

HORA

Dia	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15
1	,00	13,61	21,78	24,50	23,14	23,14	35,40	14,98	10,89	8,17	,00	,00	5,45	27,23	17,70	*
2	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	4,08	4,08	,00	,00	,00	,00	,00
3	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
4	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	*	,00	,00	,00	,00
5	,00	,00	,00	,00	4,08	,00	4,08	4,08	4,08	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
6	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
7	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
8	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
9	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	*	,00
10	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	5,45	4,08	,00	,00
11	,00	,00	,00	4,08	,00	,00	,00	,00	,00	,00	*	*	*	*	*	6,81
12	8,17	6,81	6,81	6,81	6,81	6,81	5,45	4,08	4,08	4,08	4,08	4,08	10,89	12,25	10,89	9,53
13	6,81	6,81	6,81	6,81	6,81	4,08	4,08	,00	,00	,00	16,34	47,65	16,34	34,03	34,03	16,34
14	10,89	5,45	5,45	4,08	5,45	5,45	5,45	4,08	4,08	4,08	4,08	13,61	8,17	6,81	5,45	4,08
15	,00	,00	,00	,00	,00	8,17	4,08	,00	,00	,00	,00	9,53	,00	5,45	,00	8,17
16	6,81	8,17	5,45	6,81	6,81	6,81	6,81	6,81	6,81	8,17	24,50	47,65	12,25	14,98	21,78	58,54
17	20,42	58,54	61,26	72,15	54,45	27,23	14,98	13,61	12,25	12,25	10,89	,00	,00	4,08	4,08	4,08
18	4,08	4,08	4,08	,00	,00	4,08	4,08	6,81	13,61	10,89	*	,00	,00	,00	,00	,00
19	5,45	8,17	6,81	5,45	4,08	4,08	,00	,00	4,08	4,08	,00	,00	24,50	61,26	47,65	54,45
20	35,40	59,90	58,54	54,45	40,84	38,12	81,68	61,26	47,65	17,70	9,53	8,17	12,25	27,23	43,56	12,25
21	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
22	,00	,00	,00	,00	4,08	,00	6,81	9,53	8,17	6,81	4,08	5,45	6,81	,00	24,50	14,98

QUADRO 6-IX (Cont.)
SONEGA - FEVEREIRO 1982

HORA

Dia	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15
23	,00	,00	4,08	,00	,00	,00	,00	,00	12,25	12,25	,00	8,17	23,14	,00	14,98	6,81
24	6,81	13,61	20,42	13,61	17,70	28,59	17,70	58,54	66,71	49,01	29,95	21,78	6,81	16,34	20,42	,00
25	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	16,34	19,06	20,42	19,06
26	8,17	4,08	13,61	8,17	10,89	4,08	,00	4,08	,00	,00	,00	,00	,00	8,17	17,70	17,70
27	17,70	13,61	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	23,14	20,42	,00
28	,00	10,89	16,34	5,45	,00	5,45	6,81	5,45	5,45	8,17	9,53	,00	,00	13,61	13,61	16,34

QUADRO 6-X

SONEGA - FEVEREIRO 1982

HORA

Dia	16	17	18	19	20	21	22	23
1	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
2	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
3	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
4	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
5	,00	,00	,00	4,08	4,08	,00	,00	,00
6	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
7	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
8	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
9	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
10	,00	,00	4,08	4,08	4,08	4,08	,00	4,08
11	8,17	6,81	6,81	6,81	6,81	6,81	8,17	8,17
12	9,53	9,53	5,45	5,45	9,53	9,53	9,53	8,17
13	34,03	6,81	12,25	20,42	8,17	6,81	14,98	24,50
14	13,61	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
15	*	*	,00	,00	,00	4,08	4,08	5,45
16	23,14	16,34	12,25	10,89	9,53	12,25	13,61	13,61
17	4,08	4,08	4,08	5,45	5,45	5,45	4,08	4,08
18	4,08	,00	,00	,00	,00	,00	4,08	5,45
19	68,07	24,50	8,17	,00	,00	13,61	6,81	8,17
20	8,17	5,45	,00	,00	,00	,00	,00	6,81

QUADRO 6-X (Cont.)
 SONEGA - FEVEREIRO 1982

HORA

Dia	16	17	18	19	20	21	22	23
21	,00	,00	,00	13,61	6,81	13,61	,00	,00
22	14,98	13,61	12,25	,00	,00	,00	,00	,00
23	,00	4,08	,00	,00	,00	6,81	14,98	12,25
24	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
25	,00	16,34	13,61	8,17	,00	,00	8,17	12,25
26	17,70	17,70	17,70	20,42	4,08	10,89	16,34	9,53
27	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00	,00
28	,00	,00	,00	,00	,00	,00	5,45	20,42

QUADRO 6.XI

CONCENTRAÇÕES MÉDIAS MENSAIS - 1979 - ÁREA DE SINES

(SO₂ - µg/m³ N)

1979	MONTE VELHO	MONTE CHÃOS	SONEGA
JANEIRO	-	1,12	2,47
FEVEREIRO	-	2,19	-
MARÇO	-	2,47	11,02
ABRIL	-	1,91	24,07
MAIO	-	10,26	25,73
JUNHO	-	9,52	20,02
JULHO	-	12,73	27,18
AGOSTO	-	4,54	41,52
SETEMBRO	-	* (n.c)	9,68
OUTUBRO	-	* (n.c)	18,02
NOVEMBRO	-	* (n.c)	12,19
DEZEMBRO	-	2,33	11,59

n.c. = valores não considerados devido a anomalias nas medições

QUADRO 6.XII

CONCENTRAÇÕES MÉDIAS MENSAIS - 1980 - ÁREA DE SINES

(SO₂ - µg/m³ N)

1980	MONTE VELHO	MONTE CHAOS	SONEGA
JANEIRO	-	9,22	7,50
FEVEREIRO	-	5,20	13,94
MARÇO	5,53	2,63	14,26
ABRIL	3,33	1,31	13,77
MAIO	4,77	6,03	17,56
JUNHO	6,53	3,34	34,82
JULHO	8,04	9,45	-
AGOSTO	-	7,04	21,13
SETEMBRO	-	14,47	15,51
OUTUBRO	3,11	6,90	9,02
NOVEMBRO	2,15	5,53	5,58
DEZEMBRO	-	9,68	5,07

QUADRO 6.XIII

CONCENTRAÇÕES MÉDIAS MENSAIS - 1981 - ÁREA DE SINES

(SO₂ - µg/m³ N)

1981	MONTE VELHO	MONTE CHÃOS	SONEGA
JANEIRO	4,12	9,31	10,85
FEVEREIRO	5,14	10,94	8,47
MARÇO	2,61	4,14	2,82
ABRIL	2,86	8,26	5,56
MAIO	2,71	6,57	8,57
JUNHO	4,78	7,65	7,29
JULHO	10,83	14,08	21,63
AGOSTO	6,20	6,54	9,12
SETEMBRO	5,61	7,90	12,82
OUTUBRO	7,07	14,52	7,35
NOVEMBRO	3,26	5,22	5,09
DEZEMBRO	4,25	6,09	4,77

QUADRO 6.XIV

CONCENTRAÇÕES MÉDIAS MENSAIS - 1982 - ÁREA DE SINES

(SO₂ - μg/m³ N)

1982	MONTE VELHO	MONTE CHÃOS	SONEGA
JANEIRO	7,94	3,44	4,82
FEVEREIRO	3,30	2,98	6,18
MARÇO	3,57	11,76	6,84
ABRIL	7,19	7,03	7,00
MAIO	7,70	12,33	15,76
JUNHO	* (n.c)	9,02	15,11
JULHO	* (n.c)	10,13	17,97
AGOSTO	* (n.c)	12,61	18,87
SETEMBRO	-	6,66 (1)	7,67
OUTUBRO	4,03	* (n.c.)	* (n.c)
NOVEMBRO	6,45	6,53	7,98
DEZEMBRO	-	-	-

n.c. = valores não considerados devido a anomalias nas medições

(1) eliminadas algumas medições devido a anomalias

CAPÍTULO 6

QUADRO 6.XV

CONCENTRAÇÕES MÉDIAS TRIMESTRAIS DE SO₂
OBSERVADAS NA ÁREA DE SINES DE 1979 A
1982 (µg/m³N)

	1979	1980	1981	1982
Estação de Monte Velho				
Inverno	-	-	5	5
Primavera	-	5	3	6
Verão	-	7	7	-
Outono	-	3	5	5
Estação de Monte Chãos				:
Inverno	2	6	10	4
Primavera	5	3	6	10
Verão	9	7	9	11
Outono	-	9	9	7
Estação da Sonega				
Inverno	2	11	8	5
Primavera	20	15	6	10
Verão	30	28	13	17
Outono	13	10	8	8

CAPÍTULO 6

QUADRO 6.XVI

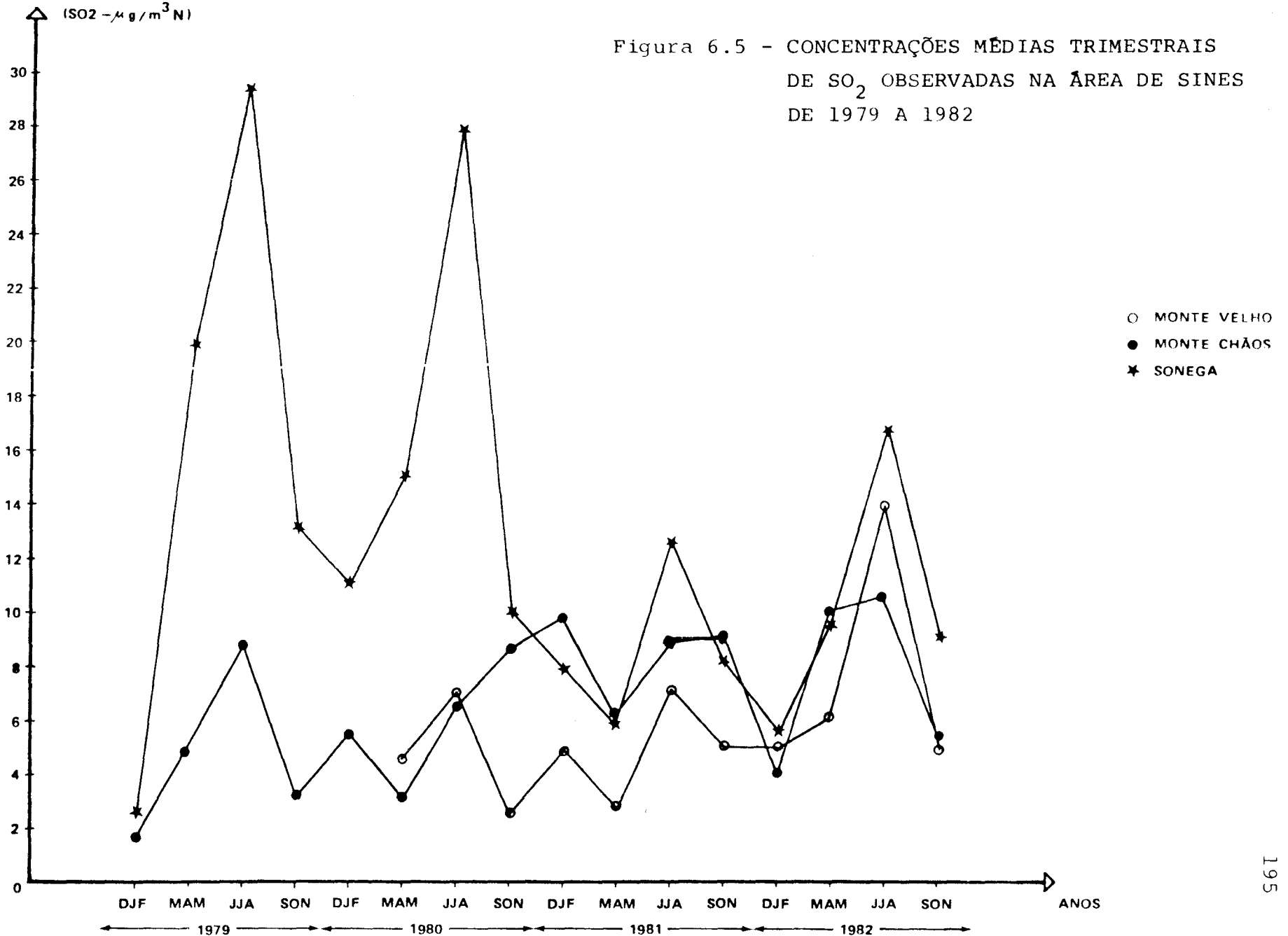
CONCENTRAÇÕES MÉDIAS ANUAIS DE DIÓXIDO
DE ENXOFRE OBSERVADAS NA ÁREA DE SINES
DE 1979 A 1982 ($\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$) (DOS QUADROS 6.XI
A 6.XIV)

	1979	1980	1981	1982	1979-1982
Monte Velho	-	5	5	6	5
Monte Chãos	6	6	9	8	7
Sonega	19	15	9	10	13

CONCENTRAÇÕES MÉDIAS TRIMESTRAIS

(SO₂ - μg/m³N)

Figura 6.5 - CONCENTRAÇÕES MÉDIAS TRIMESTRAIS DE SO₂ OBSERVADAS NA ÁREA DE SINES DE 1979 A 1982



CAPÍTULO 7

TECNOLOGIAS E PROCESSOS FABRIS DA ÁREA DE SINES

Investigados no capítulo anterior os níveis de concentrações de dióxido de enxofre, podemos passar à análise da segunda envolvente importante para o modelo: as tecnologias fabris envolvidas e seus detalhes processuais. base fundamental da realização de qualquer inventário realista das emissões industriais.

Do rigor desta análise depende a qualidade de parte significativa da informação fornecida ao modelo e, portanto, o próprio rigor das suas previsões.

CAPÍTULO 7

7.1 Malha Industrial

Conjuntamente com as partículas em suspensão, o dióxido de enxofre talvez se possa vir a transformar no poluente mais crítico para a Área de Sines. Durante os anos a que se referem as investigações feitas existiam apenas duas empresas industriais com emissões significativas: a refinaria da Petrogal (e central térmica) durante os anos de 1979 a 1980 (arranque em Dezembro de 1978) e uma parte do Complexo Petroquímico da Companhia Nacional de Petroquímica e sua central térmica a partir da data da sua entrada em funcionamento, em 1981.

CAPÍTULO 7

7.2 Refinaria e Central Térmica

A refinaria da Petrogal, situada na zona central da Área de Sines (141,186; 110,422; 275), tem uma capacidade nominal de refinação de 10.000.000 t por ano.

É uma unidade moderna, com central térmica própria, dotada de uma chaminé de altura significativa em termos internacionais e a mais alta do País - 234 metros.

Possui, para combustão dos gases indesejáveis de processo, uma "flare" com altura de 120 metros (141,45; 110,22;163).

Para tratamento dos materiais sulfídricos, a refinaria possui ainda, uma Unidade de Claus com incinerador (115,116).

A figura 7.1 mostra, de modo esquemático, as unidades anti-poluição do ar desta refinaria (117).

A Unidade de Claus é um equipamento de importância fundamental para o controle da poluição atmosférica da refinaria pelas quantidades significativas de H₂S que deve tratar habitualmente, para além das que, em caso de mau funcionamento ou paragens, são enviadas, em largas quantidades, para a atmosfera sob a forma de SO₂. Daí que valha a pena investigar, com alguma profundidade, os seus problemas específicos de operação e os princípios do seu funcionamento.

Pretende-se com estas unidades, transformar o H₂S em enxofre, utilizando a reacção de Claus:



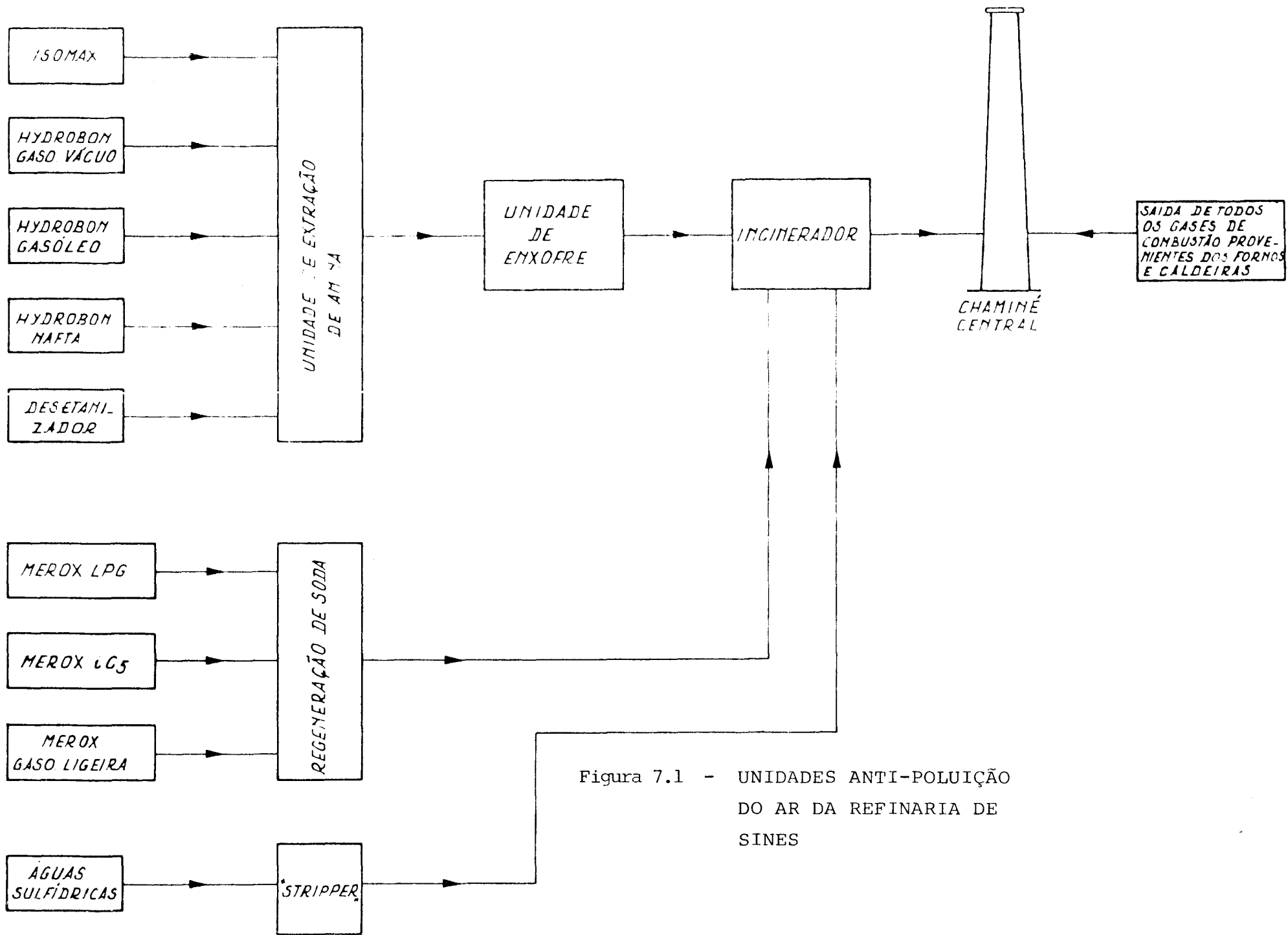


Figura 7.1 - UNIDADES ANTI-POLUIÇÃO DO AR DA REFINARIA DE SINES

CAPÍTULO 7

designando n as múltiplas formas alotrópicas do vapor de enxofre. O valor de n oscila entre 2 e 8 sendo o seu valor médio menor, à medida que a temperatura é mais elevada. A reacção é exotérmica com $n = 3$ a 8 e endotérmica para $n = 2$. A reacção é termodinamicamente equilibrada.

Primeiramente, cerca de um terço do H_2S do gás ácido é oxidado para produzir o SO_2 necessário à reacção de Claus. Esta oxidação faz-se, enviando o gás ácido a um queimador com a quantidade de ar necessária para a oxidação de um terço do H_2S aí contido. Neste forno, onde se atingem temperaturas de $1100^\circ C$ a $1200^\circ C$ dá-se a oxidação de vestígios de hidrocarbonetos do gás ácido e alguma dissociação do H_2S em enxofre e hidrogénio, com outras reacções secundárias produzindo CO , COS , e CS_2 em pequenas quantidades.

A partir do momento em que se produz o SO_2 , inicia-se a reacção de Claus, embora limitada a um rendimento de apenas 60% em virtude do equilíbrio termodinâmico atrás referido. Há, pois, que deslocar esse equilíbrio, para se obter um rendimento mais alto, o que se consegue através da condensação do vapor de enxofre formado, por abaixamento da temperatura do gás para $150^\circ C$ - $180^\circ C$. A reacção realiza-se então à temperatura de $220^\circ C$, permitindo, com a presença de um catalizador, uma velocidade elevada da reacção. Assim, à saída do primeiro reactor (1º andar da Unidade), 85% a 88% do H_2S foi transformado em enxofre. Para conseguir um rendimento ainda maior provoca-se novo abaixamento de temperatura do gás para $150^\circ C$ - $180^\circ C$ o que condensa vapor e desloca mais o equilíbrio.

CAPÍTULO 7

Um novo aquecimento a 310 °C, antes da entrada no segundo reactor (2ª etapa da Unidade), permite elevar a conversão e, portanto, o rendimento para 94% a 96% de H₂S em enxofre. Se esta operação for repetida - ou utilizado um terceiro reactor - o rendimento pode atingir 97% ou mesmo 99%.

Contudo, dado que a reacção nunca é completa, existe sempre rejeição de H₂S para o exterior, o qual é extremamente tóxico e odoroso.

Por isso as unidades de Claus industriais dispõem no final do processo, de um incinerador: os gases residuais contendo H₂S são oxidados e expelidos na forma de SO₂. Importa, pois, não esquecer estas emissões das Unidades de Claus (118, 119, 120).

A capacidade nominal da Unidade de Claus da refinaria de Sines é de 104t/dia de enxofre e da análise detalhada do "flow-sheet" geral da refinaria pode-se concluir que existem quatro fontes produtoras de H₂S para a Unidade de Claus:

- o proveniente da dessulfuração de gasóleo atmosférico;
- o proveniente da dessulfuração de gasóleo de vácuo;
- o proveniente da dessulfuração de nafta;
- o proveniente da dessulfuração dos L.P.G. (butanos -propanos).

Destes, os principais são constituídos pelo H₂S vindo da dessulfuração dos gasóleos.

CAPÍTULO 7

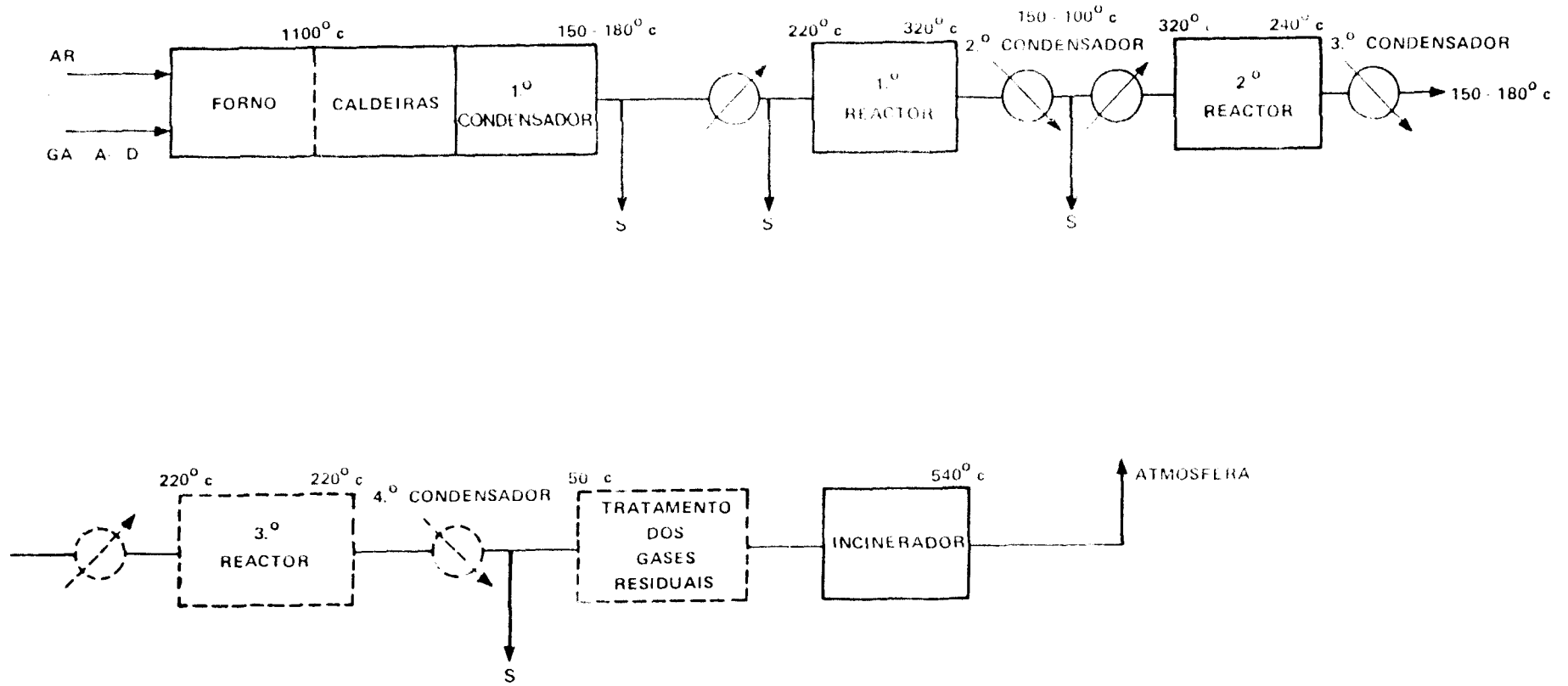
Existe ainda, uma quinta fonte, proveniente do tratamento das águas ácidas. Este gás, que contém entre 4,7% e 30% (Vol.) de H_2S juntamente com amoníaco (3,8% Vol.) e cujo débito normal é de 1,9t/h, é contudo enviado directamente ao incinerador da unidade já atrás referida. A Figura 7.2 representa, esquematicamente, uma Unidade de Claus.

São internacionalmente conhecidas as dificuldades de operação duma Unidade de Claus; derivam do facto de a composição do gás ácido variar, por vezes substancialmente, com o funcionamento geral das múltiplas unidades da refinaria, tipos de petróleo bruto em refinação, avarias de unidades, etc.. Assim, o valor 2 para a relação molar H_2S/SO_2 - desejável na Unidade de Claus, como vimos - é difícil de manter com as variações de composição em especial de hidrocarbonetos e teor em água do gás ácido. Se acrescentarmos que uma pequena diferença para o valor 2 na relação molar afecta bastante o rendimento final das reacções no 2º andar da unidade, compreendemos a importância da existência de um aparelho cientificamente avançado e preciso que permite ao operador conhecer a relação H_2S/SO_2 nos gases, antes do incinerador.

Infelizmente os aparelhos automáticos actualmente disponíveis (cromatografia ou ultravioletas) são de funcionamento muito sensível, estando sujeitos a avarias relativamente frequentes e exigindo pessoal especializado para a sua exploração e manutenção. As unidades de Claus sofrem, frequentemente, corrosões graves pelo facto do H_2S corroer o aço, a partir da temperatura de $280^{\circ}C$ a $300^{\circ}C$.

Acresce mais, nas refinarias, as unidades de Claus estão sujeitas a condições de operações difíceis - em parti-

Figura 2 - RAMA DE UMA UNIDADE DE CLAUS



CAPÍTULO 7

cular, nos tempos que vivemos - que advêm do facto das próprias taxas de exploração das refinarias serem muito baixas. Assim, por exemplo, a refinaria de Sines vem funcionando, desde o princípio, a taxas distantes do nominal e, algumas vezes, rondando os 50% - 60%.

Tal facto, acrescido de que por vezes nem sequer funcionam (devido à inexistência de necessidades dos mercados) as unidades de dessulfuração, todas ou parte, conduz a que as cargas da Unidade de Claus sejam inferiores a 50% da sua capacidade nominal, valor que representa aproximadamente o seu mínimo técnico de funcionamento. Verificam-se assim, paragens forçadas da Unidade seguidas de arranque passados dias ou semanas. Durante esses períodos ela fica sujeita a fenómenos de corrosão e o seu arranque é sempre operação delicada, devido a perigos de explosão, entre outros. Por outro lado, os caudais à Unidade de Claus, além de serem baixos, são por vezes muito variáveis atendendo à composição do "crude" refinado, à desigual repartição do enxofre pelas várias fracções e ao peso de cada fracção no programa de refinação.

No caso concreto da refinaria de Sines e da sua Unidade de Claus, também elas não têm escapado a todos estes problemas uma vez que a sua entrada em funcionamento se verificou, praticamente, com o 2º choque petrolífero, com a subida de preços de "crude" desde 1973 - de cerca de US\$ 3 para 30 US\$ em Janeiro de 1983 - com as depressões de mercado inerentes e taxas menores de refinação.

Tendo presente a análise do "flow-sheet" da refinaria e central térmica e as características da sua Unidade de Claus, pode-se dizer que as emissões de dióxido de enxofre provêm de:

CAPÍTULO 7

- a) queima de fuel-óleo, de teor variável em enxofre, na central térmica com emissão de SO_2 pela chaminé principal com altura de 234 metros;
- b) queima de fuel na refinaria, nos processos de aquecimento e utilidades, com emissões de SO_2 pela chaminé principal;
- c) emissões de SO_2 pela chaminé principal, provenientes da queima no incinerador da Unidade de Claus, de quantidades de H_2S devidas a rendimentos inferiores a 100%;
- d) emissões de SO_2 através da "flare", em situações de não funcionamento da Unidade de Claus ou do seu incinerador (111).

Ao longo dos anos foi possível apurar, com intensidades variáveis, os vários tipos de emissões descritas.

Dada a sua importância para o cálculo das emissões quantitativas, efectuado no capítulo seguinte, convém referir situações que se verificaram e que são devidas a problemas semelhantes aos analisados e relacionados com a Unidade de Claus.

- Durante o ano de 1979, até fins de Novembro, a Unidade de Claus foi funcionando, embora com as naturais discontinuidades, sendo nesses casos as cargas de H_2S queimadas no seu incinerador e expelidas como SO_2 para a atmosfera através da chaminé principal.
- De Dezembro de 1979 até Junho de 1980 verificaram-se, entre outros, problemas graves de corrosão, que mantiveram inoperante a unidade de Claus e o incinerador, obrigando à queima dos gases sulfídricos na "flare".

CAPÍTULO 7

- De Junho de 1980 até fins de 1982 aquela unidade voltou a funcionar (sem incinerador, contudo) embora com as descontinuidades normais e sendo as cargas sulfídricas sempre queimadas na "flare". Estas emissões têm significado quando comparadas com as provenientes do processo e da central e, por isso, serão cuidadosamente calculadas no capítulo seguinte.

CAPÍTULO 7

7.3 Complexo Petroquímico

A primeira unidade do complexo petroquímico começou a funcionar nos fins de 1980.

Um "steam-cracker" com capacidade para 300.000 t/a de etileno e co-produção de propileno (150.000 t/a) e fracção C₄ (para butadieno), entre outras, constitui a unidade base do complexo. Associados a este encontram-se em funcionamento uma fábrica de butadieno e duas fábricas de polietileno, (de alta e baixa densidade), uma fábrica de polipropileno, e uma central térmica para todo o complexo. A análise cuidada dos processos de fabrico e respectivos "flow-sheets" (as figuras 7.3, 7.4, 7.5, 7.6, apresentam apenas os esquemas simplificados de fabrico) indicam que não se verificam emissões de dióxido de enxofre provenientes do "steam-cracker" ou do butadieno, polietilenos e polipropilenos (122, 123, 124) embora emitam outros poluentes tais como hidrocarbonetos, partículas, etc.. As emissões significativas de dióxido de enxofre provêm, sim, da queima de fuel-óleo na central térmica.

As emissões da central - que se situa nas coordenadas 139,006; 113,123; 179,0 a Norte da Refinaria - são expelidas para a atmosfera através duma chaminé com a altura de 150 metros (diâmetro na base 16,5 m) a qual dispõe de 3 condutas internas e independentes. Por esse facto, têm de ser analisadas em separado (121).

