

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Programa de Pós-Graduação em Meteorologia
Curso de Graduação em Meteorologia

MODELAGEM ATMOSFÉRICA

Aula 10



Universidade Federal
de Campina Grande

Disciplina:

Métodos de Modelagem Numérica

Enilson Palmeira Cavalcanti
enilson.cavalcanti@ufcg.edu.br

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Graduação e Pós-Graduação em Meteorologia

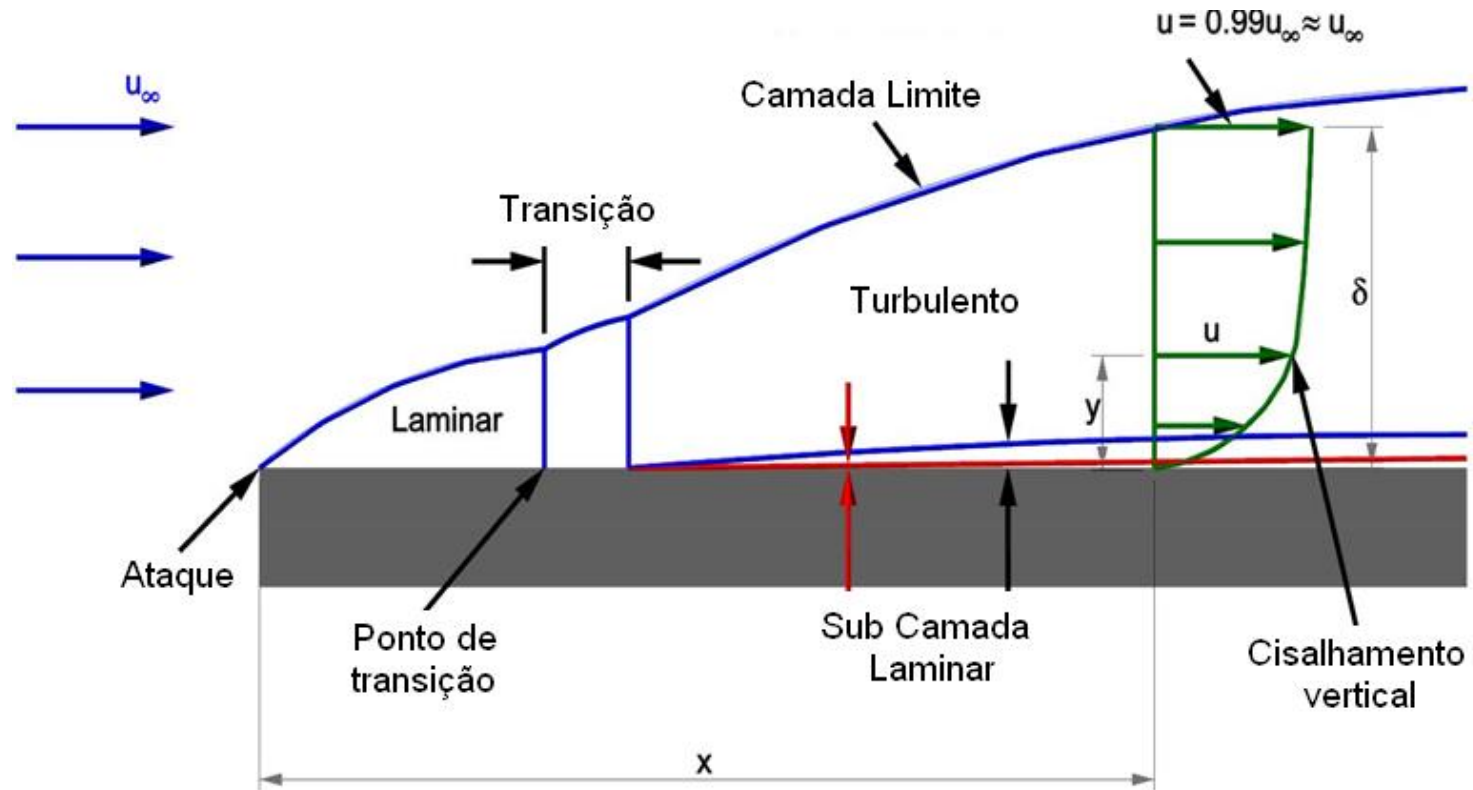
Parametrização Turbulenta

Camada Limite Turbulenta



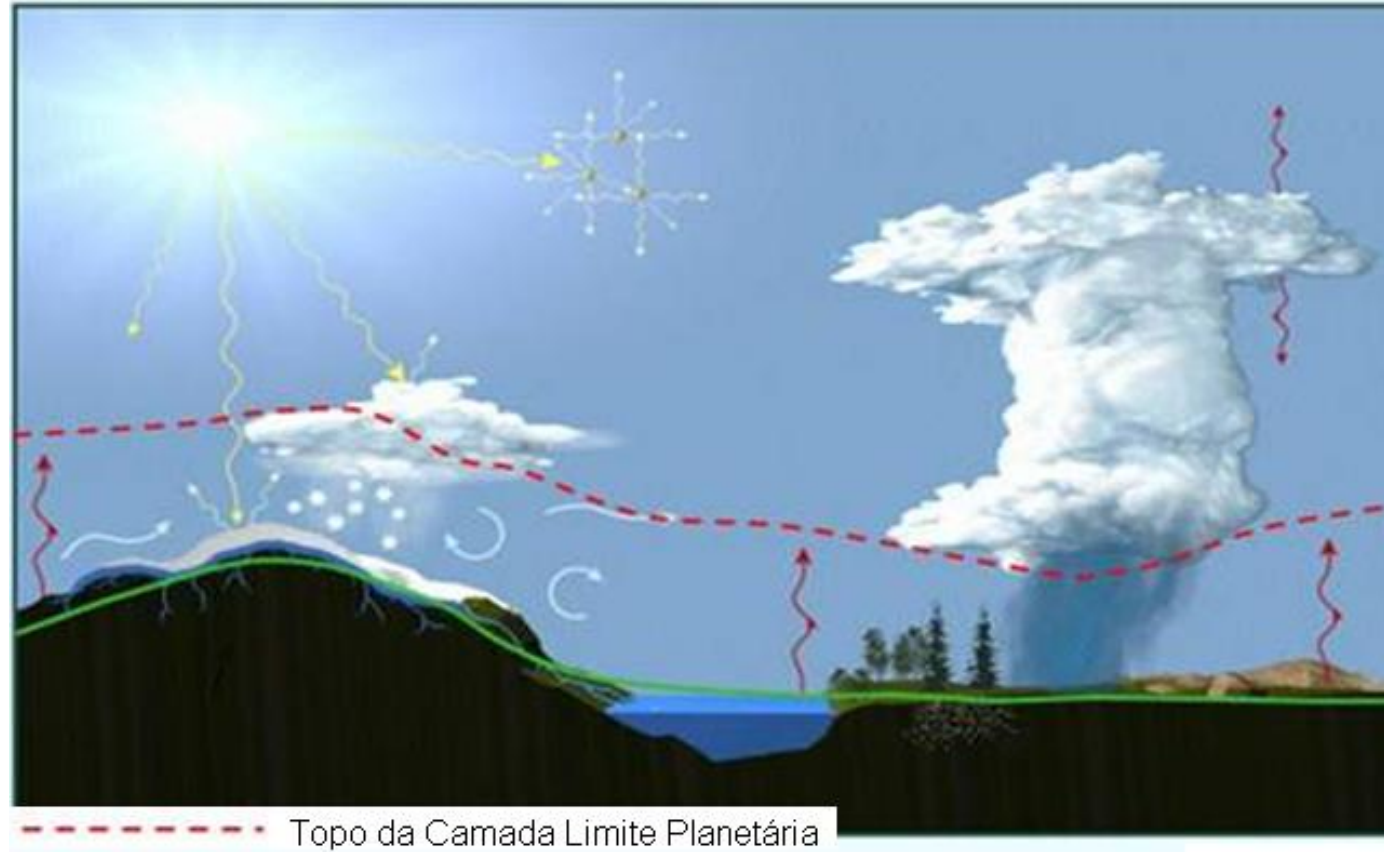
Parametrização Turbulenta

Camada Limite



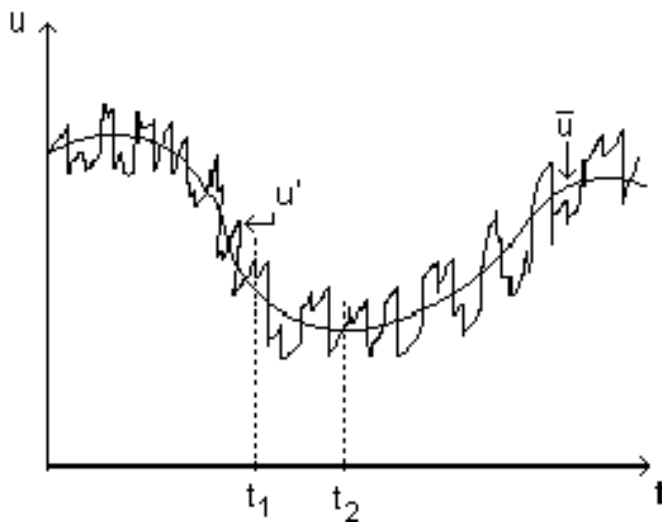
Parametrização Turbulenta

Camada Limite Planetária



Parametrização Turbulenta

Turbulência



$$T = \bar{T} + T'$$

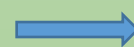
$$p = \bar{p} + p'$$

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

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

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

Média



$$\bar{u} = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_1}^{t_2} u dt$$

Propriedades da média

$$\overline{f + g} = \bar{f} + \bar{g};$$

