

A composição da atmosfera e a vigilância da qualidade do ar

Um exemplo de multidisciplinaridade

RENATO A. C. CARVALHO

Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica

A atmosfera terrestre é o invólucro gasoso que cobre o Globo terrestre, constituindo com este o planeta Terra. A sua composição actual é o resultado da evolução geológica e biológica da Terra e nela se distinguem dois grandes grupos de gases: os gases maioritários e os minoritários. Os primeiros são o azoto e o oxigénio que correspondem a cerca de 99 % do volume da homosfera, que se estende até cerca de 80 km de altitude, e em que a proporção dos gases que constituem a atmosfera se mantém sensivelmente constante e a que corresponde a «massa molecular» de 28,9.

No Quadro 1 apresenta-se a proporção dos diferentes gases que constituem a homosfera,

Quadro 1—*Composição normal da atmosfera terrestre*
(homosfera: $z \lesssim 80$ km)

Componente	Volume (%)
Azoto (N ₂)	78,084
Oxigénio (O ₂)	20,946
Argon (Ar)	0,934
Dióxido de carbono (CO ₂)	0,033 (VAR)
Neon (Ne)	0,00182
Hélio (He)	0,00052
Kripton (Kr), Hidrogénio (H ₂), Xenon (Xe), Radão	0,00066
Ozono (O ₃)	VAR
Vapor de água (OH ₂)	VAR

sendo de referir que os gases raros (Ar, Ne, He, Kr, Xe) que se encontram ainda na atmosfera correspondem a «relíquias geológicas» da atmosfera primitiva da Terra, assim como o dióxido de carbono que se terá formado após a intensa actividade vulcânica da Terra a que correspondeu o lançamento de grandes

quantidades de gases (hidrogénio, amoníaco, hidrocarbonetos, gases sulfurosos, vapor de água, etc.); nesta fase as reacções químicas na atmosfera terão sido complexas, mas poderá distinguir-se a dissociação do vapor de água por acção da radiação solar e a oxidação do amoníaco e dos hidrocarbonetos com a formação da segunda atmosfera com predominância do azoto (N₂), do dióxido de carbono (CO₂) e vapor de água.

Com o aparecimento da vegetação na Terra, esta provoca a libertação do oxigénio (O₂) existente no dióxido de carbono e assim surge a terceira atmosfera, em que predominam ainda o azoto e o vapor de água e agora também o oxigénio. Finalmente dá-se um arrefecimento significativo da Terra, incluindo portanto a sua atmosfera, o que leva à condensação da maioria do vapor de água atmosférico que dará origem à formação dos oceanos.

Reconhece-se portanto que os componentes da atmosfera terrestre actual tiveram origem em épocas muito diferenciadas da evolução geológica da Terra e as suas proporções têm variado significativamente o que só por si justifica as alterações do clima da Terra ao longo das eras geológicas.

A actual composição normal da atmosfera terrestre determina propriedades características e únicas designadamente dos pontos de vista químico e radiativo, sendo frequentemente designada «Ar Limpo». Com efeito, do ponto de vista químico todos os gases indicados no Quadro 1 não reagem entre si, o que garante a proporção em que se encontram, e do ponto de vista radiativo têm propriedades que determinam o clima da Terra.

Atendendo à importância decisiva que têm as propriedades radiativas dos principais componentes da atmosfera no estabelecimento do

clima terrestre, apresentam-se na fig. 1 os respectivos espectros de absorção-emissão; é de salientar a grande transmissividade da atmosfera nos domínios dos pequenos comprimentos de onda (c.d.o; radiação solar), resultante da sobreposição das «janelas» correspondentes aos diferentes componentes. Por outro lado, nos domínios dos grandes c.d.o. (radiação terrestre) a transmissividade da atmosfera é em regra pequena ou nula, como resultado da não coincidência das «janelas» existentes nestes c.d.o., correspondentes aos diferentes componentes, excepto nas bandas de 8,5 a 9,2 μm e 10,5 a 13 μm . Deverá referir-se que estas bandas são designadas como «janelas espectrais» da atmosfera e são intensa e extensivamente utilizadas na observação da Terra por meio de satélites artificiais portadores de radiómetros específicos para estas bandas.

