

Prova de Micrometeorologia – 2ª Parte – 22 de Junho de 2006

Prof. Amauri P. de Oliveira

Sem consulta e com 2 horas de duração

$$\Delta p = -\frac{\Delta z}{10}$$

Questão 1: (3 pontos) As seguintes medidas de vento e temperatura foram obtidas da torre de 200 m em Cabauw, Holanda, numa noite de setembro.

$ \vec{v} \sin \theta$ $-\vec{v} \cos \theta$	Δp (hPa)	Z (m)	Vel (m/s)	Direção (graus)	Temperatura (°C)	θ (K)
999,5	-0,5	5	2.2 $\begin{cases} U=0,53 \\ V=2,13 \end{cases}$	194	8.58	8,5811 → 281,61
999	-1	10	2.7 $\begin{cases} U=0,65 \\ V=2,61 \end{cases}$	194	8.81	8,812 → 281,88
998	-2	20	3.5 $\begin{cases} U=1,31 \\ V=3,24 \end{cases}$	202	9.08	9,085 → 282,22
996	-4	40	5.4 $\begin{cases} U=3,24 \\ V=4,31 \end{cases}$	217	10.15	10,16 → 283,44
992	-8	80	8.2 $\begin{cases} U=6,63 \\ V=4,81 \end{cases}$	234	12.19	12,21 → 285,72
988	-12	120	9.1 $\begin{cases} U=7,88 \\ V=4,85 \end{cases}$	240	12.96	13,00 → 286,84
984	-16	160	8.7 $\begin{cases} U=7,94 \\ V=3,53 \end{cases}$	246	12.86	12,91 → 287,04
980	-20	200	7.8 $\begin{cases} U=7,32 \\ V=2,66 \end{cases}$	250	12.63	12,61 → 287,11

- Faça um gráfico do perfil vertical das componentes zonal e meridional do vento e da temperatura potencial;
- Usando os perfis de temperatura potencial e das componentes do vento no item (a), determine o módulo do cisalhamento do vento, o gradiente de temperatura potencial e o número de Richardson, Ri , para as alturas 7,5; 15; 30; 60; 100; 140 e 180 m.

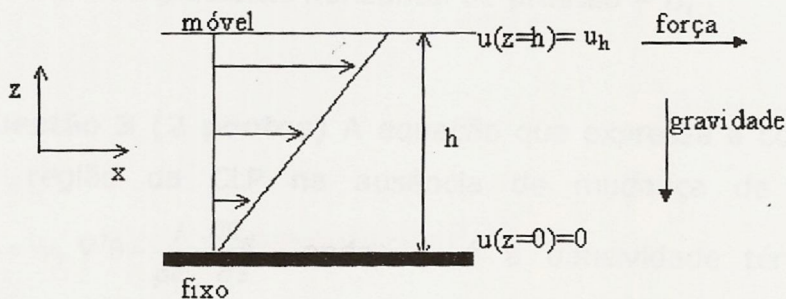
c) Faça um gráfico de Ri em função da altura e indique a altura provável do topo da CLP com base no número de Richardson crítico de 0,5.

Temperatura potencial $\theta = T \left(\frac{p}{1000} \right)^{0,257}$, T é a temperatura do ar em Kelvin e p é a pressão atmosférica em hPa. Considere a seguinte aproximação $\Delta p \approx -\frac{\Delta z}{10}$, para z em metros e p em hPa. Pressão no nível da superfície = 1000 hPa.

O número de Richardson: $Ri = \frac{g}{\theta_0} \frac{\frac{\partial \theta}{\partial z}}{\left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial z} \right)^2}$, onde $g = 9.81 \text{ m s}^{-2}$, $\theta_0 = 300\text{K}$ e $\vec{V}$ é

o vetor que indica a velocidade e a direção do vento horizontal no sistema de coordenadas fixo em relação a superfície da Terra e orientado segundo a convenção meteorológica.

