

Influência da pluma aquecida de uma chaminé no escoamento turbulento: uma abordagem inicial via simulação dos grandes turbilhões

Chimney heated plume influence in the turbulent flow: a first approach by large eddy simulation

Franciano Scremin Puhales, Otávio Costa Acevedo, Luis Gustavo Nogueira Martins, Gervásio Annes Degrazia, Pablo Eli Soares de Oliveira, Vagner Anabor, Felipe Denardin Costa e Douglas Lima de Bem

Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil

Resumo

A Simulação dos Grandes Turbilhões (LES) é uma técnica amplamente empregada para investigar as propriedades de escoamentos turbulentos. No contexto da turbulência atmosférica, esta técnica complementa estudos experimentais, proporcionando uma descrição espacializada do escoamento. No presente trabalho um modelo LES foi aplicado para avaliar a influência da emissão de uma pluma aquecida por uma chaminé, no escoamento turbulento.

Palavras-chave: LES. Camada limite planetária. Pluma aquecida.

Abstract

Large Eddy Simulation (LES) have been employed to investigate turbulent flows. In atmospheric turbulence, this methodology is widely used and, sometimes is complementary to field experiments, leading a more detailed about turbulent flow. In this work a LES model was utilized to describe the influence exerted by a hot plume, emitted for a thermal power-plant in the atmospheric flow in the planetary boundary-layer.

Keywords: LES. Planetary boundary-layer. Warm plume.

1 Introdução

A geração de energia elétrica, seja ela renovável ou não, está sempre atrelada a um impacto ambiental que deve ser mensurado e mitigado. No caso da geração termoelétrica, a partir da queima de combustíveis fósseis, um fator de interesse das concessionárias é a emissão atmosférica associada à combustão e os impactos socio-ambientais causados por essa emissão. Neste sentido, os organismos públicos de controle ambiental exigem que as geradoras executem um constante monitoramento da qualidade do ar nas cercanias da usina. Do ponto de vista físico, o problema de dispersão atmosférica em uma escala espacial de centenas de metros a alguns quilômetros, e escalas de tempo de minutos a algumas horas é uma aplicação direta da fenomenologia de camada limite planetária (CLP) (Wyngaard, 2010).

A CLP pode ser definida como a região da atmosfera, que interage com a superfície, cujo o escoamento é basicamente caracterizado pela presença de turbulência. Tal definição é, geralmente, respeitada quando essa interação é intensa. Quando essa interação é enfraquecida, a influência da superfície não é facilmente identificada e essa definição perde sua aplicabilidade (Businger, 1981).

Em função da complexidade do escoamento turbulento, diferentes técnicas precisam ser combinadas, de forma complementar, para aumentar a compreensão deste sistema físico. Estas técnicas incluem estudos teóricos, campanhas experimentais e modelagem numérica. Uma das metodologias mais empregadas é a simulação dos grandes turbilhões (LES, *Large Eddy Simulation*). Além disso, esta técnica tem se consagrado em estudos de escoamentos geofísicos e aplicações de engenharia em função de sua eficiência ao reproduzir escoamentos turbulentos (Sagaut, 1998) e é, em muitos casos, empregada para substituir dados experimentais ao se validar uma aproximação teórica (Sullivan et al., 1998; Witek et al., 2011).

O objetivo do presente estudo é avaliar a influência da presença de emissões de uma chaminé aquecida em um escoamento turbulento. Tal motivação vem da recente implantação de uma torre micrometeorológica vinculado ao projeto “Sistema de monitoramento, análise e simulação da micrometeorologia e dispersão de contaminantes em uma região costeira”. O trabalho é executado pela Universidade Federal de Santa Maria, com suporte financeiro da Telemétrica Viana SA (TEVISA) e da Linhares Geração SA (LGSA), com código ANEEL PD-6932-0114/2014. As observações mostram um comportamento peculiar das propriedades turbulentas quando o escoamento transporta ar da usina em direção a torre. Tais propriedades são fundamentais para a boa descrição da dispersão de contaminantes na CLP e esta, por sua vez, é uma questão de interesse da empresa que fomenta o projeto, em função das normas de controle ambiental. Neste sentido, este trabalho visa propor uma abordagem inicial deste problema, via LES, investigando a espacialização de um escoamento gerado de forma idealizada.