$$\overline{fg} = \bar{f} \bar{g}$$

$$\overline{af} = a \bar{f} \quad (a = \text{cte.}); \quad \overline{f'g'} = \bar{f}' \bar{g}'$$

Portanto, para o produto \overline{uv}

$$\overline{uv} = \overline{(\bar{u} + u')(\bar{v} + v')} = \bar{u} \bar{v} + \overline{u'v'}$$

Parametrização Turbulenta

Equação de Reynolds

$$\begin{aligned}
 \frac{D\bar{u}}{Dt} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + f\bar{v} + \mu \nabla^2 \bar{u} - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \overline{\rho u' u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{\rho u' v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{\rho u' w'}}{\partial z} \right) \\
 \frac{D\bar{v}}{Dt} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} - f\bar{u} + \mu \nabla^2 \bar{v} - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \overline{\rho v' u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{\rho v' v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{\rho v' w'}}{\partial z} \right) \\
 \frac{D\bar{w}}{Dt} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} - g + \mu \nabla^2 \bar{w} - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \overline{\rho w' u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{\rho w' v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{\rho w' w'}}{\partial z} \right)
 \end{aligned}$$

Em que $\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial}{\partial z}$

- Euler
- Navier-Stokes
- Reynolds

Parametrização Turbulenta

Analogia de Reynolds para Temperatura e Umidade

Transferência de calor

$$\frac{D\bar{T}}{Dt} = K\nabla^2\bar{T} - \frac{1}{\rho c_p} \left(\frac{\partial \rho c_p \overline{u'T'}}{\partial x} + \frac{\partial \rho c_p \overline{v'T'}}{\partial y} + \frac{\partial \rho c_p \overline{w'T'}}{\partial z} \right)$$

Transferência de umidade

$$\frac{D\bar{q}}{Dt} = K_q \nabla^2 \bar{q} - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho \overline{u'q'}}{\partial x} + \frac{\partial \rho \overline{v'q'}}{\partial y} + \frac{\partial \rho \overline{w'q'}}{\partial z} \right)$$

$$\text{Em que } \frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \overline{u} \frac{\partial}{\partial x} + \overline{v} \frac{\partial}{\partial y} + \overline{w} \frac{\partial}{\partial z}$$

