

MODELO DA ENTROPIA GENERALIZADA APLICADA AOS SINAIS TURBULENTOS MEDIDOS NA CAMADA LIMITE SUPERFICIAL DO PANTANAL

Maurício José Alves Bolzan*, Leonardo Deane de Abreu Sá, Fernando Manoel Ramos,
Camilo Rodrigues Neto, Reinaldo Roberto Rosa
DCM - LAC / INPE, São José dos Campos, São Paulo, Brazil.

ABSTRACT

We present a statistical model for the distribution of increments of the turbulent wind velocity measured in the Pantanal atmospheric surface layer, on a micrometeorological tower, during the IPE-2 (Integrated Pantanal Experiment) dry season campaign. The data were measured by 3D Campbell sonic anemometer located at a height of 24 m, at a sampling rate of 60 Hz. The goal of this investigation is to detect nonextensivity property of the turbulent field in such a peculiar environment. To do this we calculate the probability density function (PDF) for wind velocity differences $V_r(x) = V(x) - V(x+r)$ at different increments r . The preliminary results show some evidence that the nonextensive thermostatistics modelling proposed by Tsallis (1988) provides a new and simple framework for explaining the statistical behavior of inertial subrange fully developed turbulence. Some physical discussions are proposed to explain our results.

RESUMO

Será apresentado um modelo estatístico para as distribuições dos incrementos da velocidade do vento dos dados turbulentos medidos na camada limite superficial sobre a região do Pantanal, em uma torre micrometeorológica durante a campanha seca do IPE-2 (Experimento Integrado do Pantanal). Os dados foram medidos por um anemômetro sônico 3D Campbell colocado a uma altura de 24m, amostrados a 60 Hz. A meta deste trabalho foi investigar as propriedades não extensivas do campo turbulento em um ambiente peculiar. Para isto, foram calculados as funções de densidade de probabilidade (PDFs) para diferenças da velocidade do vento $V_r(x) = V(x) - V(x+r)$ obtidas para diferentes incrementos r . Resultados preliminares mostram alguma evidência de que o modelo termoestatístico não extensivo proposto por Tsallis (1988) constitui um novo instrumento para explicar o comportamento estatístico da turbulência desenvolvida no subdomínio inercial. Algumas discussões físicas são propostas para explicar os resultados.

INTRODUÇÃO

A turbulência constitui fenômeno extremamente importante nos estudos de processos de transporte em escoamentos apresentando número de Reynolds elevados, como é o caso mais frequente na camada limite superficial da atmosfera (Monin e Yaglom, 1971; Tennekes e Lumley, 1972).

Alguns avanços significativos já foram obtidos na descrição de muitas características estatísticas dos processos turbulentos (Frisch, 1995; Sreenivasan e Antonia, 1997). Uma componente importante deles está contida nas hipóteses formuladas por Kolmogorov em 1941 (K-41): Monin e Yaglom, (1971) e em 1962 (K-62) : Kolmogorov, (1962), as quais, embora tenham conseguido explicar muitos aspectos fenomenológicos das características espectrais da turbulência desenvolvida falham em oferecer sólida base teórica para explicar algumas das manifestações da turbulência de pequena escala tais como a distribuição da taxa de dissipação de energia cinética turbulenta, ϵ , e o fenômeno da intermitência (Kraichnan, 1974; Lumley, 1992; Nelkin, 1992; Katul et al., 1994).

Uma das abordagens para estudar as leis estatísticas da turbulência na escala pequena é constituída pelas análises de funções de densidade de probabilidade (PDFs) das distribuições de diferenças entre grandezas turbulentas separadas por uma distância r , tais como a componente longitudinal da velocidade do vento, u , componente vertical da velocidade do vento, w , e temperatura, T , (Antonia et al. 1984; Yakhot, 1989; Kraichnan, 1990; Castaing et al. 1990; Katul et al. 1994; Chu et al., 1996). Estes estudos possibilitaram que se tenha uma melhor compreensão do papel desempenhado pelo fenômeno intermitente na pequena escala, oferecendo alguma explicação física sobre diferenças existentes entre as flutuações nos campos de escalares e aquelas nos campos de velocidade do vento.