A simulação dos grandes turbilhões consiste em um modelo de médias de volume, no qual os turbilhões mais energéticos são resolvidos diretamente enquanto os menores são filtrados e tem a sua energia parametrizada por um modelo chamado de subfiltro ou subgrade. A quantidade de turbilhões e, portanto, de energia cinética turbulenta resolvida diretamente, é tão grande quanto for a resolução da grade do modelo (Pope, 2000).

2 Modelo LES de Moeng (1984)

O modelo LES de Moeng (1984) é uma das implementações da simulação dos grandes turbilhões. Basicamente, o modelo resolve o seguinte conjunto de equações prognósticas para o campo de velocidade do escoamento \tilde{u} , \tilde{v} e \tilde{w} :

$$\frac{\partial \tilde{u}}{\partial t} = \tilde{\zeta}_z \tilde{v} - \tilde{\zeta}_y \tilde{w} - \frac{\partial \Pi}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{uu}}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{uv}}{\partial y} - \frac{\partial \tau_{uw}}{\partial z} - f(v_g + \tilde{v}) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \tilde{v}}{\partial t} = \tilde{\zeta}_x \tilde{w} - \tilde{\zeta}_x \tilde{u} - \frac{\partial \Pi}{\partial y} - \frac{\partial \tau_{vu}}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{vv}}{\partial y} - \frac{\partial \tau_{vw}}{\partial z} + f(u_g - \tilde{u}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \tilde{w}}{\partial t} = \tilde{\zeta}_y \tilde{u} - \tilde{\zeta}_x \tilde{v} + \frac{\tilde{\theta}}{\theta_o} g - \frac{\partial \Pi}{\partial z} - \frac{\partial \tau_{wu}}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{wv}}{\partial y} - \frac{\partial \tau_{ww}}{\partial z} - \left\langle \frac{\partial \tilde{w}}{\partial t} \right\rangle \quad (3)$$

O símbolo $\tilde{\cdot}$ denota que as variáveis estão relacionadas com a escala resolvida (escala de grade do modelo). Além do mais, ζ_α é a vorticidade do campo de velocidade do escoamento na direção $x_\alpha = (x, y, z)$, θ é a temperatura potencial, θ_o a temperatura potencial de referência, Π a pressão modificada e u_g e v_g as componentes zonal e meridional, respectivamente, do vento geostrófico. Além do mais, este modelo tem como característica ter velocidade vertical média nula. Tal artifício é garantido pela última parcela do segundo termo da equação (3). Tal artifício é importante para garantir o equilíbrio hidrostático (Deardorff, 1972).

Além das equações prognósticas de movimento, o modelo LES resolve uma equação prognóstica para a temperatura potencial:

$$\frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial t} = -\tilde{u} \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial x} - \tilde{v} \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial y} - \tilde{w} \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial z} - \tilde{w} \frac{\partial \theta_o}{\partial z} - \frac{\partial \tau_{\theta u}}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{\theta v}}{\partial y} - \frac{\partial \tau_{\theta w}}{\partial z} \quad (4)$$

onde τ_{θ_j} representa o fluxo cinemático turbulento de energia na forma de calor sensível de subfiltro.

Os tensores τ_{ij} e $\tau_{\theta j}$ são desconhecidos e devem ser parametrizados pelo modelo LES. A parametrização destes termos é realizada através de um modelo de subgrade ou subfiltro. Nestes termos estão as grandes incertezas do modelo LES, principalmente em regiões próximas a superfície e camada de entranhamento onde os turbilhões menores são dominantes. A parametrização de subfiltro empregada no estudo é aquela proposta por Sullivan et al. (1994).