Questão 2 (3 pontos) Considere um escoamento laminar em regime estacionário que se formou entre duas superfícies rígidas com extensão horizontal infinita conforme esquema abaixo.



Considerando as seguintes equações do movimento:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right) = \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)' = \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = +f v - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \rightarrow \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0 \quad \left| \begin{array}{l} u - v(0) = 0 \\ v(z_1) = U_0 \end{array} \right.$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -f u - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] \quad \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} \nu = w = 0$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] \rightarrow \text{hidrostática}$$

onde u , v e w são as componentes da velocidade, p é a pressão, f é o parâmetro de coriolis, ρ é a densidade do ar, ν viscosidade cinemática molecular do ar e g é a aceleração da gravidade..

- Determine o perfil vertical de velocidade horizontal;
- Determine o perfil vertical da tensão de cisalhamento viscoso;
- Explique por que não se observa este tipo de escoamento na atmosfera.

Considere as seguintes hipóteses:

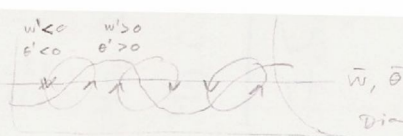
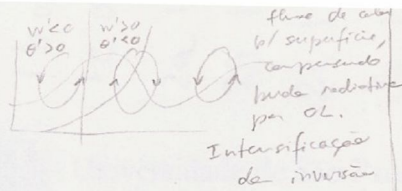
- $v = w = 0$;
- Força de Coriolis = 0;
- Forças do gradiente horizontal de pressão = 0;

Questão 3 (2 pontos) A equação que expressa a conservação de energia na região da CLP na ausência de mudança de fase é a seguinte:

$$\frac{D\theta}{Dt} = \nu_T \nabla^2 \theta - \frac{1}{\rho c_p} \frac{\partial R_N}{\partial z}, \quad \text{onde } \nu_T \text{ é a difusividade térmica do ar, } \rho \text{ é a}$$

densidade do ar, c_p é a calor específico do ar a pressão constante e R_N é a componente vertical da radiação líquida.

- Derive a equação de conservação de energia média usando as propriedades da média de Reynolds.



$$\theta' = \theta - \bar{\theta}$$

$$\overline{\theta'w'} > 0 \Rightarrow \text{fluxo de calor para cima}$$

- b) Mostre de forma esquemática como a turbulência aquece a camada limite planetária durante o dia e resfria durante a noite. Considere em sua análise que a CLP é horizontalmente homogênea e que R_N não varia com a altura.

$$x = \bar{x} + x' \Rightarrow x' = x - \bar{x}$$

Questão 4 (2 pontos) Descreva o comportamento da equação do balanço de energia cinética turbulenta na CLP em equilíbrio durante:

- a) período diurno; $\rightarrow$ ocorre produção de turbulência por S e B , dissipação por B e D .
- b) período noturno. $\rightarrow$ produção majoritariamente por S , dissipação por B e D .

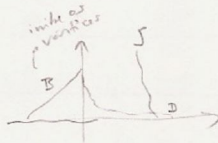
A equação da energia cinética turbulenta é expressa da seguinte forma:

$$\frac{d(ECT)}{dt} = S + B - D + T$$

onde ECT é a energia cinética turbulenta por unidade de massa, S é a produção mecânica, B é a produção ou dissipação térmica, D é a dissipação molecular e T o transporte espacial de ECT .



