

MODELO DE CAMADA LIMITE PLANETÁRIA PARA ESTIMAR A CONCENTRAÇÃO DE RADIONUCLÍDEOS EM LIBERAÇÕES ACIDENTAIS

Leslie de Molnary

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN/SP
Av. Lineu Prestes 2.242
CEP 05508-900 - São Paulo, SP, Brasil
E-mail: molnary@net.ipen.br

RESUMO

Um modelo de duas camadas é utilizado para simular numericamente a evolução temporal e espacial da concentração de radionuclídeos na camada limite planetária (CLP) durante condições convectivas e estáveis. Neste modelo, as hipóteses de fechamento são baseadas na versão integrada da equação da energia cinética turbulenta (ECT) Este modelo foi adotado porque é numericamente simples de ser aplicado operacionalmente em sistemas operacionais e de suporte à emergência a liberações atmosféricas em plantas nucleares. Comparações numéricas e observacionais de períodos de 24 horas indicam que o modelo é capaz de reproduzir a evolução diurna da temperatura, da velocidade e direção do vento horizontal para os períodos convectivos e estáveis.

Keywords:: atmospheric dispersion, numerical modeling, safety analysis, meteorology, mixing-layer

I. INTRODUÇÃO

O estudo sobre a modelagem da dispersão atmosférica de poluentes e suas implicações sobre a avaliação da qualidade do ar tem suas raízes nos programas militares e de energia atômica desenvolvidos durante o período de 1920 a 1960. A partir da década de 1960, quando diversos países passaram a se utilizar da energia nuclear para a produção de energia elétrica, assim como, passaram a desenvolver novos compostos químicos altamente tóxicos e prejudiciais ao meio ambiente, os estudos de dispersão atmosférica passaram a se constituir em um campo de pesquisa de grande relevância.

As conseqüências ambientais resultantes das liberações de materiais radioativos na atmosfera podem variar consideravelmente de acordo com as condições operacionais da instalação, com as condições meteorológicas predominantes sobre a região na hora, e durante a ocorrência do evento, assim como, com a localização e os hábitos alimentares da população potencialmente afetada.

O objetivo básico deste trabalho é apresentar um modelo numérico para avaliar os mecanismos de transporte e dispersão de radionuclídeos na atmosfera, assumindo-se os padrões característicos de liberação de rotina ou de acidente em instalações nucleares. Também é objetivo do modelo reproduzir mecanismos do transporte advectivo e turbulento para as áreas em torno da instalação assumindo

dimensões espaciais médias de 100 Km² a 10000 Km², de modo a atender as exigências da legislação no que se refere ao licenciamento e operação de instalações nucleares [1,2].

Outro objetivo deste trabalho foi calibrar o modelo numérico através de informações meteorológicas coletadas durante os Experimentos Meteorológicos I a IV realizados no Centro Experimental Aramar (Iperó, SP), com relação a evolução temporal da altura da camada limite planetária, dos fluxos verticais turbulentos de calor e umidade, e balanço de radiação na superfície.

Uma descrição detalhada sobre os experimentos de campo, as técnicas de amostragem utilizadas, e os resultados preliminares dos experimentos são apresentados nas referências [3,4,5].

II. APRESENTAÇÃO DO MODELO

Descrição Geral. Os modelos para avaliação da qualidade do ar são formulados através da utilização de uma equação que estima a concentração e a distribuição temporal e espacial dos poluentes baseada no princípio da conservação de massa. Desse modo, a equação pode ser resolvida para determinadas condições meteorológicas e de superfície, diferentes taxas de emissão de poluentes, diferentes mecanismos de transporte advectivo e turbulento, e diversos processos de remoção.

Tendo em vista a dificuldade para obter informações a respeito da evolução temporal e espacial da estrutura vertical da atmosfera abaixo da camada de inversão térmica e a impossibilidade de se obter estas informações dentro da rotina operacional, o modelo proposto simplifica a equação prognóstica da concentração de poluentes considerando a atmosfera abaixo da base de inversão como sendo formada por uma única camada vertical quando calculado o transporte horizontal e possíveis mecanismos de remoção.

