

APLICAÇÃO DO MÉTODO DE SALESKY *ET AL.* (2012) USANDO UM FILTRO TEMPORAL PARA ESTIMAR O ERRO DO FLUXO DE CALOR SENSÍVEL EM TIJUCAS DO SUL – PR E EM MISSAL – PR

Bianca Luhm Crivellaro¹, Nelson Luís Dias^{1,2}

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, UFPR;

² Departamento de Engenharia Ambiental, UFPR;

RESUMO

O Método de Covariâncias Turbulentas é o mais usado para o cálculo de fluxos turbulentos; contudo, esse método pode possuir contribuições de vários tipos de erros. Levando em consideração o erro aleatório, Salesky *et al.* (2012) desenvolveram um método de filtragem para calcular o erro aleatório de momentos turbulentos de qualquer ordem. Neste trabalho, aplicamos este método, usando um filtro temporal para calcular o erro do fluxo de calor sensível. O valor médio encontrado para o erro foi de aproximadamente 7%.

ABSTRACT

The eddy covariance method is the most used approach to calculate turbulent fluxes; however, this method can include contributions from several types of errors. Considering the random errors, Salesky *et al.* (2012) developed a filtering method to estimate the random error of turbulent moments of any order. In this paper, we apply this method, using a temporal filter, to calculate the error of the sensible heat flux. The mean value of the error among all runs analyzed was approximately 7%.

INTRODUÇÃO

A ferramenta mais utilizada para a medição de fluxos turbulentos é o Método de Covariâncias Turbulentas (MCT). Esse método consiste em medições simultâneas em alta frequência da velocidade vertical do vento e do escalar cujo fluxo se deseja medir. Segundo Salesky *et al.* (2012), as medições de fluxo pelo MCT podem possuir contribuições de vários tipos de erros, incluindo erros sistemáticos, erros devido à não estacionariedade das séries temporais, e erros aleatórios. O erro aleatório é definido como o erro devido a um período médio insuficiente para que a média no tempo convirja para a média probabilística. Esse tipo de erro pode ser uma fonte significativa de erro para os estudos de turbulência na camada limite atmosférica para escalas temporais pequenas.

Considerando somente o erro aleatório, Salesky *et al.* (2012) desenvolveram um método de filtragem para estimar o erro aleatório de momentos turbulentos de qualquer ordem através da decomposição espacial local dos fluxos turbulentos baseada em propriedades de filtros espaciais. Esse método, *a priori*, não precisa de uma estimativa da escala integral, a qual pode ser altamente sensível para o método utilizado e produzir incertezas na estimativa do erro. O método desenvolvido é baseado diretamente em calcular a variância do erro do fluxo local como uma função da escala Δ e extrapolar para estimar a variância do erro para o período T .

Levando em consideração essas questões, este trabalho tem como objetivo aplicar o método de filtragem de Salesky *et al.* (2012), usando um filtro temporal, para estimar o erro do fluxo de calor sensível a partir de dados obtidos em Tijucas do Sul – PR e em Missal – PR.

FORMULAÇÃO DO MÉTODO

Seja f um processo estocástico com média probabilística $\langle f \rangle$ e variância $\langle f'^2 \rangle = \langle [f - \langle f \rangle]^2 \rangle$, Lumley e Panofksy (1964) definem o erro aleatório em função da variância do erro para um período médio T como

$$\sigma_{\bar{f}}^2(T) = \left\langle \left[\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) dt - \langle f \rangle \right]^2 \right\rangle = \langle [\bar{f} - \langle f \rangle]^2 \rangle. \quad (1)$$

Supondo que f é estacionário, que a escala integral existe, e considerando as propriedades simétricas das funções de autocorrelação, Lumley e Panofksy (1964) encontraram que a variância do erro pode ser expressa por

$$\sigma_{\bar{f}}^2(T) = \frac{2T_f \langle f'^2 \rangle}{T}, \quad (2)$$

onde T_f é a escala integral temporal de f , que por definição é dada por

$$T_f \equiv \int_0^\infty \rho(\tau) d\tau, \quad (3)$$

onde $\rho(\tau)$ é a função de autocorrelação de f .