$\leftarrow$ Dia



$\leftarrow$ Noite



Universidade de São Paulo
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas

NOME Luiz Felipe Gozzo

N.º USP 3479406

CURSO Meteorologia

DISCIPLINA Micro meteorologia

DATA 22/06/06

NOTA	EXAMINADORES
7.5	<i>[Signature]</i>

2. Aplicando as simplificações propostas, as equações de momento reduzem-se a:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0 \quad \text{e} \quad -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \Rightarrow \frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g$$

escoamento em equilíbrio hidrostático

a) $\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0$. Esta equação diferencial tem solução

linear $\Rightarrow u(z) = az + b$. Aplicando as condições de contorno:

• $u(0) = 0 \Rightarrow b = 0$

• $u(h) = u_h \Rightarrow ah = u_h \Rightarrow a = \frac{u_h}{h}$

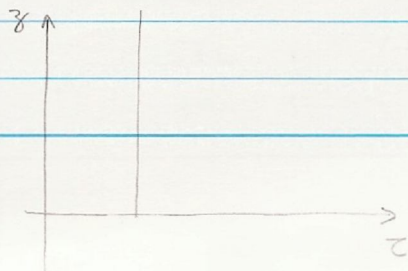
$\therefore \boxed{u(z) = \frac{u_h}{h} \cdot z}$ (cujo gráfico está esquematizado na folha de questões).

b) Sendo o ar um fluido newtoniano,

$\tau_{xz} = \mu \frac{\partial u}{\partial z}$. Então,

$\tau_{xz} = \mu \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{u_h}{h} z \right) \Rightarrow \boxed{\tau_{xz} = \mu \cdot \frac{u_h}{h}}$

Gráficamente:



c) Este escoamento não é verificado na atmosfera nenhuma das hipóteses assumidas para se chegar à solução são aplicáveis à atmosfera real: F_c , coriolis $\neq 0$, existem gradientes de pressão.

3. a) Considerando que θ, u, v, w podem ser decompostos como parte média mais perturbação, e assumindo $g = \bar{g}$, $\bar{V}_T = \bar{V}_T$ e $\bar{R}_N = \bar{R}_N$, temos:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\theta} + \theta') + (\bar{u} + u') \frac{\partial}{\partial x} (\bar{\theta} + \theta') + (\bar{v} + v') \frac{\partial}{\partial y} (\bar{\theta} + \theta') + (\bar{w} + w') \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\theta} + \theta')$$

$$\bar{V}_T \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} (\bar{\theta} + \theta') + \frac{\partial^2}{\partial y^2} (\bar{\theta} + \theta') + \frac{\partial^2}{\partial z^2} (\bar{\theta} + \theta') \right] - \frac{1}{\bar{c}_p} \frac{\partial \bar{R}_N}{\partial z}$$

$$\cdot (\bar{u} + u') \frac{\partial}{\partial x} (\bar{\theta} + \theta') = \bar{u} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x} + \bar{u} \frac{\partial \theta'}{\partial x} + \bar{v}' \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x} + \bar{v}' \frac{\partial \theta'}{\partial x} = \bar{u} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x}$$

O mesmo raciocínio se aplica aos termos $(\bar{v} + v') \frac{\partial}{\partial y}$

$$(\bar{w} + w') \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\theta} + \theta'). \text{ Então,}$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} + \bar{u}' \frac{\partial \theta'}{\partial x} + \bar{v}' \frac{\partial \theta'}{\partial y} + \bar{w}' \frac{\partial \theta'}{\partial z} =$$

$$\bar{V}_T \left[\frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial z^2} \right] - \frac{1}{\bar{c}_p} \frac{\partial \bar{R}_N}{\partial z}$$

Podemos também unir os termos com derivadas espaciais em ambos os lados da equação:

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\bar{V}_T \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x} - \bar{u}' \theta' \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\bar{V}_T \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} - \bar{v}' \theta' \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\bar{V}_T \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} - \bar{w}' \theta' \right) - \frac{1}{\bar{c}_p} \frac{\partial \bar{R}_N}{\partial z}$$

c) Este escoamento não é verificado na atmosfera nenhuma das hipóteses assumidas para se chegar à solução são aplicáveis à atmosfera real: $v \neq 0$, $F_{\text{coriolis}} \neq 0$, existem gradientes de pressão.