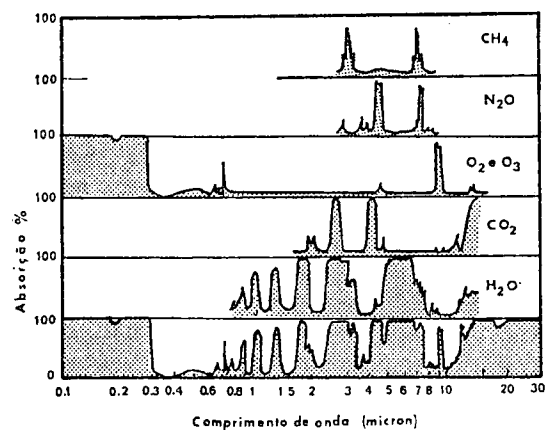


Fig. 1 — Espectros de absorção de componentes atmosféricos e da atmosfera global.

Quando se verifica uma alteração significativa na composição normal da atmosfera, quer por variação acentuada da proporção dos gases que a constituem, quer por surgirem outros componentes em proporções significativas, o ar diz-se poluído. Assim, a poluição da atmosfera, que frequentemente é definida como a presença de substâncias na atmosfera que são prejudiciais à saúde humana, é um conceito mais amplo; com efeito dir-se-á que a atmosfera está poluída quando se verificarem desvios significativos da sua composição normal

a que correspondem efeitos ecológicos importantes: alterações do clima, afectação da vida biológica (quer animal quer vegetal), modificações dos ciclos geoquímicos, etc. Nestas condições e atendendo à extraordinária importância, não só local e regional mas também global que tem a vigilância da qualidade do ar, isto é, a vigilância da composição da atmosfera, tornou-se da maior acuidade o estabelecimento de programas de medição em diferentes escalas espaço-temporais, da concentração dos componentes minoritários da atmosfera de maior significado, não só no âmbito da protecção directa das populações e dos seus bens mas também com vista à prevenção de eventuais alterações da composição da atmosfera que levem a modificações significativas do clima da Terra. Neste último domínio são de destacar dois programas mundiais realizados sob a égide da Organização Meteorológica Mundial, em que Portugal participa activamente:

a) «Programa da Camada de Ozono» em que do ponto de vista observacional existem redes de observação directa e indirecta da concentração do ozono troposférico e estratosférico.

As observações directas são principalmente executadas com ozonómetros com registo contínuo da concentração do ozono à superfície do Globo e com ozonossondas que permitem a transmissão radioeléctrica para a superfície dos valores medidos da concentração do ozono até altitudes da ordem de 35 a 50 km.

As observações indirectas são executadas com espectrofotómetros que utilizando as características do espectro de absorção do ozono permitem a medição da concentração do ozono total na vertical do local da observação, assim como a determinação da distribuição vertical da concentração do ozono (perfil vertical).

Como consequência da importância de ser garantida a «normalidade» da camada de ozono (ozonofera entre 30 a 50 km de altitude) tendo em vista que as suas propriedades radiativas, designadamente a sua capacidade de absorver a radiação solar na banda do ultravioleta ($0,22 < \lambda < 0,29 \mu\text{m}$) (Fig. 1) que é fortemente letal, a comunidade internacional,

sob os auspícios da ONU, elaborou a «Convenção Internacional de Protecção da Camada de Ozono», que foi subscrita por grande maioria dos Estados, e que traduz a grande preocupação da conservação da composição da atmosfera como factor essencial da conservação da Natureza.

Deve referir-se que a eventual «destruição da camada de ozono» (entenda-se «destruição» no sentido da provocação de alterações significativas na concentração do ozono na ozonoesfera) provocaria o aumento muito significativo da intensidade da radiação ultravioleta à superfície do Globo, que levaria à destruição extensiva da vida vegetal com os correspondentes desequilíbrios ecológicos.