Aplicando a equação (1) para um dado filtro temporal de largura Δ , obtemos

$$\sigma_{\bar{f}}^2(\Delta) = \left\langle \left[\frac{1}{\Delta} \int_{t_0}^{t_0+\Delta} f(t) dt - \langle f \rangle \right]^2 \right\rangle = \langle [\bar{f} - \langle f \rangle]^2 \rangle. \quad (4)$$

Agora mostraremos como Lumley e Panofksy (1964) chegaram até a equação (2), porém para a escala Δ . Realizando manipulações algébricas em (4), temos

$$\sigma_{\bar{f}}^2(\Delta) = \frac{1}{\Delta^2} \int_{t=0}^{\Delta} \int_{\tau=0}^{\Delta} \langle [f(t) - \langle f \rangle][f(\tau) - \langle f \rangle] \rangle d\tau dt = \frac{1}{\Delta^2} \int_{t=0}^{\Delta} \int_{\tau=0}^{\Delta} \langle f'^2 \rangle \rho(\tau - t) d\tau dt. \quad (5)$$

Fazendo a seguinte mudança de variáveis $x = t$ e $y = \tau - t$, invertendo a ordem de integração e resolvendo a integral em x , chegamos à seguinte equação:

$$\sigma_{\bar{f}}^2(\Delta) = \frac{\langle f'^2 \rangle}{\Delta^2} \left(\int_{y=-\Delta}^0 \int_{x=0}^{-y} \rho(y) dx dy + \int_{y=0}^{\Delta} \int_{x=0}^{\Delta-y} \rho(y) dx dy \right) = \frac{2\langle f'^2 \rangle}{\Delta} \int_{y=0}^{\Delta} \left(1 - \frac{y}{\Delta}\right) \rho(y) dy. \quad (6)$$

Segundo Tennekes e Lumley (1972) se o tempo de integração Δ é muito maior que a escala integral T_f , $y/\Delta \sim 0$ no intervalo de valores de y onde $\rho(y) \neq 0$, então usando a definição da escala integral, equação (3), a variância do erro pode ser aproximada por

$$\sigma_{\bar{f}}^2(\Delta) = \frac{2T_f \langle f'^2 \rangle}{\Delta}. \quad (7)$$

DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO

Agora, desenvolveremos o método para estimar o erro aleatório do fluxo de calor sensível $f = w'\theta'$. Tirando a raiz quadrada e supondo ergodicidade podemos reescrever (4) e (7) usando a média temporal:

$$\sigma_{\overline{w'\theta'}}(\Delta) = \sqrt{[\overline{w'\theta'} - \overline{w'\theta'}]^2}, \quad (8)$$

$$\sigma_{\overline{w'\theta'}}(\Delta) = \sqrt{2T_f} [\overline{(w'\theta' - \overline{w'\theta'})^2}]^{1/2} \Delta^{-1/2} = C_{w\theta} \Delta^{-1/2}, \quad (9)$$

onde $C_{w\theta}$ é uma constante.

Para estimar o erro do fluxo de calor sensível, é necessário ajustar $\overline{w'\theta'}$, calculado por (8), na forma da lei de potência dada por (9), onde $C_{w\theta}$ é o coeficiente a ser determinado pelo método dos mínimos quadrados. Salesky *et al.* (2012) verificaram que os limites para fazer o ajuste da lei de potência são $\Delta_{min} = 10T_f$ e $\Delta_{max} = T/10$, sendo que a escala de integral será aproximada por $T_f \sim z/\bar{u}$ onde \bar{u} é a velocidade horizontal média, z é a altura de medição e T é o período de análise, neste trabalho $T = 30$ minutos. Finalmente, o erro aleatório é estimado avaliando o ajuste da lei de potência (9) para $\Delta = T$ e normalizando pelo valor médio do fluxo:

$$\epsilon_{w\theta} = \frac{\sigma_{\overline{w'\theta'}}(T)}{\overline{w'\theta'}}. \quad (10)$$

MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados analisados neste trabalho são provenientes de duas campanhas micrometeorológicas, uma realizada em uma grameira em Tijucas do Sul – Paraná no período de 17/02/2011 até 27/02/2011 que possui 102 arquivos de 30 minutos e outra realizada em uma pequena ilha localizada no lago do reservatório de Itaipu nas proximidades da cidade de Missal – Paraná de 13/12/2012 até 17/12/2012 que possui 196 arquivos de 30 minutos. A aquisição dos dados nas duas campanhas foi realizada a 20 Hz. Os dados necessários para calcular o fluxo de calor sensível (velocidade do vento e temperatura) foram obtidos a partir de um anemômetro sônico tridimensional CSAT3 e de um termopar de fio fino FW3, posicionado no centro dos transdutores do CSAT3, ambos da *Campbell Scientific*. Antes de aplicar o método de filtragem foi realizado o controle de qualidade nos dados, a rotação de coordenadas e por fim o cálculo das flutuações de acordo com a decomposição de Reynolds.