3 Experimento numérico

O experimento numérico deste trabalho consiste em uma rodada de 3.000 iterações do modelo LES. A grade numérica do modelo tem dimensões espaciais (5000m,5000m,2000m), respectivamente nas coordenadas (x,y,z), discretizadas em (256,256,128) pontos de grade em cada uma das dimensões. O espaçamento de grade é dado por $\Delta\alpha = \frac{L_\alpha}{N_\alpha}$ onde L_α é a extensão espacial da grade na dimensão α e N_α é o número de pontos de grade nessa dimensão. Assim, o espaçamento de grade horizontal do experimento numérico do presente estudo é $\Delta x = \Delta y = 19,5m$ enquanto o espaçamento de grade vertical é $\Delta z = 15,6m$.

A temperatura da superfície foi mantida constante com um valor $T_S = 290,5K$. A condição de contorno inferior utilizada no experimento numérico emprega a teoria de similaridade de Monin-Obukov (Stull, 1988), como descrito por Puhales et al. (2013). A altura da camada limite empregada é $z_i = 500m$ e a espessura da camada de entramento é de $h_e = 200m$.

Para simular a presença de uma chaminé emitindo gases aquecidos uma alteração na equação 4 foi realizada. Como hipótese simplificada, assume-se que a emissão da chaminé é um ponto de aquecimento na grade do modelo. Assim, a 4 foi reescrita como:

$$\frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial t} = \left(\frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial t} \right)_o + S(x,y,z,t) \quad (5)$$

onde o termo entre parenteses é a própria equação 4. Assim, a função $S(x,y,z,t)$ representa um termo de tendência para a temperatura potencial. Tal função é não nula apenas no ponto central da grade, ou seja, quando $x = x_f = \frac{N_x}{2} \Delta x$ e $y = y_f = \frac{N_y}{2} \Delta y$. A dependência com a altura é expressa pela seguinte função:

$$H(z) = H_0 \exp \left[-A (z - z_f)^2 \right] \quad (6)$$

sendo $H_0 = 10K/s$ a divergência de fluxo de calor, $z_f = 125m$ a altura da fonte e $A = 10.000$, a fim de fazer a gaussiana tender a uma função delta de Dirac. Para que a fonte comece a atuar apenas quando a CLP já esta estabelecida, uma dependência temporal foi adicionada a função S . Assim, essa função é dada por:

$$S(x,y,z,t) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \neq x_f \text{ ou } y \neq y_f \\ H(z)F(t) & \text{se } x = x_f \text{ e } y = y_f \end{cases} \quad (7)$$

onde $F(t)$ é uma dada por uma aproximação suavizada para função de Heaviside:

$$F(t) = \frac{1}{1 + 2 \exp[-(t - t_f)]} \quad (8)$$

sendo t_f o instante em que a fonte passa a emitir. Por simplicidade numérica, uma vez que o passo de tempo é variável, o instante foi atribuído a iteração $it = 2000$ ($t_f \approx 50min$) da simulação. A figura 1 mostra o comportamento da dependência vertical $H(z)$ e temporal $F(t)$ da fonte.

As condições iniciais, cinemáticas e termodinâmicas, da simulação são apresentadas na figura 2. A figura 2a mostra os perfis verticais de velocidade inicial das componentes u e v da velocidade do vento. Além disso, a figura mostra os valores das componentes do vento geostrófico do domínio da simulação. A figura 2b mostra o perfil inicial de temperatura potencial. É fácil notar que este perfil é construído de formar similar ao perfil da componente u da velocidade do vento, sendo dividido em três partes. A diferença está no comportamento da temperatura acima da camada de entramento. No interior da camada limite a temperatura potencial apresenta um valor constante de $290K$, na camada de entramento há uma variação de temperatura $\Delta\theta = 8K$, uniformemente distribuídos. Na atmosfera livre, o perfil de temperatura apresenta uma taxa de variação vertical de $3K/km$.