E-Mail do Autor: mauricio@met.inpe.br, bolsista da CAPES

As PDFs são calculadas através da estatística das diferenças de velocidades $v_r(\mathbf{x}) = v(\mathbf{x}) - v(\mathbf{x} + \mathbf{r})$ (ou outras grandezas turbulentas) para diferentes incrementos r . Como em muitos sistemas físicos que dependem da evolução dinâmica de um grande número de subsistemas acoplados não linearmente, a cascata de energia turbulenta gera um comportamento de escala espacial (lei de potência em r) dos momentos $\langle v_r^n \rangle$ da função de densidade de probabilidade (PDF) de v_r (Nelkin, 1992). Para grandes valores do número de Reynolds em que ocorre a chamada turbulência desenvolvida, há uma enorme separação entre a escala de produção de energia cinética turbulenta (escala integral L) e a escala de dissipação da mesma (escala de Kolmogorov η) (Tennekes e Lumley, 1972). Nas grandes escalas as PDFs são normalmente distribuídas, mas em escalas muito menores do que a escala integral, são fortemente não Gaussianas (Kevlahan e Vassilikos, 1994). Isto é uma importante característica do fenômeno intermitente. Embora numerosos autores tenham procurado determinar a distribuição que melhor se ajusta às PDFs (Sinai e Yakhot, 1989; Castaing et al., 1990; Kraichnan, 1990; Frisch, 1995; Sreenivasan e Antonia, 1997), ainda há muita divergência com relação à função de melhor ajuste de um modo geral (Castaing et al., 1990; Chu et al., 1996) e à função de melhor ajuste para a PDF de temperatura, em particular (Antonia et al., 1984; Balachandar e Sirovich, 1991; Jaber et al., 1996).

Neste trabalho, será apresentado um estudo comparativo de modelagem estatística para a turbulência desenvolvida baseado na termodinâmica não extensiva proposta por Tsallis (Tsallis, 1988). Os dados utilizados foram medidos na região do Pantanal, no Mato Grosso do Sul, durante a estação seca, quando da realização da campanha IPE-2 em setembro de 1999. Foram investigadas PDFs para as variáveis w e u .

TEORIA

Baseado nas propriedades dos processos multifractais, Tsallis (1988) propôs uma generalização da termoestatística de Boltzmann-Gibbs introduzindo uma família de funções de entropia generalizada $S_q[p]$ com um parâmetro simples, q . Estas funções se reduzem à forma clássica, a forma extensiva de Boltzmann-Gibbs, para $q \rightarrow 1$.

Otimizando $S_q[p]$, sujeito a apropriadas restrições (Tsallis et al, 1995), obtém-se a distribuição:

$$p_q(x) = [1 - \beta(1 - q)x^2]^{1/(1-q)} / Z_q. \quad (1)$$

A função de partição, para $1 < q < 3$, é dada por

$$Z_q \equiv \left[\frac{\beta(q-1)}{\pi} \right]^{1/2} \frac{\Gamma(1/(q-1))}{\Gamma((3-q)/2(q-1))}$$

No limite de $q \rightarrow 1$, tem-se a distribuição Gaussiana. Ramos et al. (1999) mostraram que no contexto da turbulência plenamente desenvolvida ($x \equiv v_r$) a equação (1) fornece um modelo simples e preciso para o problema da PDF. A partir da equação (1), pode-se obter o segundo momento

$$\langle v_r^2 \rangle = \frac{1}{\beta(5 - 3q)}, \quad (2)$$

e o coeficiente de achatamento (“curtose”)

$$K_r = \frac{3(5 - 3q)}{(7 - 5q)} \quad (3)$$

DADOS EXPERIMENTAIS

O modelo estatístico da turbulência citado acima foi testado com dados obtidos durante a campanha micrometeorológica denominada IPE-2 (Integrated Pantanal Experiment). O experimento realizou-se em setembro de 1999, na estação seca. As medidas foram efetuadas numa torre micrometeorológica em uma única altura, 24 metros. A medida do vento foi efetuada com anemômetros sônicos tridimensionais CSA-T3 (Campbell Scientific Inc) e a temperatura com termômetro CA27 (Campbell Scientific Inc). Todos os dados utilizados neste estudo foram amostrados a uma frequência de 60 Hz