Em condições convectivas a camada limite planetária (CLP) pode ser dividida em três sub-camadas principais: camada limite superficial (CLS), camada de mistura (CM) e camada de transição (CT). A espessura da CLS raramente excede algumas dezenas de metros e devido ao seu contato direto com a superfície ajusta-se rapidamente às suas características. A CM representa a maior parte da extensão da CLP, com espessura atingindo até 2000 m em condições convectivas intensas. A CT representa apenas uma pequena parte da extensão vertical da CLP, e os intensos gradientes verticais são o resultado da interação entre os processos turbulentos da CLP e a atmosfera livre. Além disso, os fluxos turbulentos na CLS são constantes com a altura, e na CM eles variam linearmente com a altura.

A hipótese de mistura durante o período convectivo diurno não apresenta grandes discordâncias com as observações, entretanto, a hipótese de mistura no período estável noturno representa um alto grau de idealização. No modelo a CLP noturna é mantida pela turbulência de origem mecânica, contudo, quando a inversão térmica é particularmente intensa, a turbulência mecânica pode ser totalmente eliminada. Além disso, somente durante condições ligeiramente estáveis a hipótese de CM estável pode ser assumida.

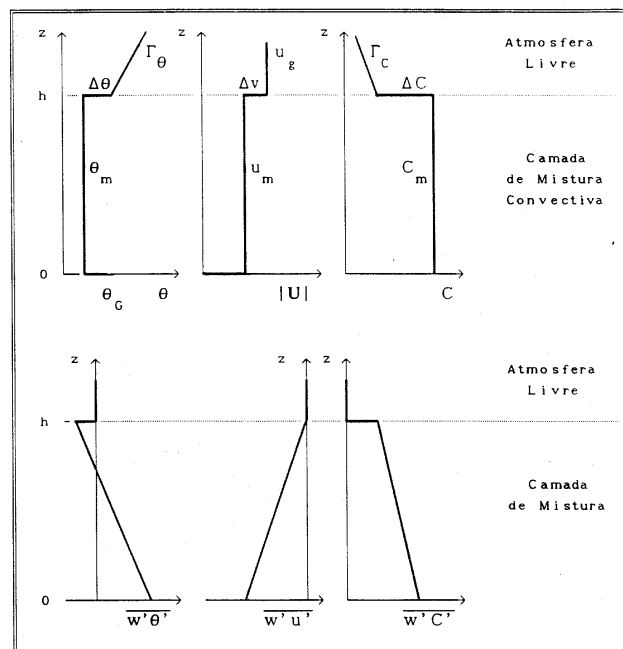
A estrutura vertical do modelo durante condições convectivas é apresentada na Figura 1(a). A estrutura vertical do modelo durante condições estáveis é apresentada na Figura 1(b). No período estável a CLP é representada através de uma CM muito mais rasa do que no período convectivo e que desenvolve-se contra a CM residual.

As equações que descrevem a evolução temporal e espacial das variáveis dinâmicas, termodinâmicas, da altura e da concentração da CLP são obtidas a partir da integração das equações médias de momento, conservação de calor, conservação da massa, e conservação da energia cinética turbulenta sobre toda a altura da CM, com posterior aplicação da regra de Leibnitz para resolver a integral da derivada. O conjunto de equações resultantes é apresentado na Tabela 1.