4 Resultados

A figura 3 mostra um plano $x - z$, com um corte vertical em $y = y_f$ da componente vertical do vento w' e da temperatura potencial θ . Nos painéis é possível observar a evolução de uma pluma quente, emitida pela chaminé idealizada, corrente a baixo do escoamento. É possível observar, de forma geral, que a presença de uma fonte de aquecimento produz uma pluma de ar quente que é transportada corrente a baixo do escoamento. Além disso, em função dos gradientes térmicos gerados ocorre a intensificação de correntes ascendentes de descendentes no escoamento. Isto é evidenciado pela presença de valores com maior

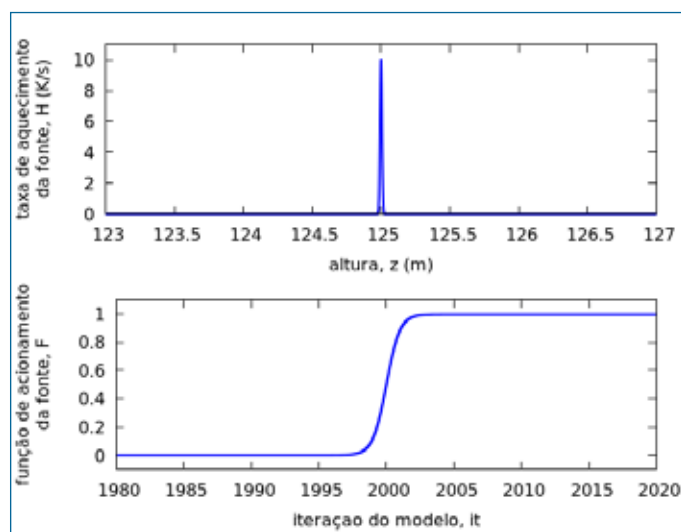
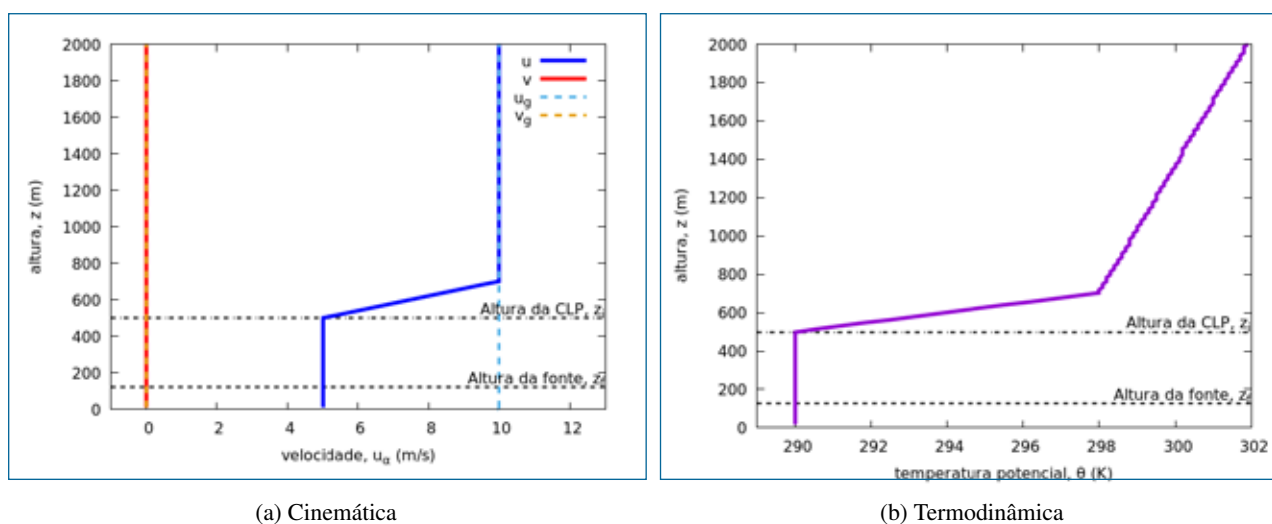


Figura 1: Funções que descrevem o comportamento da fonte utilizada no modelo.



