O PERFIL DE VELOCIDADE NA CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA SOBRE COLINA EM ATMOSFERA INSTÁVEL

Moreira, L. Q., Pellegrini, C. C., Scola, L. A.
Depto. Ciências Térmicas e dos Fluidos, Univ. Federal de São João del-Rei.
Pça. Frei Orlando 170, centro, São João del-Rei, 36.307-352, MG, pelle@funrei.br.

Palavras-chave: camada limite atmosférica, escoamento sobre colinas, atmosfera instável.

RESUMO

O conhecimento do escoamento atmosférico sobre colinas sempre interessou a meteorologistas, ambientalistas, militares, engenheiros e esportistas, por diversos motivos. Para os engenheiros, a distribuição da quantidade de movimento da Camada Limite Atmosférica ao nível da superfície é essencial na quantificação dos recursos eólicos existentes. Em particular o efeito da topografia como fator ampliador da velocidade do vento é crucial para o desenvolvimento dos estudo dessa fonte renovável de energia pois a potência gerada é proporcional ao cubo da velocidade do vento. Outra aplicação, é em projetos de estruturas preferencialmente colocadas no topo de colinas, como torres de transmissão e antenas, onde a carga devido ao vento é proporcional ao quadrado da velocidade.

O presente trabalho propõe uma solução analítica para o perfil de velocidade média do vento sobre colinas com pequena inclinação, cobertas por vegetação e sob atmosfera fraca ou moderadamente instável. Num recente trabalho, Pellegrini (2001) deduz uma equação para a velocidade em escoamentos deste tipo, a partir do gradiente adimensional de velocidade, obtido no mesmo trabalho, $\Phi_m^c = e^{(z-z_0)/R_h}$, em que z a é coordenada perpendicular às linhas de corrente, R_h é o comprimento de raio da colina (que representa a influencia do formato da colina sobre o escoamento), z_0 é a altura de rugosidade (a altura em que a velocidade média vale zero) e define-se o gradiente adimensional por

$$\Phi_m = (z\kappa/u_*)(\partial\bar{u}/\partial z), \tag{1}$$

em que κ é a constate adimensional de von Karman e u_* é a velocidade de atrito.

O gradiente adimensional de velocidade para a camada limite atmosférica sob atmosfera instável em terreno plano, foi proposto independentemente por Businger (1971) e Dyer (1974) e passou a ser conhecida como uma das Relações de Businger-Dyer:

$$\Phi_m^i = (1 + B_1\, z/L_o)^{B_2}, \tag{2}$$

válida para $-2 < z/L_o < 0$, em que L_o é o comprimento de Obukhov (que representa o grau de não-neutralidade atmosférica) e B_1 e B_2 são constantes empíricas. Seus valores mais aceitos são $B_1 = -19$ e $B_2 = -1/4$, de acordo com Högstrom (1996).

Pellegrini (2001) propôs que se calculasse o gradiente adimensional de velocidade no escoamento sobre o colina, sob atmosfera instável, como o produto do gradiente para atmosfera instável e terreno plano pelo gradiente para uma colina sob atmosfera neutra, isto é,

$$\Phi_m = e^{(z-z_0)/R_h}(1 + B_1\, z/L_o)^{B_2}. \tag{3}$$

É possível obter uma equação para o calculo da velocidade média substituindo-se a Eq. (3) na definição do gradiente adimensional de velocidade e integrando-se. O resultado é

$$\overline{u} = \frac{u_*}{\kappa} \int_{z_0}^{z} \frac{e^{(z-z_0)/R_h}}{z} \left(1 + B_1\, z/L_o\right)^{B_2} dz\,. \tag{4}$$

Na equação (3), o termo exponencial representa a influencia da colina e o termo elevado a B_2, entre parênteses, representa a influencia da instabilidade sobre o escoamento. Diversas tentativas de integração analítica da Eq. (4) foram feitas, sem êxito, inclusive com o uso de pacotes computacionais como o Matlab. Devido ao óbvio interesse existente numa solução analítica pode-se substituir o termo de instabilidade por uma aproximação polinomial e manter o termo de curvatura. A integral passa a ter solução analítica na forma

$$\overline{u} = \frac{u_*}{\kappa} \left\langle d_0 Ei\left(\frac{z}{R_h}\right) + e^{z/R_h} \left\{ d_1 + d_2\left[\left(\frac{z}{R_h}\right) - 1\right] + d_3\left[\left(\frac{z}{R_h}\right)^2 - 2\left(\frac{z}{R_h}\right) + 2\right] + d_4\left[\left(\frac{z}{R_h}\right)^3 - 3\left(\frac{z}{R_h}\right)^2 + 6\left(\frac{z}{R_h}\right) - 6\right]\right\}\right\rangle \tag{5}$$

para um polinômio de quarto grau, isto é,

$$\left(1 + B_1\, z/L_o\right)^{B_2} \approx a_0 + a_1\left(z/L_o\right) + a_2\left(z/L_o\right)^2 + a_3\left(z/L_o\right)^3 + a_4\left(z/L_o\right)^4, \tag{6}$$

em que Ei é a função integral exponencial, de propriedades conhecidas, $d_0 = a_0$, $d_1 = a_1\left(R_h/L_o\right)$, $d_2 = a_2\left(R_h/L_o\right)^2$, $d_3 = a_3\left(R_h/L_o\right)^3$, $d_4 = a_4\left(R_h/L_o\right)^4$, $a_0 = 0{,}9999$, $a_1 = 1{,}948$, $a_2 = 2{,}767$, $a_3 = 1{,}699$, $a_4 = 0{,}3661$.