3. a) Considerando que θ, u, v, w podem ser escritos como parte média mais perturbação, e assumindo $\bar{g} = \bar{g}$, $\bar{c}_p = \bar{c}_p$ e $\bar{v}_T = \bar{v}_T$ e $\bar{R}_N = \bar{R}_N$, temos:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\theta} + \theta') + (\bar{u} + u') \frac{\partial}{\partial x} (\bar{\theta} + \theta') + (\bar{v} + v') \frac{\partial}{\partial y} (\bar{\theta} + \theta') + (\bar{w} + w') \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\theta} + \theta') =$$

$$\bar{v}_T \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} (\bar{\theta} + \theta') + \frac{\partial^2}{\partial y^2} (\bar{\theta} + \theta') + \frac{\partial^2}{\partial z^2} (\bar{\theta} + \theta') \right] - \frac{1}{\bar{g} \bar{c}_p} \frac{\partial \bar{R}_N}{\partial z}$$

$$\cdot (\bar{u} + u') \frac{\partial}{\partial x} (\bar{\theta} + \theta') = \bar{u} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x} + \bar{u} \cancel{\frac{\partial \theta'}{\partial x}} + \bar{v} \cancel{\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y}} + \bar{v} \frac{\partial \theta'}{\partial y} = \bar{u} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \theta'}{\partial y}$$

O mesmo raciocínio se aplica aos termos $(\bar{v} + v') \frac{\partial}{\partial y} (\bar{\theta} + \theta')$ e

$$(\bar{w} + w') \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\theta} + \theta'). \text{ Então,}$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} + \bar{u}' \frac{\partial \theta'}{\partial x} + \bar{v}' \frac{\partial \theta'}{\partial y} + \bar{w}' \frac{\partial \theta'}{\partial z} =$$

$$\bar{v}_T \left[\frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial z^2} \right] - \frac{1}{\bar{g} \bar{c}_p} \frac{\partial \bar{R}_N}{\partial z}$$

Podemos também unir os termos com derivadas espaciais em ambos os lados da equação:

$$\left[\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} + \bar{u}' \frac{\partial \theta'}{\partial x} + \bar{v}' \frac{\partial \theta'}{\partial y} + \bar{w}' \frac{\partial \theta'}{\partial z} \right] = \frac{\partial}{\partial x} \left(\bar{v}_T \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x} - \bar{u}' \theta' \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\bar{v}_T \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} - \bar{v}' \theta' \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\bar{v}_T \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} - \bar{w}' \theta' \right) - \frac{1}{\bar{g} \bar{c}_p} \frac{\partial \bar{R}_N}{\partial z}$$

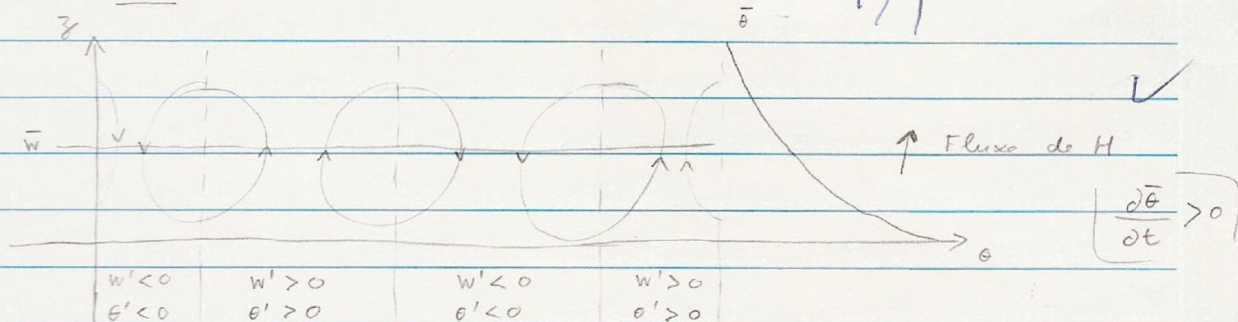
Esta é a equação de conservação de energia térmica, onde $\bar{v}_T \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x}$, $\bar{v}_T \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y}$ e $\bar{v}_T \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z}$ são os termos de

difusão molecular de calor, e $\overline{\theta'v'}$, $\overline{\theta'v'}$ e $\overline{\theta'w'}$ são os termos de difusão turbulenta de calor.