(a) Cinemática

(b) Termodinâmica

Figura 2: Pannel a: Perfil vertical inicial do campo de velocidade do escoamento simulado ($u_i = (u,v,0)$) e forçante de grande escala ($u_{gi} = (u_g, v_g, 0)$). Pannel b: Perfil vertical inicial de temperatura potencial.

magnitude na velocidade vertical. O campo de temperatura mostra a propagação da pluma de forma contínua até aproximadamente 200m da chaminé. Porém, após isso, a intensidade do aquecimento diminui e bolhas de ar quente discretas são transportadas pelo escoamento. É interessante ressaltar que os efeitos da chaminé são observados em alturas significativas, chegando a interagir com o topo da camada limite.

A figura 4 mostra os perfis médios de velocidade vertical e perturbação na temperatura potencial para os passos de tempo entre os quadros 80 e 105 para pontos localizados entre 20 e 200 m da fonte. No gráfico da figura 4a é possível observar o aumento na intensidade das correntes ascendentes devido à presença da fonte aquecida. Ainda, o esta influência se propaga verticalmente enquanto a pluma se afasta da fonte. A pluma também torna mais aquecida regiões afastadas da superfície, como mostra a figura 4b. A propagação vertical também é notada na temperatura, que, assim como a velocidade atinge um máximo de influência a 140 da fonte. A partir disto o efeito da pluma começa a decair, como visto nos perfis a 200 m da fonte emissora.

5 Considerações finais e perspectivas

Este estudo apresenta uma abordagem inicial para avaliação da influência da emissão de uma chaminé no escoamento turbulento. Tal avaliação se torna pertinente, tanto no âmbito científico quando em aplicações diretas para a modelagem da dispersão de contaminantes. Os processos de dispersão são diretamente influenciados pelo escoamento turbulento e, uma melhor descrição deste escoamento leva, conseqüentemente, a melhorias na simulação e previsão de plumas de contaminantes. No contexto do projeto “Sistema de monitoramento, análise e simulação da micrometeorologia e dispersão de contaminantes em uma região