Os estudos realizados em programas de investigação relativos ao ciclo do ozono (formação-destruição) mostraram que certas substâncias que são inertes à superfície do Globo, como é o caso dos clorofluórcarbonos que são utilizados intensivamente como agente propulsor nos «spray» e certas substâncias usadas nos frigoríficos como fluido permutador do calor, devido à sua pequena densidade, quando libertados atingem a ozonoesfera onde vão provocar reacções que destroem o ozono com a sua consequente redução de concentração. Existem por isso recomendações internacionais, que têm vindo a ser adoptadas por alguns Estados no sentido das referidas substâncias virem a ser substituídas por outras que não sejam destruidoras do ozono, embora com os consequentes custos financeiros que terão que ser suportados pelos consumidores: é um custo da protecção da Natureza à escala global.

b) «Background Air Pollution Monitoring Network» (BAPMoN) em que existem programas de observação com o objectivo de avaliar a evolução temporal da concentração de componentes minoritários da atmosfera nas escalas global e regional/continental resultantes da actividade antropogénica e/ou fenómenos naturais (por exemplo as erupções vulcânicas, incêndios florestais, etc.).

Nestes programas destacam-se as observações da concentração de dióxido de carbono à superfície do Globo (este componente, devido

à sua grande densidade, encontra-se concentrado na baixa troposfera), da concentração e natureza das partículas em suspensão na atmosfera, quer à superfície (por amostragem directa) quer o valor integrado na vertical (por observação indirecta da turvação da atmosfera, recorrendo às características da interacção entre a radiação solar e as partículas em suspensão); e ainda das características físicas e químicas de amostras da água da precipitação e da deposição seca, que constituem indicadores relevantes da qualidade e características da atmosfera na escala regional/continental.

Frequentemente são também executadas observações da concentração à superfície de outros componentes minoritários da atmosfera, em particular aqueles que resultam de actividades antropogénicas como são os compostos de enxofre (dióxido de enxofre, sulfatos) e os óxidos de azoto que se formam na queima dos combustíveis fósseis (carvão petróleo, gás).

Na Fig. 2 apresenta-se a rede mundial de estações integradas no programa BAPMoN, sendo de referir que em Portugal a sua implementação foi iniciada em 1979, funcionando actualmente 3 estações de nível regional que serão complementadas com mais 3 estações até 1988.

No âmbito da vigilância da qualidade do ar, com vista à protecção da saúde das populações e da salvaguarda dos seus bens, é frequente a instalação de redes de medição da concentração de poluentes da atmosfera em regiões industriais e/ou urbanas. Nas regiões industriais os programas de vigilância da qualidade do ar são estabelecidos de acordo com a natureza dos processos industriais utilizados, que determinam as características dos efluentes que vão contaminar a atmosfera; por outro lado, nos grandes aglomerados urbanos os poluentes mais frequentes são os que resultam das combustões, quer em instalações fixas quer em veículos móveis, sendo de destacar as partículas, dióxido de carbono, monóxido de carbono, dióxido de enxofre, óxidos de azoto e hidrocarbonetos. No caso das partículas é de salientar a importância da vigilância quer das partículas de carbono que são lançadas nas

combustões do carvão e do gasóleo quer das partículas de chumbo que são lançadas na atmosfera, resultantes da combustão das gasolinas nos motores de explosão dos veículos motorizados; com efeito a sua importância na deterioração da saúde humana é bem conhecida e por isso nas regiões urbanas a sua vigilância é de importância vital.

a distribuição espaço-temporal das suas concentrações nas vizinhanças das respectivas fontes (30 a 50 km) e a grandes distâncias (superiores a 50 km).