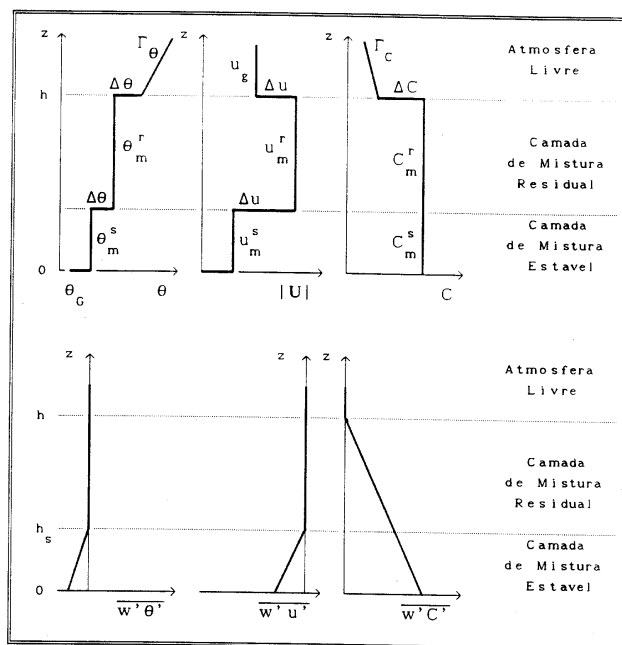
A concentração na atmosfera livre em circunstâncias normais apresenta padrões horizontalmente homogêneos, uma vez que, deve-se esperar apenas a existência de valores de concentração de fundo (*background*) e gradientes verticais de concentração muito pequenos ($\partial C/\partial z \approx 0$).

Na formulação das equações que descrevem a CLP foi mantido o termo relativo a velocidade vertical de grande escala, $w(h)$, efetivamente como sendo uma correção de dh/dt . Entretanto, como é difícil estimar-se precisamente este termo dentro da estrutura operacional é considerado um valor típico da velocidade vertical entre $-0,01$ e $-0,02 \text{ m.s}^{-1}$ ao nível de 850 hPa (aproximadamente 1500 m) e os vários

estágios de crescimento da CM. Supondo-se que a turbulência no interior da CLP está em regime estacionário ($d\epsilon/dt=0$), então é possível assumir a existência de um balanço entre a produção mecânica (ou térmica) de energia cinética turbulenta e a dissipação viscosa (ou térmica) conforme apresentado na Eq. (19).



(a)



(b)

Figura 1. Representação da Camada Limite Planetária (CLP) Durante Condições Convectivas (a) e Condições Estáveis (b). A Figura Apresenta as Parametrizações dos Perfis de Temperatura Potencial, Velocidade, Concentração, e dos Fluxos Verticais Turbulentos de Calor, Momentum, e Concentração [4].

TABELA 1. Conjunto de Equações que Representam a Evolução Temporal e Espacial da Camada Limite Planetária (CLP).

$$\frac{\partial u_m}{\partial t} + u_m \frac{\partial u_m}{\partial x} + v_m \frac{\partial u_m}{\partial y} = -f\Delta v + \frac{\Delta u}{h} \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{u_*^2}{h} \cos \mathbf{a} + K_h \left[\frac{\partial^2 u_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_m}{\partial y^2} \right] \quad (1)$$

$$\frac{\partial v_m}{\partial t} + u_m \frac{\partial v_m}{\partial x} + v_m \frac{\partial v_m}{\partial y} = f\Delta u + \frac{\Delta v}{h} \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{u_*^2}{h} \sin \mathbf{a} + K_h \left[\frac{\partial^2 v_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_m}{\partial y^2} \right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial \mathbf{q}_m}{\partial t} + u_m \frac{\partial \mathbf{q}_m}{\partial x} + v_m \frac{\partial \mathbf{q}_m}{\partial y} = \frac{\overline{(w' \mathbf{q}')}_0}{h} - \frac{\overline{(w' \mathbf{q}')}_h}{h} - R_{rad} + K_h \left[\frac{\partial^2 \mathbf{q}_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{q}_m}{\partial y^2} \right] \quad (3)$$

$$\frac{\partial C_m}{\partial t} + u_m \frac{\partial C_m}{\partial x} + v_m \frac{\partial C_m}{\partial y} = \frac{\overline{(w' C')}_0}{h} - \frac{\overline{(w' C')}_h}{h} + K_h \left[\frac{\partial^2 C_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_m}{\partial y^2} \right] \quad (4)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u_m \frac{\partial h}{\partial x} + v_m \frac{\partial h}{\partial y} = \frac{\overline{(w' \mathbf{q}')}_0}{\Delta \mathbf{q}} + \frac{2(G_* - D_*)}{gh \left(\frac{\Delta \mathbf{q}}{\mathbf{q}_m} \right)} + w(h) + K_h \left[\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right] \quad (5)$$