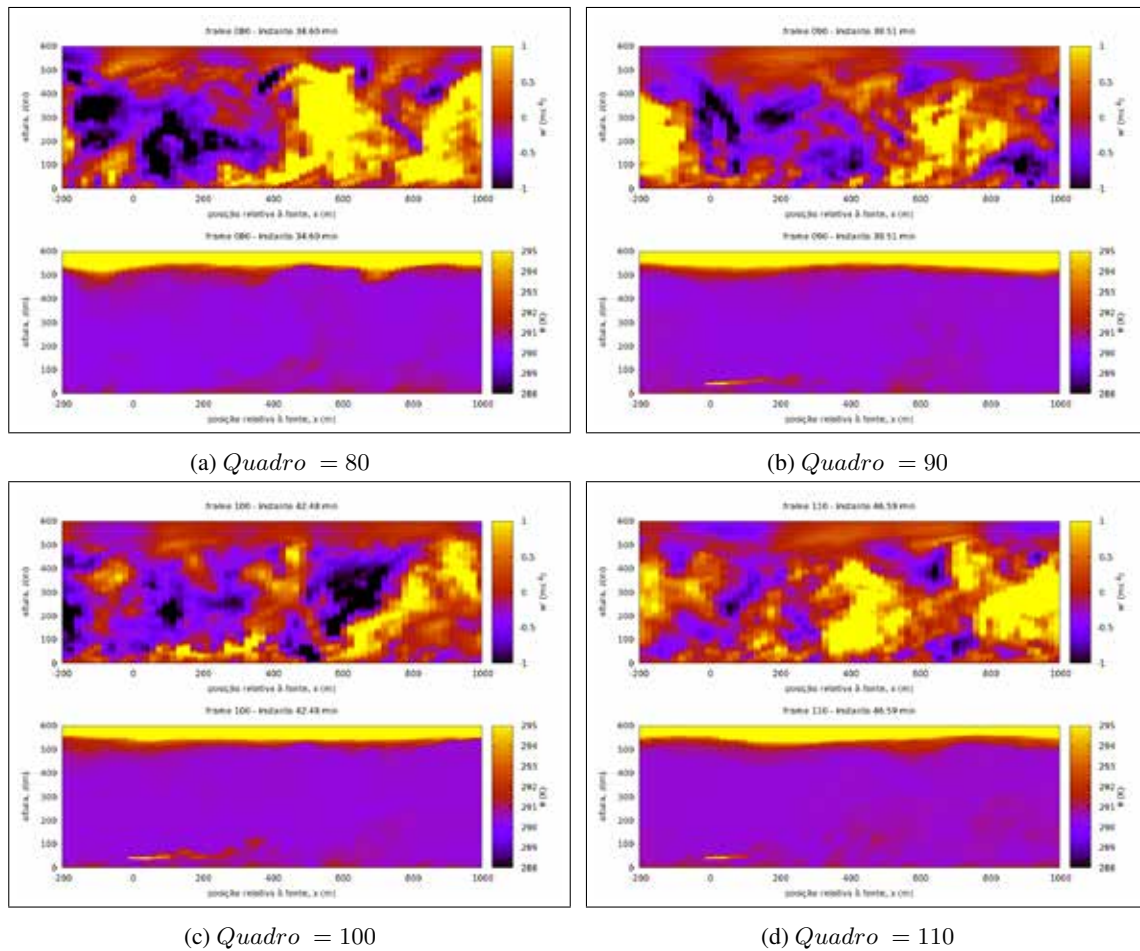


Figura 3: Plano $x - z$ com corte em $y = y_f$ para velocidade vertical (gráfico superior) e temperatura potencial (gráfico inferior) de cada painel, em diferentes quadros e instante associado a esta iteração. Os quadros são gerados a cada 25 iterações do modelo.

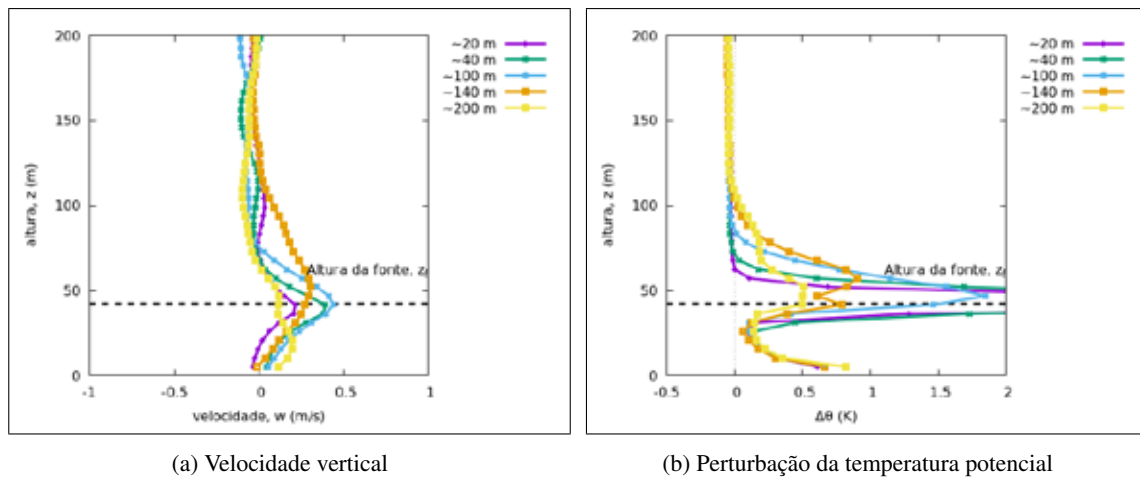


Figura 4: Perfis médios para pontos de grade localizados corrente abaixo do escoamento. A média é tomada para os passos de tempo entre os quadros 80 e 105, apresentados na figura 3.

costeira” os resultados preliminares aqui apresentados são importantes para o planejamento de novos estudos experimentais para observação da dispersão de contaminantes, quando as condições do ambiente são afetadas pela própria presença da fonte.

