

Dispersão atmosférica em sítios de usinas nucleares

Laura Alice de Araújo Ribeiro e Maysa Joppert Coelho***

Resumo

A atmosfera desempenha um papel fundamental na dispersão (transporte e difusão) de partículas radioativas emitidas por usinas nucleares. No estudo da qualidade do ar, os modelos atmosféricos são amplamente utilizados a fim de estimar a concentração e o comportamento da distribuição espacial dos poluentes lançados na atmosfera a partir de uma fonte pontual. Geralmente, para usinas nucleares, o Modelo Gaussiano é o mais empregado. Este artigo visa apresentar uma síntese da modelagem atmosférica utilizada para efluentes liberados por usinas nucleares.

Introdução

O crescimento da população mundial nas últimas décadas fez aumentar a demanda de consumo energético, induzindo a implementação de cada vez mais unidades geradoras de energia. De acordo com a CTEEP (Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista), estima-se que a necessidade global de energia cresça acima de 70% até 2020.

Atualmente existe uma grande preocupação acerca do efeito estufa em virtude do aumento de gases traço na atmosfera, principalmente o CO₂ (SANTOS, 2006). De acordo com o relatório do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) de maio de 2007, a humanidade terá de diminuir de 50% a 85% as emissões de CO₂ até a metade deste século, para salvar o clima do planeta. Com este intuito, o governo brasileiro

resolveu retomar seu programa de energia nuclear.

Sabe-se que as usinas nucleares, em sua operação normal, não liberam para a atmosfera quantidades de poluentes suficientes a ponto de alterar sua composição de modo significativo. Porém, em casos de acidentes, os efluentes por elas emitidos possuiriam um alto grau de periculosidade pelo fato de conterem material radioativo que podem causar sérias conseqüências ao ambiente e à população que vive nas vizinhanças da usina. As liberações dependem do tipo de usina e do processamento específico dos rejeitos radioativos gerados.

Essencialmente, os radionuclídeos liberados na atmosfera são: gases nobres (Xenônio-133 e Criptônio-85), gases ativados (Argônio-41, Carbono-14, Nitrogênio-16 e Enxofre-35), Trício (vapor e gás), halogênios e particulados (MELAZO, 2006).

* Metrologia (2007). Aluna de Mestrado em Engenharia Nuclear do Instituto Militar de Engenharia – IME.

** Professora do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Nuclear – IME.

Para avaliar as conseqüências de uma liberação de material radioativo para a atmosfera, deve-se prever o destino dos efluentes no espaço e no tempo. O potencial de risco de uma liberação depende das formas pelas quais os efluentes são diluídos e transportados pela atmosfera, além dos mecanismos pelos quais os mesmos são depositados na superfície (EISENBUD, 1973). Para prever estes processos atmosféricos, faz-se uso dos modelos numéricos de dispersão atmosférica. Especificamente, no caso de usinas nucleares, o modelo mais utilizado é o Modelo Gaussiano.

Lima-e-Silva Filho (1984), em seu estudo do cálculo da dose da radiação decorrente da ressuspensão de radionuclídeos na atmosfera, destaca a importância da modelagem da dispersão atmosférica em seu trabalho, já que as partículas que contaminam o solo têm origem na pluma radioativa.

Bellasio *et al* (1999), *apud* Franco (2005), documentaram o acidente de Chernobyl que causou a liberação para a atmosfera de inúmeras substâncias radioativas, resultando em contaminação na maioria dos países da Europa. Neste evento ficou evidenciado que deve haver um conjunto de procedimentos para tomadas de decisão, sendo importante o uso de modelos de dispersão de curto e longo alcance.