Estas condutas internas estão ligadas aos diferentes grupos produtores de energia geral e de vapor para o "steam-cracker".

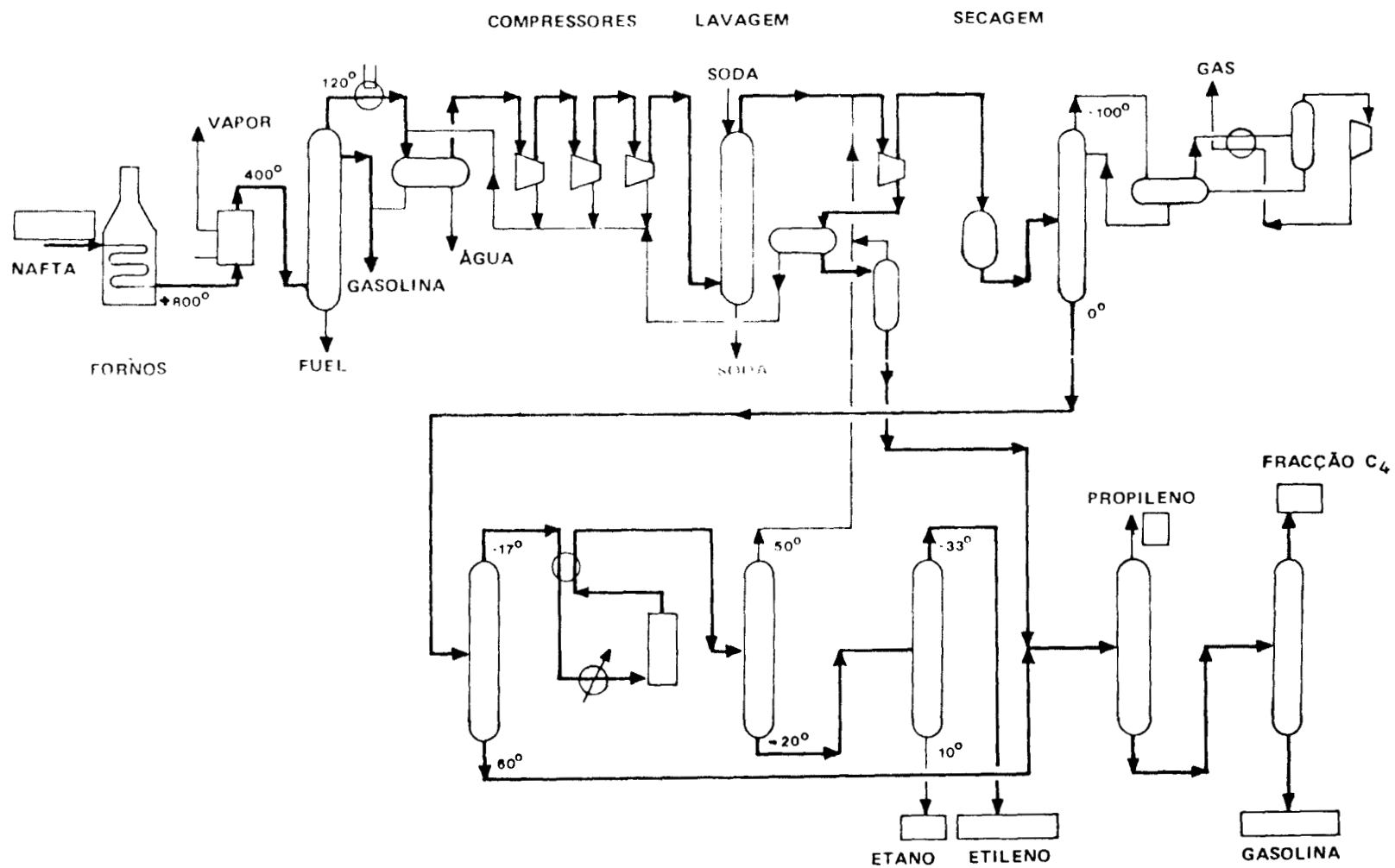


Figura 7.3 - STEAM - CRACKING,
DIAGRAMA DE PROCESSO

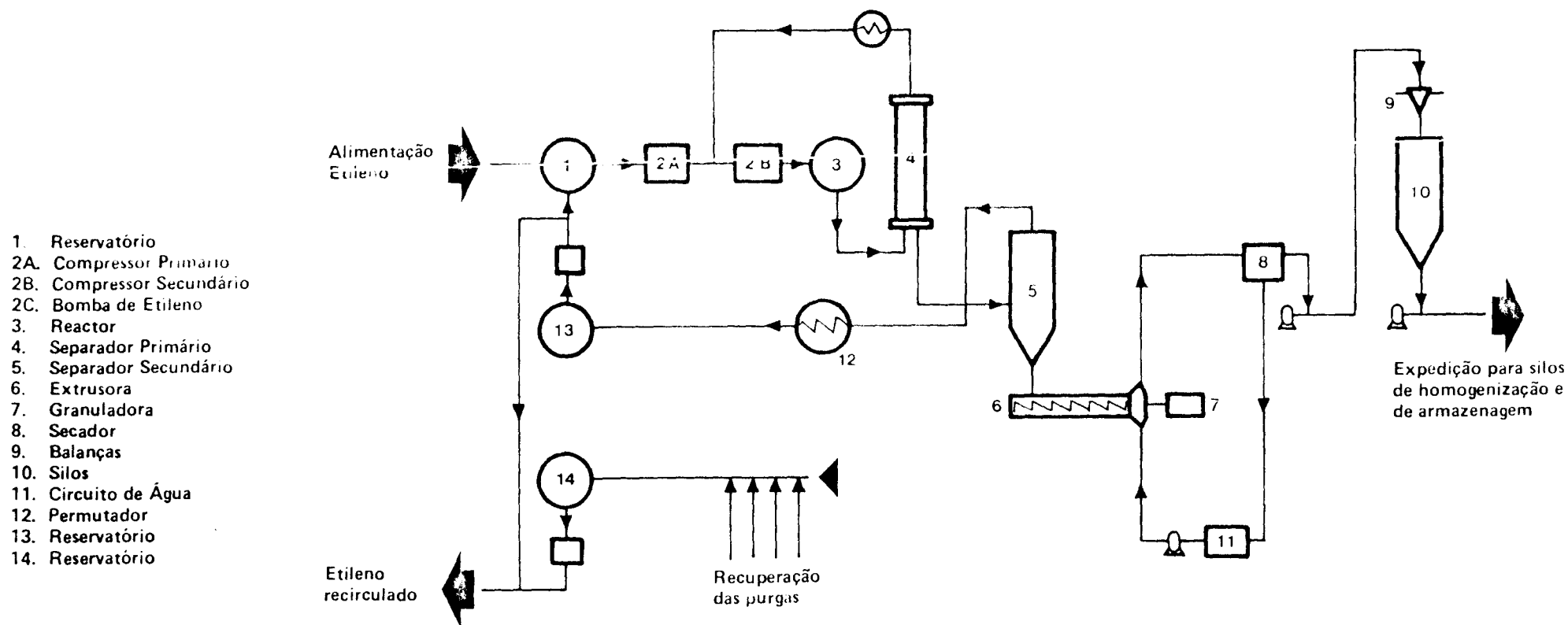


Figura 7.4 - DIAGRAMA DE PROCESSO DE PRODUÇÃO DO POLIETILENO DE BAIXA DENSIDADE

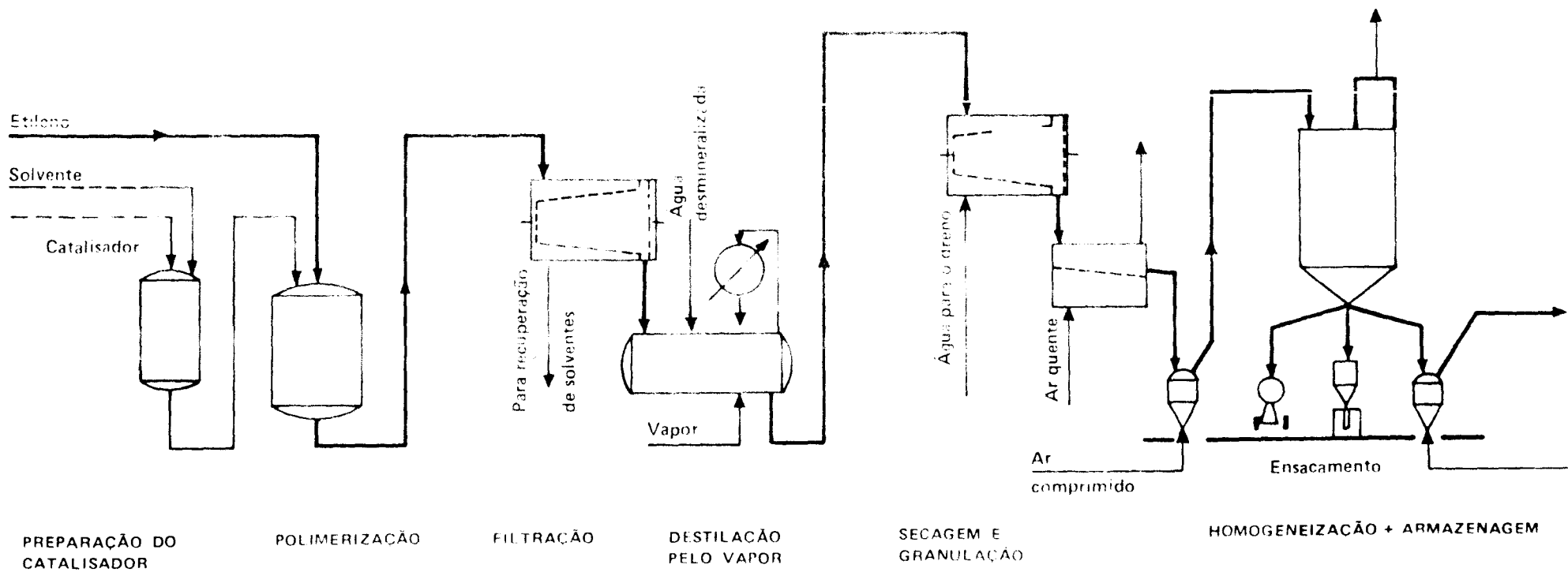


Figura 7.5 - DIAGRAMA DE PROCESSO DE PRODUÇÃO DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE

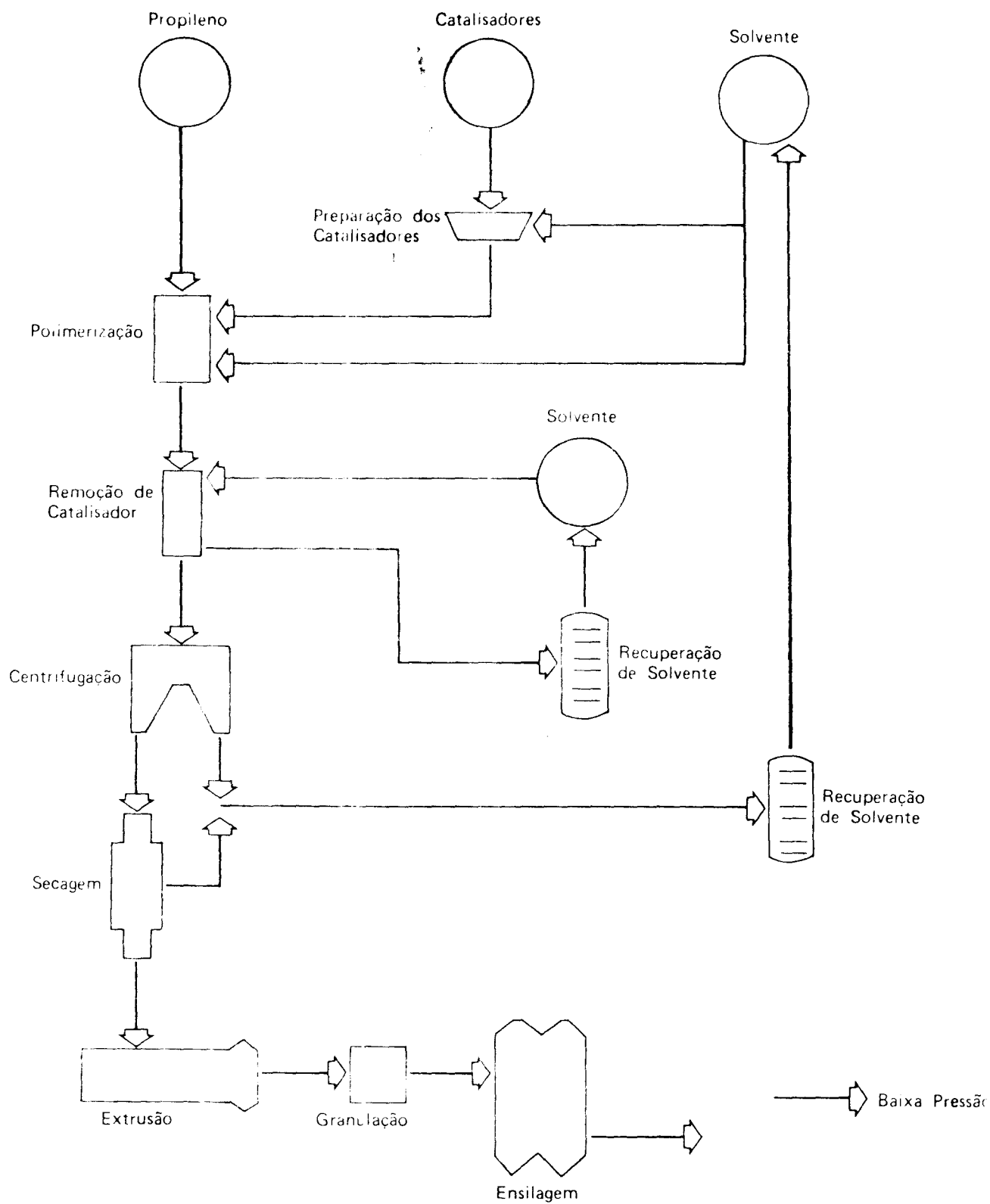


Figura 7.6 - D AGRAMA DE PROCESSO DE PRODUÇÃO DE POLIPROPILENO

CAPÍTULO 7

O diâmetro interior das condutas é de 3,1 metros. Assim, a conduta designada seguidamente por conduta nº 1, recebe os gases poluídos com SO_2 resultantes da queima de fuel-óleo (de teor de enxofre variável) na caldeira auxiliar bem como nos dois motores Diesel e, eventualmente, de gases do incinerador.

A conduta nº 2 recebe os gases das caldeiras "Mague 1" e "Mague 2".

A conduta nº 3 recebe os gases da caldeira "Mague 3" (e, no futuro, talvez da 4).

A caldeira auxiliar tem uma capacidade de produção de vapor compreendida entre 12 e 50 t/h.

As caldeiras "Mague" possuem uma capacidade de produção compreendida entre 57 e 190 t/hora de vapor.

Os 2 Grupos Diesel alternadores enviam um débito de gases situado entre 34 a 56 t/h (121).

Será assim, com base nestes aspectos detalhados e essenciais das tecnologias envolvidas, que retiraremos no próximo capítulo as implicações quantitativas das emissões dos caudais de dióxido de enxofre e gases produzidos, suas temperaturas e velocidades de saída, teores de SO_2 e outros aspectos.

CAPÍTULO 8

CARACTERIZAÇÃO QUANTITATIVA DAS EMISSÕES INDUSTRIAIS DE DIÓXIDO DE ENXOFRE.

INVENTÁRIO DE EMISSÕES.

Com base nas taxas reais de funcionamento e nas características tecnológicas das unidades fabris, calculam-se as emissões de dióxido de enxofre durante os anos de 1979, 1980, 1981 e 1982, por trimestres.

Com os valores das emissões médias poder-se-ão efectuar, no próximo capítulo, as simulações em computador.

CAPÍTULO 8

8.1 Emissões da Refinaria

Partindo da análise tecnológica dos processos fabris das várias unidades industriais, atrás descrita, torna-se possível elaborar, finalmente, o inventário das suas emissões de SO₂.

Começemos, então, pela refinaria.

8.1.1 Condições de Exploração

a) Peso específico do "fuel-oil" - 0,96 ton/m³.

b) Teor de S no fuel (%)*:

	1978	1979	1980	1981	1982
Janeiro		4,5	4,0	2,7	3,4
Fevereiro		4,5	3,0	2,6	3,4
Março		4,2	4,0	2,8	3,4
Abril		4,9	2,7	3,1	3,4
Maio		4,8	3,5	2,8	3,2
Junho		5,0	3,4	2,8	3,3
Julho		5,3	3,2	2,6	3,1
Agosto		4,9	3,2	3,0	2,3
Setembro		5,1	3,2	2,5	3,1
Outubro		5,1	3,0	2,8	2,7
Novembro		5,1	3,6	3,6	2,9
Dezembro	5,0	5,1	2,4	3,3	

* Estes valores são já as médias ponderadas para cada mês dos teores e quantidades, para cada depósito utilizado ao longo de cada mês. (Quadro 8.I).

CAPÍTULO 8

QUADRO 8.I

TEORES DE ENXOFRE NO FUEL CONSUMIDO NA REFINA
RIA DE SINES, POR TANQUES, NOS MESES DE JANEI
RO E FEVEREIRO DE 1981

DATA	TANQUE Nº	BOLETIM DE ANÁLISE Nº	TEOR DE ENXOFRE (%)
04/01/81	OP-T502	1212/80	1,7 (Superfície)
			1,6 (Zona intermediária)
			1,6 (Fundo)
06/01/81	OP-T507	018/81	2,7
			2,7
			2,7
09/01/81	OP-T507	026/81	2,7
			3,1
			3,1
23/01/81	OP-T507		
26/01/81	OP-T507	048/81	2,8
28/01/81	OP-T507		3,0
31/01/81	OP-T502		
2/02/81	OP-T502		
5/02/81	OP-T502	098/81	2,6 (média)
7/02/81	OP-T502		
10/02/81	OP-T502		
13/02/81	OP-T505	170/81	2,6
17/02/81	OP-T505		2,6
21/02/81	OP-T505		2,6

CAPÍTULO 8

- c) Determinada para cada trimestre a massa total de SO_2 emitida, o caudal mássico médio foi calculado em g/s, considerando o tempo total do período em referência.
- d) As emissões da chaminé são as provenientes da combustão do fuel no processo e na central (utilidades) e as da Unidade de Claus, quando em funcionamento o seu incinerador.
- e) Assumiu-se que as emissões do facho (desde Dezembro de 1979) provêm da combustão de H_2S , incluindo aquele que não é recuperado sob a forma de enxofre na Unidade de Claus pelo facto de o rendimento desta unidade ser inferior a 100% (e quando o seu incinerador não está operativo).
- f) Foram exaustivamente apurados mês a mês através dos registos dos instrumentos, os volumes (Nm^3) de H_2S enviados directamente ao facho e à Unidade de Claus, bem como a produção de enxofre nesta unidade, e, a partir desses valores foram calculadas as massas de SO_2 emitidas por meio de cálculos estequiométricos, assumindo o volume molar de 22,4 litros para o H_2S . Os quadros 8.II e 8.III são apenas 2 exemplos dos tipos de apuramentos efectuados nos 48 meses desde 1979 até 1982.
- g) Temperatura de emissão na chaminé:
240°C, conforme informação da refinaria.
- h) Volume de gases emitido:
Com base nas características do fuel-óleo, do pro

CAPÍTULO 8

QUADRO 8.II
CARGAS DE H₂S PARA A UNIDADE DE CLAUS
DEZEMBRO 1981

DATA	CARGA TOTAL DE H ₂ S (Nm ³ /h)	DATA	CARGA TOTAL DE H ₂ S (Nm ³ /h)
5/12/81	924	17/12/81	1157
6/12/81	887	20/12/81	468
7/12/81	887	22/12/81	1015
8/12/81	900	23/12/81	1010
9/12/81	951	24/12/81	905
10/12/81	998	25/12/81	954
11/12/81	1003	26/12/81	979
12/12/81	1031	27/12/81	988
14/12/81	1208	29/12/81	1087
15/12/81	1227	30/12/81	1019
16/12/81	1221	31/12/81	942

Carga total H₂S: 522 264 Nm³ durante o mês

Carga para os trens da Unidade de Claus: 275 000 Nm³

Produção de enxofre: 383 ton.

CAPÍTULO 8

QUADRO 8.III

CARGAS DE H₂S PARA A UNIDADE DE CLAUS
OUTUBRO 1981

DATA	CARGA TOTAL DE H ₂ S (Nm ³ /h)	DATA	CARGA TOTAL DE H ₂ S
1/10/81	823	15/10/81	1059
2/10/81	809	17/10/81	1237
3/10/81	1003	20/10/81	1357
4/10/81	1112	21/10/81	1349
5/10/81	1123	22/10/81	964
6/10/81	1087	25/10/81	572
7/10/81	1087	26/10/81	453
8/10/81	812	27/10/81	323
9/10/81	346	28/10/81	325
10/10/81	928	29/10/81	405
13/10/81	1005	30/10/81	363
14/10/81	1070		

Carga Total H₂S: 470688 Nm³ durante o mês

Carga para os trens da Unidade de Claus: 328455 Nm³ H₂S

Produção de enxofre: 404 ton.

CAPÍTULO 8

QUADRO 8.IV

QUANTIDADES DE FUEL UTILIZADAS NA REFINARIA (TON.)

	1979	1980	1981	1982
Inverno	33213,890	51749,060	47907,000	49604,000
Primavera	66501,295	41760,365	45320,000	51665,000
Verão	40534,074	54138,890	36811,732	46205,000
Outono	65462,70	49873,420	45010,000	29829,000

CAPÍTULO 8

cesso de queima e suas condições operatórias* e após continuadas trocas de impressões com os responsáveis da refinaria, (115, 116, 117) foi possível calcular o seguinte valor para o caudal de gases de combustão produzidos,

$$16,15 \times 10^3 \text{ m}^3 \text{ de gases (240}^\circ\text{C)/ton de fuel.}$$

- i) Diâmetro da chaminé - 5,9 m.
- j) Determinado para cada trimestre o volume total de gases emitido pela chaminé, a velocidade média de emissão foi calculada em m/s, dividindo o volume de gases pela área interior da chaminé e pelo tempo total em (segundos) correspondente a cada trimestre.

Não foram pcis tidas em conta as variações do caudal volumétrico ao longo do trimestre, sendo mais correcto utilizar velocidades ponderadas relativamente à massa de SO_2 emitida em cada período.

Tal método não era porém de aplicação possível a este caso, pois apenas se conhecem os consumos mensais de fuel.

- 1) Foi calculado um diâmetro equivalente de 4,8 m ^{**} para a "Flare" através da metodologia, sugerida no capítulo 5 para o Texas Climatological Model.

Os dados do projecto utilizado foram os seguintes:

- calor emitido, $q = 3,22 \times 10^7 \text{ cal/seg}$
- peso molecular MW = 34

Nestas condições foi possível chegar finalmente, aos valores representados em seguida.

* Ver Quadro 8.IV

** Foi utilizado, nalguns casos, o valor de 8m (STAR) e efectuada análise da sensibilidade que revelou fraco impacto nos resultados.

CAPÍTULO 8

8.1.2 Inventário Quantitativo das Emissões de SO₂ da Refinaria

Refinaria - Chaminé - 1979

Emissões de SO₂

Período	Processo (ton)	Utilidades (ton)	Total (ton)	Caudal de SO ₂ (g/s)	Velocidade de emissão (m/s)
Dez 78			1550		
Jan 79	380	544	924		
Fev 79	212	459	671		
			3145	542	2,53
			+ 1066*	4211	
Mar 79	1281	861	2142		
Abr 79	1152	872	2024		
Mai 79	864	1090	1954		
			6120	2080	4,95
			+10420*	16540	
Jun 79	558	736	1294		
Jul 79	684	644	1328		
Ago 79	575	902	1477		
			4099	1383	3,02
			+ 6900*	10939	
Set 79	1275	1001	2276		
Out 79	1401	1005	2406		
Nov 79	1073	922	1995		
			6677	1342	4,93
			+ 3878*	10555	

* Proveniente do incinerador da Unidade de Claus

CAPÍTULO 8

Refinaria - Chaminé - 1980

Emissões de SO₂

Período	Processo (ton)	Utilidades (ton)	Total (ton)	Caudal de SO ₂ (g/s)	Velocidade de emissão (m/s)
Dez 79	1456	1292	2748		
Jan 80	274	486	760		
Fev 80	326	593	919		
			4427	563	3,89
Mar 80	783	969	1752		
Abr 80	7	148	155		
Mai 80	627	563	1190		
			3097	390	3,11
Jun 80	633	766	1399		
Jul 80	478	676	1154		
Ago 80	292	703	995		
			3548	446	4,02
Set 80	449	456	905		
Out 80	534	629	1163		
Nov 80	504	673	1177		
			3245	413	3,75

CAPÍTULO 8

Refinaria - Chaminé - 1981

Emissões de SO₂

Período	Processo (ton)	Utilizada - des (ton)	Total (ton)	Caudal de SO ₂ (g/s)	Velocidade de emissão (m/s)
Dez 80	384	499	883		
Jan 81	298	379	677		
Fev 81	438	445	883		
	1120	1323	2443	314	3,64
Mar 81	215	336	551		
Abr 81	609	587	1196		
Mai 81	432	475	907		
	1256	1398	2654	334	3,37
Jun 81	280	434	714		
Jul 81	395	507	902		
Ago 81	122	281	403		
	797	1222	2019	254	2,74
Set 81	202	421	623		
Out 81	327	524	851		
Nov 81	565	686	1251		
	1094	1631	2725	347	3,39

CAPÍTULO 8

Refinaria - Chaminé - 1982

Emissões de SO₂

Período	Processos (ton)	Utilidades (ton)	Total (ton)	Caudal de SO ₂ (g/s)	Velocidade de emissão (m/s)
Dez 81	586	657	1243		
Jan 82	466	577	1043		
Fev 82	471	578	1049		
	1523	1812	3335	429	3,77
Mar 82	486	773	1259		
Abr 82	428	503	931		
Mai 82	576	670	1246		
	1490	1946	3436	432	3,85
Jun 82	339	616	955		
Jul 82	378	587	965		
Ago 82	286	458	744		
	1003	1661	2664	335	3,44
Set 82	539	264	803		
Out 82	524	293	817		
Nov 82	101	0	101		
	1164	557	1721	219	2,24

CAPÍTULO 8

Refinaria - Facho - 1980

Período	Massa de SO ₂ emitida (ton)	Caudal de SO ₂ (g/s)
Dezembro 79	865	165
Janeiro 80	385	
Fevereiro 80	<u>46</u> 1296	
Março 80	2446	529
Abril 80	-	
Maio 80	<u>1759</u> 4205	
Junho 80	1103	355
Julho 80	1054	
Agosto 80	<u>666</u> 2823	
Setembro 80	657	298
Outubro 80	622	
Novembro 80	<u>1066</u> 2345	

Nota: No ano de 1979, até fins de Novembro, todas as emissões provenientes dos gases sulfídricos passavam pelo incinerador da Unidade de Claus sendo expelidos pela chaminé principal.

CAPÍTULO 8

Refinaria - Facho - 1981

Emissões de SO₂

Período	Massa de SO ₂ emitida (ton)	Caudal de SO ₂ (g/s)
Dezembro 80	822	255
Janeiro 81	504	
Fevereiro 81	<u>653</u>	
	1979	
Março 81	290	160
Abril 81	779	
Maió 81	<u>203</u>	
	1272	
Junho 81	356	253
Julho 81	1361	
Agosto 81	<u>296</u>	
	2013	
Setembro 81	877	190
Outubro 81	537	
Novembro 81	<u>81</u>	
	1495	

CAPÍTULO 8

Refinaria - Facho - 1982

Emissões de SO₂

Período	Massa de SO ₂ emitida (ton)	Caudal de SO ₂ (g/s)
Dezembro 81	725	210
Janeiro 82	413	
Fevereiro 82	493	
	<u>1631</u>	
Março 82	591	281
Abril 82	667	
Maio 82	974	
	<u>2232</u>	
Junho 82	181	173
Julho 82	552	
Agosto 82	642	
	<u>1375</u>	
Setembro 82	426	139
Outubro 82	670	
Novembro 82	0	
	<u>1096</u>	

CAPÍTULO 8

8.2 Emissões do Complexo Petroquímico

Vejamos em pormenor as emissões de dióxido de enxofre para as unidades do complexo petroquímico.

8.2.1 Condições de Exploração

a) Peso específico do fuel oil - 0,96 ton/m³.

b) Teor de S no fuel:

Durante todo o ano de 1981	-	2,4 %
Ano de - Janeiro	-	2,8 %
1982 - Fevereiro	-	2,6 %
- Março	-	2,5 %
- Abril	-	2,9 %
- Maio	-	2,9 %
- Junho	-	3,0 %
- Julho	-	2,8 %
- Agosto	-	2,7 %
- Setembro	-	3,1 %
- Outubro	-	3,1 %
- Novembro	-	3,1 %

c) Determinada para cada trimestre a massa total de SO₂ emitida, o caudal mássico médio foi calculado em g/s, considerando o tempo total do período em referência, independentemente das variações do caudal.

d) Temperaturas médias de emissão dos gases de combustão

- Caldeiras principais*

* Os gases das caldeiras principais nº 2 e nº 3 vão para as condutas nº2 e nº 3 da chaminé, respectivamente.

CAPÍTULO 8

Conforme dados fornecidos pela CNP, a temperatura dos gases de combustão, à entrada na chaminé, varia em função da capacidade de produção de vapor, de acordo com a tabela seguinte:

Produção de vapor (ton/h)	Temperatura (°C)
57	128
95	136
142,5	142
190	150

Não dispondo dos períodos diários durante os quais funcionou cada caldeira (ou os motores Diesel) nem a capacidade com que operaram, sendo apenas possível calcular a capacidade média de cada 24 horas e admitindo ainda (dados de projecto) que durante a ascensão da chaminé se verifica um abaixamento de temperatura de 10°C a 15°C, resolveu-se admitir como temperatura média de emissão dos gases provenientes da combustão nas caldeiras principais - 130°C.

Note-se que a produção média de vapor da caldeira "Mague" nº 1 foi superior a 90 ton/h, admitindo que funcionou 24 horas/dia em todos os dias de que se possuem registos, pressuposto que certamente não se terá confirmado na prática.

Nestas condições considerou-se pertinente supor que o regime médio de funcionamento terá sido o nível imediatamente superior (142,5 ton/h), a que corresponde a temperatura de emissão de 142°C. A temperatura que se assumiu (130°C) resulta da diferença $142 - 12 = 130$ °C, devida ao suposto abaixamento de temperatura ao longo da chaminé.

CAPÍTULO 8

- Caldeira Auxiliar *

Conforme dados fornecidos pela CNP, a temperatura dos gases de combustão, à entrada da chaminé, varia em função da capacidade de produção de vapor, de acordo com a tabela seguinte:

Produção de vapor (ton/h)	Temperatura (°C)
12,5	205
25	190
37,5	200
50	205

Por razões idênticas às que se descreveram para as caldeiras principais e dado que a produção média de vapor da caldeira auxiliar foi próxima das 25 ton/h, admitindo que funcionou 24 horas/dia em todos os dias de que se possuem registos, pressuposto que certamente não se terá confirmado na prática, considerou-se pertinente admitir que o regime médio de funcionamento terá sido o nível imediatamente superior (37,5 ton/h) a que corresponde a temperatura de emissão de 200°C. Assumiu-se, por isso, que a temperatura de emissão média é de 188°C, em resultado do suposto abaixamento de temperatura durante a ascensão pela chaminé.

- Motores Diesel*

Conforme dados fornecidos pela CNP, a temperatura dos gases de combustão, à entrada na chaminé, pode variar entre 210°C e 260°C.

* Os gases da caldeira auxiliar e dos motores Diesel vão para a conduta nº 1 da chaminé.