Outros aspectos fundamentais nas condições de transporte e dispersão dos poluentes da atmosfera são as condições físicas da fronteira inferior da atmosfera, isto é, a natureza

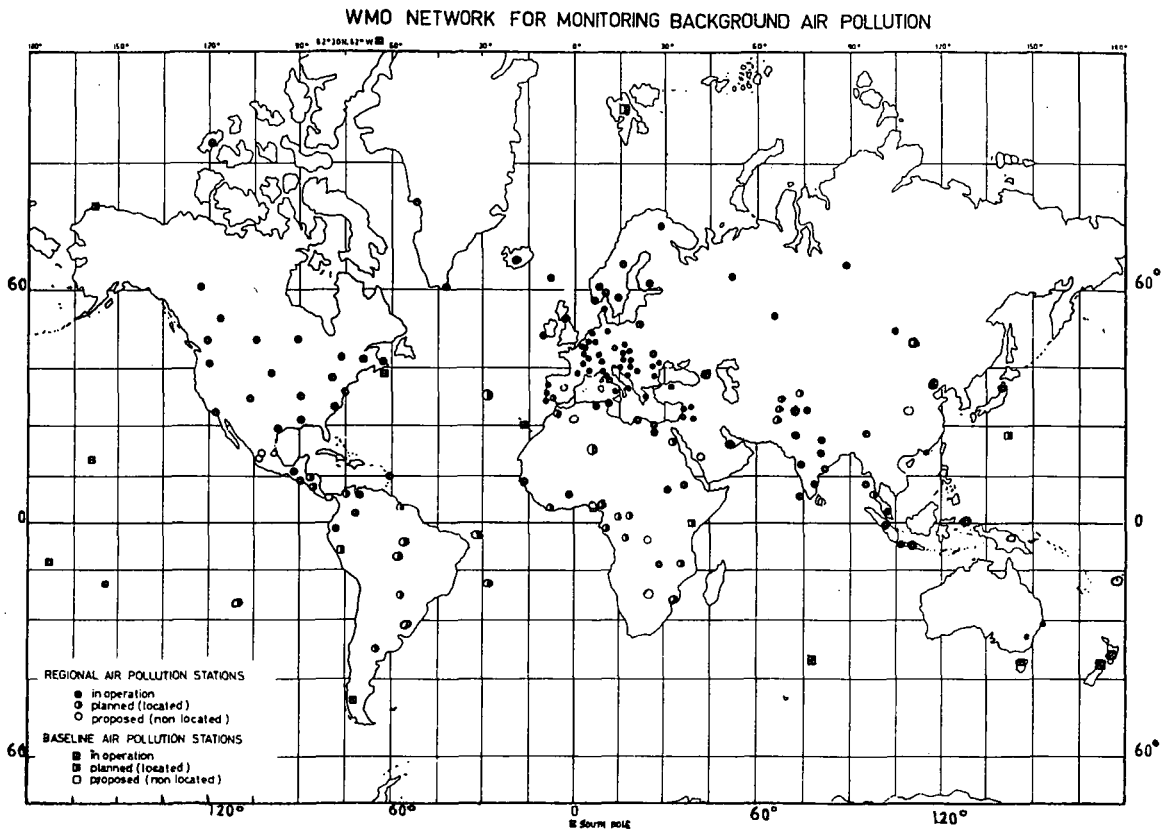


Fig. 2 - Rede mundial de estações do programa BAPMoN (Background Air Pollution Monitoring) da OMM

Deve ainda salientar-se a importância da inclusão de estudos das condições físicas da baixa troposfera quando se estabelece um projecto de vigilância da qualidade do ar. Na verdade as condições físicas da baixa troposfera, em que se destacam o regime dos ventos, as condições de estabilidade estática, a espessura da camada da baixa troposfera em que se pode dar o transporte e a dispersão dos poluentes atmosféricos lançados à superfície do Globo, são factores que determinam as condições em que se faz o transporte e a dispersão dos poluentes da atmosfera, e portanto

da superfície do Globo e do seu revestimento, sendo de destacar as condições orográficas e topográficas, assim como a natureza e dimensão dos obstáculos existentes na superfície que vão modular os perfis do vento em altitude e introduzir deformações no campo do movimento horizontal da baixa troposfera.