Parâmetros meteorológicos

A concentração de uma determinada substância na atmosfera varia no tempo e no espaço em função de reações químicas e/ou fotoquímicas, dos fenômenos de transporte, de fatores meteorológicos (ventos, turbulências e inversões térmicas) e da topografia da região. Para isso, as condições meteorológicas têm um papel determinante no transporte de poluentes entre a fonte e o receptor. Portanto, as análises dos

dados meteorológicos, a definição dos períodos críticos, o monitoramento dos poluentes e a modelagem matemática para simulação da qualidade do ar são as ferramentas principais para os estudos relacionados aos planos de controle da poluição do ar.

De acordo com Turner (1994), os gases radioativos emitidos em usinas nucleares podem sofrer processos que alterem sua concentração na atmosfera como:

- Decaimento radioativo e reações químicas provenientes;
- Deposição úmida;
- Deposição seca;
- Formação e coalescência de aerossóis;
- Ressuspensão de material depositado na superfície.

A maior parte desses efeitos pode ser expressa matematicamente e incluída nos cálculos do modelo, se necessário. Alguns deles podem ser vistos na figura 1. Os cálculos destes efeitos podem ser encontrados em IAEA SAFETY GUIDES N.50-SG-S3 (1980).

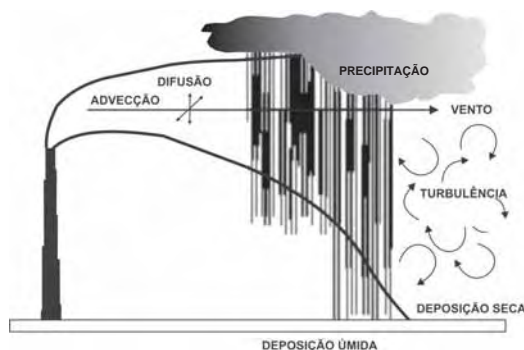


Figura 1 – Os processos que afetam o transporte de partículas e em especial os radionuclídeos na atmosfera
Fonte: Adaptada de ZANNETTI (1990) *apud* FRANCO (2005)

A relação entre a meteorologia e a dispersão atmosférica envolve principalmente o comportamento do vento. A direção do vento tem um

papel significativo no transporte de poluentes, pois determina a direção para onde as partículas são carregadas. Entre os níveis de aproximadamente 500-750m, o vento flui quase perpendicularmente às isóbaras e sua velocidade é dimensionada pelo gradiente de pressão horizontal. Próximos à superfície, os efeitos de fricção retardam o fluxo do vento, podendo causar mudança na direção (SMITH, 1973). O perfil de velocidade do vento é, portanto, afetado pelas mudanças de terreno subjacente e pela estabilidade térmica da atmosfera. O grau de turbulência da atmosfera é um parâmetro de suma importância para a dispersão atmosférica.

A turbulência, fator da maior importância na dispersão vertical dos poluentes, é resultado direto dos efeitos térmicos e mecânicos (SANTOS, 2006).

A turbulência mecânica é caracterizada pela ação do vento, podendo ser gerada pelo cisalhamento do vento e por “bloqueios” que impeçam o escoamento do fluxo de ar. Por outro lado, a turbulência térmica é produzida pelo efeito da fluabilidade da parcela em virtude da diferença de densidade do ar causada pelo aquecimento/resfriamento da superfície. As termas (parcelas de ar que por causa do aquecimento tendem a ascender) geradas têm a capacidade de carregar partículas em suspensão no ar que consigam se fixar a elas, incluindo os poluentes (TURNER, 1994). Por isso, ao desenvolver um modelo é importante levar em consideração estes efeitos.

Modelos atmosféricos

O comportamento dos efluentes liberados na atmosfera por usinas nucleares é simulado por intermédio de modelos matemáticos de dispersão atmosférica.

Existem muitas fórmulas teóricas para a dispersão atmosférica, porém a mais comum para uma emissão pontual e contínua é dada pela suposição da expressão Gaussiana. Um esquema do modelo gaussiano pode ser visualizado na figura 2. Neste modelo assume-se:

- Emissão contínua;
- Conservação de massa;
- Regime *steady-state* (não transiente);
- Velocidade do vento unidirecional e constante;
- Condições homogêneas e estacionárias de turbulência atmosférica.