CAPÍTULO 8

Tomando a média (235°C) e subtraindo o abaixamento de temperatura suposto ao longo da chaminé, assumiu-se como temperatura média de emissão - 223°C .

e) Volume de gases emitido

A indicação mais fidedigna da CNP susceptível de conduzir à determinação do caudal volumétrico de gases emitido, foi a composição ponderal do fuel:

C	85,0%
H	10,0%
S	3,5%
H ₂ O	<u>1,5%</u>
	100,0%

Admita-se, pois, a combustão de 1000 kg de fuel. As massas correspondentes dos produtos da combustão de verão ser (115,116):

	Massa (kg)
CO ₂	3117
H ₂ O	915
SO ₂	<u>70</u>
	4102 kg

A massa de oxigênio referida para esta combustão terá sido:

2267	(CO ₂)
800	(H ₂ O)
<u>35</u>	(SO ₂)
3102 kg	

CAPÍTULO 8

A massa de azoto veiculada e que sairá misturada com os produtos da combustão será:

$$3102 \times \frac{76,9}{23,1} = 10327 \text{ kg}$$

Portanto, admitindo a combustão completa sem qualquer excesso de ar, a massa total dos gases resultantes da combustão seria:

CO ₂	3117
H ₂ O	915
SO ₂	70
N ₂	<u>10327</u>
	14429 kg

ou seja, resultariam

14429 kg de gases ^{Ar} / kg de fuel
(sem excesso de ar)

Supondo agora, conforme dados de projecto, a utilização de 4,2% de excesso de ar nas caldeiras, teremos:

	Massa Kg	Nº de Kmoles	Volume (Nm ³)
CO ₂	3117	70,8	1586
H ₂ O	915	50,8	1138
SO ₂	70	1,1	25
N ₂	10761	384,3	8608
O ₂	<u>130</u>	<u>4,1</u>	<u>92</u>
	14993	511,1	11449

CAPÍTULO 8

Conclui-se, portanto, que a combustão de 1000 kg de fuel produz 11449 N m³ de gases.

Sendo 0,96 ton/m³ o peso específico do fuel:

1000 dm³ de fuel produzem 10991 N m³ de gases.

Finalmente, tendo em atenção as temperaturas de emissão assumidas para os gases provenientes das caldeiras, determina-se:

- Caldeiras principais $T = 273 + 130 = 403 \text{ }^{\circ}\text{K}$

$$\frac{403}{273} \times 10991 = 16225 \text{ m}^3 \text{ (130}^{\circ}\text{C)}$$

Em resultado deste cálculo, assumiu-se que se produzem:

$$16,2 \times 10^3 \text{ m}^3 \text{ de gases (130}^{\circ}\text{C)/m}^3 \text{ de fuel}$$

- Caldeira auxiliar $T = 273 + 188 = 461 \text{ }^{\circ}\text{K}$

$$\frac{461}{273} \times 10991 = 18560 \text{ m}^3 \text{ (188}^{\circ}\text{C)}$$

Em resultado deste cálculo, assumiu-se que se produzem:

$$18,6 \times 10^3 \text{ m}^3 \text{ de gases (188}^{\circ}\text{C)/m}^3 \text{ de fuel}$$

- Motores Diesel

Conforme dados de projecto, neste caso utiliza-se 20% de excesso de ar. Nestas condições, a composição dos gases resultantes da combustão de 1000kg de fuel será:

CAPÍTULO 8

	Massa Kg	Nº de Kmoles	Volume (Nm ³)
CO ₂	3117	70,8	1586
H ₂ O	915	50,8	1138
SO ₂	70	1,1	25
N ₂	12392	442,6	9914
O ₂	<u>620</u>	<u>19,4</u>	<u>434</u>
	17114	584,7	13097

Portanto, a combustão de 1000 Kg de fuel produz 13097 N m³ de gases.

Sendo 0,96 ton/m³ o peso específico do fuel 1000 dm³ de fuel produzem 12573 N m³ de gases.

Finalmente, tendo em atenção a temperatura de emissão assumida para os gases provenientes da combustão nos motores Diesel, determina-se:

$$T = 273 + 223 = 496 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$\frac{496}{273} \times 12573 = 22843 \text{ m}^3 \text{ (223}^\circ\text{C)}$$

Em resultado deste cálculo, assumiu-se que se produzem:

$$22,8 \times 10^3 \text{ m}^3 \text{ de gases (223}^\circ\text{C) / m}^3 \text{ de fuel}$$

f) Diâmetro de cada conduta da chaminé - 3,10 m.

CAPÍTULO 8

- g) Determinado, para cada trimestre, o volume total de gases emitido a partir das caldeiras ou motores Diesel e conduzido para cada uma das condutas da chaminé, a velocidade média de emissão foi calculada em m/s, dividindo o volume de gases pela área interior de cada conduta e pelo tempo total (em segundos) correspondente a cada trimestre.

Não foram pois tidas em conta as variações do caudal volumétrico ao longo do trimestre. Embora fosse mais correcto utilizar velocidades ponderadas relativamente à massa de SO_2 emitida em cada período e apesar de se dispor dos consumos diários de fuel, não se optou por essa alternativa pelas seguintes razões: a) apenas seriam tidas em conta as variações das médias diárias e não as variações instantâneas (pelo menos das médias horárias); b) não seria possível aplicar o mesmo critério às emissões da refinaria (aliás bastante superiores em valor absoluto) para a qual apenas se conhecem os consumos mensais de fuel.

- h) Produção de vapor

Conforme informação da CNP, a produção de vapor relaciona-se com o consumo de fuel do seguinte modo:

- Caldeiras principais

15,2 ton de vapor/ m^3 de fuel

- Caldeiras auxiliares

13,7 ton de vapor/ m^3 de fuel

CAPÍTULO 8

Por outro lado, em média, a massa de gases emitida aproxima-se de 1 ton./ton. de vapor produzido.

Conforme cálculos anteriores, verifica-se que tanto para as caldeiras principais como auxiliar se obtêm cerca de 15 ton de gases/ton de fuel.

Para confirmar a validade da ordem de grandeza dos cálculos efectuados, só faltará, portanto determinar a produção esperada de vapor em função do calor de combustão do fuel (9600Kcal/kg).

Calor latente de vaporização da água 541 Kcal/Kg

$$\Delta t = 100 - 15 = 85^{\circ}\text{C}$$

Calor específico da água 1,0 Kcal/Kg $^{\circ}\text{C}$

Portanto, a combustão de 1 m³ de fuel produz 10⁷ Kcal e :

$$\frac{10^7 \text{Kcal}}{541 + 85} = 15,97 \times 10^3 \text{ Kg} = 15,97 \text{ ton de vapor.}$$

Nestas condições foi possível chegar finalmente aos valores apresentados em seguida

CAPÍTULO 8

8.2.2 Inventário Quantitativo das Emissões de SO₂
do Complexo PetroquímicoConduto nº 1CNP

1981

Período	Fuel Consumido (m ³)			Massa de SO ₂ emitida (ton)	Caudal de SO ₂ (g/s)	Velocidade de emissão (m/s)
	Caldeira Auxiliar	Motor Diesel nº 1	Motor Diesel nº 2			
Dez 80						
Jan 81	1086			49,4		
Fev 81	<u>1144</u>			<u>52,1</u>		
	2230			101,5	13,1	1,08
Mar 81	1625			73,9		
Abr 81	1550			70,5		
Mai 81	<u>1496</u>			<u>68,1</u>		
	4671			212,5	26,7	1,45
Jun 81	1585			72,1		
Jul 81	1414			64,3		
Ago 81	<u>1374</u>			<u>62,5</u>		
	4373			198,9	25,0	1,36
Set 81	1098			50,0		
Out 81	1790			81,5		
Nov 81	<u>956</u>	<u>305</u>	<u>78</u>	<u>60,9</u>		
	3844	305	78	192,4	24,5	1,35

CAPÍTULO 8

Conduta nº 2CNP

1981

Período	Fuel consumido (m ³)		Massa de SO ₂ emitida (ton)	Caudal de SO ₂ (g/s)	Velocidade de emissão (m/s)
	Caldeira nº 1	Caldeira nº 2			
Dez 80	-	-	-		
Jan 81	-	-	-		
Fev 81	842	-	38,3	4,9	0,75
	842	-	38,3		
Mar 81	1782	-	81,1		
Abr 81	1031	-	46,9		
Mai 81	1764	1567	151,6		
	4577	1567	279,6	35,2	1,66
Jun 81	2717	2968	258,7		
Jul 81	3817	2961	308,4		
Ago 81	4121	1912	274,5		
	10655	7841	841,6	105,9	5,00
Set 81	3853	3719	344,5		
Out 81	6221	6585	582,7		
Nov 81	3985	1728	259,9		
	14059	12032	1187,1	151,0	7,12

CAPÍTULO 8

Conduta nº 1CNP

1982

Período	Fuel Consumido (m ³)			Massa de SO ₂ emitida (ton)	Caudal de SO ₂ (g/s)	Velocidade de emissão (m/s)
	Caldeira Auxiliar	Motor Diesel nº 1	Motor Diesel nº 2			
Dez 81	684	369	380	65,2		
Jan 82	760	537	706	105,7		
Fev 82	950	138	523	81,9		
	2394	1044	1609	252,8	32,5	1,79
Mar 82	1055	-	696	85,0		
Abr 82	691	117	410	67,3		
Mai 82	685	69	180	51,7		
	2431	186	1286	204,0	25,7	1,31
Jun 82	748	121	-	50,1		
Jul 82	358	-	-	19,8		
Ago 82	284	140	-	22,2		
	1390	261		92,1	11,6	0,53
Set 82	-	-	-			
Out 82	883	336	-	72,6		
Nov 82	966	483	-	86,2		
	1849	819		158,8	20,2	0,90

CAPÍTULO 8

Conduta nº 2CNP

1982

Período	Fuel consumido (m ³)		Massa de SO ₂ emitida (ton)	Caudal de SO ₂ (g/s)	Velocidade de emissão (m/s)
	Caldeira nº 1	Caldeira nº 2			
Dez 81	3619	2118	261,1		
Jan 82	5136	3327	446,9		
Fev 82	5732	5914	592,5		
	14487	11359	1300,5	167,2	7,14
Mar 82	6946	2464	457,1		
Abr 82	5215	453	313,4		
Mai 82	5368	-	296,8		
	17529	2917	1067,3	134,3	5,52
Jun 82	5934	-	341,8		
Jul 82	5760	-	309,6		
Ago 82	5142	-	266,6		
	16836		918	115,5	4,6*
Set 82	1146		68,2		
Out 82	548		32,6		
Nov 82	5291		314,9		
	6985		415,7	52,8	1,9

* houve indicações de que devido a anomalias de funcionamento o caudal de gases teria sido cerca de 20% inferior ao normal.

CAPÍTULO 8

Conduta nº 3CNP

1982

Período	Fuel Consumido (m ³) Caldeira nº 3	Massa de SO ₂ emitida (ton)	Caudal de SO ₂ (g/s)	Velocidade de emissão (m/s)
Dez 81	-	-		
Jan 82	-	-		
Fev 82	862	43,9		
	862	43,9	5,6	0,77
Mar 82	3127	151,9		
Abr 82	5075	280,6		
Mai 82	4386	242,5		
	12588	675,0	84,9	3,40
Jun 82	4195	241,6		
Jul 82	5019	269,8		
Ago 82	2312	119,9		
	11526	631,3	79,4	3,1
Set 82	414	24,6		
Out 82	1515	90,2		
Nov 82	5382	320,4		
	7311	435,2	55,3	2,0

CAPÍTULO 8

8.3 Input Global para o Modelo T.C.M.

Os quadros das páginas seguintes sumarizam para cada estação do ano e para os anos de 1979 até 1982 - a que se refere esta investigação - os "input" utilizados para as simulações com o modelo T.C.M..

INVENTÁRIO DE EMISSÕES

T E X A S C L I M A T O L O G I C A L M O D E L

REFINARIA - CHAMINÉ

X = 141,19 km;

Y = 110,42 km

1 9 7 9

	Q (g/s)	u (m/s)	T (°C)	D (m)	h (m)		
					Monte Velho	Monte Chãos	Sonega
INVERNO	542	2,53	240	5,9	233	172	79
PRIMAVERA	2080	4,95	240	5,9	233	172	79
VERÃO	1383	3,02	240	5,9	233	172	79
OUTONO	1342	4,93	240	5,9	233	172	79

INVENTÁRIO DE EMISSÕES

T E X A S C L I M A T O L O G I C A L M O D E L

REFINARIA - CHAMINÉ

X = 141,19 Km;

Y = 110,42 Km

1 9 8 0

	Q (g/s)	u (m/s)	T (°C)	D (m)	h (m)		
					Monte Velho	Monte Chãos	Sonega
INVERNO	563	3,89	240	5,9	233	172	79
PRIMAVERA	390	3,11	240	5,9	233	172	79
VERÃO	446	4,02	240	5,9	233	172	79
OUTONO	413	3,75	240	5,9	233	172	79

INVENTÁRIO DE EMISSÕES

T E X A S C L I M A T O L O G I C A L M O D E L

REFINARIA - FLARE X = 141,45 Km;
Y = 110,22 Km

1 9 8 0

	Q (g/s)	u (m/s)	T (°C)	D (m)	h (m)		
					Monte Velho	Monte Chãos	Sonega
INVERNO	165	20	1000	4,8	120	61	-32/0
PRIMAVERA	529	20	1000	4,8	120	61	-32/0
VERÃO	355	20	1000	4,8	120	61	-32/0
OUTONO	298	20	1000	4,8	120	61	-32/0

INVENTÁRIO DE EMISSÕES

T E X A S C L I M A T O L O G I C A L M O D E L

REFINARIA - CHAMINÉ

X = 141,19 Km;

Y = 110,42 Km

1 9 8 1

	Q (g/s)	u (m/s)	T (°C)	D (m)	h (m)		
					Monte Velho	Monte Chãos	Sonega
INVERNO	314	3,64	240	5,9	233	172	79
PRIMAVERA	334	3,37	240	5,9	233	172	79
VERÃO	254	2,74	240	5,9	233	172	79
OUTONO	347	3,39	240	5,9	233	172	79

INVENTÁRIO DE EMISSÕES

T E X A S C L I M A T O L O G I C A L M O D E L

REFINARIA - FLARE X = 141,45 Km;
Y = 110,22 Km

1 9 8 1

	Q (g/s)	u (m/s)	T (°C)	D (m)	h (m)		
					Monte Velho	Monte Chãos	Sonega
INVERNO	255	20	1000	4,8	120	61	-32/0
PRIMAVERA	160	20	1000	4,8	120	61	-32/0
VERÃO	253	20	1000	4,8	120	61	-32/0
OUTONO	190	20	1000	4,8	120	61	-32/0

INVENTÁRIO DE EMISSÕES

T E X A S C L I M A T O L O G I C A L M O D E L

PETROQUÍMICA - CONDUTA Nº 1

X = 139,01 Km;

Y = 113,12 Km

1981

	Q (g/s)	u (m/s)	T (°C)	D (m)	h (m)		
					Monte Velho	Monte Chãos	Sonega
INVERNO	13,1	1,08	200	3,1	136	77	-16/0
PRIMAVERA	26,7	1,45	200	3,1	136	77	-16/0
VERÃO	25	1,36	200	3,1	136	77	-16/0
OUTONO	24,5	1,35	200	3,1	136	77	-16/0

INVENTÁRIO DE EMISSÕES

T E X A S C L I M A T O L O G I C A L M O D E L

PETROQUÍMICA - CONDUTA Nº 2

X = 139,01 Km;

Y = 113,12 Km

1 9 8 1

	Q (g/s)	u (m/s)	T (°C)	D (m)	h (m)		
					Monte Velho	Monte Chãos	Sonega
INVERNO	4,9	0,75	130	3,1	136	77	-16/0
PRIMAVERA	35,2	1,66	130	3,1	136	77	-16/0
VERÃO	105,9	5,0	130	3,1	136	77	-16/0
OUTONO	151,0	7,12	130	3,1	136	77	-16/0

INVENTÁRIO DE EMISSÕES

T E X A S C L I M A T O L O G I C A L M O D E L

PETROQUÍMICA - CONDUTA Nº 3

X = 139,01 Km;

Y = 113,12 Km

1 9 8 1

	Q (g/s)	u (m/s)	T (°C)	D (m)	h (m)		
					Monte Velho	Monte Chãos	Sonega
INVERNO	-			3,1	136	77	-16/0
PRIMAVERA	-			3,1	136	77	-16/0
VERÃO	-			3,1	136	77	-16/0
OUTONO	-			3,1	136	77	-16/0

INVENTÁRIO DE EMISSÕES

T E X A S C L I M A T O L O G I C A L M O D E L

REFINARIA - CHAMINÉ

X = 141,19 Km:

Y = 110,42 Km

1 9 8 2

	Q (g/s)	u(m/s)	T (°C)	D (m)	h (m)		
					Monte Velho	Monte Chãos	Sonoga
INVERNO	429	3,77	240	5,9	233	172	79
PRIMAVERA	432	3,85	240	5,9	233	172	79
VERÃO	335	3,44	240	5,9	233	172	79
OUTONO	219	2,24	240	5,9	233	172	79

INVENTÁRIO DE EMISSÕES

T E X A S C L I M A T O L O G I C A L M O D E L

REFINARIA FLARE

X = 141,45 Km;

Y = 110,22 Km

1 9 8 2

	Q (g/s)	u (m/s)	T (°C)	D (m)	h (m)		
					Monte Velho	Monte Chãos	Sonega
INVERNO	210	20	1000	4,8	120	61	-32/0
PRIMAVERA	281	20	1000	4,8	120	61	-32/0
VERÃO	173	20	1000	4,8	120	61	-32/0
OUTONO	139	20	1000	4,8	120	61	-32/0

INVENTÁRIO DE EMISSÕES

T E X A S C L I M A T O L O G I C A L M O D E L

PETROQUÍMICA - CONDUTA Nº 1

X = 139,01 Km;

Y = 113,12 Km

1 9 8 2

	Q (g/s)	u (m/s)	T (°C)	D (m)	h (m)		
					Monte Velho	Monte Chãos	Sonoga
INVERNO	32,5	1,79	200	3,1	136	77	-16/0
PRIMAVERA	25,7	1,31	200	3,1	136	77	-16/0
VERÃO	11,6	0,53	200	3,1	136	77	-16/0
OUTONO	20,2	0,90	200	3,1	136	77	-16/0

INVENTÁRIO DE EMISSÕES

T E X A S C L I M A T O L O G I C A L M O D E L

PETROQUÍMICA - CONDUTA Nº 2

X = 139,01 Km;

1 9 8 2

Y = 113,12 Km

	Q (g/s)	u (m/s)	T (°C)	D (m)	h (m)		
					Monte Velho	Monte Chãos	Sonega
INVERNO	167,2	7,14	130	3,1	136	77	-16/0
PRIMAVERA	134,3	5,52	130	3,1	136	77	-16/0
VERÃO	115,5	3,6	130	3,1	136	77	-16/0
OUTONO	52,8	1,9	130	3,1	136	77	-16/0

INVENTÁRIO DE EMISSÕES

T E X A S C L I M A T O L O G I C A L M O D E L

PETROQUÍMICA - CONDUITA Nº 3

X = 139,01 Km;

Y = 113,12 Km

1 9 8 2

	Q (g/s)	u (m/s)	T (°C)	D (m)	h (m)		
					Monte Velho	Monte Chãos	Sonega
INVERNO	5,6	0,77	130	3,1	136	77	-16/0
PRIMAVERA	84,9	3,4	130	3,1	136	77	-16/0
VERÃO	79,4	3,1	130	3,1	136	77	-16/0
OUTONO	55,3	2,0	130	3,1	136	77	-16/0

CAPÍTULO 9

SIMULAÇÕES MATEMÁTICAS COM O MODELO DE TRANSPORTE E DIFUSÃO DE GASES

Cria-se e investiga-se uma nova função de frequências meteorológicas, com novos valores mais adaptados à realidade da área.

Utiliza-se um refinamento relativo a alturas de emissão para garantir maior rigor nas previsões.

Simulam-se pela primeira vez na área as emissões poluentes de fábricas industriais.

Investigam-se os valores previstos pelo modelo durante os anos de 1979, 1980, 1981 e 1982 através da consideração de 55.000 cenários, sumarizados em cerca de 96 valores de concentrações trimestrais.

CAPÍTULO 9

9.1 Investigação das Concentrações Previstas pelo Texas Climatological Model, através de um Computador Univac 1100

Com base no estudo das tecnologias industriais e no inventário de emissões, cujos cálculos se explicitaram nos capítulos anteriores, foram efectuadas simulações com o Texas Climatological Model (TCM).

Com o modelo previram-se as concentrações médias trimestrais de dióxido de enxofre, para os 16 trimestres relativos a 1979, 1980, 1981 e 1982 e para as três estações de medida e região circundante.

9.1.1 Apuramento Metodológico

Visando um maior rigor nos cálculos, utilizou-se um processo mais apurado no tratamento geral do TCM, o qual consistiu em utilizar as alturas das chaminés, mas em relação às alturas das estações de recepção.

Assim, as variações topográficas do terreno puderam ser tidas em conta, o que, no caso da estação de Senega, se reveste de particular importância. Embora tal aspecto não seja relevante para o cálculo de concentrações médias para toda a área dado esta ser relativamente plana, reveste-se do maior interesse, conferindo considerável acréscimo de realismo e rigor, para a investigação em curso, que pretende calibrar o modelo e comparar os valores previstos com os observados em três pontos específicos situando-se dois deles em ligeiras elevações da Área. Julga-se que quaisquer procedimentos futuros de calibração de modelos na Área não deverão nun-

CAPÍTULO 9

ca ignorar este aspecto que, aliás, o autor debateu largamente com os técnicos do Texas Air Control Board e com um dos autores do modelo, Mr. Richard Porter.

A única desvantagem deste processo reside no maior tempo de computador dispendido, pois as alturas dos emissores são diferentes em relação aos nossos três receptores.

Nestas condições, foram efectuadas 48 simulações de computador (16 trimestres x 3 estações) para cálculo das concentrações médias, ponderadas através das frequências de observações de 576 situações meteorológicas (16 direcções de vento, 6 classes de velocidade de vento e 6 classes de estabilidade) para cada uma das 48 simulações.

Tratou-se, portanto, de investigar 27.648 situações conjuntas, de meteorologia e de emissões específicas, sintetizando-as em 48 valores de concentrações médias trimestrais.*

Na prática, o número de simulações foi exactamente o dobro, isto é, 55.296 porque resolvemos aplicar a todos os casos referidos, dois tipos de meteorologia. Vejamos em pormenor esta questão.

* Utilizou-se um computador UNIVAC modelo 1100

CAPÍTULO 9

9.1.2 Criação de Novas Funções de Frequências para as Quatro Estações do Ano em Sines.O Programa STARCAN.

Quando se iniciou o esforço do lançamento do Complexo de Sines e da simulação das suas emissões atmosféricas, não se dispunha de dados precisos sobre as frequências de ocorrência de ventos distribuídos pelas classes de direcção e velocidade necessárias aos modelos e já atrás referidas.

Para obviar a esse problema, a meteorologia utilizada nas simulações, foi a observada durante anos em Lisboa e resumida no programa "STAR" do National Weather Service dos E.U.A..

Efectivamente, peritos nacionais e internacionais manifestaram-se pela validade deste procedimento inicial dado que tanto Lisboa como Sines se situam junto da costa e porque, em termos de escala meteorológica, a distância entre elas não é grande, e as diferenças de meteorologia não seriam radicais.

Nesta dissertação tentou-se dar um passo em frente, - se bem que não fosse possível ainda atingir o ponto ideal por inexistência de parte das observações meteorológicas necessárias - procurando-se ir mais longe tendo em conta, além das frequências de Lisboa e das frequências de Sines entretanto observadas e calculadas para os anos 1978, 1979 e 1980 (125), o último conjunto de dados completos disponível.

Trata-se dum conjunto de cerca de 25.000 observações relativas aos anos de 1978, 1979, 1980, 1981 e 1982 gentilmente cedidas pelo GAS através da equipa da sua Divisão de Informática e Matemáticas Aplicadas em especial pelo esforço do Dr. Pedro Sousa e Silva.

CAPÍTULO 9

Não dispondo, contudo, - por inexistência das relativamente complexas, sofisticadas e caras medições - das frequências de ocorrências das classes de estabilidade em Sines, o autor desenvolveu um procedimento de cálculo dum novo programa STAR - bastante mais próximo da realidade meteorológica de Sines - através das frequências de direcção e velocidade disponíveis, já relativas a Sines, embora considerando que as classes de estabilidade seriam distribuídas como em Lisboa proporcionalmente às frequências de ocorrência dos ventos nas mesmas direcções/velocidades.

Calcularam-se então primeiramente as frequências de direcções/velocidades de vento para Sines adaptadas a uma comparação com as do programa STAR de Lisboa e agrupando os 25.000 dados com cerca de 400 valores de frequências. O STAR de Lisboa foi seguidamente afectado por 384 parâmetros de relação linear de frequências de observação das direcções/velocidades de vento Sines/Lisboa para as 4 estações do ano e através de 2.500 cálculos lineares, determinaram-se 4 novas funções de frequências da meteorologia de Sines, cuja proximidade das realidades de Sines é bastante maior - programa de meteorologia que denominamos por STAR CAN (126).

Este procedimento representa o maior esforço executável, no presente estado de conhecimento da meteorologia de Sines, em ordem a aumentar o rigor das previsões com os modelos de simulação.

Em anos vindouros, à medida que os ensaios se forem efectuando e se dispuser de cada vez maior número de observações, novos programas STAR deverão ser calculados melhorando assim o input do modelo naquilo que concerne ao valor e rigor dos dados meteorológicos.

CAPÍTULO 9

Esta a razão por que o número de cenários investigados foi de 55.296 e não de metade, e porque se dispõe de 96 concentrações trimestrais em vez de 48.

Os quadros 9I a 9/III são representativos de alguns dos cerca de 2.500 valores das funções de frequências calculadas para as diferentes estações do ano*.

* No "output" do TCM as frequências correspondentes à classe D aparecem na coluna DD; as correspondentes à classe E na coluna DN e as de classe F na coluna E+F.

QUADRO 9.1

STARCAN

INVERNO

N A 0.000010.000000.000000.000000.000000.000000
NNE A 0.000100.000000.000000.000000.000000.000000
NE A 0.000000.000000.000000.000000.000000.000000
ENE A 0.000000.000000.000000.000000.000000.000000
E A 0.000000.000000.000000.000000.000000.000000
ESE A 0.000030.000000.000000.000000.000000.000000
SE A 0.000110.000000.000000.000000.000000.000000
SSE A 0.000020.000000.000000.000000.000000.000000
S A 0.000030.000000.000000.000000.000000.000000
SSW A 0.000010.000000.000000.000000.000000.000000
SW A 0.000000.000000.000000.000000.000000.000000
WSW A 0.000000.000000.000000.000000.000000.000000
W A 0.000010.000000.000000.000000.000000.000000
WNW A 0.000020.000000.000000.000000.000000.000000
NW A 0.000010.000000.000000.000000.000000.000000
NNW A 0.000000.000000.000000.000000.000000.000000
N B 0.000310.000170.000000.000000.000000.000000
NNE B 0.002100.000100.000000.000000.000000.000000
NE B 0.000250.000040.000000.000000.000000.000000
ENE B 0.000360.000150.000000.000000.000000.000000
E B 0.000370.000400.000000.000000.000000.000000
ESE B 0.000220.000230.000000.000000.000000.000000
SE B 0.000000.000000.000000.000000.000000.000000
SSE B 0.000000.000000.000000.000000.000000.000000
S B 0.000000.000000.000000.000000.000000.000000

QUADRO 9.III

STARCAN

INVERNO

NE D 0.000210.001560.005280.007920.002040.00016
ENE D 0.000330.001720.006530.012820.001700.00038
E D 0.000370.004210.016300.026210.006220.00173
ESE D 0.000450.003940.021210.013390.003580.00031
SE D 0.000470.003580.009300.005280.001320.00031
SSE D 0.000450.002110.009710.012820.003200.00110
S D 0.000730.002090.012400.020170.014520.01584
SSW D 0.000150.001160.004430.010560.008670.01263
SW D 0.000050.001260.006050.019230.010560.01018
WSW D 0.000030.000800.004730.021870.008300.00811
W D 0.000250.000990.000750.017720.011510.00830
WNW D 0.000380.001160.005510.009610.004340.00471
NW D 0.000110.002140.011330.023000.010180.00679
NNW D 0.000040.001240.013200.029790.016030.00905
N E 0.000000.003330.027760.000000.000000.00000
NNE E 0.000000.001520.026440.000000.000000.00000
NE E 0.000000.001230.011610.000000.000000.00000
ENE E 0.000000.001180.005980.000000.000000.00000
E E 0.000000.002840.004010.000000.000000.00000
ESE E 0.000000.004640.000000.000000.000000.00000
SE E 0.000000.005570.002320.000000.000000.00000
SSE E 0.000000.002710.000840.000000.000000.00000
S E 0.000000.001610.000230.000000.000000.00000
SSW E 0.000000.001860.000850.000000.000000.00000
SW E 0.000000.001740.000800.000000.000000.00000

QUADRO 9. IV
STARCAN

INVERNO

WSW E 0.000000.001680.000420.000000.000000.000000
W E 0.000000.002940.002120.000000.000000.000000
WNW E 0.000000.003470.002600.000000.000000.000000
NW E 0.000000.003610.004650.000000.000000.000000
NNW E 0.000000.001800.012710.000000.000000.000000
N F 0.002220.012890.000000.000000.000000.000000
NNE F 0.016400.011220.000000.000000.000000.000000
NE F 0.001070.008750.000000.000000.000000.000000
ENE F 0.000770.004350.000000.000000.000000.000000
E F 0.000680.004430.000000.000000.000000.000000
ESE F 0.000820.002090.000000.000000.000000.000000
SE F 0.000110.000800.000000.000000.000000.000000
SSE F 0.000670.000300.000000.000000.000000.000000
S F 0.000870.000640.000000.000000.000000.000000
SSW F 0.000130.000700.000000.000000.000000.000000
SW F 0.000100.000580.000000.000000.000000.000000
WSW F 0.000110.001020.000000.000000.000000.000000
W F 0.000910.001910.000000.000000.000000.000000
WNW F 0.000530.002320.000000.000000.000000.000000
NW F 0.000690.004280.000000.000000.000000.000000
NNW F 0.000310.004770.000000.000000.000000.000000

QUADRO 9.V

STARCAN

PRIMAVERA

N A 0.000460.000230.000000.000000.000000.000000
NNE A 0.000040.000100.000000.000000.000000.000000
NE A 0.000050.000090.000000.000000.000000.000000
ENE A 0.000190.000130.000000.000000.000000.000000
E A 0.000450.000280.000000.000000.000000.000000
ESE A 0.000080.000180.000000.000000.000000.000000
SE A 0.000120.000430.000000.000000.000000.000000
SSE A 0.000000.000000.000000.000000.000000.000000
S A 0.000940.000290.000000.000000.000000.000000
SSW A 0.000000.000000.000000.000000.000000.000000
SW A 0.000000.000000.000000.000000.000000.000000
WSW A 0.000000.000000.000000.000000.000000.000000
W A 0.000030.000070.000000.000000.000000.000000
WNW A 0.000000.000000.000000.000000.000000.000000
NW A 0.000000.000000.000000.000000.000000.000000
NNW A 0.000000.000000.000000.000000.000000.000000
N B 0.001350.001710.000670.000000.000000.000000
NNE B 0.000480.001050.001410.000000.000000.000000
NE B 0.000200.000470.000000.000000.000000.000000
ENE B 0.000620.000860.000160.000000.000000.000000
E B 0.001170.002160.000700.000000.000000.000000
ESE B 0.000850.002820.000270.000000.000000.000000
SE B 0.000340.000850.000000.000000.000000.000000
SSE B 0.000430.001050.000000.000000.000000.000000

QUADRO 9.VI

STARCAN

PRIMAVERA

S B 0.000680.000500.000480.000000.000000.000000
 SSW B 0.000280.000380.000000.000000.000000.000000
 SW B 0.000020.000280.000300.000000.000000.000000
 WSW B 0.000220.000110.000150.000000.000000.000000
 W B 0.000390.000550.000100.000000.000000.000000
 WNW B 0.000340.000000.000000.000000.000000.000000
 NW B 0.000260.000490.000000.000000.000000.000000
 NNW B 0.000250.000810.000500.000000.000000.000000
 N C 0.000820.002340.008280.005960.001190.000000
 NNE C 0.000480.002380.006820.002430.000140.000000
 NE C 0.000450.001540.001500.000000.000000.000000
 ENE C 0.000260.000830.002270.000140.000000.000000
 E C 0.000260.001150.004320.000000.000000.000005
 ESE C 0.000260.000700.001370.000000.000080.000000
 SE C 0.000070.001280.000210.000000.000030.000003
 SSE C 0.000640.001840.001730.000000.000000.000008
 S C 0.000140.001500.000970.000000.000630.000000
 SSW C 0.000560.000750.000000.000000.000000.000000
 SW C 0.000090.001680.000910.000230.000130.000000
 WSW C 0.000520.000760.001790.000000.000000.000420
 W C 0.000350.001190.001500.000620.000000.000000
 WNW C 0.000260.001360.002770.000000.000000.000000
 NW C 0.000190.000840.003710.000560.003020.000000
 NNW C 0.000360.001620.003150.000280.003620.000000

QUADRO 9.VII

STARCAN

PRIMAVERA

N D 0.000550.002340.013050.069560.022920.00766
 NNE D 0.000140.001240.003990.009230.000820.00000
 NE D 0.000120.000930.001240.005430.000160.00000
 ENE D 0.000070.000830.001550.003210.000000.00000
 E D 0.000640.001610.003730.005430.000640.00027
 ESE D 0.000090.002110.003830.003830.000400.00000
 SE D 0.000100.003840.003310.002870.000130.00013
 SSE D 0.000250.002890.004500.004470.002240.00040
 S D 0.000610.006510.014030.021710.006880.00559
 SSW D 0.000060.002250.008980.022990.003510.00112
 SW D 0.000420.002520.010970.016060.003220.00128
 WSW D 0.000770.002520.014460.020600.004470.00166
 W D 0.000250.004020.011690.022380.003350.00176
 WNW D 0.000230.002320.016100.034010.005270.00192
 NW D 0.000120.002250.018530.076880.042310.02219
 NNW D 0.000230.001620.011790.065040.022870.00862
 N E 0.000000.002000.014890.000000.000000.00000
 NNE E 0.000000.000860.005170.000000.000000.00000
 NE E 0.000000.000790.001410.000000.000000.00000
 ENE E 0.000000.000830.000650.000000.000000.00000
 E E 0.000000.000740.000350.000000.000000.00000
 ESE E 0.000000.001060.000270.000000.000000.00000
 SE E 0.000000.000850.000000.000000.000000.00000
 SSE E 0.000000.001840.000000.000000.000000.00000

QUADRO 9. VIII

STARCAN

PRIMAVERA

S E 0.000000.003760.000480.000000.000000.000000
SSW E 0.000000.002250.002990.000000.000000.000000
SW E 0.000000.003630.001220.000000.000000.000000
WSW E 0.000000.003830.001490.000000.000000.000000
W E 0.000000.005120.002990.000000.000000.000000
WNW E 0.000000.003270.006040.000000.000000.000000
NW E 0.000000.002670.010340.000000.000000.000000
NNW E 0.000000.001450.009630.000000.000000.000000
N F 0.002880.007020.000000.000000.000000.000000
NNE F 0.000630.003330.000000.000000.000000.000000
NE F 0.000770.001450.000000.000000.000000.000000
ENE F 0.000340.000500.000000.000000.000000.000000
E F 0.000550.000460.000000.000000.000000.000000
ESE F 0.000800.000000.000000.000000.000000.000000
SE F 0.000330.000070.000000.000000.000000.000000
SSE F 0.000590.000530.000000.000000.000000.000000
S F 0.001300.000250.000000.000000.000000.000000
SSW F 0.001180.001880.000000.000000.000000.000000
SW F 0.000440.000840.000000.000000.000000.000000
MSW F 0.001030.002190.000000.000000.000000.000000
W F 0.001590.004840.000000.000000.000000.000000
WNW F 0.001250.004230.000000.000000.000000.000000
NW F 0.001020.003650.000000.000000.000000.000000
NNW F 0.001070.002490.000000.000000.000000.000000

CAPÍTULO 9

9.2 "Output" do Computador

As cerca de 500 páginas de dados que apresentam os resultados das simulações que efectuámos com o TCM durante os 4 anos e que constituem o "output" do computador, são ilustradas no seu tipo apenas nas 4 páginas seguintes, de modo a não alongar o volume desta dissertação.