Parametrização Turbulenta

Considerando que $u' = v' = w'$

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{\rho u' w'}}{\partial z} \quad \longrightarrow \quad \tau = \overline{\rho u' w'}$$

$$\tau = \rho l^2 \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right)^2 \quad \longrightarrow \quad \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} = l \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}$$

$$\int_0^U \partial \bar{u} = \frac{u^*}{k} \int_{z_0}^z \partial \ln z$$

Perfil logaritmo do vento

$$U = \frac{u^*}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right)$$

Teoria do comprimento de mistura de Prandtl.

$$u' \cong v' \cong w' = l \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}$$

$$l = kz \quad \text{e} \quad u^* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}}$$

τ Tensão de cisalhamento

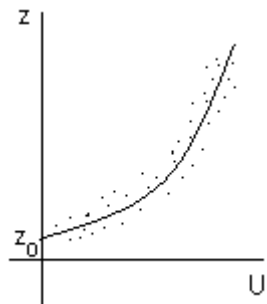
k Difusividade turbulenta

u^* Velocidade de fricção

z_0 Rugosidade

Parametrização Turbulenta

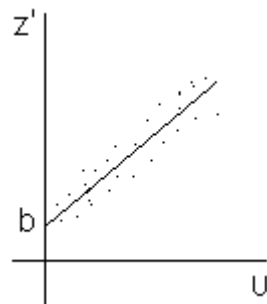
Perfil logaritmo do vento



$$\frac{kU}{u^*} = \ln z - \ln z_0 \quad \longrightarrow \quad \ln z = \frac{kU}{u^*} + \ln z_0$$

$$\ln z = \frac{kU}{u^*} + \ln z_0 \quad \longrightarrow \quad z' = aU + b$$

$$a = \frac{k}{u^*}; \quad b = \ln z_0; \quad z' = \ln z$$



$$u_1 = \frac{u^*}{k} \ln \left(\frac{z_1}{z_0} \right)$$

$$u_2 = \frac{u^*}{k} \ln \left(\frac{z_2}{z_0} \right)$$

$$u^* = \frac{k(u_2 - u_1)}{\ln \left(\frac{z_2}{z_1} \right)}$$

Parametrização Turbulenta

Fluxo de calor sensível (H)

$$0 = -\frac{1}{\rho c_p} \frac{\partial \rho c_p \overline{w'T'}}{\partial z} \longrightarrow H = -\rho c_p \overline{w'T'}$$

$$H = -\rho c_p l \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} l_T \frac{\partial \bar{T}}{\partial z}$$

$$H = -\rho c_p u^* k_T \frac{\partial \bar{T}}{\partial \ln z}$$

$$w' \cong u' = l \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}$$

$$T' = l_T \frac{\partial \bar{T}}{\partial z}$$

$$l = kz \text{ e } l_T = k_T z$$

Coeficiente de difusividade
térmica k_T

$$k_T \cong k$$

$$H = \frac{-\rho c_p k k_T (u_2 - u_1)(T_2 - T_1)}{\left[\ln \left(\frac{z_2}{z_1} \right) \right]^2}$$

Parametrização Turbulenta

Fluxo de calor latente (LE)

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{\rho w' q'}}{\partial z} \quad \longrightarrow \quad LE = -\overline{\rho w' q'}$$

$$LE = -\rho l \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} l_q \frac{\partial \bar{q}}{\partial z}$$

$$LE = -\rho u^* k_q \frac{\partial \bar{q}}{\partial \ln z}$$

$$LE = \frac{-\rho k k_q (u_2 - u_1)(q_2 - q_1)}{\left[\ln \left(\frac{z_2}{z_1} \right) \right]^2}$$

$$w' \cong u' = l \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}$$

$$q' = l_q \frac{\partial \bar{q}}{\partial z}$$

$$l = kz \text{ e } l_q = k_q z$$

Coeficiente de difusividade

úmida k_q

$$k_T \cong k_q \cong k$$



Fim da Aula-01/Módulo-03

F I M