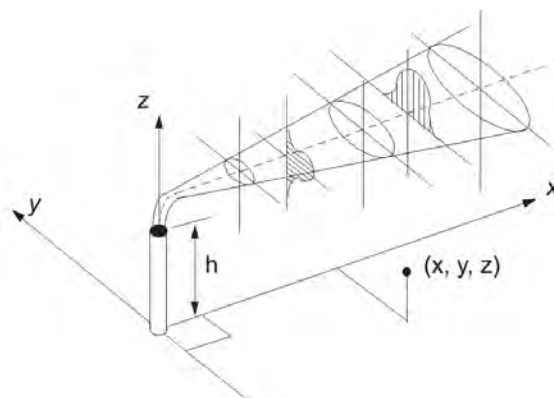


Figura 2 – Modelo Gaussiano de pluma atmosférica
Fonte: Adaptado de TURNER (1994)

A equação básica da dispersão é vista abaixo:

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

Cada termo é apresentado a seguir:

Fator de emissão: Q

Fator do transporte na direção x: $\frac{1}{u}$

Fator da difusão na direção y:

$$\frac{1}{(2\pi)^{1/2}\sigma_y} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right]$$

Fator da difusão na direção z:

$$\frac{1}{(2\pi)^{1/2}} \left\{ \exp\left[-\frac{(H-z)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(H+z)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\}$$

Onde, de acordo com EISENBUD (1973):

χ = Concentração de radionuclídeo em Curie por unidade de volume (Cim^{-3})

Q = Taxa de emissão de radionuclídeo em Curie por unidade de tempo (Cis^{-1})

u = Velocidade do vento no ponto de emissão (ms^{-1})

σ_y = Desvio padrão da distribuição da concentração na direção y

σ_z = Desvio padrão da distribuição da concentração na direção z

π = Constante matemática igual a 3,1415926...

H = Altura efetiva

Determinação dos coeficientes de dispersão

σ_y e σ_z

Os valores numéricos de σ_y e σ_z variam de acordo com as condições de estabilidade, o cisalhamento do vento e a rugosidade do terreno.

Pasquill (1961) apresentou o conceito das classes de estabilidade e foi uma enorme contribuição para os cálculos de dispersão atmosférica que utilizam o modelo de pluma gaussiana como metodologia. As classes de estabilidade de Pasquill são caracterizadas de acordo com a velocidade do vento, radiação solar incidente e cobertura de nuvem, como visto na tabela 1. As classes são divididas em extremamente instável (A), moderadamente instável (B), ligeiramente instável (C), neutra (D), ligeiramente estável (E), moderadamente estável (F). Em casos de velocidade baixa do vento à noite

pode ser considerada uma sétima classe de estabilidade referida como extremante estável (G).

Gifford (1961), *apud* Boçon (1998), desenvolveu as correlações mais freqüentemente utilizadas para determinar os coeficientes de dispersão em modelos gaussianos, conhecidas como as curvas de Pasquill-Gifford que relacionam σ_y e σ_z (coeficientes de dispersão horizontal e vertical respectivamente) com a distância da fonte e com a classe de estabilidade. As curvas de σ_y e σ_z Pasquill-Gifford podem ser vistas nas figuras 3 e 4.

É importante ressaltar que estas curvas foram desenvolvidas fazendo algumas considerações, como terreno plano e fonte localizada na superfície. Caso haja necessidade de alta precisão, os coeficientes de difusão devem ser determinados experimentalmente na localização do sítio (EISENBUD, 1973).

Cálculo da altura efetiva

Uma importante consideração feita nos cálculos de concentração é a altura efetiva (H), resultante da soma da altura da chaminé (h) com a altura de ascensão da pluma no momento em que ela é liberada (Δh), como visto na figura 5. As equações utilizadas foram obtidas do IAEA SAFETY GUIDES N.50-SG-S3 (1980).