Concentrações Previstas

MONTE CHÃOS

Verão - 1979 (STARCAN)

	137.7		137.9		138.1		138.3		138.5
111.5	1	1	1	1	1	1	1	1	1
111.4	1	1	1	1	1	1	1	1	1
111.3	1	1	1	1	1	1	1	1	1
111.2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
111.1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
111.0	2	2	2	2	2	1	1	1	1
110.9	2	2	2	2	2	2	2	2	2
110.8	2	2	2	2	2	2	2	2	2
110.7	2	2	2	2	2	2	2	2	2
110.6	2	2	2	2	2	2	2	2	2
110.5	2	2	2	2	2	2	2	2	2
110.4	2	2	2	2	2	2	2	2	2
110.3	2	2	2	2	2	2	2	2	2
110.2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
110.1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
110	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Concentrações Previstas

MONTE CHAOS

Outono 1980 (STARCAN)

	137.7	137.9	138.1	138.3	138.5	138.7
111.2	2	2	2	2	2	3
111.1	2	2	2	2	2	3
111.0	5	5	2	2	2	3
110.9	7	5	5	5	5	3
110.8	7	7	7	7	5	5
110.7	7	7	7	7	7	7
110.6	7	7	7	7	7	7
110.5	7	7	7	7	7	7
110.4	7	7	7	7	7	7
110.3	7	7	7	7	7	7
110.2	7	7	7	7	7	7
110.1	7	7	7	7	7	7
110.0	7	7	7	7	7	7

Concentrações Previstas

Monte Chãos

Outono 1981 (STARCAN)

	137.7		137.9		138.1		138.3		138.5		138.7	
111.4	3	3	6	6	6	6	6	6	6	6	6	8
111.3	3	5	6	6	6	6	6	6	6	6	6	8
111.2	3	5	5	5	6	6	6	6	6	6	8	8
111.1	5	5	5	5	5	5	6	6	6	6	8	8
111.0	8	8	8	5	5	5	6	6	6	6	9	8
110.9	9	8	8	8	8	8	8	8	8	6	9	9
110.8	9	9	9	9	9	9	8	8	8	8	11	11
110.7	9	9	9	9	9	9	9	9	9	13	13	13
110.6	9	9	9	9	9	9	9	9	9	13	13	13
110.5	9	9	9	9	9	9	9	9	9	13	13	13
110.4	9	9	9	9	9	9	9	9	9	13	13	13
110.3	8	8	9	9	9	9	9	9	9	13	13	13
110.2	8	8	8	8	9	9	9	9	13	13	13	13
110.1	8	8	8	8	8	8	8	8	12	12	13	13
110.0	8	8	8	8	8	8	8	8	12	12	12	12

Concentrações Previstas

MONTE CHÃOS

VERÃO 1982 (STARCAN)

	137.7		137.9		138.1		138.3		138.5		138.7	
111.4	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	17
111.3	1	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	17
111.2	1	2	2	2	3	3	3	3	3	3	17	17
111.1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	17	17
111.0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	15	17
110.9	3	2	2	2	2	3	3	3	3	2	15	15
110.8	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	15	15
110.7	3	3	3	3	3	3	3	3	3	15	15	15
110.6	3	3	3	3	3	3	3	3	3	15	15	15
110.5	3	3	3	3	3	3	3	3	3	15	15	15
110.4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	15	15	15
110.3	2	2	3	3	3	3	3	3	3	15	15	15
110.2	2	2	2	2	3	3	3	3	15	15	15	15
110.1	2	2	2	2	2	2	2	2	13	13	15	15
110.0	2	2	2	2	2	2	2	2	13	13	13	13

CAPÍTULO 9

9.3 Resultados Finais das Simulações Matemáticas

No quadro 9.IX estão finalmente referidas as concentrações médias previstas para os 4 anos de investigação nas 3 estações com os dados meteorológicos provenientes do STAR e do STARCAN. Essas concentrações estão expressas graficamente nas figuras 9.1 e 9.2.

Resta-nos, no capítulo seguinte, construir a envolvente global desta dissertação, ao comparar os resultados previstos pelo modelo através de 55.296 cenários de meteorologia e emissões com os 105.120 resultados das medições efectuadas na realidade.

A análise estatística dos valores dos 16 trimestres ao longo dos 4 anos, para as 3 estações com os dois conjuntos de dados meteorológicos usados, constituirá o cerne dos resultados da investigação desenvolvida.

CAPÍTULO 9

QUADRO 9.IX

CONCENTRAÇÕES MÉDIAS PREVISTAS PARA
SINES COM O TCM

	1979		1980		1981		1982		
	STAR	STARCAN	STAR	STARCAN	STAR	STARCAN	STAR	STARCAN	
Inverno	-	-	-	-	1	2	2	2	Monte Velho
Primavera	-	-	2	3	3	4	3	4	
Verão	-	-	2	3	4	5	-	-	
Outono	-	-	2	2	3	4	3	3	
Inverno	3	1	4	2	3	2	5	4	Monte Chãos
Primavera	11	5	5	2	4	2	7	5	
Verão	5	2	3	1	3	2	4	2	
Outono	-	-	6	7	6	8	5	7	
Inverno	3	3	3	4	1	3	1	3	Sonega
Primavera	10	30	4	10	4	9	7	18	
Verão	8	31	4	13	4	16	5	20	
Outono	4	8	3	4	3	6	4	6	

CONCENTRAÇÕES MÉDIAS
PREVISTAS EM SINES
(SO₂ - $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$)

Fig. 9.1 - CONCENTRAÇÕES MÉDIAS PREVISTAS
EM SINES (STARCAN)

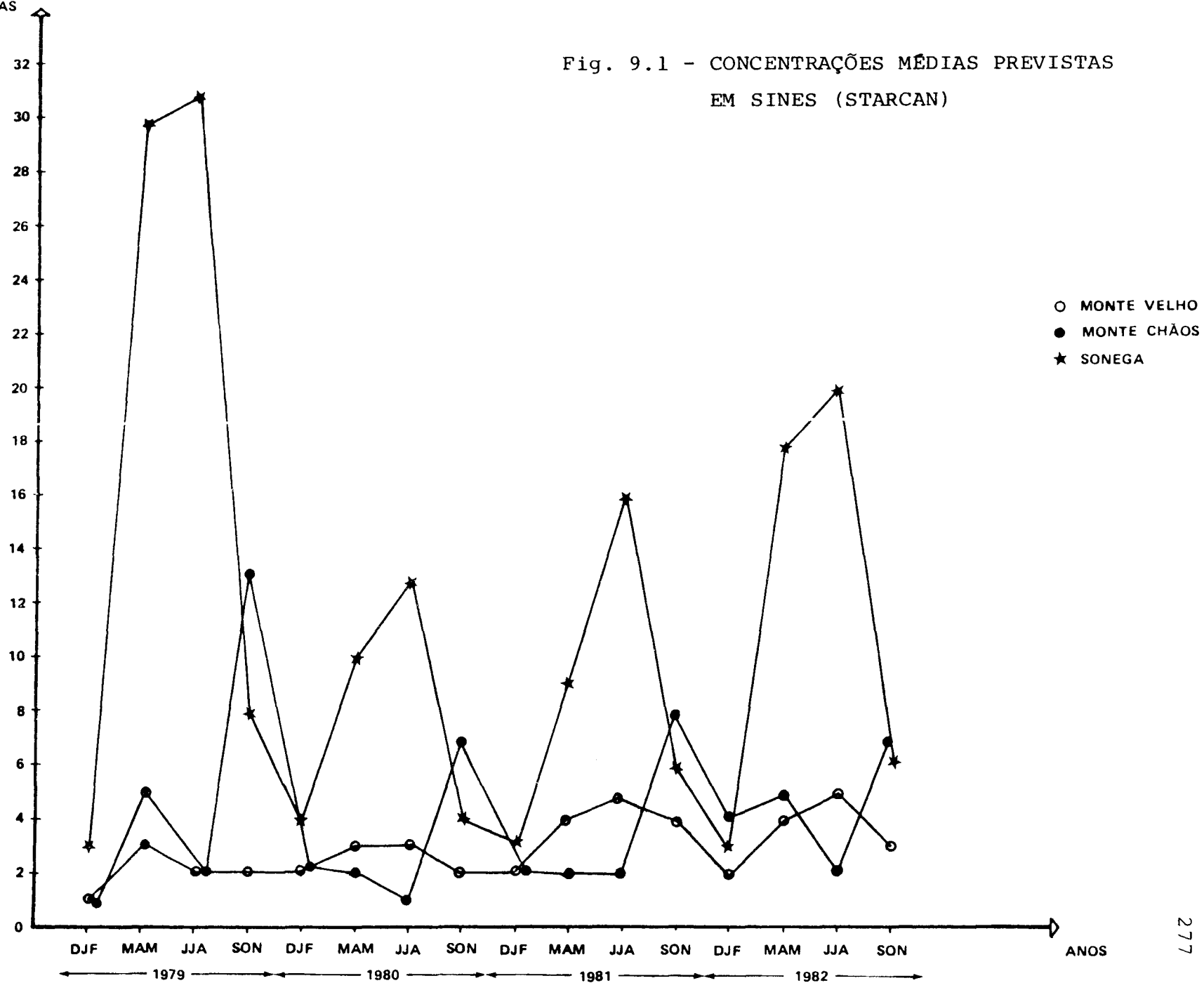
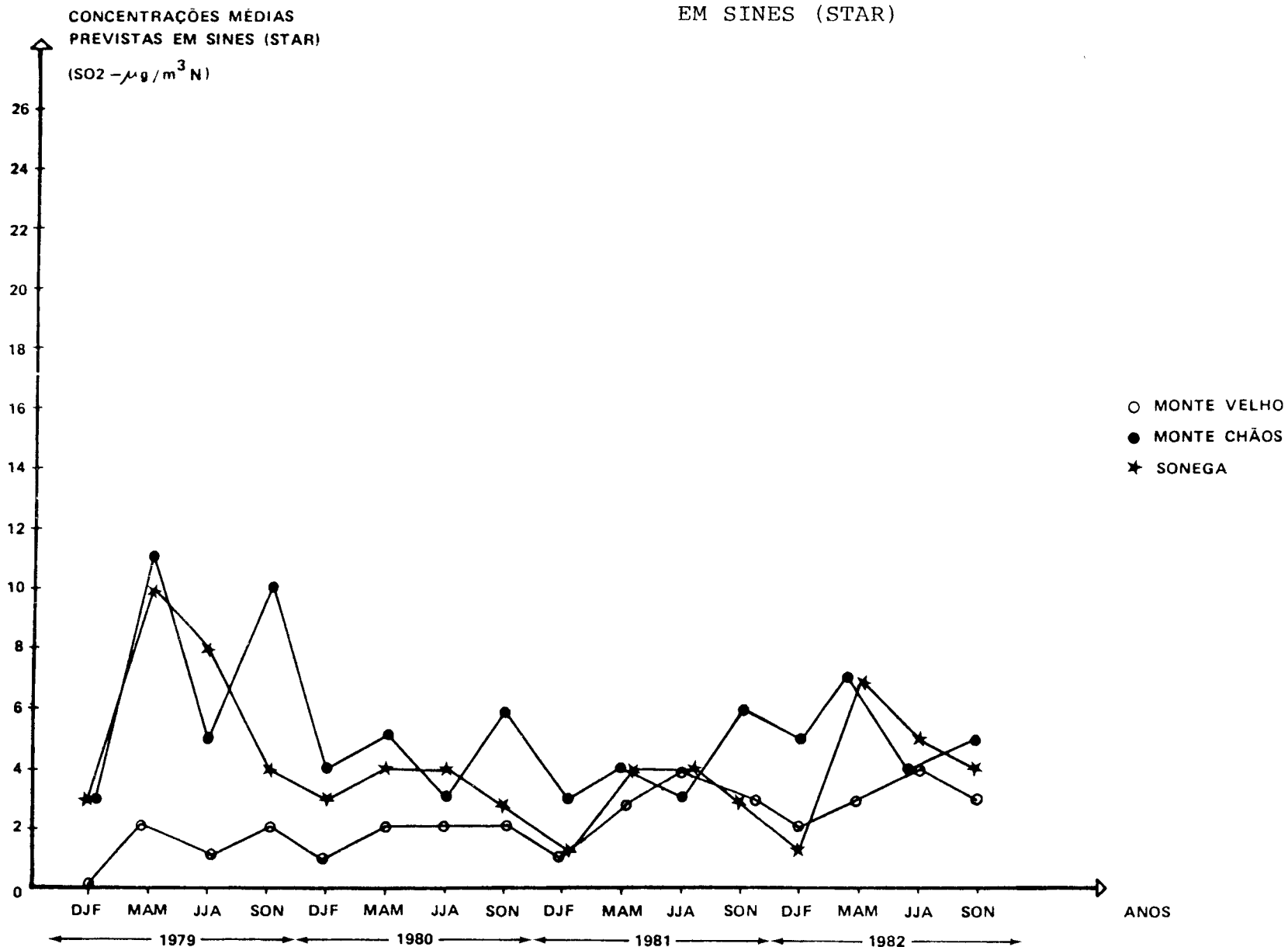


Figura 9.2 - CONCENTRAÇÕES MÉDIAS PREVISTAS
EM SINES (STAR)



CAPÍTULO 10

AVALIAÇÃO E CALIBRAÇÃO DO TEXAS CLIMATOLOGICAL MODEL

Analisa-se a problemática actual da avaliação, calibração e validação dos modelos gaussianos de simulação do transporte e difusão de gases na atmosfera.

Comparam-se, finalmente, os valores observados experimentalmente com os valores previstos pelo modelo, para os quatro anos a que se refere esta investigação.

Apresenta-se a calibração do modelo e avalia-se a sua "performance".

CAPÍTULO 10

10.1 O Problema da Avaliação e Validação dos Modelos da Simulação do Transporte e Difusão de Gases na Atmosfera

Durante a última década, em especial devido à necessidade de controlo e previsão dos níveis crescentes de poluentes atmosféricos nas regiões mais desenvolvidas, foram criados numerosos modelos que, embora com objectivos comuns, se procuravam adaptar a diferentes aspectos da problemática da poluição do ar.

Assim se desenvolveram modelos para poluentes tais como o dióxido de enxofre, procurando traduzir o comportamento relativamente estável deste poluente na atmosfera e, para partículas em suspensão, com introdução de parâmetros indicativos de fenómenos de deposição. Para além daqueles que procuram traduzir o comportamento de gases sujeitos a reacções na atmosfera, tais como os hidrocarbonetos e o ozono.

E se, em certas regiões, o interesse principal está no cálculo das concentrações de curto prazo (até 24 horas) noutras estará nas de longo prazo (anuais), ou na sua comparação com níveis "standard" expressos através de máximos aceitáveis para protecção da saúde das populações e flora.

Todo este esforço de análise dos fenómenos físicos, químicos e meteorológicos, que se procurou exprimir na produção de algoritmos, não tem sido acompanhado de esforço adequado na zona da validação completa das previsões efectuadas.

De entre as razões principais para o facto, uma primeira é precisamente a diversidade de situações em jogo; uma segunda razão é a quantidade assinalável de recursos humanos e materiais

CAPÍTULO 10

que há que disponibilizar para realizar as determinações experimentais e efectuar os inventários de emissões e as simulações em computador; uma terceira razão é a própria complexidade e dificuldade na realização do inventário de emissões, - em zonas urbanas e industriais de grande densidade, - com um mínimo de garantias de realismo e precisão. Para já não referir as dificuldades relacionadas com a inexistência de adequados dados físicos ou meteorológicos e as de natureza sociopolítica.

Assiste-se então actualmente - por via do reconhecimento dessa lacuna - a um esforço assinalável, no sentido de reunir um consenso sobre quais os indicadores a utilizar para caracterizar a "performance" dos modelos e quais os valores ou gamas de valores que esses indicadores devem atingir para os modelos se considerarem válidos.

Deve-se assim referir, que têm existido algumas tentativas para avaliação dos modelos bem como juízos de valor ou recomendações sobre a sua "performance" (110, 127, 128, 129, 130, 131, 138, 139, 140), mas não validações completas de modelos específicos, efectuadas, ou aceites como válidas, pelas agências governamentais responsáveis.

Por exemplo, a Environmental Protection Agency desenvolve desde 1979 esforços intensos (27, 133) para, em colaboração com a American Meteorological Society, especificar os indicadores que devem ser utilizados para esse fim.

Existem, já, algumas recomendações preliminares bem como contribuições e análises detalhadas, numa excelente publicação (135) da American Meteorological Society, esperando-se contudo ainda a formação dum consenso sobre este complexo assunto.

CAPÍTULO 10

Após essa fase, poder-se-á dar seguimento a programas exaustivos, de continuação dos trabalhos de avaliação já desenvolvidos, de acordo então com as normas entretanto estabelecidas.

Dum modo resumido, pode dizer-se que na avaliação dum modelo se procuram desenvolver as múltiplas acções de análise até se poder efectuar a da compatibilidade dos resultados previstos com os medidos experimentalmente, enquanto que na validação se deverá ir ainda mais longe, efectuando medições físicas e meteorológicas exaustivas e dispendiosas (determinações por sondagem dos perfis de vento em altitude, temperaturas, inversões e medições dos parâmetros λ_z e σ_y da difusão vertical e horizontal, envolvendo eventualmente aeronaves e outros meios), bem como avaliações e calibrações em diferentes regiões geográficas.

Para a validação completa dum modelo haverá que, para além do atrás referido:

- a) Comparar as concentrações estimadas com as determinadas experimentalmente (para várias regiões).
- b) Procurar determinar as causas das discrepâncias.
- c) Melhorar as bases de dados (físicos, químicos, meteorológicos ou das emissões).
- d) Se necessário, com base nesses dados sugerir modificações ao modelo.
- e) Documentar os testes estatísticos utilizados na avaliação, para permitir a outros investigadores comparação posterior de resultados.

CAPÍTULO 10

É pela dimensão destes programas e dificuldades - só exequíveis na sua totalidade, no futuro, por organizações de âmbito nacional, de alguns países - que se tem revelado extremamente útil efectuar, quando possível, avaliações da "performance" dos modelos, e introdução de factores correctivos que calibram o modelo, adaptando, com carácter sistemático, as previsões às observações.

Os procedimentos de avaliação dum modelo - face à comparação estabelecida entre os resultados observados e os previstos - conduzem a uma primeira decisão de fundamental importância que é a sua rejeição ou aceitação e, neste último caso, representam portanto um passo importante, para corrigir e aumentar a exactidão de futuras previsões numa área geográfica específica: com todas as consequências positivas quer em termos de balanço estritamente económico quer de qualidade de vida para as populações da região.

Um excelente ponto de situação e sugestões positivas são efectuadas por Fox (136) e Bowne (137).

CAPÍTULO 10

10.2 Investigações Anteriores

A United States Environmental Protection Agency espera pois, que seja possível estabelecer um consenso sobre os indicadores estatísticos a aplicar aos procedimentos de validação, para dentro de alguns anos se poderem concluir os primeiros trabalhos definitivos de validação.

Neste contexto, é porque as avaliações da "performance" de modelos exigem também mobilização de recursos sensíveis, encontram-se descritos na bibliografia alguns estudos - em número relativamente pequeno - de avaliações e calibrações para áreas geográficas específicas.

Mais vulgares são as comparações entre resultados previstos pelas simulações com vários modelos.

De entre trabalhos de calibração descritos na bibliografia (110, 127, 128, 129, 130, 131, 138, 139, 140) selecionamos para análise os que dizem respeito a condições semelhantes às nossas e que portanto permitem estabelecer algumas comparações:

- a) Simulações efectuadas com o próprio Texas Climatological Model (TCM) ou com os modelos análogos - o Climatological Dispersion Model (CDM) e o Air Quality Display Model (A.Q.D.M.)
- b) Simulações para previsão de concentrações de dióxido de enxofre.
- c) Simulações para previsão de concentrações trimestrais ou anuais, mas não diárias.
- d) Simulações em regiões relativamente planas.

CAPÍTULO 10

10.2.1 Investigação de Koch e Fisher (138) em Nova York.

Em 1973 é publicado por estes investigadores, no seguimento de estudos anteriores (1971) para St. Louis e Chicago, o desenvolvimento dum programa para a cidade de Nova York.

Foram observadas e estimadas as concentrações anuais de dióxido de enxofre utilizando os modelos CDM e AQDM - além doutros - baseados em meteorologia dos aeroportos da cidade.

Os resultados obtidos encontram-se sumarizados no Quadro 10.I.

10.2.2 Investigação de Braig (139) em Frankfurt

Em 1975 Braig apresentou os resultados do estudo efectuado na cidade de Frankfurt sobre a relação entre as concentrações observadas e as previstas, estabelecidas por três modelos: o A.Q.D.M., o C.D.M. e o A.T.D.L..

Os resultados obtidos estão sumarizados no Quadro 10.II.

10.2.3 Investigação de Porter e Christiansen (110) em Frankfurt

Em 1976 Porter (um dos autores do T.C.M.) reporta a aplicação do TCM à área de Frankfurt, mas na sua comunicação apenas se apresenta o valor das linhas previstas de igual concentração e não a comparação com as observadas.

Porter e Christiansen indicam contudo a obtenção de coeficientes de correlação de rectas de regressão de 0,89 e 0,62, embora na avaliação do TCM para partículas em suspensão, na região de Houston.

CAPÍTULO 10

QUADRO 10.I

RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO E AVALIAÇÃO DE KOCH
E FISHER (1973), PARA O DIÓXIDO DE ENXOFRE EM
NOVA YORK.

CONCENTRAÇÕES

	CDM	AQDM
Nº de comparações	75	75
Ordenada na origem da recta de regressão	35	31
Inclinação da recta	0,66	0,45
Coefficiente de correlação	0,84	0,89
Média observada ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	135	135
Média calculada ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	138	211
Máximo erro negativo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	-118	-87
Máximo erro positivo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	166	310

CAPÍTULO 10

QUADRO 10.II

RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO E AVALIAÇÃO DE
BRAIG (1975) PARA DIÓXIDO DE ENXOFRE EM
FRANKFURT

	<u>CONCENTRAÇÕES</u>			OBSERVADA
	CDM	AQDM	ATDL	
Concentração média para todas as estações ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	70	95	116	92
Desvio padrão	20,5	19,6	16	20,8
Ordenada na origem da recta de regressão	55,2	46,1	39,5	
Inclinação da recta	0,52	0,48	0,45	
Coefficiente de correlação	0,49	0,45	0,39	
Máximo erro negativo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	- 74	- 52	- 8	
Máximo erro positivo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24	49	61	

CAPÍTULO 10

10.2.4 Investigação de Prahm e Christensen (140) em Copenhaga

Em 1977 estes autores apresentaram um estudo, de comparação das concentrações observadas com as previstas pelo CDM, para períodos de 3 meses, em Copenhaga.

O estudo contempla variantes diversas do modelo, com introdução de diferentes valores dos coeficientes σ e do tempo de vida média do poluente em 9 cenários diferentes.

O Quadro 10.III, sumariza os resultados e evidencia que estes são pouco sensíveis a essas variações introduzidas.

QUADRO 10.III

RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO E AVALIAÇÃO DE PRAHM
E CHRISTENSEN (1977) PARA O DIOXIDO DE ENXOFRE
EM COPENHAGA

CDM

CENÁRIOS COM DIFERENTES σ E $T_{1/2}$

	1a	1b	2a	2b	2c	3a	3b	3c	4a	4b	5a	5b	6a	6b	7a	7b	8a	8b	9a	9b
r^2	0,64	0,63	0,64	0,63	0,62	0,64	0,63	0,61	0,66	0,65	0,66	0,65	0,64	0,62	0,66	0,65	0,66	0,65	0,64	0,62
Inclinação da recta de re- gressão	0,74	0,79	0,82	0,84	0,88	0,92	0,93	0,98	0,87	0,92	0,96	1.2	0,87	0,93	0,54	0,57	0,6	0,64	0,72	0,76
Ordenada na origem	40	43	35	38	40	32	36	39	33	37	31	35	39	42	39	42	37	40	37	40

CAPÍTULO 10

10.3 A Investigação de Sines de 1979 a 1982

Tendo como objectivos principais a avaliação e calibração do T.C.M. para a Área de Sines, no sentido de - dentro dos limites exequíveis neste momento - aproximar as suas previsões à realidade observada e portanto otimizar alturas das chaminés e o rigor na previsão das concentrações futuras, a investigação de Sines tentou avançar com mais alguns dos passos possíveis, na óptica mais ampla, das medidas sugeridas para validação do modelo explicitadas em 10.1 alíneas a), b), c) e e).

Assim, para além da base de dados meteorológicos até aqui utilizada na Área, produziu-se uma nova base, melhorada, muito mais próxima da realidade de Sines (recomendação citada em 10.1 alínea c)).

Introduziram-se refinamentos metodológicos que adequam as previsões do modelo às peculiaridades topográficas das estações de medida (10.1 alínea c)).

Procurou-se explicar, entre outras, discrepâncias aparentes nos resultados da estação de Monte Velho através de esforços adicionais de modelização de contributos poluentes, provenientes do exterior da Área e inicialmente não esperados (10.1 alínea b)).

Tentou-se aplicar, na máxima extensão possível, o sugerido na alínea e), através das recomendações recentes sobre testes estatísticos da U.S.E.P.A. e American Meteorological Society.

De notar contudo que, neste último caso, não foi possível a comparação - em toda a extensão - com os trabalhos dos autores atrás referidos por estes não afluírem a utilização da maior parte destes testes só muito recentemente sugeridos, a título experimental aliás, e ainda não ensaiados e aferidos como se disse.

CAPÍTULO 10

Sem prejuízo de aspectos já referidos nos capítulos anteriores gostaríamos de focar então, agora com um pouco mais de detalhe, alguns destes pontos específicos da investigação efectuada em Sines.

10.3.1 As Observações Experimentais

A investigação de Sines foi efectuada com aparelhagem moderna - atrás descrita - de medição em contínuo das concentrações de dióxido de enxofre em três estações de medida.

Não sendo possível evitar avarias pontuais de aparelhagem ao longo de tão extenso período de tempo, adoptou-se o critério de só utilizar os dados mensais, sempre que o equipamento, após calibração, produzisse valores num período igual ou superior a 75% do tempo total, passível de medida.

O Gabinete da Área de Sines detectou também, com carácter pontual, algumas anomalias nítidas, em certos períodos de medição - aliás naturais numa fase de construção dum complexo industrial - quer devidas a fenómenos anormais ocorrendo na vizinhança imediata das estações (movimentos de terra, queimas de materiais ou movimento anormal de veículos) quer a prováveis avarias.

A análise sistemática de anomalias nos registos e a opinião dos técnicos do GAS sobre essas ocorrências anormais levou-nos a suprimir da análise dos resultados os valores correspondentes ao Outono de 1979 e Outubro de 1982 em Monte Chãos, bem como ao Verão de 1982 em Monte Velho, por pouco fidedignos.

Da mesma forma não se indicam, por não existirem, registos da estação de Monte Velho em 1979.

CAPÍTULO 10

A análise aos dados, observados experimentalmente, incidirá pois, sobre 41 situações trimestrais (para dois tipos de meteorologia) em vez das 48 relativas a 4 anos e 3 estações de medida, correspondentes a uma situação teórica, sem avarias nem anomalias.

Considera-se assim, que a taxa de funcionamento - 85% do tempo disponível para as três estações - (mesmo comparada com os níveis internacionais) foi elevada, para mais, numa rede em fase de lançamento.

Deve salientar-se que - no período em estudo nesta dissertação - em mais nenhum local do País existia uma rede de medição de poluentes análoga.

10.3.2 O Inventário de Emissões

Utilizaram-se, sempre que existentes, os valores dos registos experimentais gentilmente cedidos pelas empresas: é o caso das medições de densidade, teor de enxofre e registos de consumo de fuel na Refinaria e Petroquímica, bem como registos da Unidade de Claus relativamente às cargas de sulfídrico e enxofre produzido.