Como exemplo de aglomerado urbano em que a vigilância da qualidade do ar deverá constituir preocupação saliente, poderá referir-se a cidade de Macau. Trata-se de aglomerado urbano, com população que ultrapassa 400 000 habitantes, ocupando a área da ordem

de 15 km², correspondendo portanto a uma das maiores densidades médias populacionais do mundo: superior a 27 000 habitantes/km². Deve no entanto salientar-se que a distribuição da população não é uniforme em toda a área urbana e por isso existem freguesias em que a densidade populacional ultrapassa 500 000 habitantes/km².

Por outro lado, o surto de desenvolvimento económico nos últimos 10 a 15 anos introduziu no tecido urbano numerosas unidades industriais de pequena e média dimensão que são responsáveis por numerosas fontes fixas de poluição da atmosfera. De maior importância ainda o aumento muito significativo do parque de viaturas motorizadas que circulam num sistema viário constituído essencialmente por vias estreitas e frequentemente «encaixadas» em edifícios de altura significativa, que reduzem drasticamente as condições de ventilação, o que permitiria a dispersão dos efluentes do escape dos motores.

Tendo em atenção os problemas indicados e ainda a existência no território de Macau de 2 centrais termo-eléctricas (1 em Macau e 1 na ilha de Coloane a cerca de 8 km a sul de Macau) e de uma unidade industrial de produção de cimento, foi iniciado em 1985 um «Projecto de Vigilância da Qualidade do Ar em Macau» que contém três componentes essenciais:

- 1) Estudos meteorológicos e climatológicos da baixa troposfera na região de Macau para definição das condições características de transporte e dispersão dos poluentes da atmosfera.

- 2) Aplicação de modelos de transporte e dispersão de poluentes da atmosfera lançados por fontes fixas (chaminés) e por fontes móveis (veículos motorizados).

- 3) Estabelecimento e exploração de redes de observação da concentração à superfície dos poluentes da atmosfera característicos na região.

Os estudos climatológicos têm em vista caracterizar o campo do movimento horizontal na região da baixa troposfera, isto é até 6 km de altitude, assim como a sua estrutura térmica

vertical com especial destaque para a caracterização das inversões de radiação e das inversões na baixa troposfera. Nestes estudos são utilizados os resultados das observações aerológicas, executadas durante 5 anos em Hong Kong, que são representativos das condições regionais. Os resultados das observações utilizadas correspondem a 4 sondagens diárias do vento em altitude e 2 radiossondagens diárias, em que foram medidas de forma contínua ao longo da vertical as 3 variáveis que caracterizam o estado termodinâmico da atmosfera: pressão atmosférica, temperatura e humidade relativa do ar. Assim, com estes resultados das observações aerológicas é possível definir uma sucessão de estados da baixa troposfera na região, que permitem caracterizar estatisticamente os aspectos salientes do regime do movimento assim como dos estados termodinâmicos da baixa troposfera, com discriminação temporal de 6 horas no caso do vento e de 12 horas no caso dos estados termodinâmicos.

A fim de caracterizar o estado termodinâmico da baixa troposfera numa escala temporal mais fina, isto é, da ordem de 1 hora, em particular no que se refere às condições da sua estabilidade estática, recorre-se a métodos indirectos baseados no balanço da radiação à superfície e nas características turbulentas do vento à superfície, obtidas a partir dos resultados das observações horárias executadas durante 10 anos nas estações meteorológicas existentes no Território de Macau.

Constitui-se assim um banco de dados meteorológicos de superfície e de altitude, que permitem caracterizar os diferentes estados da baixa troposfera que vão ser utilizados no estudo e análise das condições de transporte e dispersão dos poluentes e, utilizando modelos gaussianos de dispersão, determinam-se as distribuições das concentrações dos poluentes na região de Macau.