O sítio experimental caracterizou-se pela existência de condições de pista (fetch) bastante peculiares as quais dependeram consideravelmente da direção do vento dominante, o que pode influenciar as características aerodinâmicas do escoamento. Ao sul da torre encontram-se um extenso cinturão de mata ciliar e paradisais, distantes aproximadamente 500m daquela. Ao norte e a oeste a vegetação apresenta arbustos e árvores de médio porte esporádicos (de 8m de altura média), situados em região com extensas áreas de gramíneas. A leste as gramíneas são predominantes (campos limpos).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para este trabalho, foram utilizados dados da componente vertical (w) e longitudinal (u) da velocidade do vento. Foram calculadas as PDFs das diferenças de velocidade longitudinal e vertical, $\Delta u_r = u(x) - u(x+r)$, entre duas localizações na série temporal, x e $x+r$, onde r é dado por $r = \bar{U} \Delta t$, sendo $\Delta t = 0.2, 2, 20, 200$ s e \bar{U} , a velocidade média do escoamento. Assumiu-se a validade da Hipótese de Taylor sobre a turbulência congelada (Gledzer, 1997), a qual, apesar de algumas vezes contestada (Kaimal et al., 1972; Srenivasan e Antonia, 1997), possivelmente é válida para as flutuações das grandezas micrometeorológicas no subdomínio inercial da turbulência desenvolvida (Katul et al. 1994).

Foram obtidas as PDFs, normalizadas pelas suas respectivas variâncias, e também as propriedades estatísticas relevantes dos momentos de terceira e quarta ordem de variáveis turbulentas no subdomínio inercial (coeficiente de assimetria e achatamento) de cada PDF (tabelas 1 e 2). A partir das equações (1)-(3), e usando o coeficiente de achatamento, foi determinada a distribuição de Tsallis correspondente para cada incremento. Neste regime, observa-se uma boa concordância entre os resultados experimentais e o modelo para as componentes u e w , exceto para intervalos de tempo elevados ($\Delta t = 200s$), que apresenta um comportamento bi-modal. Resultados similares a estes para a PDF da componente vertical com bimodalidade foram discutidos por Baerentsen e Berkowics (1984) os quais atribuem este padrão anômalo a dois tipos de movimentos organizados: i) células convectivas positivas (updrafts) e; ii) regiões de subsidência local negativa (downdrafts). Além disso, este incremento é maior do que as escalas associadas ao subdomínio inercial (Henjes, 1998), razão pela qual não se espera que o modelo de Tsallis seja válido aí: ele foi formulado para valer nas escalas correspondentes ao subdomínio inercial ou naquelas associadas à dissipação. Katul et al. (1994), também analisaram a influência da intermitência e de eventos locais contendo energia sobre o espectro turbulento e mostraram que estes efeitos podem ser responsáveis pela não Gaussianidade verificada nas distribuições das variáveis meteorológicas no subdomínio inercial do espectro turbulento.

| | | $\Delta t = 0.2$ s | $\Delta t = 2$ s | $\Delta t = 20$ s | $\Delta t = 200$ s |
|--------------|----------|--------------------|------------------|-------------------|--------------------|
| Componente u | SKEWNESS | 0.1393 | 0.2322 | 0.6311 | -0.2738 |
| Componente u | KURTOSIS | 8.1732 | 5.4531 | 4.9527 | 3.2200 |
| Componente w | SKEWNESS | -0.1731 | 0.0559 | 0.1741 | -0.0238 |
| Componente w | KURTOSIS | 9.0615 | 5.2370 | 3.7852 | 3.9070 |

Tabela 1: Valores das propriedades estatísticas de u e w para cada escala, para as 14:22 horas.