Nos casos onde não existiam dados experimentais - velocidade de saída dos gases, temperatura, volume de gases, "flare" - foram consultados os dados de projecto, fornecidos pelas empresas ou contidos em manuais de engenharia, efectuadas amplas trocas de impressões com os seus técnicos e calculados finalmente por nós, os valores, através de balanços mássicos e térmicos tendo em conta o importante aspecto de que as unidades se encontravam dum modo geral a funcionar a baixas taxas em relação à sua capacidade nominal, tendo pois sido ajustados os dados de projecto.

CAPÍTULO 10

Curiosamente, a investigação preliminar dos outputs das simulações em computador evidenciou que os dados previstos, eram, na estação de Monte Velho, sempre inferiores aos observados sugerindo a possibilidade duma contaminação de fora da Área, inicialmente não considerada.

Tal hipótese foi investigada, procurando-se então simular a possível influência da península de Setúbal através das emissões e características aproximadas das duas unidades industriais mais representativas: a fábrica de cimento e a central térmica.

Tendo em conta as queimas anuais de fuel-óleo da central térmica (ao longo dos 4 anos respectivamente: 42 000t; 325 000t; 608 000t; 650 000t) e para a fábrica de cimento (384 000t; 93 000t; 189 000t; 193 000t) e apesar da longa distância de cerca de 44km que separa as regiões, verificou-se a previsão aproximada de concentrações, embora pequenas, na estação situada mais a Norte - Monte Velho (Inverno, 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; Primavera, 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; Verão, 3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; Outono, 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) correspondendo a uma queima média de 630 000t/ano por exemplo da Central e sendo obtidos valores semelhantes noutras simulações análogas devido a essas emissões.

Este mesmo efeito de poluição do exterior da área já não se detectou em relação a Monte Chãos ou Sonega.

Estes aspectos são curiosos e importantes, sugerindo que, de futuro, poderá ser interessante efectuar um seguimento atento das emissões industriais e urbanas da região de Setúbal.

10.3.3 As Simulações com o T.C.M.. Utilização de Alguns Apuramentos Metodológicos

Conforme se focou detalhadamente no capítulo 5, o TCM envolve vários pressupostos de base e conseqüentemente apresenta limitações.

CAPÍTULO 10

Procurámos contudo, sempre que possível, tornear essas dificuldades através da utilização de refinamentos metodológicos que, embora causando a utilização de muito maior tempo de computador (por vezes três vezes mais), e não se adaptando totalmente à realidade, pelo menos constituíram simulação de situações provavelmente muito mais próximos dela e por isso - sem desvirtuamento do algoritmo - mais rigorosas.

Vejamos as principais.

10.3.3.1 Correcções de Cotas, Relativas aos Receptores

Tendo em conta que a Área de Sines é relativamente plana, mas que os locais de Monte Chãos e Sonega representam elevações que o modelo, como referido, não contempla na sua formulação, utilizaram-se nas simulações as alturas dos emissores relativas às cotas das estações de recepção para Monte Chãos e Sonega e em relação a esta última ainda uma correcção na concentração (factor 1,3) face à sua altura superior à da "flare"*, o que, embora tenha acrescido o tempo de utilização do computador para o triplo nos permite uma simulação muito mais de acordo com a realidade da Área, particularmente em relação à estação de Sonega, de cota elevada.

Parece-nos mesmo indispensável a utilização desta metodologia em futuras calibrações do modelo.

10.3.3.2 Utilização de um Novo Conjunto de Dados Meteorológicos mais Adaptados à Realidade de Sines

Como já referido, a investigação das previsões com o modelo foi iniciada com base no programa STAR de Lisboa - local mais próximo de Sines com dados meteorológicos adequados ao TCM.

* e à das chaminés da CNP

CAPÍTULO 10

Um conjunto completo de simulações foi efectuado.

Todavia verificou-se - no período de execução da parte final desta dissertação - que o número de dados meteorológicos relativos a direcção e velocidade entretanto recolhidos em Sines ($\sim 25\ 000$), se aproximava daquele em que se alicerçava o STAR relativo a Lisboa.

Com base, então, nos 25 000 dados de Sines, desenvolvemos a nova função de frequências meteorológicas expressa através do programa STARCAN mencionado.

Sem prejuízo de poder envolver desvios em relação às classes de estabilidade, ela já se insere na filosofia atrás expressa, dum caminho tendencial para validação e, pelo menos, exprime a realidade de Sines dos anos 1978 a 1982 no que respeita a direcção e velocidade de vento, com o consequente acréscimo de rigor espectável nas previsões do TCM.

Daí, decidimos efectuar um novo conjunto global de simulações para os quatro anos baseadas nestes novos dados meteorológicos, tendo-se obtido resultados interessantes (Quadro 9.IX).

10.3.3.3 Utilização da Metodologia Sugerida pelo Texas Air Control Board para Simulação da "flare"

Os dados de projecto existentes inicialmente no GAS apontavam para contribuições menores das emissões da "flare" da Refinaria, por isso elas nunca foram contabilizadas nas simulações globais.

A investigação efectuada à luz das realidades dos últimos 4 anos, evidenciou contudo números com significado.

CAPÍTULO 10

Utilizou-se assim, pela primeira vez para a Área, a simulação das contribuições da "flare" cujo comportamento é naturalmente diferente do de uma chaminé. Um dos dados mais difíceis de calcular - o Diâmetro Equivalente da "flare" - foi estimado em 4,8m com as sugestões do Texas Air Control Board.

10.3.3.4 A Localização das Estações de Medida em Relação aos Emissores

Como atrás indicado, o modelo utiliza no seu cálculo as concentrações para sectores circulares de $22,5^{\circ}$ centrados em cada emissor e admite que em cada sector e para cada distância elas são constantes.

É curioso notar que a posição da Sonega é tal, em relação à Refinaria e Petroquímica, que recebe poluentes com ventos do sector de NW.

Analogamente a estação de Monte Velho recebe poluentes da Refinaria e "flare" quando o vento sopra de Sul situando-se relativamente centrada no sector, embora em relação à Petroquímica receba de SSW, mas no limite com o sector Sul.

Situação completamente diferente se passa com a estação de Monte Chãos. Esta estação situa-se no centro do sector Este em relação à "flare" mas, em relação à chaminé da Refinaria recebe ainda de Este, embora no limite de fronteira com o ENE. Também em relação à Petroquímica recebe de NNE, mas no limiar do sector Norte.

Estes dois últimos factos são importantes, conforme nos foi aliás confirmado pelos técnicos do Texas Air Control Board.

CAPÍTULO 10

É que, na realidade, a dispersão de poluentes na direcção perpendicular à do vento faz-se segundo uma distribuição gaussiana e portanto não "termina" rigorosamente nos $22,5^{\circ}$ que o modelo define para cada sector. Então, o que se passa na realidade para as estações - como Monte Chãos - que se situam em relação aos dois emissores, nos limites dos sectores, é que sofrem as influências das frequências de ventos no sector adjacente, com particular relevo se estas frequências são muito diferentes das dos sectores em que se inserem, como é realmente o caso de Monte Chãos.

Aí as frequências de N e NNE são bastante diferentes (variando de 1:1,8 de NNE para N no inverno; de 1:4,1 na Primavera; de 1:8 no Verão e de 1:2,5 no Outono).

Natural é pois que, em particular na Primavera e Verão, a realidade observada seja superior à prevista, o que aliás se verificou.

O mesmo tipo de raciocínio explica, pelo menos em parte, alguns dos aparentes afastamentos entre as concentrações observadas e as previstas nesta estação de Monte Chãos.

Por estas razões, no tratamento estatístico dos dados, adiante efectuado, se considerou, numa das análises, uma concentração na "área" de Monte Chãos e não somente nas coordenadas exactas da estação tendo-se obtido resultados mais elevados, nesse caso, para o coeficiente de regressão.

Em conclusão pois, os resultados tratados estatisticamente em seguida, são a expressão numérica também da consideração de todos estes aspectos.

CAPÍTULO 10

10.3.4. Comparação dos Resultados Observados Experimentalmente com os Resultados Previstos pelo T.C.M..
Avaliação e Calibração do Modelo

O Quadro 10.IV, de importância fundamental alicerça-se nos resultados apresentados no capítulo anterior e no capítulo 6 e estabelece, finalmente a comparação entre as concentrações de dióxido de enxofre, observadas experimentalmente e as previstas por simulação com o TCM, quer utilizando como "input" meteorológico o programa STAR, quer o programa STARCAN, durante os quatro anos investigados, de 1979 a 1982.

As figuras 10.1, 10.2 e 10.3 representam graficamente esses valores.

Procurámos aplicar aos dados obtidos, não só os tratamentos estatísticos convencionais, já utilizados por outros autores - no sentido de estabelecermos comparações - mas também aqueles que foram recentemente recomendados, embora a título experimental, pela United States Environmental Protection Agency, American Meteorological Society e outros (132, 133, 134, 135, 136, 137).

Análises de regressão, cálculo de intervalos de confiança de 95%, médias de concentrações previstas e observadas, teste de Student às diferenças ("residuals"), factores de relação entre concentrações, cálculo de diferenças ("residuals"), testes de Kolmogorof-Smirnof e χ^2 e comparação entre frequências relativas acumuladas das concentrações observadas e previstas, são os principais tratamentos estatísticos sugeridos por essas entidades, e que procurámos efectuar com os resultados da nossa investigação.

CAPÍTULO 10

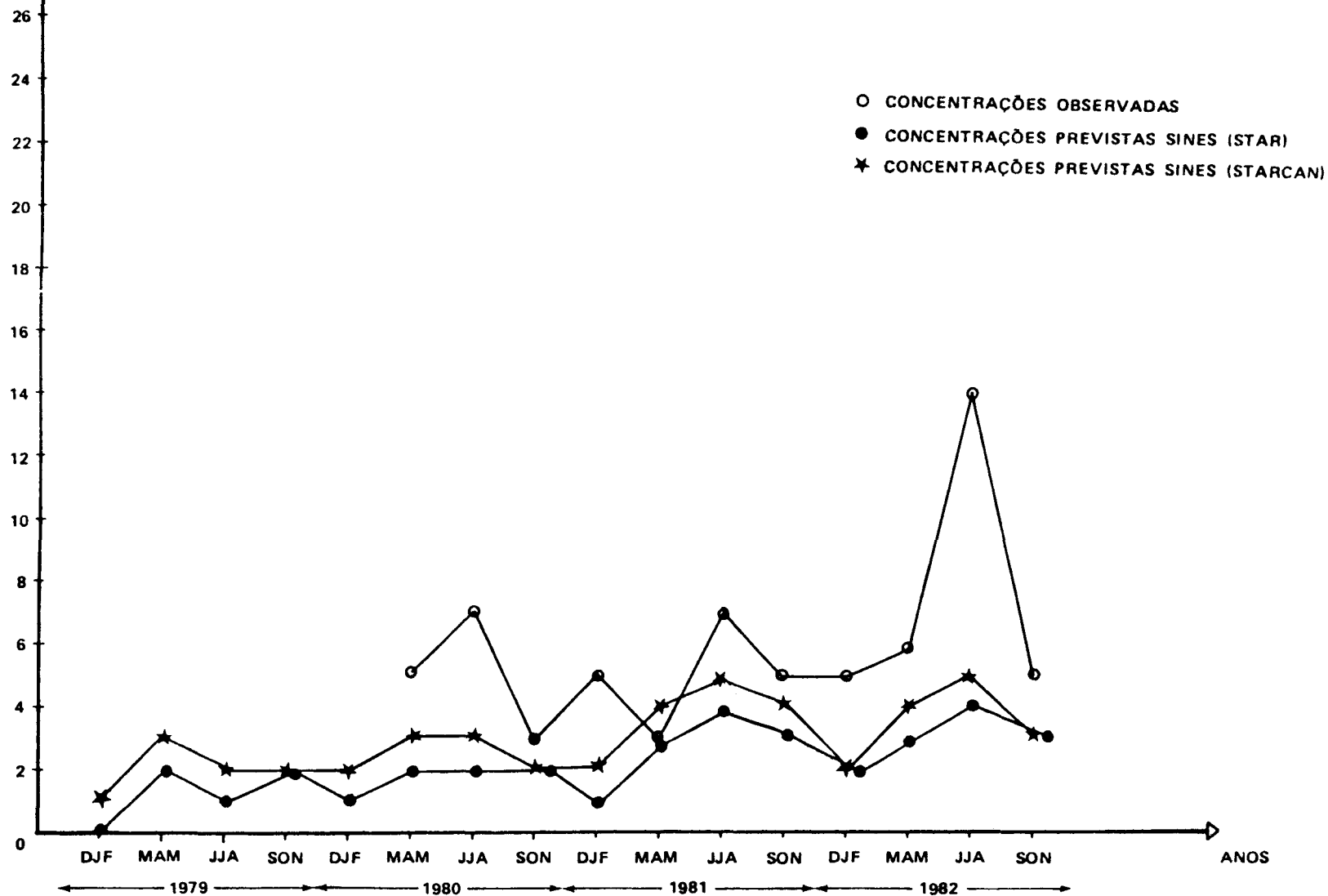
QUADRO 10.IV

Comparação das Concentrações Observadas Experimentalmente e Previstas por Simulação com o TCM, para o Poluente Dióxido de Enxofre na Área de Sines, durante os Anos de 1979 a 1982

	1979		1980		1981		1982		
	C _O	C _P	C _O	C _P	C _O	C _P	C _O	C _P	
Inverno	-	0 (STAR) 1 (STARCAN)	-	1 2	5	1 2	5	2 2	MONTE VELHO
Primavera	-	2 3	5	2 3	3	3 4	6	3 4	
Verão	-	1 2	7	2 3	7	4 5	-	4 5	
Outono	-	2 2	3	2 2	5	3 4	5	3 3	
Inverno	2	3 (STAR) 1 (STARCAN)	6	4 2	10	3 2	4	5 4	
Primavera	5	11 5	3	5 2	6	4 2	10	7 5	
Verão	9	5 2	7	3 1	9	3 2	11	4 2	
Outono	-	10 13	9	6 7	9	6 8	7	5 7	
Inverno	2	3 (STAR) 3 (STARCAN)	11	3 4	8	1 3	5	1 3	SONEÇA
Primavera	20	10 30	15	4 10	6	4 9	10	7 18	
Verão	30	8 31	28	4 13	13	4 16	17	5 20	
Outono	13	4 8	10	3 4	8	3 6	8	4 6	

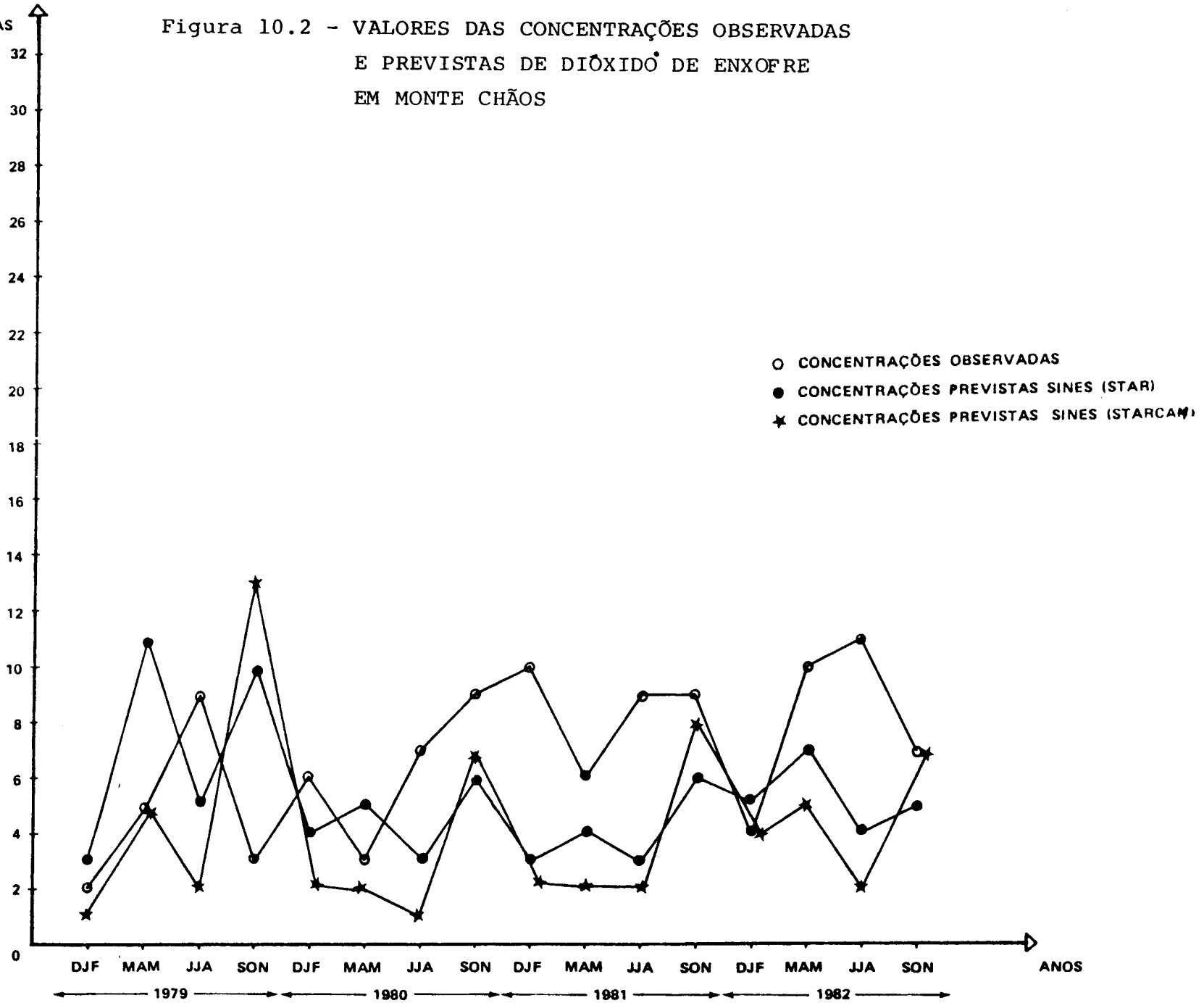
CONCENTRAÇÕES MÉDIAS
(SO₂ - μg / m³ N)

Figura 10.1 - VALORES DAS CONCENTRAÇÕES OBSERVADAS
E PREVISTAS DE DIÓXIDO DE ENXOFRE
EM MONTE VELHO



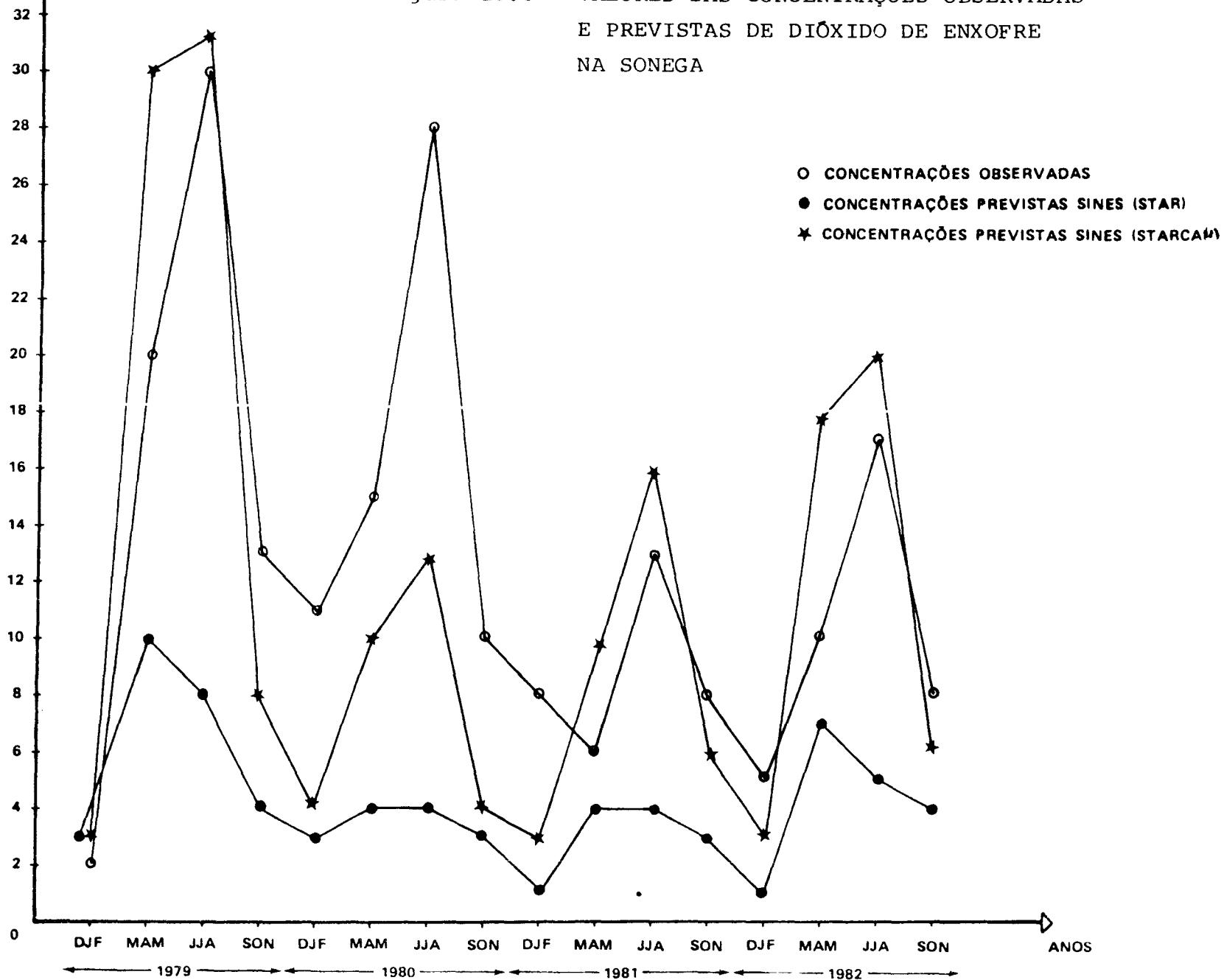
CONCENTRAÇÕES MÉDIAS
(SO₂ - μg/m³N)

Figura 10.2 - VALORES DAS CONCENTRAÇÕES OBSERVADAS
E PREVISTAS DE DIÓXIDO DE ENXOFRE
EM MONTE CHÃOS



CONCENTRAÇÕES MÉDIAS
(SO₂ - μg/m³N)

Figura 10.3 - VALORES DAS CONCENTRAÇÕES OBSERVADAS
E PREVISTAS DE DIÓXIDO DE ENXOFRE
NA SONEGA



CAPÍTULO 10

Assim, no Quadro 10.V, apresentou-se o resultado do cálculo da regressão linear, com representação das concentrações observadas em ordenadas e as correspondentes concentrações previstas em abcissas.

Verifica-se que os resultados estão correlacionados através duma recta de coeficiente angular $B = 0,67$, ordenada na origem $A = 4,4$, desvio padrão dos valores previstos $\sigma_x = 6,99$ e dos valores observados $\sigma_y = 5,98$.

O coeficiente de correlação apresenta um valor elevado $R = 0,79$ para o caso da utilização do programa STARCAN mas apenas de $R = 0,41$ para a simulação com utilização do programa STAR de Lisboa.

Estes valores não causam surpresa dado que o programa STARCAN traduz muito mais rigorosamente a meteorologia de Sines no que respeita a direcções e velocidades do vento. Ora, é conhecido, (anexo II) que o TCM é particularmente sensível ao rigor dos inputs de direcção de vento, daí a melhoria da correlação.

O valor $B = 0,67$, encontrado para a inclinação da recta, indica que o TCM, na zona de potencial violação dos standards internacionais, tem tendência para prever valores superiores aos que realmente se verificam. Este facto é importante e sugere a utilização do factor de calibração menor que 1, com poupanças significativas nos custos das chaminés através da sua menor altura necessária.

O valor 4,4 encontrado para a ordenada na origem sugere a existência na Área, dum nível de base de SO_2 expectável, aliás pequeno.

CAPÍTULO 10

QUADRO 10.V

ANÁLISE DE REGRESSÃO
 PARA O CONJUNTO DOS
 VALORES DOS QUATRO ANOS

A) Conjunto global dos valores dos 4 anos com programa
 STARCAN

$$\begin{array}{lll} B = 0,67 & \sigma_x = 6,99 & \\ A = 4,43 & \sigma_y = 5,98 & R = 0,79 \end{array}$$

B) Conjunto global dos valores dos 4 anos com programa
 STAR de Lisboa

$$\begin{array}{lll} B = 1,14 & \sigma_x = 2,13 & \\ A = 4,19 & \sigma_y = 5,98 & R = 0,41 \end{array}$$

C) Conjunto global dos valores dos 4 anos com programa
 STARCAN, utilizando os valores, "na área" de Monte Chãos
 na Primavera e Outono

$$\begin{array}{lll} B = 0,70 & \sigma_x = 6,92 & \\ A = 3,90 & \sigma_y = 5,98 & R = 0,81 \end{array}$$

A - Ordenada na origem

B - Coeficiente angular

σ_x - Desvio padrão dos valores C_p (C_p concentrações previstas)

σ_y - Desvio padrão dos valores C_o (C_o concentrações observadas)

R - Coeficiente de Regressão

CAPÍTULO 10

Os resultados expostos são concordantes e análogos aos de outros investigadores, apresentados atrás em 10.2.1, 10.2.2, 10.2.3 e 10.2.4.

Efectivamente esses investigadores encontraram, todos eles, coeficientes angulares da recta de regressão inferiores à unidade para os modelos utilizados (que só diferem no pormenor de cálculo do TCM e não no algoritmo, em especial o CDM).

Koch e Fisher, apresentam um valor quase igual ao nosso para o coeficiente angular em Nova York, $B = 0,66$ para o CDM, com um coeficiente de correlação ligeiramente superior - $0,84$ - ao $0,79$ por nós encontrado.

Braig, em Frankfurt, apresenta $0,52$ de coeficiente angular para o CDM, com correlação, $R = 0,49$, bastante inferior à por nós encontrada.

Prahm e Christensen em Copenhaga referem inclinações de recta situando-se em média em $0,74$ para os coeficientes de correlação mais elevados que encontraram, $0,81$ ($R^2 = 0,66$).

Analogamente esses investigadores indicam ordenadas na origem positivas embora superiores à nossa, o que era de prever dadas as características mais poluídas das regiões que estudaram - Nova York, Frankfurt e Copenhaga - quando comparados com a área de Sines que continua a ter componentes de área rural no seu conjunto e nas regiões que a rodeiam.

Deve ainda referir-se que utilizando os valores de concentrações, não nas coordenadas exactas de Monte Chãos mas na "área" em que se centra, em particular na Primavera e Outono (efeito explicado em 10.3.3.4) se verifica um coeficiente angu-

CAPÍTULO 10

lar de 0,7 com um coeficiente de correlação superior, $R = 0,81$ (alínea c quadro 10.V).

A figura 10.4 representa graficamente a recta de correlação entre os valores observados e previstos com o programa STARCAN.

Da análise anterior, efectuada com o maior número de determinações disponível sugere-se que o modelo deve ser calibrado através da recta $C_{\text{observada}} = 0,67 C_{\text{prevista}} (\text{ug/m}^3) + 4,4 (\text{ug/m}^3)$ e que em futuras simulações, parece ser mais desejável a utilização do programa STARCAN em vez do programa STAR anteriormente utilizado para simulações no complexo de Sines.

Os quadros 10.VI, 10.VII e 10.VIII, apresentam a análise de regressão respectivamente para os anos de 1979, 1980, 1981, 1982, bem como por estações de medição experimental - Monte Chãos, Monte Velho e Sonega - e por estações do ano (anos de 1979 a 1982).

Estas análises têm apenas um interesse mais indicativo - quando comparados com a análise global atrás efectuada - dado o menor número de dados em que são alicerçadas, tendo portanto menor significado estatístico.

Sem prejuízo deste aspecto, é curioso notar que em todos os quadros referidos, os dados simulados com o programa STAR apresentam sistematicamente coeficientes de correlação menores que os correspondentes dados obtidos com o programa STARCAN.

É ainda de notar que a estação da Sonega apresenta o maior coeficiente de correlação e Monte Chãos o menor.

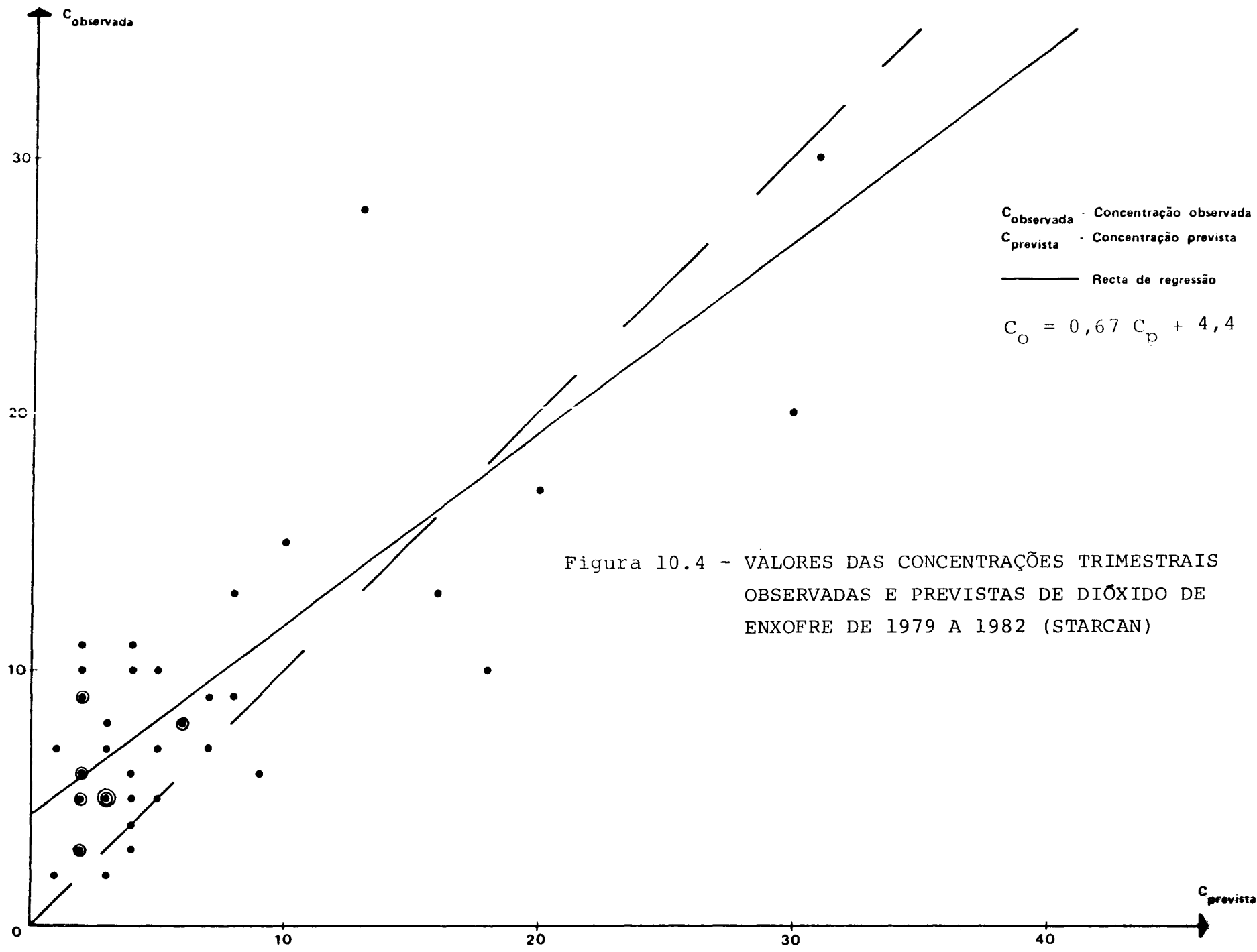


Figura 10.4 - VALORES DAS CONCENTRAÇÕES TRIMESTRAIS OBSERVADAS E PREVISTAS DE DIÓXIDO DE ENXOFRE DE 1979 A 1982 (STARCAN)

CAPÍTULO 10

QUADRO 10.VI

ANÁLISE DE REGRESSÃO
POR VALORES ANUAIS

A) PROGRAMA STARCAN

	1979	1980	1981	1982
B	0,72	1,70	0,34	0,45
A	3,30	1,57	5,58	4,98
σ_x	12,25	3,62	3,96	5,98
σ_y	9,6	6,77	2,56	3,64
R	0,92	0,91	0,52	0,74

B) PROGRAMA STAR DE LISBOA

	1979	1980	1981	1982
B	1,41	1,18	0,53	1,01
A	2,73	5,38	5,69	3,78
σ_x	3,10	1,23	1,30	1,8
σ_y	9,6	6,77	2,56	3,64
R	0,45	0,21	0,27	0,50

CAPÍTULO 10

QUADRO 10.VII

ANÁLISE DE REGRESSÃO
 POR ESTAÇÕES DE MEDIÇÃO
 EXPERIMENTAL

A) PROGRAMA STARCAN

	Monte Velho	Monte Chãos	Sonega
B	0,50	0,27	0,64
A	3,50	6,19	5,40
σ_x	0,98	2,28	8,91
σ_y	1,30	2,66	7,55
R	0,38	0,23	0,75

B) PROGRAMA STAR DE LISBOA

	Monte Velho	Monte Chãos	Sonega
B	0,38	- 0,06	2,00
A	4,10	7,4	4,25
σ_x	0,81	2,02	2,28
σ_y	1,30	2,66	7,55
R	0,24	0,05	0,60

CAPÍTULO 10

QUADRO 10.VIII

ANÁLISE DE REGRESSÃO
 POR ESTAÇÃO DO ANO (ANOS
 DE 1979 A 1982)

A) PROGRAMA STARCAN

	Inverno	Primavera	Verão	Outono
B	0,98	0,52	0,70	1,02
A	3,26	3,72	7,14	2,06
σ_x	0,92	8,17	9,65	2,01
σ_y	2,89	5,05	8,17	2,72
R	0,31	0,84	0,83	0,76

B) PROGRAMA STAR DE LISBOA

	Inverno	Primavera	Verão	Outono
B	- 0,23	0,86	3,75	0,99
A	6,40	3,22	1,93	3,85
σ_x	1,28	2,80	1,54	1,30
σ_y	2,89	5,05	8,17	2,72
R	- 0,23	0,48	0,70	0,47

CAPÍTULO 10

Interessante nos parece focar que o coeficiente de correlação é elevado para a Primavera, Verão e Outono - 0,84; 0,83; 0,76 - e baixo para o Inverno 0,31 (STARCAN).