$$\Delta u = u_g - u_m \quad (6)$$

$$\Delta v = v_g - v_m \quad (7)$$

$$\mathbf{a} = \tan^{-1} \left(\frac{v_m}{u_m} \right) \quad (8)$$

$$u_g = f(t) \quad (9)$$

$$v_g = f(t) \quad (10)$$

$$\left. \frac{\partial \mathbf{q}_{AL}}{\partial t} \right|_{z=h} = \Gamma_{\mathbf{q}} \left[\frac{dh}{dt} - w(h) \right] \quad (11)$$

$$\left. \frac{\partial C_{AL}}{\partial t} \right|_{z=h} = \Gamma_C \left[\frac{dh}{dt} - w(h) \right] \quad (12)$$

$$R_{rad} = A(\mathbf{q}_m - \mathbf{q}_G) \quad (13)$$

$$\overline{(w' \mathbf{q}')}_0 = C_{\mathbf{q}} u_* (\mathbf{q}_m - \mathbf{q}_G) \quad (14)$$

$$\overline{(u' w')}_0 = -u_*^2 \cos \mathbf{a} \quad (15)$$

$$\overline{(v' w')}_0 = -u_*^2 \sin \mathbf{a} \quad (16)$$

$$\overline{(w' C')}_0 = 0 \text{ (liberação instantânea)} \quad (17)$$

$$\overline{(w' C')}_0 = f(t) \text{ (liberação em função do tempo)} \quad (18)$$

$$R_* + G_* - D_* = 0 \quad (19)$$

onde, u_m e v_m são respectivamente as componentes zonal e meridional do vento da CM; u_g e v_g são respectivamente as componentes zonal e meridional do vento geostrófico na interface da CM com a atmosfera livre; θ_m é a temperatura potencial média da CM; C_m é a concentração média na CM; h é a altura da CM; f é o parâmetro de Coriolis; a tensão de Reynolds (stress de superfície) é representada pelo vetor $\mathbf{t} = \rho_0(u_*^2 \cos \alpha, u_*^2 \sin \alpha)$, α é o ângulo entre \mathbf{t} com o eixo zonal x ; ρ_0 é a densidade do ar; u_* é a velocidade de atrito; $\overline{(w' \theta')}_0$ é o fluxo turbulento de calor na superfície; $\overline{(w' \theta')}_h$ é o fluxo turbulento de calor no topo da CM; $\overline{(w' C')}_0$ é o fluxo turbulento de concentração na superfície; R_{rad} é o termo de resfriamento radiativo devido ao fluxo radiativo e onda-longa entre o topo da CM e a superfície; A é uma constante de proporcionalidade (10^{-5} s^{-1}), K_h é o coeficiente

de difusão turbulenta horizontal constante no interior da CM; R_* é a taxa de produção (ou destruição) de energia cinética turbulenta (ECT) devido à convecção térmica no interior da CM; G_* é a taxa de geração mecânica de ECT pelo cisalhamento do vento; D_* é a taxa de dissipação molecular da ECT no interior da CM; $w(h)$ é a velocidade vertical do vento de escala sinótica; g é a aceleração da gravidade; Γ_{θ} e Γ_C são respectivamente o gradiente vertical de temperatura potencial e de concentração na atmosfera livre; C_{θ} é o coeficiente de transferência de calor; e θ_G é a temperatura potencial da superfície.

A Figura 2 apresenta um diagrama da equação da ECT e os principais processos de troca envolvidos sob condição de estado uniforme e estacionário.

A Eq. (5) é utilizada para prognosticar a altura da CM durante condições convectivas e estáveis. A análise dos termos que descrevem a altura da CM mostram que durante o período estável o crescimento da CM estável é sustentado apenas pelo mecanismo de geração mecânica de ECT devido ao cisalhamento do vento na superfície.