A partir dos resultados de Simulação dos Grandes Turbilhões (LES) mostrou-se que a influência da pluma aquecida por uma chaminé pode-se ser observada a uma distância de centenas de metros da fonte emissora. Ainda, tal influência afeta os níveis superiores da Camada Limite Planetária (CLP). Tal influência pode ser ainda maior em condições estáveis, quando a

turbulência é suprimida pela estratificação térmica. Cabe ressaltar que os resultados apresentados tem um caráter mais qualitativo que quantitativo, uma vez que as condições empregadas na simulação são idealizadas e, para representar conduções mais realistas, necessitam de ajustes.

Em função dos resultados obtidos neste estudo pretende-se aprimorar o *set-up* da simulação, tornando-a mais realista. Este passo é fundamental para que os resultados simulados possam ser comparados com aqueles obtidos pela campanha experimental do projeto. Uma vez que as simulações tenham sucesso em reproduzir os resultados experimentais, tais simulações podem explicar melhor a espacialização da pluma e os efeitos no escoamento, uma vez que as observações são limitadas a apenas uma coluna vertical, dada pela torre micrometeorológica.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Direção da TEVISA e da LGSA por oferecer o suporte financeiro e técnico ao projeto.

Referências

- Businger, J. A. (1981). Equations and concepts. Em: Nieuwstadt, F., Dop, H. V. (Eds) *Atmospheric turbulence and air pollution modeling*, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Cap. 1, pp. 1–36.
- Deardorff, J. W. (1972). Numerical investigation of neutral and unstable planetary boundary layers. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 29(1), 91–115.
- Moeng, C. H. (1984). A large-eddy-simulation model for the study of planetary boundary layer turbulence. *Journal of Atmospheric Science*, 41(13), 2052–2062.
- Pope, S. B. (2000). *Turbulent flows*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Puhales, F. S., Rizza, U., Degrazia, G. A., Acevedo, O. C. (2013). A simple parameterization for the turbulent kinetic energy transport terms in the convective boundary layer derived from large eddy simulation. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 392(4), 583–595.
- Sagaut, P. (1998). *Large eddy simulation for incompressible flows*, 3^o edn. Springer, Berlin.
- Stull, R. (1988). *An introduction to boundary layer meteorology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Sullivan, P. P., McWilliams, J. C., Moeng, C. H. (1994). A subgrid-scale model for large-eddy simulations of planetary boundary-layer flows. *Boundary Layer Meteorology*, 71(3), 247–276.
- Sullivan, P. P., Moeng, C. H., Stevens, B., Lenschow, D. H., Mayor, S. D. (1998). Structure of the entrainment zone capping the convective atmospheric boundary layer. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 55(19), 3042–3064.
- Witek, M. L., Teixeira, J., Matheou, G. (2011). An eddy diffusivity-mass flux approach to the vertical transport of turbulent kinetic energy in convective boundary layers. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 68(10), 2385–2394.
- Wyngaard, J. C. (2010). *Turbulence in the atmosphere*. Cambridge University Press, Cambridge.

Franciano Scremin Puhales

Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil
E-mail: fpuhales@gmail.com

Otávio Costa Acevedo

Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil
E-mail: otavio@ufsm.br

Luis Gustavo Nogueira Martins

Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil
E-mail: lgsm@gmail.com

Gervásio Annes Degrazia

Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil
E-mail: gervasio.degrazia@gmail.com

Pablo Eli Soares de Oliveira

Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil
E-mail: pablo.deoliveira@gmail.com

Vagner Anabor

Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil
E-mail: vanabor@gmail.com

Felipe Denardin Costa

Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil
E-mail: denardin@gmail.com

Douglas Lima de Bem

Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil
E-mail: douglaslima523@gmail.com