O modelo apresenta dois maiores dificuldades na simulação de situações de Inverno.

O Quadro 10.IX representa a análise de regressão efectuada com uma recta e curvas de vários tipos, verificando-se que, de todas, a que apresenta correlação mais elevada (R^2) é a recta de $R^2 = 0,62$.

O Quadro 10.X, contém os dados para determinação das importantes bandas de confiança de 95%, da recta de regressão calculada $C_o = 0,67 C_p + 4,4$.

A figura 10.5 representa graficamente, essas bandas de confiança.

Os Quadros 10.XI e 10.XII apresentam os valores de médias, desvios padrões e erros; o quadro 10.XIII indica o teste de Student para as diferenças (residuals); o quadro 10.XIV o factor de relação entre concentrações. Neste último quadro é curioso referir que cerca de 68% dos valores se situam dentro do factor 2, apontado por eminentes cientistas (Briggs, Hanna e outros) como o significativo para as previsões destes modelos.

O Quadro 10.XV evidencia as diferenças entre as Concentrações observadas e previstas verificando-se que 76% dos valores se situam na zona de precisão de $\pm 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$; o quadro 10.XVI apresenta o teste não paramétrico de Kolmogorov-Smirnov e o de χ^2 .

CAPÍTULO 10

QUADRO 10.IX

ANÁLISE DE REGRESSÃO -
 TESTE A VÁRIOS TIPOS DE
 CURVAS (DADOS GLOBAIS;
 PROGRAMA STARCAN)

$$Y = A + BX \quad A = 4,43 \quad B = 0,67 \quad R^2 = 0,62$$

$$Y = A \exp(BX) \quad A = 4,99 \quad B = 0,059 \quad R^2 = 0,47$$

$$Y = AX^B \quad A = 3,54 \quad B = 0,49 \quad R^2 = 0,46$$

$$Y = A + \frac{B}{X} \quad A = 12,90 \quad B = -13,39 \quad R^2 = 0,25$$

$$Y = \frac{1}{A + BX} \quad A = 0,21 \quad B = -0,01 \quad R^2 = 0,23$$

$$Y = \frac{X}{AX + B} \quad A = 0,089 \quad B = 0,24 \quad R^2 = 0,26$$

CAPÍTULO 10

QUADRO 10.X

CÁLCULO DAS BANDAS DE CONFIANÇA
DE 95% PARA A RECTA DE REGRESSÃO

$$C_o = 0,67 \quad C_p + 4,43 \quad (\text{global})$$

*** Wang VS File Display Utility - Version 3.06.00 *** 05/11/83 18:04 Page
 Consecutive File SIN in Library BJMTTY on Volume VOL444

Response Series
 YYY

Simple Linear Regression

Date Range: Quarterly 1/01 - 4/12

No. of Observations (Without Missing Data) = 41

$$YYY = 4.430366 + 0.6729665 * XXX$$

Series	Coefficient	Std Error	T-value	Beta	Elast.
CONSTANT	4.430366	0.80735	5.49		
1) XXX	0.6729665	0.84351E-01	7.98	0.78745	0.498

Analysis of Variance Table

SOURCE	D.F.	SUM OF SQUARES	MEAN SQUARE	F	% CONF.
Regression	1	907.6676	907.6676	63.7	100.0
Error	39	556.1373	14.25993		
Total	40	1463.805			

R-Squared = 0.620 Correlation Coefficient = 0.7874
 Adj R-Squared = 0.610 Std Error of Residuals = 3.7762
 Durbin-Watson = 1.348

Date	Lower 95%	Fitted	Upper 95%	Actual	Residual	%Error
1/01	-1.31	6.45	14.21	5.00	-1.45	-22.47
2/01	-1.31	6.45	14.21	7.00	0.55	8.54
3/01	-1.99	5.78	13.55	3.00	-2.78	-48.06
4/01	-1.99	5.78	13.55	5.00	-0.78	-13.44
1/02	-0.62	7.12	14.87	3.00	-4.12	-57.88
2/02	0.06	7.80	15.53	7.00	-0.80	-10.20
3/02	-0.62	7.12	14.87	5.00	-2.12	-29.80
4/02	-1.99	5.78	13.55	5.00	-0.78	-13.44
1/03	-0.62	7.12	14.87	6.00	-1.12	-15.76
2/03	-1.31	6.45	14.21	5.00	-1.45	-22.47
3/03	-2.69	5.10	12.89	2.00	-3.10	-60.81
4/03	0.06	7.80	15.53	5.00	-2.80	-35.86
1/04	-1.99	5.78	13.55	9.00	3.22	55.81
2/04	-1.99	5.78	13.55	6.00	0.22	3.87
3/04	-1.99	5.78	13.55	3.00	-2.78	-48.06
4/04	-2.69	5.10	12.89	7.00	1.90	37.17
1/05	1.41	9.14	16.87	9.00	-0.14	-1.54
2/05	-1.99	5.78	13.55	10.00	4.22	73.12
3/05	-1.99	5.78	13.55	6.00	0.22	3.87
4/05	-1.99	5.78	13.55	9.00	3.22	55.81
1/06	2.08	9.81	17.55	9.00	-0.81	-8.30
2/06	-0.62	7.12	14.87	4.00	-3.12	-43.84
3/06	0.06	7.80	15.53	10.00	2.20	28.28
4/06	-1.99	5.78	13.55	11.00	5.22	90.43
1/07	1.41	9.14	16.87	7.00	-2.14	-23.42
2/07	-1.31	6.45	14.21	2.00	-4.45	-68.99
3/07	15.91	24.62	33.33	20.00	-4.62	-18.76
4/07	16.50	25.29	34.08	30.00	4.71	18.61

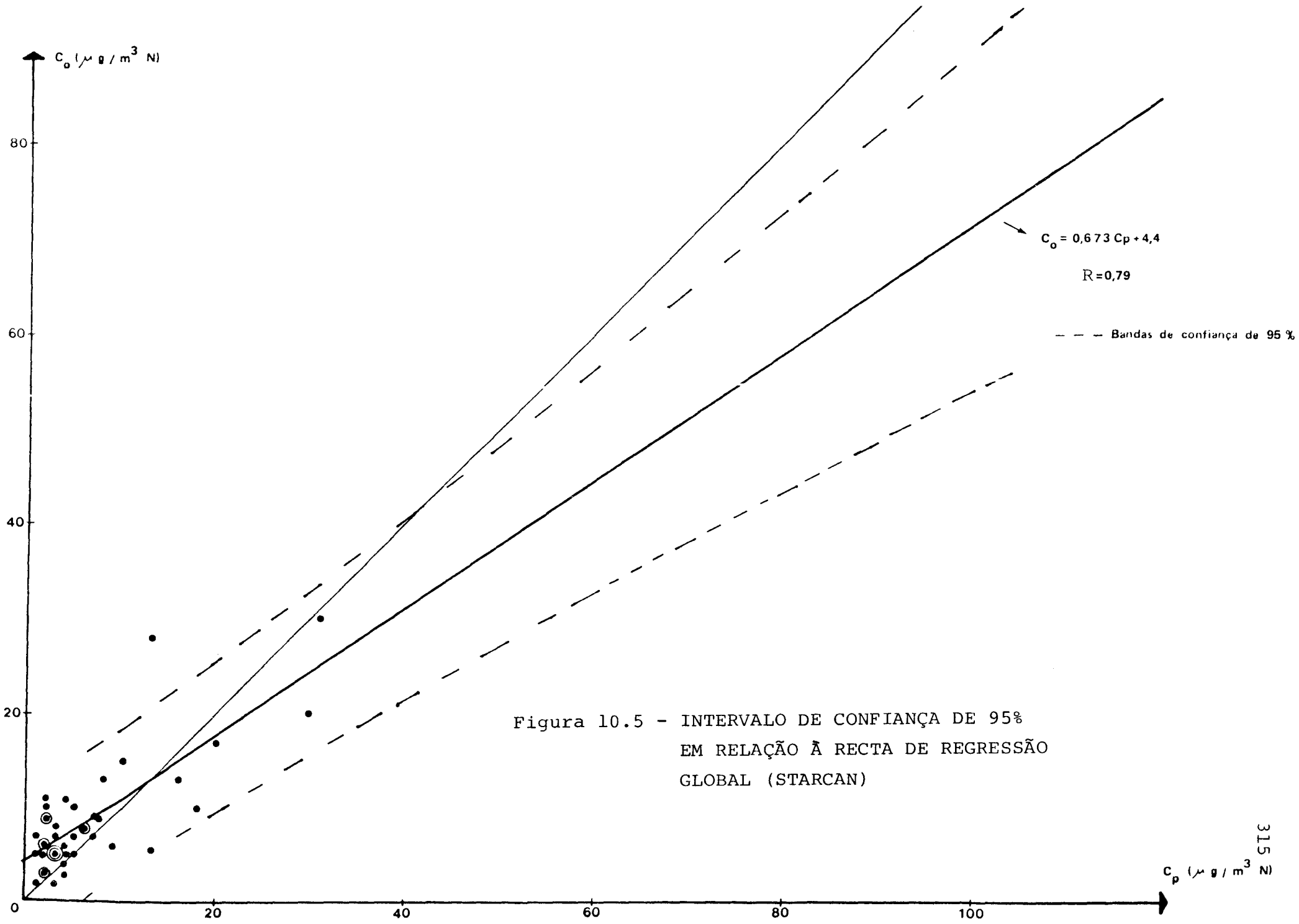


Figura 10.5 - INTERVALO DE CONFIANÇA DE 95%
EM RELAÇÃO À RECTA DE REGRESSÃO
GLOBAL (STARCAN)

CAPÍTULO 10

QUADRO 10.XI

MÉDIAS DAS CONCENTRAÇÕES TRIMESTRAIS OBSERVADAS E PREVISTAS ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
(dos Quadros 6.XV e 9.IX)

A) Conjunto global de valores dos 4 anos

Média Observada (dos trimestres):	9
Média Prevista (STARCAN):	7
Média Prevista (STAR):	4
Desvio Padrão das Concentrações Observadas (trimestrais):	6
Desvio Padrão das Concentrações Previstas (STARCAN):	7
Máximo Erro Negativo ($C_o - C_p$ -STARCAN):	-10
Máximo Erro Positivo:	15

B) Por valores anuais ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

	1979	1980	1981	1982
\bar{C}_o	12	9	7	8
\bar{C}_p (STARCAN)	11	5	5	7
\bar{C}_p (STAR)	6	3	3	4

CAPÍTULO 10

QUADRO 10.XII

MÉDIAS DAS CONCENTRAÇÕES TRIMESTRAIS
OBSERVADAS E PREVISTAS ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) -
POR ESTAÇÕES DO ANO E POR ESTAÇÕES DE
MEDIÇÃO EXPERIMENTAL

A) Por Estação do Ano (anos de 1979 a 1982)

	Inverno	Primavera	Verão	Outono
\bar{C}_O	6	8	14	8
\bar{C}_p (STARCAN)	3	8	10	6
\bar{C}_p (STAR)	3	5	4	4

B) Por Estações de Medição Experimental

	Monte Velho	Monte Chãos	Sonega
\bar{C}_O	5	7	13
\bar{C}_p (STARCAN)	3	3	12
\bar{C}_p (STAR)	2	5	4

CAPÍTULO 10

QUADRO 10.XIII

TESTE DE STUDENT ÀS DIFERENÇAS ("RESIDUALS")

$$\bar{d} = \frac{1}{N} \sum (c_o - c_p)$$

$$s_o^2 = \frac{1}{N-1} \sum (c_o - \bar{c}_o)^2$$

$$s_p^2 = \frac{1}{N-1} \sum (c_p - \bar{c}_p)^2$$

$$d^{95\%} = \bar{d} \pm t_v^{95\%} \sqrt{\frac{s_o^2}{N} + \frac{s_p^2}{N}}$$

	Monte Velho	Monte Chãos	Sonega
\bar{c}_o trimestrais	5,1	7,1	12,8
\bar{c}_p trimestrais (STARCAN)	3,2	3,5	11,5
s_o^2	1,9	7,6	60,9
s_p^2	1,1	5,6	84,7
$t_v^{95\%}$	2,262	2,145	2,131
\bar{d}	1,9	3,7	1,2
$d^{95\%}$	1,9 \pm 1,2	3,7 \pm 2,0	1,25 \pm 6,4

CAPÍTULO 10

QUADRO 10.XIV

FACTORES DE RELAÇÃO ENTRE AS CON-
CENTRAÇÕES (STARCAN) - F

$$\text{Se } C_o > C_p \quad F = \frac{C_o}{C_p} ; \quad \text{Se } C_o < C_p \quad F = \frac{C_p}{C_o}$$

FACTOR	PERCENTAGEM
1 (iguais)	7,3
$1 < F \leq 1,5$	41,5
$1,5 < F \leq 2,0$	17,1
$2,0 < F \leq 3,0$	22,0
$3,0 < F \leq 5$	7,3
$F > 5$	4,8

QUADRO 10.XV

VALORES DAS DIFERENÇAS ENTRE AS CON-
CENTRAÇÕES OBSERVADAS E PREVISTAS (STARCAN)

$C_o - C_p$	% verificada
$\pm 5 \mu\text{g m}^3\text{N}$	76
± 10 "	22
± 20 "	2,4
± 50 "	0
± 100 "	0

CAPÍTULO 10

QUADRO 10.XVI

RESULTADOS DO TESTE DE KOLMOGOROV-SMIRNOV
E TESTE DE χ^2

A) Kolmogorov-Smirnov (não paramétrico)

Ao conjunto dos valores:

nº observações	C _O	C _P	Δ	nº observações	C _O	C _P	Δ
≤ 0	0	0	0	≤ 5	13	27	14
≤ 1	0	4	4	≤ 6	17	29	12
≤ 2	2	12	10	⋮	⋮	⋮	⋮
≤ 3	5	20	15	⋮	⋮	⋮	⋮
≤ 4	6	24	18	<u>Maior Diferença</u> = $\frac{18}{41} = 0,43$			
				nº observações 41			

Monte Velho

nº observações	C _O	C _P	Δ	nº observações	C _O	C _P	Δ
≤ 0	0	0	0	≤ 6	8	10	2
≤ 1	0	0	0	⋮	⋮	⋮	⋮
≤ 2	0	3	3	<u>Maior Diferença</u> = $\frac{7}{10} = 0,7$			
≤ 3	2	8	6	nº observações 10			
≤ 4	2	9	7				
≤ 5	7	10	3				

Monte Chãos

nº observações	C _O	C _P	Δ	nº observações	C _O	C _P	Δ
≤ 0	0	0	0	≤ 4	3	10	7
≤ 1	0	4	4	≤ 5	4	12	8
≤ 2	1	9	8	≤ 6	6	12	6
≤ 3	2	9	7	⋮	⋮	⋮	⋮
				<u>Maior Diferença</u> = $\frac{8}{15} = 0,53$			
				nº observações 15			

CAPÍTULO 10

QUADRO 10.XVI (Cont.)

Sonoga

$$\frac{\text{Maior Diferença}}{\text{nº observações}} = \frac{4}{15} = 0,25$$

B) Teste de χ^2 ao conjunto dos valores

$$\chi^2 = \sum \frac{(C_o - C_p)^2}{C_p} = 265 .$$

CAPÍTULO 10

Finalmente, e como sugerido por numerosos autores, a figura 10.6 mostra as curvas de comparação entre frequências relativas acumuladas de concentrações observadas e previstas.

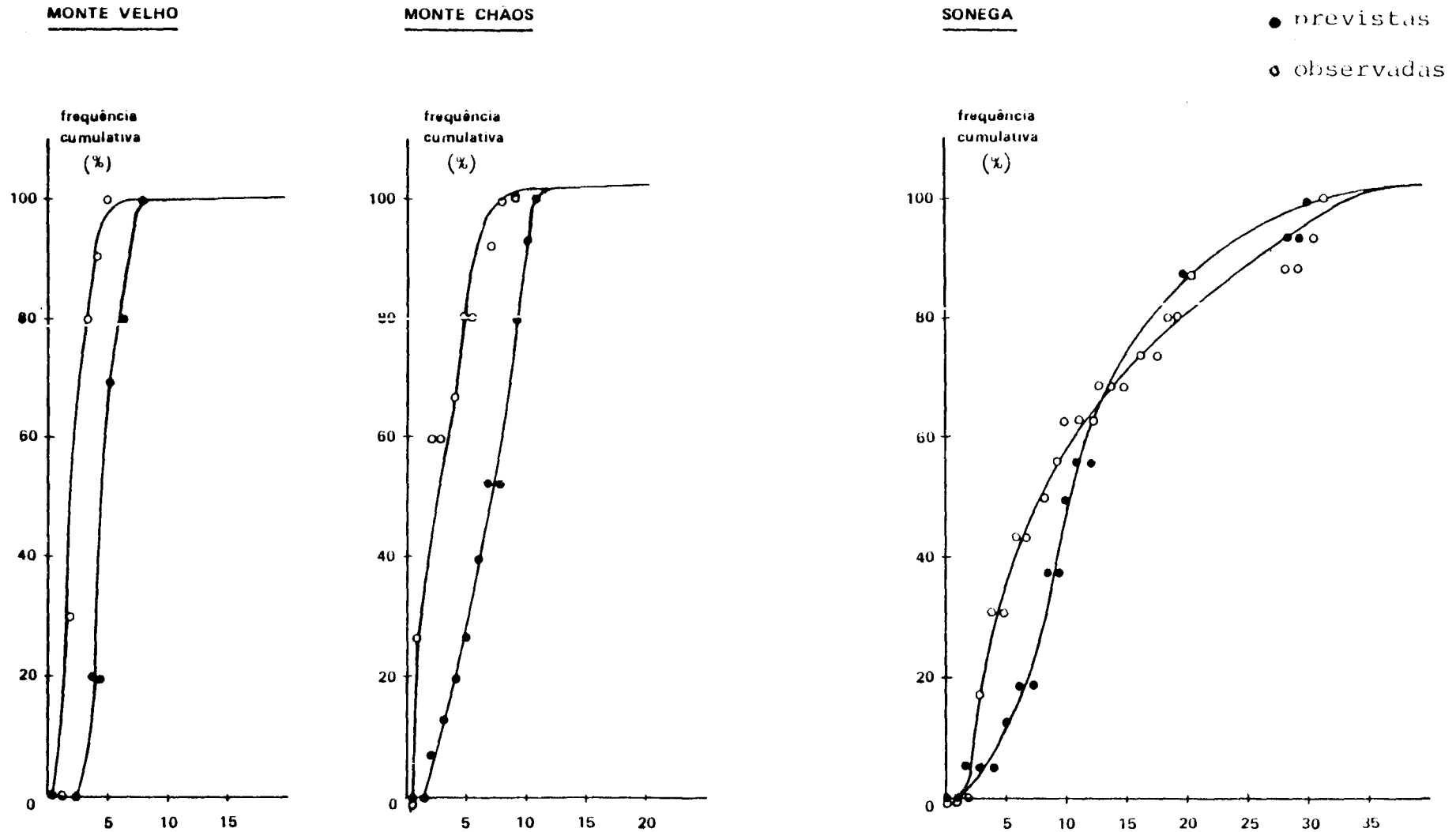
Não é infelizmente possível comparar os resultados destes últimos testes estatísticos com os de outros autores dada a sua recente indicação e a demora e complexidade dos estudos de avaliação e calibração.

Os resultados globais obtidos, em particular a medida de "performance" que é coeficiente de correlação sugerem o interesse na utilização do Texas Climatological Model à simulação do transporte e difusão de gases, pelo menos à Área de Sines, e com os factores de calibração indicados.

É desejável que, dentro de anos, quando o País dispuser dos resultados de outra(s) rede(s) de "monitoring" se possam novamente mobilizar os recursos humanos e materiais, desenvolvendo acções para avaliação e calibração pelo menos do TCM noutras regiões do País.

Do mesmo modo é desejável que se continuem melhorando as bases de dados, quer no que respeita a inventário de emissões da Área de Sines e da região de Setúbal, quer no que respeita aos dados meteorológicos.

Figura 10.6 - COMPARAÇÃO ENTRE FREQUÊNCIAS RELATIVAS ACUMULADAS DE CONCENTRAÇÕES OBSERVADAS E PREVISTAS (STARCAN)



CAPÍTULO 11

CONCLUSÕES

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apresentam-se as principais conclusões da investigação realizada.

Explicitam-se alguns pensamentos relativos a acções futuras.

CAPÍTULO 11

11.1 CONCLUSÕES

Conclusão 1

Com base num esforço intensificado a partir de 1976, efectuaram-se observações sistemáticas em contínuo, por método moderno, das concentrações de dióxido de enxofre na Área de Sines, durante os anos de 1979 a 1982.

A quantidade de dados recolhidos permitiu que se procedesse, no âmbito desta dissertação, à sua análise e detalhado processamento estatístico de forma adequada à comparação com simulações do transporte e difusão de gases poluentes na atmosfera, através de modelo matemático gaussiano.

Conclusão 2

Foi possível reunir as condições para realização de um detalhado inventário das emissões de dióxido de enxofre, tendo como substracto a consideração das tecnologias industriais envolvidas, as características das matérias primas utilizadas e as taxas efectivas de operação das unidades fabris ao longo dos trimestres dos anos de 1979 a 1982.

Conclusão 3

Utilizou-se um modelo gaussiano - Texas Climatological Model - nas simulações em computador UNIVAC 1100, relativas aos 16 trimestres dos 4 anos e às três estações de medição experimental, com os programas meteorológicos STAR e STARCAN correspondendo à cenarização de 55 000 situações meteorológicas e industriais.

Estes factos ocorrem pela primeira vez em Portugal.

CAPÍTULO 11

Conclusão 4

Pode-se concluir com base nos cerca de 100 000 valores de concentrações horárias registadas de 1979 a 1982 nas estações de medida da Área de Sines que a concentração média de dióxido de enxofre foi de $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$. A média da estação de Monte Velho foi de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. A da estação de Monte Chãos de $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e a da Sonega de $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Conclusão 5

Os valores das concentrações observadas são ainda - felizmente - relativamente baixos quando comparados com os verificados em centros urbanos ou regiões mais industrializadas doutros países europeus, E.U.A. ou Japão.

As concentrações nos locais de medição situam-se pois, em zona afastada dos "standards" definidos pelo Despacho Normativo nº 168/81, D.R. nº 152 de 6/7/1981, para a Área de Sines.

Conclusão 6

Os valores das concentrações observadas, se por um lado traduzem o incompleto desenvolvimento do complexo industrial, por outro, traduzem também a correcta implementação duma política de preservação da qualidade do ar - aquando da construção das grandes unidades industriais - efectuada pelo GAS através, entre outras medidas, da construção de elevadas chaminés industriais, sem as quais as referidas concentrações na Área seriam, já, muito mais elevadas.

CAPÍTULO 11

Conclusão 7

Com o conjunto mais recente de dados meteorológicos (1978 a 1982) relativos a direcção e velocidade de vento, num total de cerca de 25 000 dados, desenvolveu-se uma nova função de frequências expressa através de 2 880 valores dum novo programa de nominado de STARCAN, mais adaptado às realidades de Sines.

As simulações, utilizando este novo programa em vez do STAR de Lisboa, mostraram-se muito mais próximas das concentrações observadas, o que sugere a adopção do novo programa STARCAN, em vez do STAR de Lisboa anteriormente utilizado.

Conclusão 8

Investigação adicional desenvolvida, permitiu provar que se verifica um impacte na Área de Sines, detectado nomeadamente a Norte, na estação de Monte Velho, proveniente do transporte atmosférico de longa distância, presumivelmente da concentração industrial da região de Setúbal.

Conclusão 9

De entre os diversos tratamentos estatísticos, aplicados aos resultados observados e previstos em Sines, é possível concluir que o coeficiente de regressão linear global encontrado - e portanto a "performance" - é semelhante ao determinado por outros investigadores com o modelo CDM para Nova York e Copenhaga e claramente superior ao encontrado para Frankfurt, com a vantagem significativa de redução de tempos e custos de utilização do computador nas simulações de rotina.

CAPÍTULO 11

Conclusão 10

Os resultados dos tratamentos estatísticos aplicados aos dados, ponderados com o facto duma informação meteorológica relativa a Sines susceptível de sofrer melhorias no futuro, sugerem a adequação do modelo ao tratamento da dispersão e transporte do dióxido de enxofre nesta Área.

Conclusão 11

A calibração actual do modelo pode ser traduzida pela equação

$$C_{\text{observada}} (\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}) = 0,67 C_{\text{prevista}} (\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}) + 4,4 (\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N})$$

que embora diferindo - como é natural, dadas as diferentes características da Área - das de outros investigadores, confirma a tendência comum até aqui encontrada nas investigações anteriores, de que, quer o CDM, quer o TCM, efectuem previsões superiores à realidade na zona de potencial violação dos "standards".

Conclusão 12

Este aspecto é da maior relevância, pois permite concluir pelo interesse imediato para o País, na utilização dum factor multiplicativo das concentrações previstas, inferior a 1; com poupanças na ordem de algumas dezenas ou mesmo centenas de milhares de contos, no custo global das chaminés das múltiplas indústrias previstas para o complexo e sem prejuízos para a flora ou população da Área.

CAPÍTULO 11

11.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

É importante o prosseguimento das investigações em Sines, nomeadamente na determinação das frequências das classes de estabilidade da atmosfera, maior volume de dados sobre direcção e velocidade de ventos e maior número de estações de medida de dióxido de enxofre, se possível.

Da mesma forma se conclui pelo interesse numa quantificação detalhada ao longo do tempo, nas emissões industriais da península de Setúbal, bem como nas da Área.

Estes procedimentos, se desencadeados através das equipas cuja definição pode ser necessária desde já, permitirão a recalibração desejável do modelo, em 1986-87.

O GAS - que tem revelado especiais capacidades neste domínio - será certamente capaz de perspectivar mais uma vez, que estes trabalhos futuros poderão poupar ao País mais alguns milhares de contos, pela mais rigorosa aferição e aperfeiçoamento, do grau de precisão do modelo apontado neste trabalho.

Esta dissertação, procurou consumir a utilidade e a aplicação generalizada dos modelos de simulação do transporte e difusão de gases provenientes de emissões múltiplas, por nós iniciada em 1976/1977 no Gabinete da Área de Sines, bem como o interesse que a Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa depositou na calibração e avaliação - efectuadas pela primeira vez em Portugal - dum modelo matemático da simulação do transporte e difusão de gases poluentes na atmosfera.

Será interessante que, logo que o País disponha de outra(s) rede(s) de medida, se dê mais um passo para a validação do modelo com a sua avaliação também durante vários anos, noutras regiões geográficas.

CAPÍTULO 11

Julga-se que seria da maior utilidade ao País, a rápida implementação de Legislação que generalizasse a utilização dos modelos de simulação de poluição atmosférica, na determinação das alturas de chaminés industriais e na previsão antecipada dos impactes na qualidade do ar, a provocar por novos empreendimentos.

Ferramenta utilíssima, de planeamento industrial e urbano, ela poderá constituir uma das estratégias para compatibilizar desenvolvimento industrial e qualidade do Ambiente no nosso País.

Permita-se-me, enfim, que termine com uma palavra de esperança, de que a Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa queira embarcar, a partir de agora, com o seu contributo ainda mais decidido na investigação dos problemas de poluição atmosférica do País, e dum modo geral nas acções de preservação ou melhoria da sua qualidade do Ar.

Numa sociedade que experimenta nesta década, e nas próximas, modificações estruturais profundas, acredito que os países em desenvolvimento, como Portugal, não podem nem devem escolher o mesmo tipo de desenvolvimento industrial, nem de soluções ambientais "à posteriori", seguidas por outros países há décadas e sob condições diferentes.

Acredito que devemos investir no sector do Ambiente como aliás noutros, numa capacidade de antecipação aos problemas, na criação dum espírito de mudança através da mudança dos espíritos, num gosto pelos desafios, numa crença em novas oportunidades.

Acredito na capacidade humana de inovação como meio de promover o progresso das nossas sociedades e a nossa Qualidade de Vida.

CAPÍTULO 11

Acredito que não há problemas difíceis, mas sim, soluções inteligentes.

É que, como cidadãos responsáveis, estamos interessados em ganhar o Desafio, que consiste em transmitir aos nossos filhos e às futuras gerações, os eventuais benefícios duma industrialização do País, mas sem destruímos, ou fazermos perigar, um magnífico recurso por que outros Países lutam e de que nós ainda dispomos: a Qualidade do Ambiente do País.

ANEXO I

Outras Expressões Gaussianas do Transporte e Difusão de Gases

a) Bosanquet e Pearson

$$C(x, y, 0, H) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} p q x^2 u} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{qx} \right)^2 \right] \cdot \exp \left(-\frac{H}{px} \right)$$

em que p e q são coeficientes de difusão.

b) Sutton

$$C(x, y, 0, H) = \frac{2 Q}{\pi C_y C_z x^{2-n} u} \cdot \exp \left[-\frac{1}{x^{2-n}} \left(\frac{y^2}{C_y^2} + \frac{H^2}{C_z^2} \right) \right]$$

em que C_y e C_z são coeficientes de difusão e n uma constante.

c) Calder

$$C(x, y, 0, H) = \frac{Q u}{2 k^2 a V_x^2 x^2} \cdot \exp \left[- \frac{u}{k V_x x} \left(\frac{y}{a} + H \right) \right]$$

em que k é a constante de von Karman de valor 0,4

$$e V_x = \frac{Ku}{\ln \left(\frac{H}{z_0} \right)}$$

ANEXO II

Análise Matemática da Sensibilidade da Concentração aos Diversos Parâmetros da Expressão Gaussiana

Na expressão gaussiana da concentração dum poluente a nível do solo

$$C = \frac{Q}{\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp \left[-\frac{H^2}{2 \sigma_z^2} \right] \exp \left[-\frac{y^2}{2 \sigma_y^2} \right]$$

o erro na concentração devido a erro introduzido no parâmetro P_j será:

$$\frac{d C}{d P_j} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial C}{\partial P_i} \frac{d P_i}{d P_j} .$$

O erro total devido aos erros introduzidos nos vários parâmetros será:

$$\Delta C = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^r \left(\frac{\partial C}{\partial P_i} \right) \frac{d P_i}{d p_j}$$

Na realidade, a solução da equação gaussiana envolve os oito parâmetros de significado já analisado: Q , u , σ_y , σ_z , H , x , y e θ como se explicitou na sua avaliação nos capítulos do texto.