Tabela 1 – Classe de Estabilidade de Pasquill
Fonte: Adaptado de TURNER (1994)

INSOLAÇÃO				NOITE	
Velocidade do Vento a 10m (m/s)	Forte	Moderado	Fraco	Cobertura fina de nuvens ou cobertura de nuvens baixas >4/8	Cobertura de nuvens <3/8
<2	A	A-B	B	-	-
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	D	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

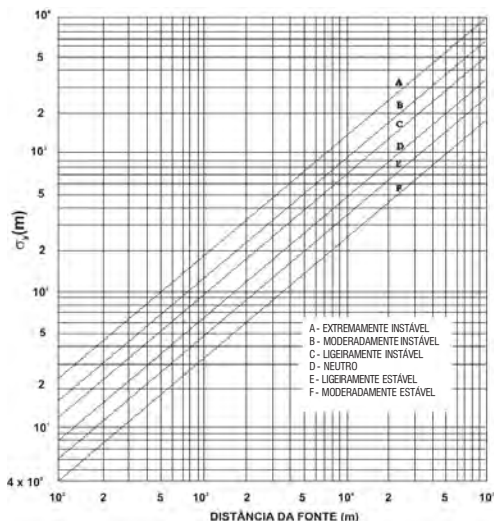


Figura 3 – Curvas de Pasquill-Gifford para Sigma y
Fonte: Adaptado de SMITH (1973)

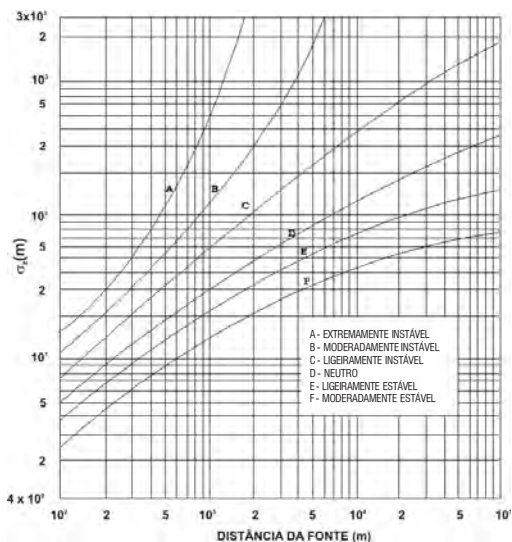


Figura 4 – Curvas de Pasquill-Gifford para Sigma z
Fonte: Adaptado de SMITH (1973)

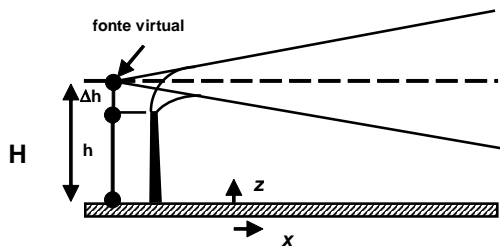


Figura 5 – Ilustração da Altura Efetiva
Fonte: Lisboa (2005)

- Δh para Condições Instáveis ou Neutras

A maior parte dos modelos de dispersão calcula tanto a ascensão em virtude do empuxo quanto o momento. Para determinar a ascensão por causa do empuxo em casos instáveis ou neutros, é necessário primeiramente calcular o fluxo de empuxo F pela equação (2).

$$F = \frac{gvd^2 \Delta T}{(4T_s)} \quad (2)$$

Onde:

F = fluxo de empuxo, m^4/s^3

g = aceleração da gravidade, m/s^2

v = velocidade de saída do gás, m/s

d = diâmetro do interior da chaminé, m

ΔT = temperatura do gás menos a temperatura do ambiente, K

T_s = temperatura do gás, K

A ascensão (Δh) em condições instáveis ou neutras é calculada a partir das equações abaixo, onde u_h = velocidade do vento no topo da chaminé.