Durante o período convectivo, o crescimento da CLP é sustentado pelo mecanismo de turbulência térmica gerada pelo fluxo turbulento de calor da superfície e pelo mecanismo de produção mecânica. Ainda durante o período convectivo o termo dissipativo é maior que o termo de geração mecânica devido ao cisalhamento do vento.

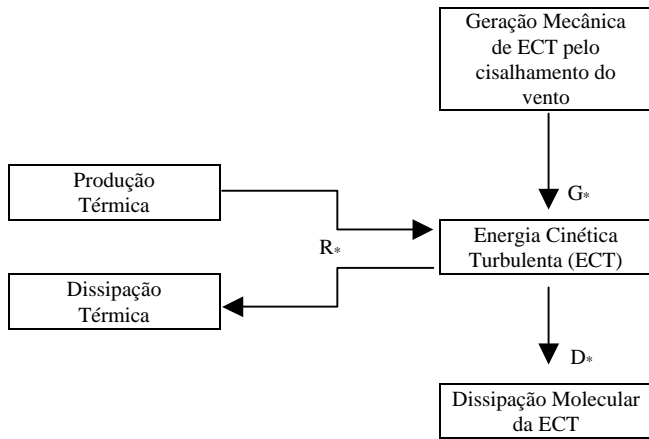


Figura 2. Representação dos Mecanismos de Transformação da Energia Cinética Turbulenta, e Respectivas Orientações com o qual os Mecanismos se Processam. Assume-se Estado Uniforme e Estacionário [4].

Desde que o fluxo turbulento de calor durante o período de transição para o período estável está orientado em direção à superfície, ele se constitui em um importante processo para a estabilização da camada superficial. Assumindo que durante o período de transição o termo de entranhamento no topo da CLP é pequeno e pode ser desprezado, então pode-se reescrever a equação para estimativa da altura da CM como sendo:

$$h = - \frac{2(G_* - D_*)}{\frac{g}{q_m} (w'q')_0} \quad (20)$$

A Eq.(20) é aplicada após o início do período de transição e durante o intervalo de tempo necessário até que seja obedecida a relação:

$$\left| \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{(w'q')_0}{\Delta q} \right| \leq 0,05 \left| \frac{(w'q')_0}{\Delta q} \right| \quad (21)$$

Com este critério a Eq. (20) procura diagnosticar um novo valor de altura para a camada estável que está se

originando, antes dela começar a desenvolver-se novamente. Após a utilização da Eq. (20) durante o intervalo de tempo necessária para atender a Eq. (21), a Eq. (5) é utilizada durante todo o restante do período noturno.

III. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO MODELO

As simulações são realizadas com o objetivo de prognosticar a evolução da CLP através das comparações com os perfis verticais de temperatura potencial, velocidade e direção do vento obtidos durante a realização dos experimentos meteorológicos realizados no Centro Experimental Aramar (CEA).

Na Figura 3 apresentam-se as sondagens realizadas neste dias, e os respectivos valores numéricos obtidos. Para esta comparação, são consideradas como representativas as informações dos perfis verticais obtidos entre os dias 16 e 17 de março de 1991 do Experimento Meteorológico II. As condições de contorno e condições iniciais assumidas para a realização da simulação numérica são apresentadas na Tabela 2 a seguir.

TABELA 2. Condições de Contorno e Condição Iniciais Assumidas para a Realização do Experimento Numérico de Sensibilidade com o Modelo de CLP. Não Considera-se os Processos Físicos de Advecção e Difusão Horizontal.

Condições de Contorno		Condições Iniciais	
Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Γ_θ (K.m ⁻¹)	0,006	u_m^0 (m.s ⁻¹)	-2,0
Γ_C (Ci.m ⁻³)	-0,001	v_m^0 (m.s ⁻¹)	5,0
w_h (m.s ⁻¹)	0,0	D_m^0 (graus)	160
u_g (m.s ⁻¹)	-5,0	h^0 (m)	200
v_g (m.s ⁻¹)	5,0	θ_m^0 (K)	298,5
D_g (graus)	135	θ_{AL}^0 (K)	299,0
z_0 (m) ^{1/1}	0,010	C_m^0 (Ci.m ⁻³)	100
γ (m ⁻¹)	0,001	C_{AL}^0 (Ci.m ⁻³)	1
		θ_G^0 (K)	301,5

^{1/1} O valor do parâmetro de rugosidade, z_0 , foi escolhido em função do tipo de terreno e vegetação mais representativo em torno do CEA.