Por outro lado, nesta análise, utilizaremos a equação de elevação da pluma de Briggs*:

$$\Delta h = \frac{1.6 F^{1/3} (3.5 x^*)^{2/3}}{u} \quad \text{em que}$$

$$F = g V R^2 \left(\frac{T - T_A}{T} \right) e$$

$$x^* = 14 F^{5/8} \quad \text{se } F < 55$$

e

$$x^* = 34 F^{2/5} \quad \text{se } F \geq 55$$

Então derivando a expressão gaussiana e simplificando pode-se chegar às seguintes equações para $\frac{\partial C}{\partial P_j}$:

$$\frac{\partial C}{\partial Q} = \frac{C}{Q} \quad \frac{\partial C}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial C}{\partial u} = -\frac{C}{u} \quad \frac{\partial C}{\partial y} = -\frac{y C}{\sigma_y^2}$$

$$\frac{\partial C}{\partial \sigma_y} = \frac{1}{\sigma_y} \left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} - 1 \right) C \quad \frac{\partial C}{\partial h} = -\frac{H C}{\sigma_z^2}$$

$$\frac{\partial C}{\partial \sigma_z} = \frac{1}{\sigma_z} \left(\frac{H^2}{\sigma_z^2} - 1 \right) C \quad \frac{\partial C}{\partial \theta} = 0$$

*. Para condições neutras ou instáveis e plumas dominadas por flutuação térmica, para além do local de elevação máxima.

Desenvolvamos agora as expressões para

$$\frac{d P_i}{d P_j} \quad \text{assumindo que}$$

$$\begin{aligned} \sigma_z &= A x^B & e & & \sigma_y &= C x^D \\ x &= r \cos \theta & e & & y &= r \sin \theta \end{aligned}$$

A tabela seguinte é ilustrativa*:

		$\frac{d P_i}{d P_j}$					
		Q	u	σ_y	σ_z	y	h
P_j	Q	1	0	0	0	0	0
	u	0	1	0	0	0	$-(H-h)u^{-1}$
	σ_y	0	0	1	0	0	0
	σ_z	0	0	0	1	0	0
	x	0	0	$D\sigma_y x^{-1}$	$B\sigma_z x^{-1}$	0	0
	y	0	0	0	0	0	0
	h	0	0	0	0	0	1
	θ	0	0	$-D\sigma_y \tan \theta$	$-B\sigma_z \tan \theta$	$y \cot \theta$	0

não se listando $\frac{d x}{d P_j}$ e $\frac{d \theta}{d P_j}$

$$\text{pois} \quad \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial u} = 0$$

* Adaptado de Richard Porter (documento interno do Texas Air Control Board, U.S.A.)

Temos finalmente que :

$$\frac{d C}{d Q} = \frac{\partial C}{\partial Q}$$

$$\frac{d C}{d u} = \frac{\partial C}{\partial u} + \frac{\partial C}{\partial H} \frac{d H}{d u}$$

$$\frac{d C}{d \sigma_y} = \frac{\partial C}{\partial \sigma_y}$$

$$\frac{d C}{d \sigma_z} = \frac{\partial C}{\partial \sigma_z}$$

$$\frac{d C}{d x} = \left(\frac{\partial C}{\partial \sigma_y} \right) \frac{d \sigma_y}{d x} + \left(\frac{\partial C}{\partial \sigma_z} \right) \frac{d \sigma_z}{d x}$$

$$\frac{d C}{d y} = \frac{\partial C}{\partial y}$$

:

$$\frac{d C}{d H} = \frac{\partial C}{\partial H}$$

$$\frac{d C}{d \theta} = \left(\frac{\partial C}{\partial \sigma_y} \right) \frac{d \sigma_y}{d \theta} + \left(\frac{\partial C}{\partial \sigma_z} \right) \frac{d \sigma_z}{d \theta} + \left(\frac{\partial C}{\partial y} \right) \frac{d y}{d \theta}$$

Se definirmos o erro percentual de concentração como

$$f_C (P_j) = \frac{\Delta C (P_j)}{C} ,$$

para pequenos erros introduzidos em P_j será

$$f_{C(P_j)} = \frac{dC(P_j)}{C} = \left\{ \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial C}{\partial P_i} \frac{dP_i}{dP_j} \right) \right\} \frac{dP_j}{C}$$

e então para os vários parâmetros vem, finalmente

$$f_{C(Q)} = \frac{dQ}{Q}$$

$$f_{C(u)} = \left[\frac{H(H-h)}{\sigma_z^2} - 1 \right] \frac{du}{u}$$

$$f_{C(\sigma_y)} = \left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} - 1 \right) \frac{d\sigma_y}{\sigma_y}$$

$$f_{C(\sigma_z)} = \left(\frac{H^2}{\sigma_z^2} - 1 \right) \frac{d\sigma_z}{\sigma_z}$$

$$f_{C(x)} = \left[\left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} - 1 \right) D + \left(\frac{H^2}{\sigma_z^2} - 1 \right) B \right] \frac{dx}{x}$$

$$f_{C(y)} = - \frac{y^2}{\sigma_y^2} \frac{dy}{y}$$

$$f_{C(H)} = \left(- \frac{H^2}{\sigma_z^2} \right) \frac{dH}{H}$$

$$f_{C(\theta)} = \left[\frac{y^2}{\sigma_y^2} (\cot \theta + D \tan \theta) + (B + D) \tan \theta - \frac{H^2}{\sigma_z^2} B \tan \theta \right] \theta \frac{d\theta}{\theta}$$

Obviamente que o rigor das equações descreve a medida que ΔP_j toma significado face ao valor P_j .

Contudo as oscilações observadas na prática na determinação dos parâmetros P_j são tais que as equações têm pouco significado com excepção do parâmetro θ .

Neste parâmetro o erro experimental pode ser grande quando comparado com o ângulo efectivo entre o eixo da pluma e o vector fonte/receptor.

Neste caso poderá usar-se então a expressão:

$$\bar{f}_{C(\theta)} = 1 - \frac{\cos \theta_1}{\cos \theta_2} \exp \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{H^2}{\sigma_z^2} \right) \left[(1 + \tan^2 \theta_1)^D - (1 + \tan^2 \theta_2)^D \right] + \left(\frac{r^{1-B}}{A} \right)^2 \left[(\cos^{1-B} \theta_1 \tan \theta_1)^2 - (\cos^{1-B} \theta_2 \tan \theta_2)^2 \right] \right\} \quad \text{em que}$$

θ , é o ângulo entre a direcção do vento e a direcção fonte emissora/receptor

$\Delta\theta$, é o erro em θ_1 e

$$\theta_2 = \theta_1 + \Delta\theta.$$

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. STERN, A.C., (1977)
"Air Pollution", Third Edition, Volumes I, II, III, IV, V.
Academic Press, Inc., U.S.A..
2. AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS, (1979)
"Threshold Limit Values for Chemical Substances in Workroom
Air", Cincinnati, Ohio.
3. MIDDLETON, W.E.K., (1952)
"Vision Through the Atmosphere", Univ. of Toronto, Ontario.
4. LEIGTON, P.A., (1961)
"Photochemistry of Air Pollution" Academic Press, New York,
New York.
5. CHARLSON, R.J. e AHLQUIST, N.C., (1969)
Atmosch. Environ. 3, 653-656.
6. WARNER, J., (1968)
J. Appl. Meteorol. 7, 247-251.
7. EAGAN, R.C., HOBBS, P. V. e RADKE, L.F., (1974)
J. Appl. Meteorol. 13, 535-552.
8. BARRET, L. B. e WADDEL, T.E., (1973)
"Cost of Air Pollution Damage: A Status Report", Publ. No
AP-85 U.S.E.P.A., Research Triangle Park, North Carolina.
9. BELL, J.N.B. e CLOUGH, W.S., (1973)
"Depression of Yield in Ryegrass Exposed to Sulphur Dioxide",
Nature, Vol. 241, January.
10. MATSUSHIMA, J. e BREMER, R.F., (1972)
"Influence of SO₂ and HF as a Mix or Reciprocal Exposure
on Citrus Growth and Development", Journal Air Poll. Cont.
Assoc. September.
11. ROUECHÉ, B., (1953)
"Eleven Blue Men.", Little, Brown, Boston, Massachussets.

12. McCABE, L.C. e CLAYTON, G.D., (1952)
"Arch Ind. Hyg. Occup.", Med. 6, 199-213.
13. MINISTRY OF HEALTH, (1954)
"Mortality and Morbidity During the London Fog of December 1952", Reports on Public Health and Related Subjects No 95, Table 1, pag. 2 - His Majesty Stationary Office, London, England.
14. CASSEL, E.J., MCCARROL, J.R., INGRAM, W. e WOLTER, D., (1965)
Arch. Environ. Health 10, 367-372.
15. HETTCHE, A., (1964)
Eur. Conf. Air Pollution, Paper No CPA/RN/I/AL/137.
16. TOKYO METROPOLITAN GOVERNMENT, (1971)
"Tokyo Fights Pollution", Kowa, Tokyo, Japan.
17. FREEMAN, G., JUHOS, L.T., FURIOSI, N.J., MUSSENDEN, R., STEVENS, R. e EVANS, M. J., (1974)
Arch. Environ. Health 29, 203-210.
18. PORT, C.D., COFFIN, D.L., KANE, P. e KETELS, K.V., (1977)
Journal Toxicol. Environmental Health 2, 589.
19. LASKIN, S., KUSCHNER, M. e DREW, R.T., (1970)
"Inhalation Carcinogenesis Symposium", Ser. No. 18 U.S. Atomic Energy Commission, Washington. D.C..
20. DIÁRIO DO GOVERNO, (1971)
Decreto Lei nº 270/71 de 19 de Junho.
21. GABINETE DA ÁREA DE SINES, (1974)
Introducing a Maritime Industrial Development Area at Sines, Portugal.
22. GABINETE DA ÁREA DE SINES, (1978)
Sines, uma Área Industrial em Desenvolvimento.
23. GABINETE DA ÁREA DE SINES, CREMER & WARNER CONSULTING ENGINEERS, (1974)
Calculations of Stack Heights for the petrosul Refinery, Sines, Portugal.

24. GABINETE DA ÁREA DE SINES, ENGINEERING SCIENCE, (1977)
"Air Quality Assesement of Proposed Urban-Industrial Complex, Sines," Portugal.
25. CANELAS, L. B., CONCEIÇÃO, J., HIGH, D. e MARCH, S., (1977)
"Planning for Industrial Development in Portugal" Air Pollution Control Association Meeting, Toronto, Canada.
26. CANELAS, L.B., CONCEIÇÃO, J., PORTER, R. e CHRISTIANSEN, J., (1977)
"Comparative Study of four Mathematical Air Dispersion Models for a New Urban Industrial Complex at Sines, Portugal". Committee on Challenges of Modern Society (NATO/CCMS) Annual Conference, Belgium.
27. ARGONNE NATIONAL LAB/E.P.A., (1978)
"Workbook for Comparison of Air Quality Models, Appendices," R.T.P. North Carolina.
28. HANNA, S., BRIGGS, G. e HOSKER, J. JR., (1982)
"Handbook on Atmospheric Diffusion", NOAA., U.S.A..
29. TAYLOR, G., (1921)
"Diffusion by Continuous Movements", Proc. London Math. Soc. 20:196.
30. SUTTON, O.G., (1943)
"A Theory of Eddy Diffusion in the Atmosphere", Proc. R. Soc. London, Ser. A 135.
31. SUTTON, O.G., (1953)
"Micrometeorology" Mc Graw Hill Book Company, New York.
32. REID, J., (1979)
"Markov Chains Simulations of Vertical Dispersion in the Neutral Surface Layer for Surface and Elevated Releases", Boundary Layer Meteorol. 16:3-22.
33. HANNA, S.R., (1973)
"Description of ATDL Computer Model for Dispersion for Multiple Sources", in Industrial Air Pollution Control, Ann Arbor Pub. Mich.

34. WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, (1972)
"Dispersion and Forecasting of Air Pollution" Technical Report n° 121, Geneva.
35. LANGE, R., (1978)
"A Three Dimensional Particle-in-Cell Model for the Dispersal of Atmospheric Pollutants and its Comparison to Regional Tracer Studies", J. Applied Meteorol. 17:320-329.
36. PASQUILL, F., (1975)
"The Dispersion of Materials in the Atmosphere Boundary Layer" Lectures on Air Pollution and Environmental Impact Analysis, American Meteorological Society, Boston.
37. PANDOLFO, J.P., e JACOBS, C.A., (1973)
"Tests of an Urban Meteorological Model (K) Using CO Validation Data in the Los Angeles Area. Vol I CEM Report 490a, Center for the Environment and Manag./Environmental Protection Agency.
38. ESCHENROEDER, A.Q., MARTINEZ, J.R. e NORDSIECK, R.A., (1972)
"Evaluation of a Diffusion Model for Photochemical Smog Simulation". Report by General Research Corporation for U.S. Environmental Protection Agency.
39. VENKATRAM, A., (1978)
"An Examination of Box Models for Air Quality Simulation", Atmos. Environ., 12; 2243-2250.
40. DORAN, J., HORST, T. e NICKOLA, P.W., (1978)
"Variations in Measured Values of Lateral Diffusion Parameters", J. Appl. Meteorol. 17 (6), 825-831.
41. HANNA, S.R., (1978)
"Diurnal Variations of the Stability Factor in the Simple ATDL Urban Dispersion Model", J. Air Pollut. Control Assoc. 28: 147-150.

42. BRIGGS, G.A., (1973)
"Diffusion Estimates for Small Emissions" A.T.D.L.
nº 79.
43. BRIGGS, G.A., (1975)
"Plume Rise Predictions" in Lectures on Air Pollution
and Env. Imp. Anal., American Meteorological Society, Bos
ton.
44. BRIGGS, G.A., (1982)
"Plume Rise and Buoyancy Effects" in Atmospheric Science
and Power Production, U.S. Department of Energy.
45. SUTTON, O.G., (1947)
"The Problem of Diffusion in the Lower Atmosphere" Quart.
J. Roy. Met. Soc. 73, 257-231.
46. GIFFORD, F.A., (1959)
"Computation of Pollution from Several Sources", Int. J.
Air Poll., 2, 109-110.
47. GIFFORD, F.A., (1960)
"Atmospheric Dispersion Calculations Using the Generalized
Gaussian Plume Model", Nuclear Safety, 2,2, 56-59, 67-68.
48. GIFFORD, F.A., (1975)
"Atmospheric Dispersion Models for Environmental Pollution
Applications", in Lectures on Air Poll. and Env. Impact
Analysis , American Meteorological Society, Boston.
49. GIFFORD, F.A., (1981)
"Horizontal Diffusion in the Atmosphere, A Lagrangian - Dyna
mical Theory", DOE, Los Alamos Scientific Laboratory.
50. HANNA, S.R., (1971)
"A Simple Method of Calculating Dispersion from Urban Area
Sources", J. Air Pollut. Control Ass., 21: 774-777.
51. TURNER, D., (1974)
"Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates", U.S.E.P.A
Research Triangle Park, North Carolina.

52. PASQUILL, F., (1961)
"The Estimation of the Dispersion of Windborne Material",
Meteorol. Mag., 90: 33-49.
53. GIFFORD, F.A., (1968)
"Use of Routine Meteorological Observations for Estimating Atmospheric Dispersion" Nuclear Safety 2 (4): 47-57.
54. GIFFORD, F.A., (1976)
"Turbulent Diffusion Typing Schemes - A review", Nucl. Saf. 17: 68-86.
55. BRIGGS, G.A., (1969)
"Plume Rise", A.E.C. Critical Review Series. United States Atomic Energy Commission.
56. TAYLOR, G.I., (1948)
"Dynamics of a Mass of Hot Gas Rising in Air", U.S. Atomic Energy Commission Report MDD C-919, Los Alamos Scientific Laboratory.
57. MOSES, H., (1969)
"Mathematical Urban Air Pollution Models" ANL/ES-RPY-001, Argonne Nat. Lab..
58. DE MARRAIS, G.A., (1979)
"A History of Air Pollution Meteorology Through 1969" NOAA Technical Memorandum ERL ARL-74.
59. ZIB, P., (1977)
"Urban Air Pollution Dispersion Models - A Critical Survey" Department of Geography, University of Witwatersrand, Johannesburg.
60. ESCHENROEDER, A., (1975)
"An Assessment of Models for Predicting Air Quality" Environmental Research and Technology, Inc., California.

61. NATO/CCMS (1971)

"Proceedings of the Second Meeting of the Expert Panel on Air Pollution Modeling", Paris, France, Committee on Challenges of Modern Society, NATO, Belgium, 1971.

62. NATO/CCMS (1972)

"Proceedings of the Third Meeting of the Expert Panel on Air Pollution Modeling, Paris, France, CCMS/NATO, Belgium.

63. NATO/CCMS (1973)

"Proceedings of the Fourth Meeting of the Expert Panel on Air Pollution Modeling", Oberursel, Federal Republic of Germany, CCMS/NATO, Belgium.

64. NATO/CCMS (1974)

"Proceedings of the Fifth Meeting of the Expert Panel on Air Pollution Modeling", Roskilde, Denmark, CCMS/NATO, Belgium.

65. NATO/CCMS (1975)

"Proceedings of the Sixth International Technical Meeting on Air Pollution Modeling and its Application", Frankfurt, NATO/CCMS, Belgium.

66. NATO/CCMS (1976)

"Proceedings of the Seventh International Technical Meeting on Air Pollution Modeling and its Application", Airlie House, Virginia USA, NATO/CCMS Public. 51, Belgium.

67. NATO/CCMS (1977)

"Proceedings of the Eighth International Technical Meeting on Air Pollution Modeling and its Application", Louvain-la-Neuve, Committee on Challenges of Modern Society/NATO, Belgium.

68. NATO/CCMS (1978)

"Proceedings of the Ninth International Technical Meeting on Air Pollution Modeling and its Application", Downsview, Ontario, Canada, Committee on Challenges of Modern Society, NATO, Belgium.

69. AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY, (1971)
"Preprints of Conference on Air Pollution Meteorology",
Raleigh, N.C..
70. AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY, (1974)
"Preprints of Symposium on Atmospheric Diffusion and
Air Pollution", Santa Barbara, California.
71. AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY, (1976)
"Preprints of Third Symposium on Atmospheric Turbulence
Diffusion and Air Quality", Raleigh N.C..
72. AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY, (1979)
"Preprints of Fourth Symposium on Turbulence Diffusion
and Air Pollution", Reno NV.
73. AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY, (1977)
"Preprints of Joint Conference on Applications of Air
Pollution Meteorology", Salt Lake City, U.T.
74. SHIEH, L.J., DAVIDSON, B. e FRIEND, J.P., (1973)
"A Model of Diffusion in Urban Atmospheres: SO₂ in Greater
New York" Proceedings of Symposium on Multiple Source Ur-
ban Diffusion Models, U.S.E.P.A..
75. DAVIDSON, B., (1967)
"A Summary of the New York Urban Air Pollution Dynamics
Research Program". J. Air Poll. Control Assoc. 17.
76. HANNA, S.R., (1973)
"Simple Dispersion Model for the Analysis of Chemically
Reactive Pollutants" Atmos. Environ. 7: 803.
77. SHIR, C.C. e SHIEH, J.J., (1974)
"A Generalized Urban Air Pollution and its Application to
the Study of SO₂ distributions in the St Louis Metropoli-
tan Area" J. Appl. Meteorol. 13: 185.
78. BOWNE, N.E., (1969)
"A Simulation Model for Air Pollution Over Connecticut" J.
Air Poll. Control Assoc. 19: 570.

79. CLARKE, J.F., (1964)
"A Simple Diffusion Model for Calculating Concentration from Multiple Sources", Journal Air Poll. Control Assoc. 14, 347.
80. KOGLER, J.B., SHOLTES, R.S., DANIS, A.L. e HARDING, C.I., (1967)
"A Multivariate Model for Atmospheric Dispersion Predictions" J. Air Poll. Control Assoc. 17: 211.
81. GIFFORD, F.A., (1974)
"The Simple ATDL Urban Diffusion Model" in Proceedings of the Fourth Meeting of the Expert Panel on Air Pollution Modeling, NATO/CCMS.
82. DEMERJIAN, K.L., (1976)
"Urban Air Quality Simulation Models - Current Status and Future Prospects" Symposium on Air Pollution Diffusion Modeling, Canberra, Australia.
83. MARCH, S., (1974)
"Preliminary Users Manual for the APMAX Computer Program" Engineering Science Inc., Texas.
84. BRINGFELT, B., HJORTH, T. e SING, S., (1974)
"A Numerical Air Pollution Dispersion Model for Central Stockholm", Atmos. Env. 8: 131.
85. TURNER, D.B., (1979)
"Atmospheric Dispersion Modeling - A Critical Review" Journal of Air Poll. Control Assoc. 5, 502-519.
86. BOWERS, J.F., BJORKLUND, J.R. e CHENEY, C.S., (1979)
"Industrial Source Complex (ISC)-Dispersion Model User's Guide" Vol I and Vol II, NTIS PP-80-133044, 133051.
87. DEMERJIAN, K.L., (1976)
"Oxidant Modeling Status", Transportation Research Record Series 670, Trans Research Bd, National Res. Council Washington D.C. pag. 75-39.

83. BJORKLUND, J.R. e BOWERS. J.F. , (1979)
"User's Instructions for the SHORTZ and LONGZ Computer Programs" Vol 1 and 2. TR-79-131-01. H.E. Cramer Co, Inc. University of Utah Research Park, Salt Lake City, Utah.
89. BENSON, P. , (1979)
"Caline 3, A Versatile Dispersion Model for Predicting Air Pollution Levels near Highways and Arterial Streets" Report Number FHWA/CA/TL-79/23 Fed. Highway Admin.
90. BASS, A. e BENKLEY, C. , (1980)
"Development of Mesoscale Air Quality Models: Vol. 2 , User's Guide to Mesoplume", EPA 600/7-80-057.
91. SCHULMAM, L.L. e SCIRE, J. , (1979)
"Buoyant Line and Point Source Dispersion Model User's Guide", Document P-7304B, Environmental Research and Technology Inc., Concord, Massachusetts.
92. JOHNSON, W.B., LUDWIG, F.L., DABBERDT, W.F. e ALLEN, R.J., (1973)
"An Urban Diffusion Simulation Model for Carbon Monoxide" J. Air Pollution Control Assoc. 23: 490.
93. SAKAMAKI, F., FUKUDA, M. e AKIMOTO, H. , (1982)
"Computer Modeling of Photochemical Ozone Formation" Environ. Sci. Technol. Vol 16 n° 1, 45-52.
94. DUMBAULD, R.K., SATERLIE, S.F. e RAFFERTY, J.E. , (1981)
"A Dispersion - Optics Model for Calculating Visibility Impairment and Comparison of Model Estimates with Field Measurements" Atm. Env. Vol 15 n° 10/11 2185, 2196.
95. BASSET, M., GELBARD, F. e SEINFELD, J. , (1981)
"Mathematical Model for Multicomponent Aerosol Formation and Growth in Plumes" Atm. Envir. Vol 15 n° 10/11 2395-2406.
96. LUDWIG, F.L. , (1981)
"A Model for Simulating the Behaviour of Pollutants Emitted at Ground Level Under Time-Varying Meteorological Conditions" Atm. Envir. Vol. 15, n° 6, pag. 989-999.

97. WANG, L., WANG, M.H. e BERGENTHAL, J., (1981)
"Predicting the Dispersion of Airborne Effluents for Environmental Management" J. Envir. Manag. 12, 247-270.
98. BAASEL, W.D., (1981)
"A Single Technique for Determining the Maximum Ground Level Concentration of An Elevated Gaseous Release" J. Air Poll. Cont. Assoc. Vol 31. n° 8, 866-870.
99. KOTAKE, S. e SANO, T., (1981)
"Simulation Model of Air Pollution in Complex Terrains Including Streets and Buildings" Atm. Envir. Vol 15, n° 6, pag. 1001-1009.
100. LEDOLTER, J. e TIAO, G., (1979)
"Statistical Models for Ambient Air Pollutants with Special Reference to the Los Angeles City Catalyst Study Data" Env. Sci. Techn. Vol 13, 10, 1233-1240.
101. VENKATRAMAN, A., LEY, B.E. e WONG, S.Y., (1982)
"A Statistical Model to Estimate Long-Term Concentrations of Pollutants Associated with Long Range Transport" Atmos. Envir. Vol. 16, n° 2, pag. 249-257.
102. TIAO, G. e HILLMER, S., (1978)
"Statistical Models for Ambient Concentrations of Carbon Monoxide, Lead and Sulfate, Based on LACS Data" Env. Science & Techn. 12, n° 7, 820-828.
103. DRAXLER, R., (1980)
"An Improved Gaussian Model for Long-Term Average Air Concentration Estimates" Atm. Environ. Vol. 14, pag. 597-601,
104. ALAM, M.K., (1981)
"Solution of the Steady State, Three Dimensional Atmospheric Diffusion Equation for Sulphur Dioxide and Sulfate Dispersion from Point Sources" Atmos. Environ. Vol 15 n° 7 pag. 1221-1225.

105. CHOU, D.C. e SUNG, J.Y., (1981)
"A Practical Computerized Atmospheric Pollution Dispersion Model with Altitude Dependent Diffusivities: Application to Carbon Monoxide Concentration Calculation" Intern. Journal Envir. Studies Vol 16, pag. 91-100.
106. VENKATRAN, A. e VET, R., (1981)
"Modeling of Dispersion from Tall Stacks" Atm. Envir. Vol. 15, n° 9 Pag. 1531-1538.
107. FAY, J. e ROSENZWEIG, J., (1980)
"An Analytical Diffusion Model for Long Distance Transport of Air Pollutants" Atm. Envir. Vol. 14, 355-365.
108. JOURNAL, R. e VIDON, R. (1980)
"Dispersion de Polluants dans une Rue en U" Pollution Atmospherique n° 83.
109. CHRISTIANSEN, J.H. e PORTER, R.A., (1975)
"Ambient Air Quality Predictions with the Fast Air Quality Model" Proceedings of the Conference in Ambient Air Quality Measurements, Southwest Section of Air Pollution Control Association, pp III-34-35.
110. PORTER, R. e CHRISTIANSEN, J., (1976)
"Two Efficient Gaussian Plume Models Developed at the Texas Air Control Board" 7th NATO/CCMS International Technical Meeting.
111. TAN, S.H., (1967)
"Flare Systems Design Simplified" Hydrocarbon Processing 46(1) 172-176.
112. THERMOELECTRON CORPORATION, (1982)
"Instruction Manual, Pulsed Fluorescent Ambient SO₂ Analyser" Hopkinton, Mass.
113. O'KEEFE e ORTMAN, (1966)
"Permeation Tubes" Analytical Chemistry 38, 760.

114. THERMO ELECTRON CORPOFATION, (1978)
"Instruction Manual Model 143 Permeation Tube Calibrator", Hopkington, Massachussets.
115. PERRY, CHILTON, e KIRKPATRICK, (1969)
"Chemical Engineer's Handbook" 4th Edition, McGraw-Hill.
116. FOUST, A., WENZEL, L., CLUMP, C., MAUS, L. e ANDERSEN, B., (1960)
"Principles of Unit Operations", John Wiley & Sons, Inc..
117. PETROGAL, (1979)
"Flow-Sheet Geral da Refinaria de Sines".
118. PETROGAL, (1979)
"Flow-Sheet da Unidade de Claus".
119. PETROGAL, (1979)
"Esquemas simplificados diversos de várias unidades".
120. GUYOT, G., (1982)
"Fiabilité des Unités Claus des Raffineries Portugaises",
Organisation Mondiale de la Santé.
121. CNP, (1982)
"Características tecnológicas da Central Térmica do Complexo Petroquímico".
122. INSTITUT FRANCAIS DU PETROLE, (1971)
Procedés de Petrochimie, Editions Technip, Paris.
123. CANELAS, L., (1977)
"Technology and Pollution Control on Polyethylene Plants",
Gabinete da Área de Sines (GAS).
124. CANELAS, L., (1977)
"Technology and Pollution Control on Ethylene Plants", GAS.
125. SILVA, P. SOUSA, (1981)
"Ventos de Sines" Divisão de Informática e Matemáticas Aplicadas do GAS, Junho.

126. CANELAS, L., (1983)
"Simulação do transporte e Difusão de Gases em Sines - a importância dos parâmetros meteorológicos", GAS Fevereiro.
127. GUZEWICH, D.C. e PRINGLE, J.B., (1977)
"Validation of the EPA-P.T.M.T.P. Short Term Gaussian Dispersion Model" J. Air Poll. Cont. Assoc. Vol., 27 nº 6.
128. U.S.E.P.A., O.A.Q.P.S. e O.A.N.R., (1981)
"Accuracy of Air Quality Models", Research Triangle Park NC.
129. HODANBOSI, R.F. e PETERS, L.K., (1981)
"Evaluation of RAM Model for Cleveland, Ohio", J. Air Poll. Cont. Assoc., Vol. 31 nº 3.
130. SCHULMAN, L.L., SCIRE, J.S. e BASS. A., (1982)
"Evaluation of the ISCST and RAM Models at an Industrial Complex", 3rd Joint Conference on Application of Air Pollution Meteorology, sponsored by APCA and AMS.
131. BROBERG, B. e MIKSAD. R., (1982)
"A Comparison of the Texas Episodic Model with Observed Concentrations" Texas Air Control Board.
132. U.S.E.P.A., O.A.Q.P.S., (1979)
"Procedures for Evaluating the Performance of Air Quality Simulation Models", Research Triangle Park EPA-450/4-79-033.
133. U.S.E.P.A., O.A.Q.P.S., (1979)
"Performance Measures and Standards for Air Quality Simulation Models" R.T.P., EPA-450/4-79-032.
134. JONES, K., RUCH, R. BARONE, J., WALSH J. e KARPOVICH R., (1983)
"The Rationale and Need to Consider an Alternative to EKMA", J. Air Poll. Cont. Assoc. 33, 330-332.

135. A.M.S., AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY, (1981)
"Air Quality Modeling and the Clean Air Act: Recommendations to E.P.A. on Dispersion Modeling for Regulatory Applications", Boston.
136. FOX D., (1980)
"Judging Air Quality Model Performance, a Summary of the A.M.S. Workshop on Dispersion Model Performance" Woods Hole, Massachussets.
137. BOWNE, N., (1981)
"Validation and Performance Criteria, Air Quality Models" Air Quality and the Clean Air Act, A.M.S., Boston.
138. KOCH, R.C. e FISHER, G.E., (1973)
"Evaluation of the Multiple Source Gaussian Plume Diffusion Model, Phase I" EPA 650/4-75-18a EPA, RTP.
139. BRAIG, A., (1975)
"Results of the Revised ATDL Model Compared with Results of the AQDM and CDM Models" 6th NATO, CCMS Meeting, Frankfurt.
140. PRAHM, L.P. e CHRISTENSEN M., (1977)
"Validation of a Multiple Source Gaussian Air Quality Model" Atmos. Envir. Vol 11, 791-95.