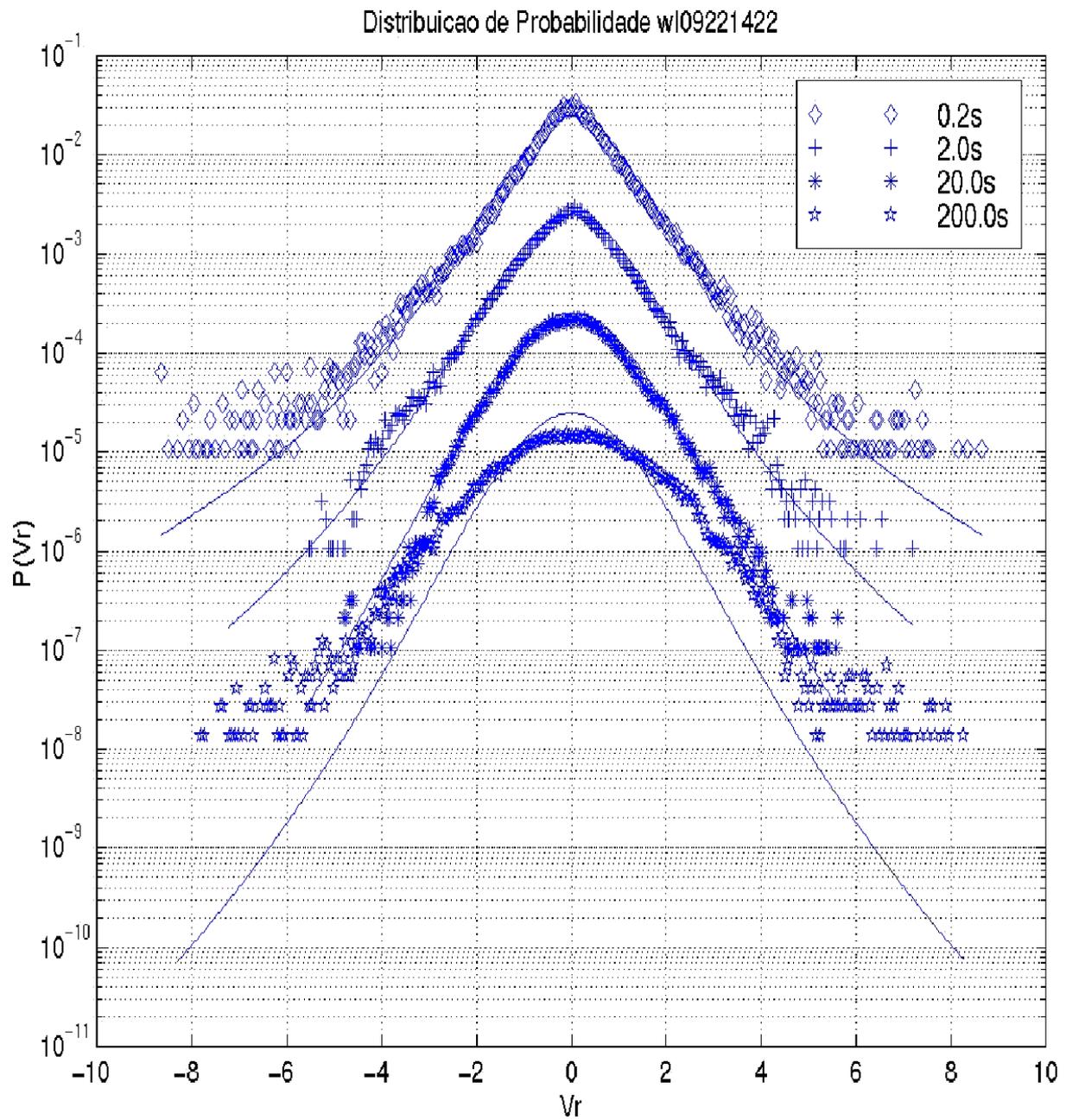


Figura 1: Função de densidade de probabilidade (PDF) para cada incremento da componente w , com dados medidos à partir das 14:22 horas. Dados experimentais (símbolos) e curvas teóricas (linhas).