IV. CONCLUSÃO

A utilização do modelo de duas camadas para avaliar a evolução temporal da CLP durante os períodos convectivo (diurno) e estável (noturno) conseguiu reproduzir o comportamento médio dos perfis verticais observados durante os dias 16 e 17 de março de 1991 do Experimento Meteorológico II, e que correspondem a uma situação típica de verão.

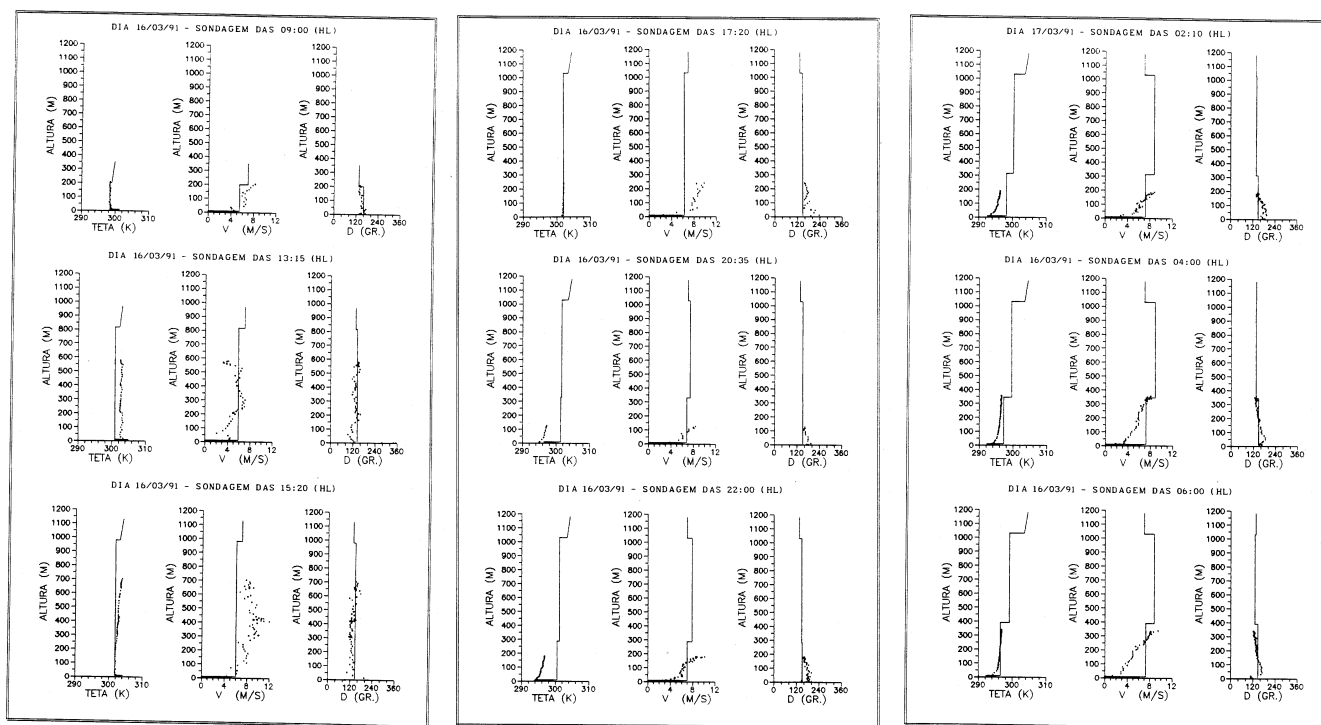


Figura 3. Comparação entre os Resultados Numéricos do Modelo de Duas Camadas para Representar a Camada Limite Planetária (CLP) com os Perfis Verticais de Temperatura Potencial, Velocidade e Direção do Vento Observados nos Dias 16 e 17/03/1991 do Experimento Meteorológico II. A Curva Contínua é a Solução Numérica do Modelo, e os Pontos Correspondem aos Valores Amostrados pelo Sistema de Balão-Cativo.