- $F < 55$
 $\Delta h = 21,425 F^{3/4} / u_h \quad (3)$

- $F \geq 55$
 $\Delta h = 38,71 F^{3/5} / u_h \quad (4)$

A ascensão por momento é obtida pela equação (5).

$$\Delta h = 3dv / u_h \quad (5)$$

O Δh considerado será o valor mais alto encontrado entre as equações (3 ou 4) e a equação (5).

• Δh para Condições Estáveis

Para calcular Δh por empuxo em condições estáveis, deve-se considerar uma nova variável, o parâmetro de estabilidade s , determinada pela equação:

$$s = (g d\theta / dz) / T \quad (6)$$

Onde:

g = aceleração da gravidade, m/s^2

$d\theta / dz$ = variação da temperatura potencial com a altura = $dT/dz + \Gamma$, K/m

T = temperatura do ar do ambiente, K

Γ = lapse-rate adiabático = $0,0048 K/m$

A determinação da ascensão final da pluma para estas condições é obtida pelas equações (7).

$$\Delta h = 2,6 [F/(u_h s)]^{1/3} \quad (7)$$

Porém, para casos de calmaria, utiliza-se a equação (8).

$$\Delta h = 4F^{1/4} s^{-3/8} \quad (8)$$

O menor valor encontrado de Δh por empuxo, calculado pelas equações (7) e (8), é então comparado com Δh por momento, podendo ser obtido pela equação (9).

$$\Delta h = 1,5 [(v^2 d^2 T) / (4T_s u_h)]^{1/3} s^{-1/6} \quad (9)$$

A equação (5) para condições instáveis e neutras também é usada, e o menor valor encontrado das duas equações é considerado Δh por momento para condições estáveis. Posteriormente, este menor valor é comparado com Δh por empuxo, e o maior valor obtido é dado como Δh para condições estáveis.

Enquanto a temperatura das partículas da pluma for maior que a temperatura do ar, a pluma continua a se elevar. O tempo necessário para dissipar a diferença de temperatura irá variar com a natureza da pluma e com as condições atmosféricas, mas geralmente dura aproximadamente três ou quatro minutos. Por outro lado, o efeito momento tem um tempo de dissipação muito menor, por volta de 30 a 40 segundos. Durante o tempo em que a temperatura excedente está sendo dissipada, Δh é estimada para todas as condições atmosféricas (instáveis, neutras ou estáveis), pela equação (10). Aqui, Δh é a ascensão gradual.

$$\Delta h = (1,60 F^{1/3} x^{2/3}) u_h \quad (10)$$

Onde x é a distância da fonte em metros.

A distância onde ocorre a ascensão final, x_f , pode ser obtida apenas com o fluxo de empuxo, como visto pelas equações abaixo:

• Condições instáveis ou neutras para $F < 55$

$$x_f = 49 F^{5/8} \quad (11)$$

• Condições instáveis ou neutras para $F \geq 55$

$$x_f = 119 F^{2/5} \quad (12)$$

• Condições estáveis

$$x_f = 2,0 u s^{-1/2} \quad (13)$$

Determinação da dose no tecido por intermédio da concentração de um determinado efluente

A dose em virtude da inalação de um radionuclídeo pode ser obtida por intermédio da

concentração do mesmo no ar em um ponto de interesse. De acordo com Peterson (1998), a dose pode ser obtida pela equação (14), vista abaixo:

$$D = \left(\frac{\chi}{Q}\right) \cdot Q \cdot FCD \cdot T_r \cdot t \quad (14)$$

Onde:

D = Dose

χ = Concentração de radionuclídeo em Curie por unidade de volume (Cim^{-3})


Q = Taxa de emissão de radionuclídeo em Curie por unidade de tempo (Cis^{-1})

FCD = fator de conversão de dose ($mrem.pCi^{-1}$)

T_r = taxa de inalação (m^3s^{-1})

t = tempo de exposição (s)

O fator de conversão de dose (FCD) é dependente do tipo de radionuclídeo inalado e do órgão do corpo humano no qual se pretende calcular a dose. Este fator é tabelado no *Regulatory Guides 1.109* (1977) da *U.S. Nuclear Regulatory Commission*.