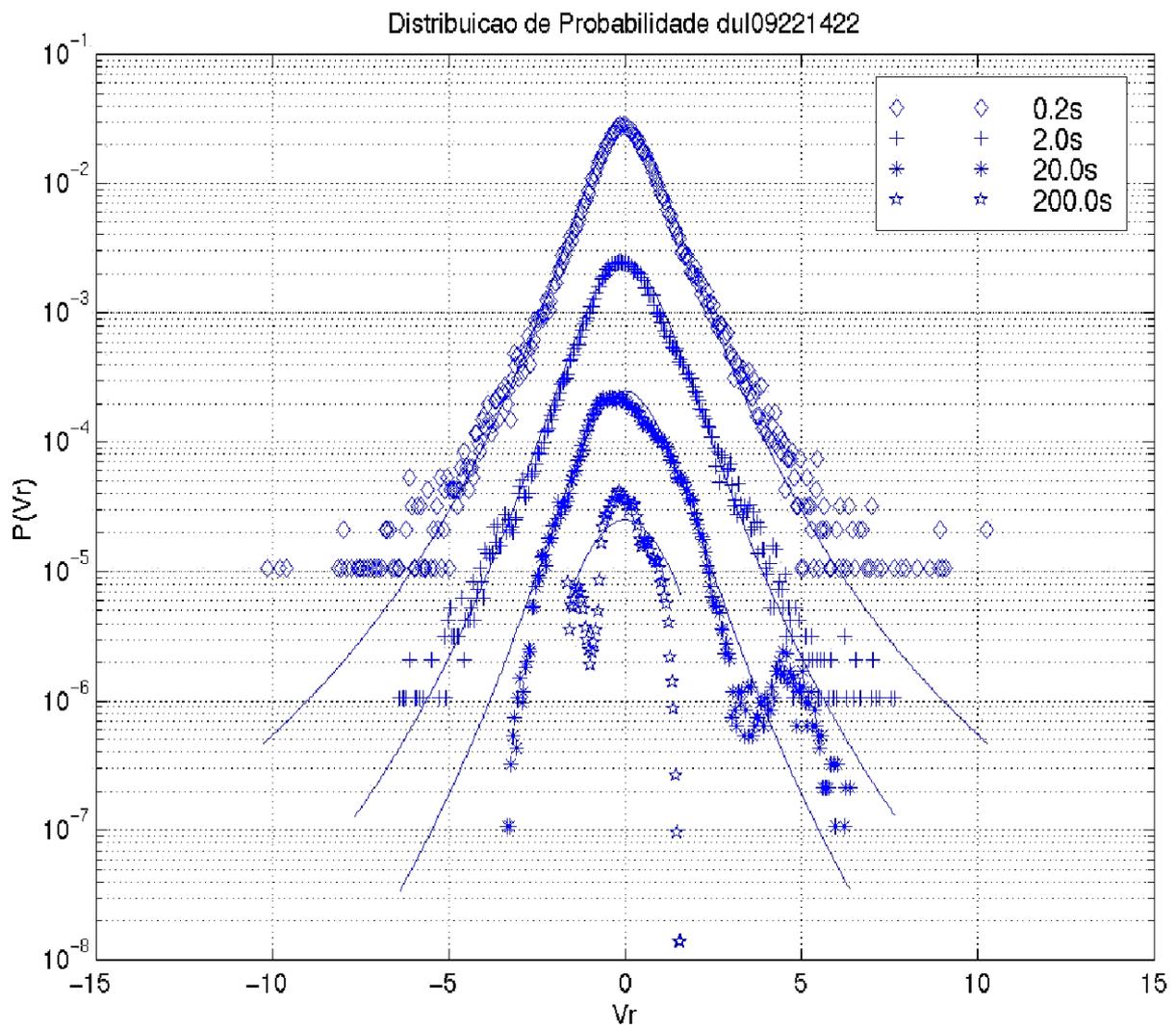


Figura 2: Função de densidade de probabilidade para cada incremento para a componente u, com dados medidos à partir das 14:22 horas. Dados experimentais (símbolos) e curvas teóricas (linhas).

Outro aspecto interessante da dependência das funções de densidade de probabilidade com relação ao incremento de tempo Δt foi salientado por Zhu et al (1995). Eles notaram a dependência das funções das densidades de probabilidades com os incrementos de tempo em dados de u e T obtidos, também, na camada limite superficial. Segundo estes, esta dependência seria consistente com a hipótese de similaridade refinada de Kolmogorov (Kolmogorov, 1962).