RESULTADOS

As Figuras 1 e 2 apresentam o desvio padrão do fluxo de calor sensível calculado pelos dados (linha preta) e ajustado aos dados por $\sigma_{\overline{w'\theta'}}(\Delta) = C_{w\theta} \Delta^{-1/2}$ no intervalo de $\Delta_{min} = 10T_f$ e $\Delta_{max} = T/10$ (linha pontilhada) respectivamente para Tijucas do Sul e Missal. Pela equação (10), temos que o desvio padrão do fluxo de calor sensível extrapolado para o período T (ponto preto), normalizado pelo fluxo médio resulta no erro $\epsilon_{w\theta}$. Para a Figura 1^a, temos que $\epsilon_{w\theta} \sim 6\%$, para Figura 1b $\epsilon_{w\theta} \sim 7\%$ e para as Figuras 2a e 2b $\epsilon_{w\theta} \sim 8\%$.

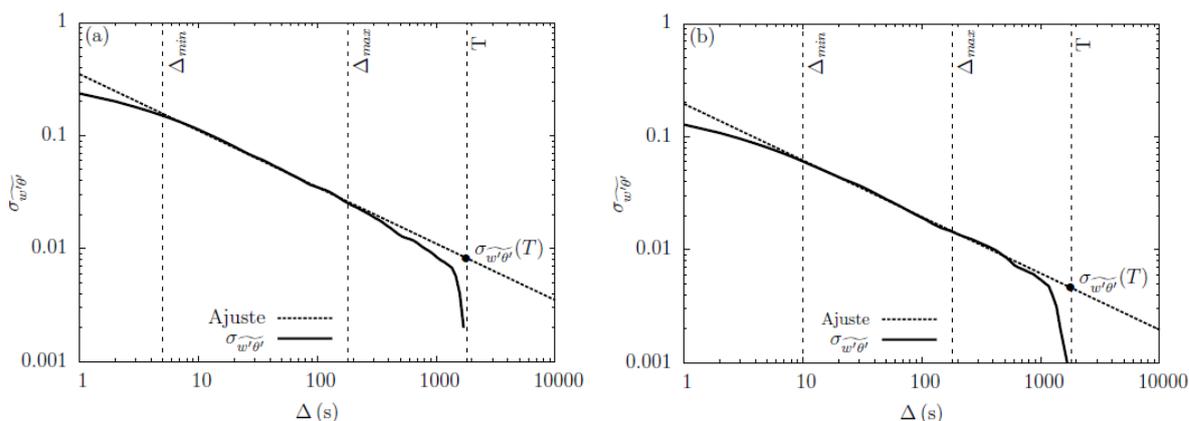


Figura 1. Desvio padrão do fluxo em Tijucas do Sul. (a) 19/02/2011 – 16:00. (b) 21/02/2011 – 12:10.

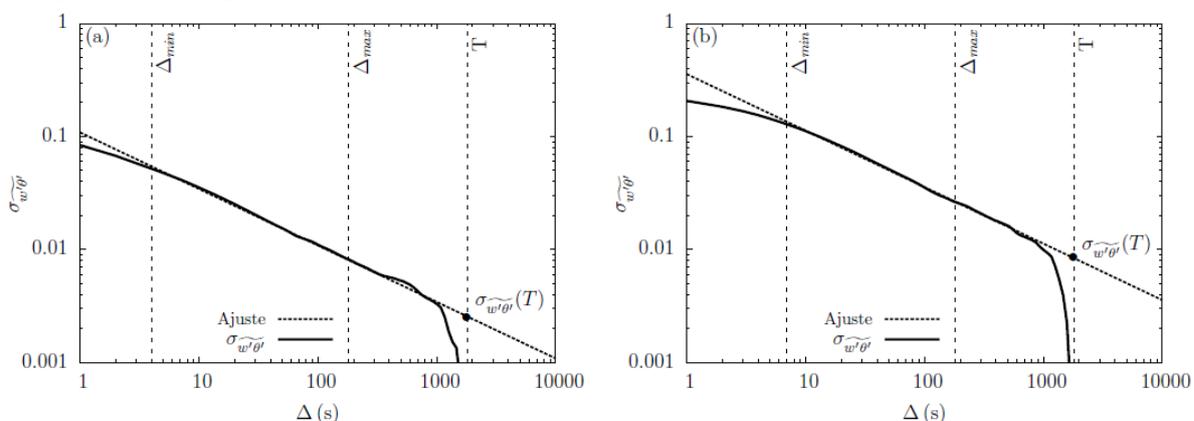


Figura 2. Desvio padrão do fluxo em Missal (a) 16/12/2012 – 10:00. (b) 16/02/2012 – 16:00.