b) Sendo R_H constante com a altura, a CLP horizontalmente homogênea (não há advecção horizontal), considerando apenas processos turbulentos e assumindo $\bar{w} = 0$, a equação derivada no item (a) torna-se:

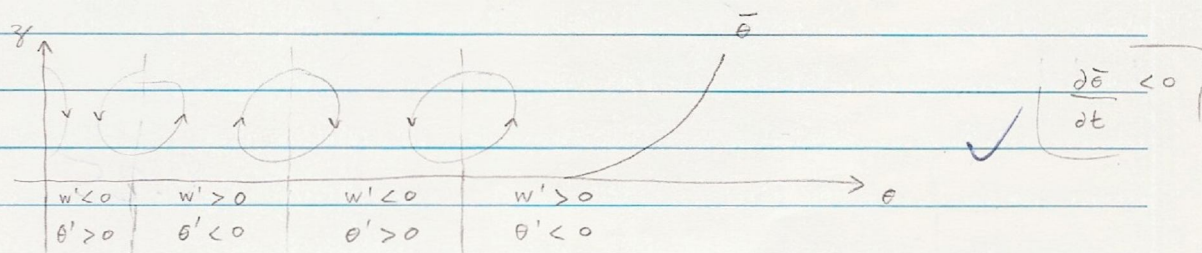
$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} = - \frac{\partial (\overline{\theta'w'})}{\partial z} \quad \text{Por dif. finitas, } \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} = - \frac{(\overline{\theta'w'_L} - \overline{\theta'w'_0})}{\Delta z}$$

• Dia:



$\therefore \overline{w'\theta'} > 0$, ou seja, o fluxo de calor devido à turbulência é orientado para cima.

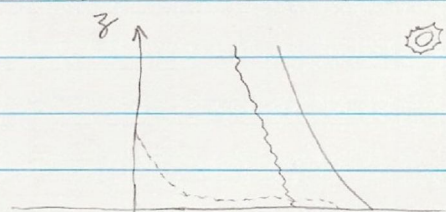
• Noite:



$\therefore \overline{w'\theta'} < 0$. A superfície se resfria rapidamente à noite, resfriando também o ar adjacente. A turbulência

vai, então, atuar no sentido de transferir calor para baixo, tornando o ar acima progressivamente mais frio, intensificando a inversão térmica,

4. a) No período diurno, a geração de turbulência ocorre principalmente por produção térmica, mas a produção mecânica também está presente. A dissipação viscosa é mais intensa nos níveis inferiores da CLP.



— B

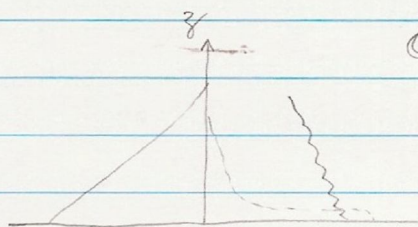
0.5/1

--- S

---- D X

T X

b) No período noturno, B passa a representar dissipação térmica (inversão térmica inibe os vórtices turbulentos), a produção mecânica por cisalhamento do vento torna-se a principal fonte geradora de turbulência e a dissipação viscosa ocorre da mesma maneira que ocorre durante o dia.



— B ✓

0.5/1

--- S ✓

---- D X

T X

1. b)	Cisalhamento	$\frac{q_1 - q_2}{\Delta z}$	Ri	
7,5	0,25	0,135	0,07	0.25
15	0,45	0,17	0,27	
30	1,1	0,61	0,16	
60	1,7	1,16	0,13	
100	0,64	0,535	0,42	1 e 0/0
140	0,51	0,1	0,12	
180	0,53	0,035	$4,1 \cdot 10^{-2}$	

1. a) Curvas de θ , U , V