O ajuste polinomial do gradiente de velocidade aparece na Fig. 1, para polinômios do 3º. 4º. e 5º. graus.

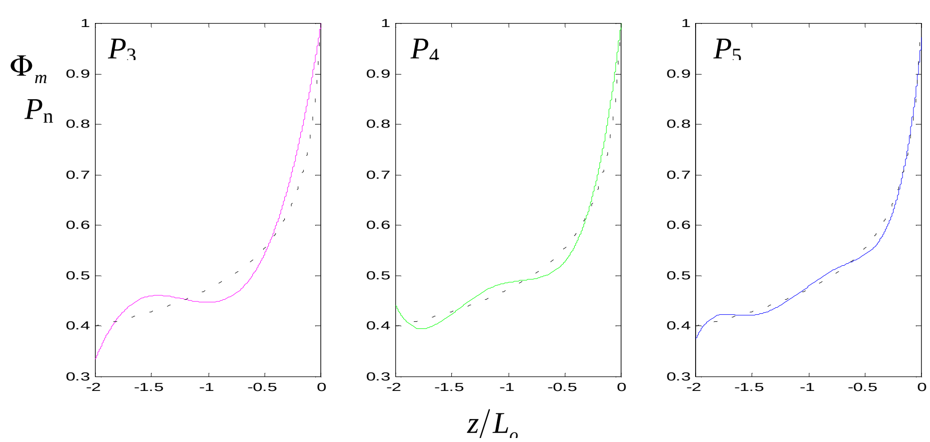

Fig. 1: — Aproximação polinomial do gradiente adimensional de velocidade.

Os resultados da Eq. (5) não podem ser comparados diretamente com o experimento, pois não existem dados disponíveis na literatura na forma adequada. Uma verificação preliminar pode ser feita comparando-a com a solução numérica da Eq. (4). O resultado aparece na Fig. 2. Todos resultados podem ser considerados bons.

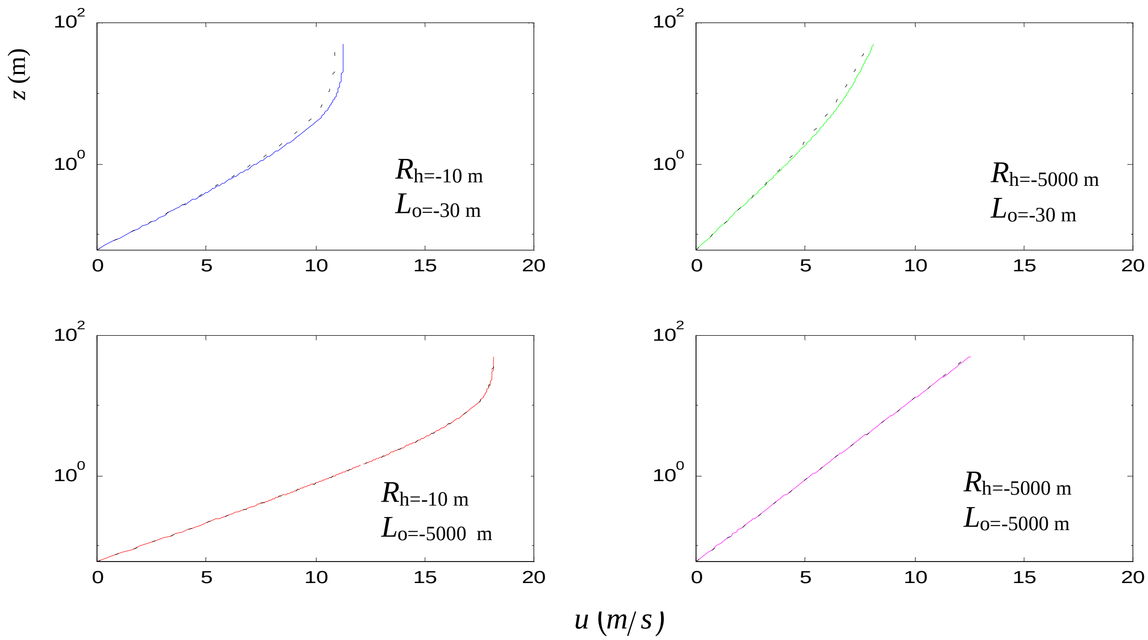

Fig. 2: Variação da velocidade com a altura. Escala mono-log. Eq. (5) ——.
Integral numérica da Eq. (4) - - - - -

A tabela 1 mostra que o polinômio de quarto proposto grau leva à melhor relação custo-beneficio.

Tabela 1- Erro percentual na velocidade para polinômios de diferentes graus, com R_h=-10 m e L_o=-30 m.

z (m)	P_3	P_4	P_5
10	5,31	3,61	2,39
30	5,11	3,40	2,25
50	5,07	3,36	2,21

REFERENCIAS

Businger, J. A.: 1982, 'Equations and concepts', in Nieuwstadt and van Dop (ed.), *Atmospheric turbulence and air pollution modeling*, chapter 1, Reidel, 385 pp.

Dyer, A. J.: 1974, 'A review of flux-profile relations', *Boundary Layer Meteorol.* **7**, 363-372.

Pellegrini, C. C.: 2001, *A modified logarithmic law for the atmospheric boundary layer over vegetated hills under non-neutral atmosphere* (in Portuguese), Ph.D dissertation, Federal University of Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 142 pp.