Em 1987 foi iniciada a instalação das redes de medição da concentração dos diferentes poluentes mais significativos na região, designadamente:

- a) Rede de 5 postos de medição da concentração de partículas totais em suspensão na

Modelo gaussiano de dispersão de poluentes atmosféricos, para fontes pontuais contínuas

1 — Concentração de poluentes

O modelo gaussiano que permite avaliar estimativas da concentração média, para amostragens de cerca de 1 hora, de um gás ou aerosol emitido por uma fonte poluente pontual contínua é traduzido analiticamente pela expressão:

$$\bar{x}(x, y, z) = \frac{Q}{2\tau\sigma_y\sigma_z\bar{u}} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left\{ \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \left[\exp\left(-\frac{(z-h-2nL)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+h+2nL)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \right\} \quad (1)$$

dióxido de enxofre e de partículas em suspensão (fumos negros) na atmosfera à superfície.

c) 1 posto de medição em contínuo, com analisadores automáticos, da concentração à superfície de dióxido de enxofre, óxidos de azoto e monóxido de carbono.

d) Rede de 5 postos de medição da deposição de partículas sedimentáveis, em períodos de 15 dias, instalada nas vizinhanças da fábrica de cimentos.

Este conjunto de redes de medição directa da concentração dos poluentes da atmosfera à superfície, em Macau, permitirá estabelecer não só os indicadores preliminares da qualidade do ar na região, mas permitirá também proceder à calibração do modelo gaussiano de dispersão que permitirá caracterizar não só as distribuições das concentrações médias dos principais poluentes mas também as distribuições das concentrações dos poluentes em estações bem definidos da atmosfera na região.

Em Apêndice apresenta-se a descrição dos aspectos essenciais do modelo gaussiano utilizado no Projecto de Vigilância da Qualidade do Ar em Macau.

em que:

$\bar{x}(x, y, z)$ é a concentração média horária de um gás ou aerosol num ponto de coordenadas (x, y, z) .

Q é a intensidade em poluente da fonte emissora.

\bar{u} é a velocidade média do vento, no período de amostragem, à altura do eixo do penacho.

σ_y, σ_z são os coeficientes de dispersão turbulenta identificados com o desvio padrão das concentrações nas direcções dos eixos dos yy e dos zz , respectivamente; o sistema de eixos O, x, y, z tem a origem (O) na base da fonte e os eixos têm a seguinte orientação:

Ox — no plano horizontal na direcção para onde sopra o vento

Oy — no plano horizontal e normal a Ox

Oz — segundo a vertical

h é a altura efectiva da fonte, isto é, a soma da altura geométrica da chaminé com a sobrelevação dos produtos emitidos pela fonte.

Para obter as estimativas da concentração de SO em pontos ao longo do eixo dos xx ($y=0$) a equação (1) toma a forma:

$$\bar{x}(x, 0, z) = \frac{Q}{2\tau\sigma_y\sigma_z\bar{u}} \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \left[\exp\left(-\frac{(z-h-2nL)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+h+2nL)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \quad (2)$$

Neste modelo de dispersão aceita-se que:

a) O poluente comporta-se como gás ideal e é emitido a uma taxa contínua e uniforme; o campo do vento horizontal é homogêneo e a velocidade média do vento no intervalo de 1 hora é representativa para todo o período; o rumo do vento não varia ao longo da vertical e o penacho é infinito e sem história, isto é, cada período de 1 hora é completamente independente do período anterior.

b) O poluente é um gás ou aerosol estável que permanece em suspensão no ar atmosférico e participa no movimento turbulento da atmosfera; nenhuma fracção de poluente é removida do penacho quando este se move e difunde na direcção do vento; há reflexão completa do penacho ao nível da superfície.

c) A concentração em poluente no interior do penacho tem distribuição gaussiana segundo os eixos Oy e Oz.

d) Os coeficientes de dispersão σ_y e σ_z são os sugeridos por Pasquill e Gifford e revistos por Turner. Os valores de σ_y e σ_z são funções da distância x (segundo Ox) à fonte emissora e da classe de estabilidade da baixa troposfera.