Por fim, a taxa de inalação depende da idade da pessoa exposta. Para um adulto, esta taxa de inalação é igual a 8.400 por ano, de acordo com Peterson (1998). 

Referências

- BELLASIO, R; BIANCONI, R. RTMOD: an Internet based system to analyze the predictions of long-range atmospheric dispersion models. *Computers & Geosciences*, 25: 819-833, 1999.
- COMPANHIA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PAULISTA (CTEEP)
Site: www.cteep.com.br Último acesso: 02/07/2007.
- EISENBUD, M. Environmental Radioactivity, An Interdisciplinary Monograph Series, 2nd, *Academic Press*, N. Y., 1973.
- FRANCO, N.J.N. Aplicação de um Modelo de Trajetória na Simulação do Transporte de Radionuclídeos na Atmosfera. Doutorado em Engenharia Civil. Ciências Atmosféricas em Engenharia. UFRJ, 2005.
- GIFFORD, FA. Use of Routine Meteorological Observations for Estimating Atmospheric Dispersion. *Nuclear Safety*, 2, p. 47-51, 1961.
- IAEA SAFETY GUIDES N.50-SG-S3. Atmospheric Dispersion in Nuclear Power Plant Siting, *Safety Series, International Atomic Energy Agency*, Viena: 1980.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC), 2007.
Site: <http://www.ipcc.ch/> Último acesso: 02/07/2007.
- LIMA-E-SILVA, PP. Um Método de Cálculo da Dose de Radiação Decorrente da Ressuspensão de Radionuclídeos na Atmosfera. Tese (Mestrado em Engenharia Nuclear) – UFRJ, 1984.
- LISBOA, H.M. Controle da Poluição Atmosférica – ENS 5133, Meteorologia e Dispersão – ENS/UFSC
Site: <http://www.ens.ufsc.br/grade/disciplinas/ens5235/Dispers%E3o%20atmosf%E9rica1.pdf> Último acesso: 20/08/2007.
- MELAZO, C.D. Emissão de 14 C pelas Unidades I e II da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAEA) e seu efeito local nos níveis ambientais. Tese de Doutorado em Geologia, UnB, 2006.
- PASQUILL, F. The estimation of the dispersion of windborne material, *Meteorological Magazine*, 90, p. 33-491, 1961.
- PETERSON, R.P. Appendix A: Methods of Dose Calculations, *LLNL Environmental Report for 1998*, 1998.
Site: <http://www.llnl.gov/saer/saer98/98pdfs/mv-apA.pdf> Último acesso: 30/07/2007.
- REGULATORY GUIDES 1.109. Calculation of Annual Doses to Man from Routine Releases of Reactor Effluent for the Purpose of Evaluation Compliance with 10 CFR part 50, Appendix 1, U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1977.
- SANTOS, E.O. Contabilização das Emissões Líquidas de Gases de Efeito Estufa de Hidrelétricas: Uma Análise Comparativa entre Ambientes Naturais e Reservatórios Hidrelétricos. Tese (Doutorado em Ciências em Planejamento Energético) – UFRJ, 2006.
- SMITH, M.E. Recommended Guide for the Prediction of the Dispersion of Airborne Effluents. ASME, N.Y.: 1973. 2 ed, United Engineering Center, 1973.
- TURNER, B.D. Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates: An Introduction to Dispersion Modeling. 2 ed, Lewis Publishers, 1994.
- ZANNETTI, P. Air Pollution Modeling. Van Nostrand, Reinhold, 1990.