ÍNDICE DE FIGURAS

		Pág.
Figura 1.1	Localização de Algumas Produções Poluentes do País	12
Figura 3.1	Efeitos do Dióxido de Enxofre na Vegetação	36
Figura 3.2	Efeitos do NO ₂ na Vegetação	37
Figura 3.3	Efeitos do NO ₂ na Saúde Humana	44
Figura 3.4	Efeitos das Partículas em Suspensão na Saúde Humana	45
Figura 3.5	Efeitos do Dióxido de Enxofre na Saúde Humana	48
Figura 4.1	Distribuição Gaussiana da Concentra- ção Segundo o Eixo dos yy	66
Figura 4.2	Distribuição da Concentração Segundo os Eixos dos yy e dos zz. Direcção do Vento Segundo o Eixo dos xx	66
Figura 4.3	Os Valores de σ_y	70
Figura 4.4	Os Valores de σ_z	71
Figura 4.5	Os Valores de $\sigma_y \times \sigma_z$	72

	Pág.
Figura 5.1	Sistema de Coordenadas Polares Usado no TCM 121
Figura 5.2	Localização da Fonte Emissora e do Receptor em Coordenadas Polares Quando o Vento Sopra da Direcção $\pi + \beta$ 123
Figura 5.3	Índices dos Sectores de Direcção do Vento 143
Figura 6.1	Cotas, em Relação ao Nível do Mar, das Estações de Medição e das Extremidades das Chaminés e "Flare". Suas Localizações 153
Figura 6.2	Princípio de Operação de um Medidor de SO ₂ no Ar Ambiente 159
Figura 6.3	Trajecto da Amostra no Analisador ... 160
Figura 6.4	Analisador de SO ₂ 161
Figura 6.5	Concentrações Médias Trimestrais de SO ₂ Observadas na Área de Sines de 1979 a 1982 195
Figura 7.1	Unidades Anti-Poluição do Ar da Refinaria de Sines 199

		Pág.
Figura 7.2	Diagrama de Uma Unidade de Claus	203
Figura 7.3	Steam - Cracking, Diagrama de Processo.	208
Figura 7.4	Diagrama de Processo de Produção do Polietileno de Baixa Densidade	209
Figura 7.5	Diagrama de Processo de Produção de Polietileno de Alta Densidade	210
Figura 7.6	Diagrama de Processo de Produção de Polipropileno	211
Figura 9.1	Concentrações Médias Previstas em Sines (STARCAN)	277
Figura 9.2	Concentrações Médias Previstas em Sines (STAR)	278
Figura 10.1	Valores das Concentrações Observadas e Previstas de Dióxido de Enxofre em Monte Velho	300
Figura 10.2	Valores das Concentrações Observadas e Previstas de Dióxido de Enxofre em Monte Chãos	301
Figura 10.3	Valores das Concentrações Observadas e Previstas de Dióxido de Enxofre na Sonega	302

Pág.

Figura 10.4	Valores das Concentrações Trimes- trais Observadas e Previstas de Dióxido de Enxofre de 1979 a 1982 (STARCAN)	307
Figura 10.5	Intervalo de Confiança de 95% em Relação à Recta de Regressão Glo- bal (STARCAN)	315
Figura 10.6	Comparação entre Frequências Rela- tivas Acumuladas de Concentrações Observadas e Previstas (Programa STARCAN; "Unpaired Comparison")	31

ÍNDICE DE QUADROS

			Pág.
Quadro	3.I	Efeitos de Poluentes Atmosféricos nos Materiais	30
Quadro	3.II	Efeitos do Ozono, Dióxido de Enxofre e Azoto, na Vegetação	33
Quadro	3.III	Efeitos do SO ₂ em Pinheiros do Canadá	34
Quadro	3.IV	Efeitos dos Oxidantes (Ozono) na Vegetação	34
Quadro	3.V	Zonas de Efeitos Críticos do Dióxido de Enxofre	46
Quadro	3.VI	Standards de Ar Ambiente para SO ₂	47
Quadro	4.I	Classes de Estabilidade	69
Quadro	4.II	Relação Entre Valores Observados e Calculados com Diferentes Equações de Elevação da Pluma	80
Quadro	4.III	Relação Concentração/Tempo de Amostragem	82
Quadro	5.I	Os Coeficientes de σ_z	132

		Pág.
Quadro 5.II	Valores do Expoente de Correção da Velocidade do Vento em Altitude, P, para as Diferentes Classes de Estabilidade	135
Quadro 5.III	Equações de Elevação da Pluma	137
Quadro 5.IV	Valores de ρ e H para os quais o TCM tem Previamente Calculados os Correspondentes Valores de $t_{1/2}$ e K	139
Quadro 5.V	Índices dos Sectores de Direcção de Vento	142
Quadro 6.I	Exemplos de Dados Observados durante 4 anos em Três Estações de Medida	169
Quadro 6.II	Idem	171
Quadro 6.III	Idem	173
Quadro 6.IV	Idem	175
Quadro 6.V	Idem	177
Quadro 6.VI	Idem	179
Quadro 6.VII	Idem	181
Quadro 6.VIII	Idem	183
Quadro 6.IX	Idem	185
Quadro 6.X	Idem	187

			Pág.
Quadro	6.XI	Concentrações Médias Mensais 1979 Área de Sines	189
Quadro	6.XII	Concentrações Médias Mensais 1980 Área de Sines	190
Quadro	6.XIII	Concentrações Médias Mensais 1981 Área de Sines	191
Quadro	6.XIV	Concentrações Médias Mensais 1982 Área de Sines	192
Quadro	6.XV	Concentrações Médias Trimestrais de SO_2 Observadas na Área de Si- nes de 1979 a 1982	193
Quadro	6.XVI	Concentrações Médias Anuais de Dióxido de Enxofre Observadas na Área de Sines de 1979 a 1982 ...	194
Quadro	8.I	Teores de Enxofre no Fuel Consu- mido na Refinaria de Sines, por Tanques, nos Meses de Janeiro e Fevereiro de 1981	215
Quadro	8.II	Cargas de H_2S para a Unidade de Claus, Dezembro de 1981	217
Quadro	8.III	Cargas de H_2S para a Unidade de Claus, Outubro de 1981	218
Quadro	8.IV	Quantidades de Fuel Utilizadas na Refinaria (Ton.)	219

		Pág.
Quadro 9.I	STARCAN - Inverno, Classes A e B	262
Quadro 9.II	" " " B e C	263
Quadro 9.III	" " " D e E	264
Quadro 9.IV	" " " E e F	265
Quadro 9.V	STARCAN - Primavera, Classes A e B ...	266
Quadro 9.VI	" " " B e C ...	267
Quadro 9.VII	" " " D e E ...	268
Quadro 9.VIII	" " " E e F ...	269
Quadro 9.IX	Concentrações Médias Previstas para Sines (STAR e STARCAN) com o TCM	276
Quadro 10.I	Resultados da Calibração e Avaliação de Koch e Fisher (1973), para o Dióxido de Enxofre em Nova York	286
Quadro 10.II	Resultados da Calibração e Avaliação de Eraig (1975) para o Dióxido de Enxofre em Frankfurt	287
Quadro 10.III	Resultados da Calibração e Avaliação de Prahm e Christensen (1977) para o Dióxido de Enxofre em Cope- nhaga	289

		Pág.
Quadro 10.IV	Comparação das Concentrações Observadas Experimentalmente e Previs- tas por Simulação com o TCM, para o Poluente Dióxido de Enxofre na Área de Sines, durante os anos de 1979 a 1982	299
Quadro 10.V	Análise de Regressão - Para o Con- junto dos Valores dos Quatro Anos ...	304
Quadro 10.VI	Análise de Regressão - Por Valores Anuais	308
Quadro 10.VII	Análise de Regressão - Por Esta- ções de Medição Experimental	309
Quadro 10.VIII	Análise de Regressão - Por Esta- ção do Ano (de 1979 a 1982)	310
Quadro 10.IX	Análise de Regressão - Teste a Vá- rios Tipos de Curvas (Dados Glo- bais, Programa STARCAN)	312
Quadro 10.X	Cálculo das Bandas de Confiança de 95% para a Recta de Regressão	313
Quadro 10.XI	Médias das Concentrações Trimes- trais Observadas e Previstas - (Conjunto Global de Valores e Va- lores Anuais).....	316

		Pág.
Quadro 10.XII	Médias das Concentrações Trimes- trais Observadas e Previstas - Por Estações do Ano e por Esta- ções de Medição Experimental	317
Quadro 10.XIII	Teste de Student às Diferenças ("Residuals")	318
Quadro 10.XIV	Factores de Relação entre as Concentrações (STARCAN)	319
Quadro 10.XV	Valores das Diferenças entre as Concentrações Observadas e Pre- vistas (STARCAN)	319
Quadro 10.XVI	Resultados dos Testes de Kolmo- gorov-Smirnov e χ^2	320

ÍNDICE DE AUTORES

ALAM, M.K., (1981)

"Solution of the Steady State, Three Dimensional Atmospheric Diffusion Equation for Sulphur Dioxide and Sulfate Dispersion from Point Sources" Atmos. Environ. Vol 15 n° 7 Pag. 1221-1225.

AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS, (1979)

"Threshold Limit Values for Chemical Substances in Workroom Air", Cincinnati, Ohio.

AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY, (1971)

"Preprints of Conference on Air Pollution Meteorology", Raleigh, N.C..

AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY, (1974)

"Preprints of Symposium on Atmospheric Diffusion and Air Pollution", Santa Barbara, California.

AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY, (1976)

"Preprints of Third Symposium on Atmospheric Turbulence Diffusion and Air Quality", Raleigh N.C..

AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY, (1977)

"Preprints of Joint Conference on Applications of Air Pollution Meteorology", Salt Lake City, U.T..

AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY, (1979)

"Preprints of Fourth Symposium on Turbulence Diffusion and Air Pollution", Reno NV.

A.M.S., AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY, (1981)

"Air Quality Modeling and the Clean Air Act: Recommendations to E.P.A. on Dispersion Modeling for Regulatory Applications", Boston.

- ARGONNE NATIONAL LAB/E.P.A., (1978)
"Workbook for Comparison of Air Quality Models, Appendices", R.T.P. North Carolina.
- BAASEL, W.D., (1981)
"A Single Technique for Determining the Maximum Ground Level Concentration of An Elevated Gaseous Release" J. Air Poll. Cont. Assoc. Vol 31, n° 8, 866-870.
- BARRET, L.B. e WADDEL, T.E., (1973)
"Cost of Air Pollution Damage: A Status Report", Publ. No AP-85 U.S.E.P.A., Research Triangle Park, North Carolina.
- BASS, A. e BENKLEY, C., (1980)
"Development of Mesoscale Air Quality Models: Vol. 2, User's Guide to Mesoplume", EPA 600/7-80-057.
- BASSET, M., GELBARD, F. e SEINFELD, J., (1981)
"Mathematical Model for Multicomponent Aerosol Formation and Growth in Plumes" Atm. Envir. Vol 15 n° 10/11 2395-2406.
- BELL, J.N.B. e CLOUGH, W.S., (1973)
"Depression of Yield in Ryegrass Exposed to Sulphur Dioxide", Nature, Vol. 241, January.
- BENSON, P., (1979)
"Caline 3, A Versatile Dispersion Model for Predicting Air Pollution Levels near Highways and Arterial Streets" Report Number FHWA/CA/TL-79/23 Fed. Highway Admin.
- BJORKLUND, J.R. e BOWERS, J.F., (1979)
"User's Instructions for the SHORTZ and LONGZ Computer Programs" Vol 1 and 2. TR-79-131-01. H.E. Cramer Co, Inc. University of Utah Research Park, Salt Lake City, Utah.

- BOWERS, J.F., BJORKLUND, J.R. e CHENEY, C.S., (1979)
"Industrial Source Complex (ISC)-Dispersion Model User's Guide" Vol I and Vol II, NTIS PP-80-133044, 133051.
- BOWNE, N.E., (1969)
"A Simulation Model for Air Pollution Over Connecticut" J. Air Poll. Control Assoc. 19: 570.
- BOWNE, N., (1981)
"Validation and Performance Criteria, Air Quality Models" Air Quality and the Clean Air Act, A.M.S., Boston.
- BRAIG, A., (1975)
"Results of the Revised ATDL Model Compared with Results of the AQDM and CDM Models" 6th NATO, CCMS Meeting, Frankfurt.
- BRIGGS, G.A., (1969)
"Plume Rise", A.E.C. Critical Review Series. United States Atomic Energy Commission.
- BRIGGS, G.A., (1973)
"Diffusion Estimates for Small Emissions" A.T.D.L. n° 79.
- BRIGGS, G.A., (1975)
"Plume Rise Predictions" in Lectures on Air Pollution and Env. Imp. Anal., American Meteorological Society, Boston.
- BRIGGS, G.A., (1982)
"Plume Rise and Buoyancy Effects" in Atmospheric Science and Power Production, U.S. Department of Energy.

- BRINGFELT, B., HJORTH, T. e SING, S., (1974)
"A Numerical Air Pollution Dispersion Model for Central Stockholm", Atmos. Env. 8: 131.
- BROBERG, B. e MIKSAD. R., (1982)
"A Comparison of the Texas Episodic Model with Observed Concentrations" Texas Air Control Board.
- CANELAS, L.B., CONCEIÇÃO, J., HIGH, D. e MARCH, S., (1977)
"Planning for Industrial Development in Portugal" Air Pollution Control Association Meeting, Toronto, Canada.
- CANELAS, L.B., CONCEIÇÃO, J., PORTER, R. e CHRISTIANSEN, J., (1977)
"Comparative Study of four Mathematical Air Dispersion Models for a New Urban Industrial Complex at Sines, Portugal". Committee on Challenges of Modern Society (NATO/CCMS) Annual Conference, Belgium.
- CANELAS, L., (1977)
"Technology and Pollution Control on Polyethylene Plants", Gabinete da Área de Sines (GAS).
- CANELAS, L., (1977)
"Technology and Pollution Control on Ethylene Plants", GAS.
- CANELAS, L., (1983)
"Simulação do transporte e Difusão de Gases em Sines - a importância dos parâmetros meteorológicos", GAS Fevereiro.
- CASSEL, E.J., MCCARROL, J.R., INGRAM, W. e WOLTER, D., (1965)
"Arch. Environ. Health 10, 367-372.
- CHARLSON, R.J. e AHLQUIST, N.C., (1969)
"Atmosph. Environ. 3, 653-656.

CHOU, D.C. e SUNG, J.Y., (1981)

"A Practical Computerized Atmospheric Pollution Dispersion Model with Altitude Dependent Diffusivities: Application to Carbon Monoxide Concentration Calculation" Intern. Journal Envir. Studies Vol 16, pag. 91-100.

CHRISTIANSEN, J.H. e PORTER, R.A., (1975)

"Ambient Air Quality Predictions with the Fast Air Quality Model" Proceedings of the Conference in Ambient Air Quality Measurements, Southwest Section of Air Pollution Control Association, pp III-34-35.

CLARKE, J.F., (1964)

"A Simple Diffusion Model for Calculating Concentration from Multiple Sources", Journal Air Poll. Control Assoc. 14, 347.

CNP, (1982)

"Características Tecnológicas da Central Térmica do Complexo Petroquímico".

DAVIDSON, B., (1967)

"A Summary of the New York Urban Air Pollution Dynamics Research Program". J. Air Poll. Control Assoc. 17.

DE MARRAIS, G.A., (1979)

"A History of Air Pollution Meteorology Through 1969" NOAA Technical Memorandum ERL ARL-74.

DEMERJIAN, K.L., (1976)

"Oxidant Modeling Status", Transportation Research Record Series 670, Trans Research Bd, National Res. Council Washington D.C. pag. 75-89.

DEMERJIAN, K.L., (1976)

"Urban Air Quality Simulation Models - Current Status and Future Prospects" Symposium on Air Pollution Diffusion Modeling, Canberra, Australia.

DIÁRIO DO GOVERNO, (1971)

Decreto Lei nº 270/71 de 19 de Junho.

DORAN, J., HORST, T. e NICKOLA, P.W., (1978)

"Variations in Measured Values of Lateral Diffusion Parameters", J. Appl. Meteorol. 17 (6), 825-831.

DRAXLER, R., (1980)

"An Improved Gaussian Model for Long-Term Average Air Concentration Estimates" Atm. Environ. Vol. 14, pag. 597-601.

DUMBAULD, R.K., SATERLIE, S.F. e RAFFERTY, J.E., (1981)

"A Dispersion - Optics Model for Calculating Visibility Impairment and Comparison of Model Estimates with Field Measurements" Atm. Env. Vol 15 nº 10/11 2185, 2196.

EAGAN, R.C., HOBBS, P.V. e RADKE, L.F., (1974)

J. Appl. Meteorol. 13, 535-552.

ESCHENROEDER, A.Q., MARTINEZ, J.R. e NORDSIECK, R.A., (1972)

"Evaluation of a Diffusion Model for Photochemical Smog Simulation". Report by General Research Corporation for U.S. Environmental Protection Agency.

ESCHENROEDER, A., (1975)

"An Assessment of Models for Predicting Air Quality" Environmental Research and Technology, Inc., California.

FAY, J. e ROSENZWEIG, J., (1980)

"An Analytical Diffusion Model for Long Distance Transport of Air Pollutants" Atm. Envir. Vol. 14, 355-365.

FOUST, A., WENZEL, L., CLUMP, C., MAUS, L. e ANDERSEN, B., (1960)
"Principles of Unit Operations", John Wiley & Sons, Inc..

FOX, D., (1980)

"Judging Air Quality Model Performance, a Summary of
the A.M.C Workshop on Dispersion Model Performance" Woods
Hole, Massachusetts.

FREEMAN, G., JUHOS, L.T., FURIOSI, N.J., MUSSENDEN, R., STEVENS,
R. e EVANS, M. J., (1974)

Arch. Environ. Health 29, 203-210.

GABINETE DA ÁREA DE SINES, (1974)

Introducing a Maritime Industrial Development Area at
Sines, Portugal.

GABINETE DA ÁREA DE SINES, CREMER & WARNER CONSULTING EN-
GINEERS, (1974)

Calculations of Stack Heights for the Petrosul Refine-
ry, Sines, Portugal.

GABINETE DA ÁREA DE SINES, ENGINEERING SCIENCE, (1977)

"Air Quality Assessement of Proposed Urban-Industrial
Complex, Sines", Portugal.

GABINETE DA ÁREA DE SINES, (1978)

Sines, uma Área Industrial em Desenvolvimento.

GIFFORD, F.A., (1959)

"Computation of Pollution from Several Sources", Int.
J. Air Poll., 2, 109-110.

GIFFORD, F.A., (1960)

"Atmospheric Dispersion Calculations Using the Generali-
zed Gaussian Plume Model", Nuclear Safety, 2,2, 56-59,
67-68.

GIFFORD, F.A., (1968)

"Use of Routine Meteorological Observations for Estimating Atmospheric Dispersion" Nuclear Safety 2 (4): 47-57.

GIFFORD, F.A., (1974)

"The Simple ATDL Urban Diffusion Model" in Proceedings of the Fourth Meeting of the Expert Panel on Air Pollution Modeling, NATO/CCMS.

GIFFORD, F.A., (1975)

"Atmospheric Dispersion Models for Environmental Pollution Applications", in Lectures on Air Poll. and Env. Impact Analysis, American Meteorological Society, Boston.

GIFFORD, F.A., (1976)

"Turbulent Diffusion Typing Schemes - A review", Nucl. Saf. 17: 68-86.

GIFFORD, F.A., (1981)

"Horizontal Diffusion in the Atmosphere, A Lagrangian - Dynamical Theory", DOE, Los Alamos Scientific Laboratory.

GUYOT, G., (1982)

"Fiabilité des Unités Claus des Raffineries Portugaises", Organisation Mondiale de la Santé.

GUZEWICH, D.C. e PRINGLE, J.B., (1977)

"Validation of the EPA-P.T.M.T.P. Short Term Gaussian Dispersion Model" J. Air Poll. Cont. Assoc. Vol., 27 n° 6.

HANNA, S.R., (1971)

"A Simple Method of Calculating Dispersion from Urban Area Sources", J. Air Pollut. Control Ass., 21: 774-777.

HANNA, S.R., (1973)

"Simple Dispersion Model for the Analysis of Chemically Reactive Pollutants" Atmos. Environ. 7: 803.

HANNA, S.R., (1973)

"Description of ATDL Computer Model for Dispersion for Multiple Sources", in Industrial Air Pollution Control, Ann Arbor Pub. Mich.

HANNA, S.R., (1978)

"Diurnal Variations of the Stability Factor in the Simple ATDL Urban Dispersion Model", J. Air Pollut. Control Assoc. 28: 147-150.

HANNA, S., BRIGGS, G. e HOSKER, J. JR., (1982)

"Handbook on Atmospheric Diffusion", NOAA., U.S.A..

HETTICHE, A., (1964)

Eur. Conf. Air Pollution, Paper No CPA/RN/I/AL/137.

HODANBOSI, R.F. e PETERS, L.K., (1981)

"Evaluation of RAM Model for Cleveland, Ohio", J. Air Poll. Cont. Assoc., Vol. 31 nº 3.

INSTITUT FRANÇAIS DU PETROLE, (1971)

"Procédés de Petrochimie", Editions Technip, Paris.

JOHNSON, W.B., LUDWIG, F.L., DABBERDT, W.F. e ALLEN, R.J. (1973)

"An Urban Diffusion Simulation Model for Carbon Monoxide" J. Air Pollution Control Assoc. 23: 490.

JONES, K., RUCH, R. BARONE, J., WALSH J. e KARPOVICH R., (1983)

"The Rationale and Need to Consider an Alternative to EKMA", J. Air Poll. Cont. Assoc. 33, 330-332.

JOUMARD, R. e VIDON, R. (1980)

"Dispersion de Polluants dans une Rue en U" Pollution Atmospherique nº 88.

- KOCH, R.C. e FISHER, G.E., (1973)
"Evaluation of the Multiple Source Gaussian Plume Diffu
sion Model, Phase I" EPA 650/4-75-18a EPA, RTP.
- KOOGLER, J.B., SHOLTES, R.S., DANIS, A.L. e HARDING, C.I., (1967)
"A Multivariate Model for Atmospheric Dispersion Predic
tions" J. Air Poll. Control Assoc. 17: 211.
- KOTAKE, S. e SANO, T., (1981)
"Simulation Model of Air Pollution in Complex Terrains
Including Streets and Buildings" Atm. Envir. Vol 15,
nº 6, pag. 1001-1009.
"A Three Dimensional Particle-in-Cell Model for the Dis
persal of Atmospheric Pollutants and its Comparison to
Regional Tracer Studies", J. Applied Meteorol. 17:320-
-329.
- LASKIN, S., KUSCHNER, M. e DREW, R.T., (1970)
"Inhalation Carcinogenesis Symposium", Ser. No. 18 U.S. Ato
mic Energy Commission, Washington. D.C..
- LEDOLTER, J. e TIAO, G., (1979)
"Statistical Models for Ambient Air Pollutants with Spe
cial Reference to the Los Angeles City Catalyst Study Da
ta" Env. Sci. Techn. Vol 13, 10, 1233-1240.
- LEIGTON, P.A., (1961)
"Photochemistry of Air Pollution" Academic Press, New York,
New York.
- LUDWIG, F.L., (1981)
" A Model for Simulating the Behaviour of Pollutants
Emitted at Ground Level Under Time-Varying Meteorologi
cal Conditions" Atm. Envir. Vol. 15, nº 6, pag. 989-999.

MARCH, S., (1974)

"Preliminary Users Manual for the APMAX Computer Program"
Engineering Science Inc., Texas.

MATSUSHIMA, J. e BREMER, R.F., (1972)

"Influence of SO₂ and HF as a Mix or Reciprocal Exposure
on Citrus Growth and Development", Journal Air Poll. Cont.
Assoc. September.

MCCABE, L.C. e CLAYTON, G.D., (1952)

"Arch Ind. Hyg. Occup.", Med. 6, 199-213.

MIDDLETON, W.E.K., (1952)

"Vision Through the Atmosphere", Univ. of Toronto, Ontario.

MINISTRY OF HEALTH, (1954)

"Mortality and Morbidity During the London Fog of December 1952", Reports on Public Health and Related Subjects No 95, Table 1, pag. 2 - His Majesty Stationary Office, London, England.

MOSES, H., (1969)

"Mathematical Urban Air Pollution Models" ANL/ES-RPY-001,
Argonne Nat. Lab.

NATO/CCMS (1971)

"Proceedings of the Second Meeting of the Expert Panel
on Air Pollution Modeling", Paris, France, Committee
on Challenges of Modern Society, NATO, Belgium, 1971.

NATO/CCMS (1972)

"Proceedings of the Third Meeting of the Expert Panel
on Air Pollution Modeling, Paris, France, CCMS/NATO,
Belgium.

NATO/CCMS (1973)

"Proceedings of the Fourth Meeting of the Expert Panel on Air Pollution Modeling", Oberursel, Federal Republic of Germany, CCMS/NATO, Belgium.

NATO/CCMS (1974)

"Proceedings of the Fifth Meeting of the Expert Panel on Air Pollution Modeling", Roskilde, Denmark, CCMS/NATO, Belgium.

NATO/CCMS (1975)

"Proceedings of the Sixth International Technical Meeting on Air Pollution Modeling and its Application", Frankfurt, NATO/CCMS, Belgium.

NATO/CCMS (1976)

"Proceedings of the Seventh International Technical Meeting on Air Pollution Modeling and its Application", Airlie House, Virginia USA, NATO/CCMS Public. 51, Belgium.

NATO/CCMS (1977)

"Proceedings of the Eighth International Technical Meeting on Air Pollution Modeling and its Application", Louvain-la-Neuve, Committee on Challenges of Modern Society/NATO, Belgium.

NATO/CCMS (1978)

"Proceedings of the Ninth International Technical Meeting on Air Pollution Modeling and its Application", Downsview, Ontario, Canada, Committee on Challenges of Modern Society, NATO, Belgium.

O'KEEFE e ORTMAN, (1966)

"Permeation Tubes" Analytical Chemistry 38, 760.

- PANDOLFO, J.P., e JACOBS, C.A., (1973)
"Tests of an Urban Meteorological Model (K) Using CO Validation Data in the Los Angeles Area. Vol I CEM Report 490a, Center for the Environment and Manag./Environmental Protection Agency.
- PASQUILL, F., (1975)
"The Dispersion of Materials in the Atmosphere Boundary Layer" Lectures on Air Pollution and Environmental Impact Analysis, American Meteorological Society, Boston.
- PASQUILL, F., (1961)
"The Estimation of the Dispersion of Windborne Material", Meteorol. Mag., 90: 33-49.
- PETROGAL, (1979)
"Flow-Sheet Geral da Refinaria de Sines".
- PETROGAL, (1979)
"Flow-Sheet da Unidade de Claus".
- PETROGAL, (1979)
"Esquemas simplificados diversos de várias unidades".
- PERRY, CHILTON e KIRKPATRICK, (1969)
"Chemical Engineer's Handbook" 4th Edition, McGraw-Hill.
- PORT, C.D., COFFIN, D.L., KANE, P. e KETELS, K.V., (1977)
Journal Toxicol. Environmental Health 2, 589.
- PORTER, R. e CHRISTIANSEN, J., (1976)
"Two Efficient Gaussian Plume Models Developed at the Texas Air Control Board" 7th NATO/CCMS International Technical Meeting.

- PRAHM, L.P. e CHRISTENSEN M., (1977)
"Validation of a Multiple Source Gaussian Air Quality Model" Atmos. Envir. Vol. 11, 791-95.
- REID, J., (1979)
"Markov Chains Simulations of Vertical Dispersion in the Neutral Surface Layer for Surface and Elevated Releases", Boundary Layer Meteorol. 16: 3-22.
- ROUECHÉ, B., (1953)
"Eleven Blue Men.", Little, Brown, Boston, Massachussets.
- SAKAMAKI, F., FUKUDA, M. e AKIMOTO, H., (1982)
"Computer Modeling of Photochemical Ozone Formation" Environ. Sci. Technol. Vol 16 nº 1, 45-52.
- SCHULMAN, L.L., SCIRE, J.S. e BASS. A., (1982)
"Evaluation of the ISCST and RAM Models at an Industrial Complex", 3rd Joint Conference on Application of Air Pollution Meteorology, sponsored by APCA and AMS.
- SHIEH, L.J., DAVIDSON, B. e FRIEND, J.P., (1973)
"A Model of Diffusion in Urban Atmospheres: SO₂ in Greater New York" Proceedings of Symposium on Multiples Source Urban Diffusion Models, U.S.E.P.A..
- SHIR, C.C. e SHIEH, J.J., (1974)
"A Generalized Urban Air Pollution and its Application to the Study of SO₂ distributions in the St Louis Metropolitan Area" J. Appl. Meteorol. 13: 185.
- SHULMAM, L.L. e SCIRE, J., (1979)
"Buoyant Line and Point Source Dispersion Model User's Guide", Document P-7304B, Environmental Research and Technology Inc., Concord, Massachussets.

- SILVA, P. SOUSA, (1981)
"Ventos de Sines" Divisão de Informática e Matemáticas
Aplicadas do GAS, Junho.
- STERN, A.C., (1977)
"Air Pollution", Third Edition, Volumes I, II, III, IV,
V. Academic Press, Inc., U.S.A..
- SUTTON, O.G., (1943)
"A Theory of Eddy Diffusion in the Atmosphere", Proc.
R. Soc. London, Ser. A 135.
- SUTTON, O.G., (1947)
"The Problem of Diffusion in the Lower Atmosphere"
Quart. J. Roy. Met. Soc. 73, 257-281.
- SUTTON, O.G., (1953)
"Micrometeorology" Mc Graw Hill Book Company, New York.
- TAN, S.H., (1967)
"Flare Systems Design Simplified" Hydrocarbon Processing
46(1) 172-176.
- TAYLOR, G., (1921)
"Diffusion by Continuous Movements", Proc. London Math.
Soc. 20:196.
- TAYLOR, G.I., (1948)
"Dynamics of a Mass of Hot Gas Rising in Air", U.S. Ato
mic Energy Comission Report MDD C-919, Los Alamos Scient
ific Laboratory.
- THERMO ELECTRON CORPORATION, (1978)
"Instruction Manual Model 143 Permeation Tube Calibra-
tor", Hopkington, Massachussets.
- THERMO ELECTRON CORPORATION, (1982)
"Instruction Manual, Pulsed Fluorescent Ambient SO₂
Analyser" Hopkington, Mass.

- TIAO, G. e HILLMER, S., (1978)
"Statistical Models for Ambient Concentrations of Carbon Monoxide, Lead and Sulfate, Based on LACS Data" Env. Science & Techn. 12, nº 7, 820-828.
- TOKYO METROPOLITAN GOVERNMENT, (1971)
"Tokyo Fights Pollution", Kowa, Tokyo, Japan.
- TURNER, D., (1974)
"Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates", U.S.E.P.A. Research Triangle Park, North Carolina.
- TURNER, D.B., (1979)
"Atmospheric Dispersion Modeling - A Critical Review" Journal of Air Poll. Control Assoc. 5, 502-519.
- U.S.E.P.A., O.A.Q.P.S., (1979)
"Procedures for Evaluating the Performance of Air Quality Simulation Models", Research Triangle Park EPA-450/4-79-033.
- U.S.E.P.A., O.A.Q.P.S., (1979)
"Performance Measures and Standards for Air Quality Simulation Models" R.T.P., EPA-450/4-79-032.
- U.S.E.P.A., O.A.Q.P.S. e O.A.N.R., (1981)
"Accuracy of Air Quality Models", Research Triangle Park NC.
- VENKATRAM, A., (1978)
"An Examination of Box Models for Air Quality Simulation, Atmos. Environ., 12; 2243,2250.
- VENKATRAN, A. e VET, R., (1981)
"Modeling of Dispersion from Tall Stacks" Atm. Envir. Vol. 15, nº 9 Pag. 1531-1538.
- VENKATRAN, A., LEY, B.E. e WONG, S.Y., (1982)
"A Statistical Model to Estimate Long-Term Concentrations of Pollutants Associated with Long Range Transport" Atmos. Envir. Vol. 16, nº 2, pag. 249-257.

- WANG. L., WANG, M.H. e BERGENTHAL, J., (1981)
"Predicting the Dispersion of Airborne Effluents for
Environmental Management" J. Envir. Manag. 12, 247-270.
- WARNER, J., (1968)
J. Appl. Meteorol. 7, 247-251.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, (1972)
"Dispersion and Forecasting of Air Pollution" Techni-
cal Report n° 121, Geneva.
- ZIB, P., (1977)
"Urban Air Pollution Dispersion Models - A Critical
Survey" Department of Geography, University of Witwater-
srand, Johannesburg.

Agradecemos o apoio concedido pelo INIC - Instituto Nacional de Investigação Científica, através de subsídio a toda a parte gráfica deste trabalho.