Analisando os gráficos gerados após o método de filtragem, verificou-se que poucos deles decaem segundo a lei de potência $-1/2$. Para analisar qual a real lei de potência fizemos o seguinte ajuste $\sigma_{w'\theta'}(\Delta) = C_{w\theta}\Delta^a$. A Figura 3 mostra um histograma com o resultado encontrado para o ajuste de a . Analisando a figura é possível verificar que, para ambas as situações, a maioria dos casos está no intervalo de -0.3 a -0.5 .

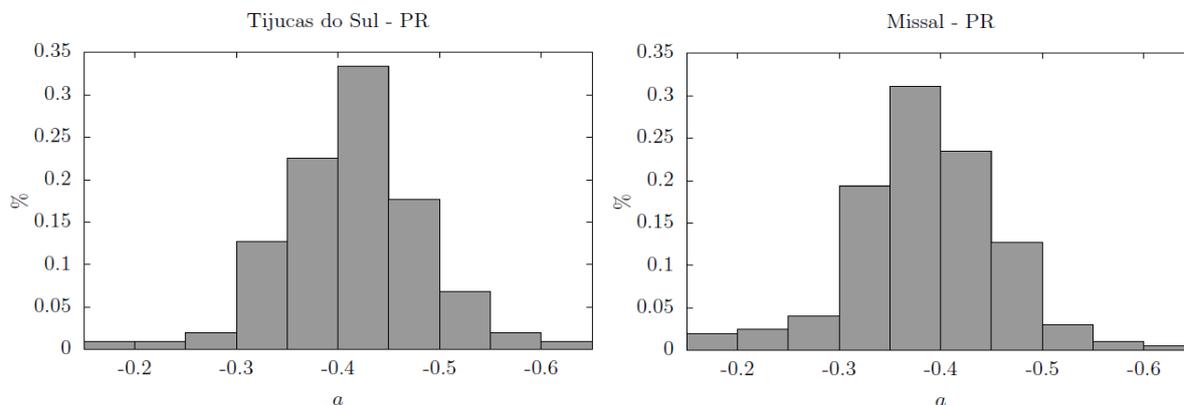


Figura 3. Histograma com os valores de a , resultantes do ajuste de $\sigma_{w'\theta'}(\Delta) = C_{w\theta}\Delta^a$.

CONCLUSÃO

Neste trabalho, aplicamos o método proposto por Salesky *et al.* (2012) para estimar o erro aleatório do fluxo de calor sensível, porém ao invés de usar um filtro espectral, usou-se um filtro temporal. Pelos resultados apresentados nas Figuras 1 e 2, verificamos que o filtro temporal também é aplicável a este método. O valor encontrado para o erro do fluxo de calor sensível foi aproximadamente de 7%.

Conforme mostram os histogramas da Figura 3, a maioria dos casos segue a lei de potência no intervalo de -0.3 a -0.5 , o que difere da previsão teórica, equação (9). Salesky *et al.* (2012) comentam que o decaimento previsto pela teoria são casos ideais e que na prática se ajustarmos $\overline{\sigma_{w\theta}}(\Delta) = C_{w\theta}\Delta^a$, nem sempre se obtém $a = -1/2$. Eles acreditam que estas diferenças são devido a não-estacionariedade nas séries temporais.

AGRADECIMENTOS

Parte deste trabalho foi realizada com recursos do projeto FUNPAR 2882 financiado pela Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF), da Chamada ANEEL 009/2008, Projeto Estratégico “Monitoramento das Emissões de Gases de Efeito Estufa em Reservatórios de Usinas Hidrelétricas”, do Fundo Setorial de Energia Elétrica.

REFERÊNCIAS

LUMLEY, J. L.; PANOFKSY, H. A. **The structure of atmospheric turbulence**. New York: Interscience, 1964.

SALESKY, S. T.; CHAMECKI, M.; DIAS, N. L. Estimating the random error in eddy-covariance based fluxes and other turbulence statistics: the filtering method. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 144, p. 113–135, 2012.

TENNEKES, H.; LUMLEY, J. L. **A first course in turbulence**. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 1972