Através das sondagens com o balão-cativo é possível verificar que o crescimento da CM convectiva ocorre nas primeiras horas do dia a partir da quebra da camada de inversão térmica existente sob a camada residual do dia anterior, com o topo da CM chegando a atingir valores acima de 900 m.

No período noturno, existe a formação de uma camada de inversão de superfície que vai intensificando-se por causa do resfriamento radiativo da superfície. Sobre essa camada de inversão, que possui uma profundidade entre 200 e 400 m, é observado a formação de jatos noturnos de baixos níveis.

A simulação numérica com as condições iniciais e de contorno pode variar enormemente em função da sensibilidade de algumas das variáveis inseridas no modelo. Entre as principais variáveis que irão determinar a estrutura do crescimento da altura da camada de mistura pode-se mencionar o coeficiente de dissipação turbulenta, e o gradiente vertical da temperatura potencial na atmosfera livre.

As condições de contorno mais críticas para o modelo são a especificação correta da temperatura de superfície em função do passo de integração no tempo, a rugosidade do terreno, e a velocidade e direção do vento geostrófico na interface entre a atmosfera livre e o topo da camada de mistura.

De maneira geral o modelo comporta-se de maneira bastante estável, e sua utilização pode ser implementada facilmente em um microcomputador padrão IBM-PC, e

demanda poucos minutos para fazer a projeção do comportamento das variáveis prognosticadas para o período de 24 horas.

REFERÊNCIAS

- [1] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Formato padrão de relatórios de análise de segurança com reatores de potência a água leve pressurizada.** Rio de Janeiro. 1974. (Relatório 53).
- [2] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Programas de meteorologia de apoio de usinas nucleoeletricas.** Rio de Janeiro. 1989. (CNEN-NE 1.22)
- [3] MOLNARY, L.; OLIVEIRA, A.P. **Evolução temporal da camada limite planetária em Iperó (SP) durante os experimentos meteorológicos de campo I e II – comparação entre modelo numérico e observações.** Anais do VII Congresso Brasileiro de Meteorologia, v.2, 437-441. São Paulo, Brasil. 1992.
- [4] MOLNARY, L. **Caracterização de um modelo de camada limite planetária para avaliar liberações de radionuclídeos em instalações nucleares.** Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1993.

[5] OLIVEIRA, A. P., O.L.L. MORAES, G.A.DEGRAZIA;
MOLNARY, L..**Observational studies of the planetary
boundary layer at subtropical regions of Brazil.** Revista
Brasileira de Geofísica, vol.12, p. 55-58. 1994.

ABSTRACT

A two layer bulk model is used to simulate numerically the time and spatial evolution of concentration of radionuclides in the Planetary Boundary Layer (PBL) for convective and stable conditions. In this model, the closure hypothesis are based on the integrated version of the Turbulent Kinetics Energy (TKE) equation. This type of model was adopted here because it is numerically simple to be applied operationally in routine and emergency support systems of atmospheric releases at nuclear power plants, and the hypothesis of the efficiency of the vertical mixing seems to be physically reasonable to simulate PBL evolution for high wind conditions and stable conditions in subtropical latitudes regions. In order to validate the model, numerical simulations were carried out with initial and boundary conditions based on vertical profiles of temperatures and horizontal wind speed and direction obtained from tethered balloon soundings, synoptic charts at 850 hPa and surface observations. Comparisons between a 24 hour long numerical simulation and observations indicate that the model is capable of reproduce the diurnal evolution of temperature and horizontal wind during the convective regime. During stable conditions, the slab model was able to simulate the intensity of the surface inversion as a difference between the mixed layer and the surface temperature. The simulated mixed layer height matches with observations during the convective and stable regime.