A estimativa dos valores médios da concentração média horária de SO₂ num período longo T, é dada por:

$$\bar{\chi}_T(x, o, z) = \sum_{n=1}^N P(S_n) \cdot \chi(x, o, z) \quad (3)$$

em que:

- i) $\bar{\chi}(x, o, z)$ é a concentração média horária no ponto de coordenadas (x, o, z), correspondente à situação meteorológica S_n.
- ii) P(S_n) é a frequência de ocorrência da situação meteorológica S_n.
- iii) N é o número total das diferentes situações meteorológicas.
- iv) $\bar{\chi}_T(x, o, z)$ é a concentração média horária, no ponto de coordenadas (x, o, z), referida ao período T.

2 — Sobrelevação e altura efectiva do penacho

A altura efectiva da fonte (h) é a soma da altura geométrica da chaminé (h_g) com a sobrelevação do penacho (Δh). No cálculo da sobrelevação do penacho utiliza-se a formulação de Briggs (1972); nesta formulação admite-se que a sobrelevação depende do inverso da velocidade média do vento e é directamente proporcional à potência 2/3 da distância x (segundo Ox) à fonte.

A formulação da sobrelevação de Briggs é apresentada a seguir para os casos de atmosfera neutra ou instável e para a atmosfera estável. Assim:

- i) Para a atmosfera neutra ou instável a sobrelevação final Δh_f é dada por:

$$\Delta h_f = 1,6 F^{1/3} (x_f)^{2/3} u^{-1} \quad (4)$$

com $x_f = 3,5x^*$, e

$$x^* = \begin{cases} 14 F^{5/8} & \text{quando } F < 55 \text{ (m}^4\text{s}^{-3}) \\ 34 F^{2/5} & \text{quando } F > 55 \text{ (m}^4\text{s}^{-3}) \end{cases} \quad (5)$$

$$F = g \cdot v_s \cdot R^2 \cdot (T_s - T_a) / T_s \quad (7)$$

em que:

- g é a aceleração da gravidade (9,8 m/s²)
- v_s é a velocidade dos gases emitidos à saída da chaminé (m/s)
- R é o raio interior da boca da chaminé (m)
- T_s é a temperatura dos gases à saída (°K)
- T_a é a temperatura do ar (°K)
- u é a velocidade média do vento ao nível da boca da chaminé (m/s)
- x_f é a distância (segundo Ox) à fonte onde finda o processo de elevação do penacho (m)

- ii) Para a atmosfera estável a sobrelevação final é dada por

$$\Delta h_f = \begin{cases} 2,4 \cdot F / (us)^{1/3} & (8) \\ 5 F^{1/4} \cdot s^{-3/8} & (9) \end{cases}$$

conforme a velocidade do vento.

Nos cálculos utilizou-se para sobrelevação final o menor dos valores de Δh_f correspondentes às equações (8) e (9).

A distância x_f (segundo Ox) é dada por:

$$x_f = \pi u s^{-1/2} \quad (10)$$

onde

$$s = g - \frac{\partial \Theta}{\partial z} T_a^{-1} \quad (11)$$

e em que $\frac{\partial \Theta}{\partial z}$ é o gradiente vertical da temperatura potencial do ar (K/m), e s é um parâmetro de estabilidade.

2.1. Correções do efeito topográfico

A influência do relevo na estimativa da concentração de SO₂ em locais de altitude superior à origem das coordenadas (altitude da base da fonte) é tida em conta, admitindo que o penacho se eleva, devido ao relevo, de Z/2 em que Z é a altura de cada local em relação ao referencial Oxyz definido em 1.

BIBLIOGRAFIA

- PEIXOTO, J. P. — A Radiação Solar e o Ambiente. CNA, Lisboa, 1981.
- CARVALHO, R. A. C. e SANTOS, J. P. R. E. — Modelos gaussianos de dispersão para fontes pontuais (MDFP, MDFM). INMG, Lisboa, 1982.
- CARVALHO, R. A. C. e SANTOS, J. P. R. E. — Projecto de Vigilância da qualidade do ar em Macau. INMG, Lisboa, 1983.