CONCLUSÕES

Usaram dados medidos no Pantanal Matogrossense, amostrados a 60 Hz para estudar propriedades da turbulência desenvolvida no subdomínio inercial,

Foram calculadas as funções de densidade de probabilidade para as componentes u , e w da velocidade do vento, nas escalas temporais $\Delta t = 0.2, 2, 20, 200$ s. Foi testado um novo modelo para caracterizar a distribuição de incrementos de grandezas turbulentas.

No regime instável, os resultados das funções de densidade de probabilidade das variáveis u e w mostraram uma boa concordância com a distribuição de Tsallis, exceção encontrada na escala de $\Delta t = 20s$ e $\Delta t = 200s$, o que pode ser atribuído ao efeito das estruturas coerentes existentes nesta.

Uma característica notada em ambas as variáveis u e w foi a dependência das PDFs destas com relação à escala temporal, o que parece estar de acordo com a teoria de similaridade refinada de Kolmogorov.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP (Processos 98/00105-5 e 98/11246-9) e à CAPES (bolsa do aluno Maurício J. A. Bolzan) pelos auxílios. Também são gratos à Universidade Federal do Mato Grosso do Sul e a todos os participantes da Campanha IPE-2., particularmente ao Dr. Antonio Ocimar Manzi, coordenador do Projeto IPE e à Dra. Regina Célia dos Santos Alvalá, coordenadora da campanha IPE-2.

REFERÊNCIAS

Antonia, R. A.; Hopfinger, E. J.; Gagne, Y. e Anselmet, F., Temperature structure functions in turbulent shear flows, **Physical Review A**, 30, 5: 2704-2707, november, 1984.

Baerentsen, J. H. e Berkowicz, R. Monte Carlo Simulation of Plume Dispersion in the Convective Boundary Layer, **Atmospheric Environment**, 18, 4: 701-712, 1984.

Chu, C. R.; Parlange, M. B.; Katul, G. G. e Albertson, J. D. Probability density functions of turbulent velocity and temperature in the atmospheric surface layer, **Water Resources Research**, 32, 6: 1681-1688, June, 1996.

Frisch, U. From global scaling, à la Kolmogorov, to local multifractal scaling in fully developed turbulence, In: Turbulence and Stochastic Processes: Kolmogorov's Ideas 50 Years On, J.C.R.Hunt, O. M. Phillips and D. Williams Eds., **Proceedings of the Royal Society of London A**: 89-99 pp., London, 1991.

Frisch, U. **Turbulence**, Cambridge-University-Press, 296 pp., Cambridge, 1995.

Gledzer, E. On the Taylor hypothesis corrections for measured energy spectra of turbulence, **Physica D**, 104, 163-183, 1997.

Henjes, K. On probing the inertial subrange. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 91, p. 367-384, 1999.

- Jaberi, F. A.; Miller, R. S.; Madnia, C. K. e Givi, P. Non-Gaussian scalar statistics in homogeneous turbulence, **Journal of Fluid Mechanics**, 313, 241-282, 25 April, 1996.
- Kaimal, J. C.; Wyngaard, J. C.; Izumi, Y. e Coté, O. R. Spectral Characteristics of surface layer turbulence, **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, 98, 417: 563-589, July, 1972.
- Katul, G. G.; Parlange, M. B. e Chu, C. R. Intermittency, local isotropy, and non-Gaussian statistics in atmospheric surface layer turbulence, **Physics of Fluids**, 6, 7: 2480-2492, July, 1994.
- Kevlahan, N. K.-R.; Vassilicos, J. C. The space and scale dependencies of the self-similar structure of turbulence, **Proceedings of the Royal Society of London A**, 447, 341-363, 1994.
- Kolmogorov, A. N. A refinement of previous hypotheses concerning the local structure of turbulence in a viscous incompressible fluid at high Reynolds number, **Journal of Fluid Mechanics**, 13, 82-85, 1962.
- Kraichnan, R. H. On Kolmogorov's inertial-range theories, **Journal of Fluid Mechanics**, 62 (part. 2), 305-330, 1974.
- Kraichnan, R. H. Turbulent cascade and intermittency growth, In: Turbulence and Stochastic Processes: Kolmogorov's Ideas 50 Years On, *J.C.R.Hunt, O. M. Phillips and D. Williams Eds.*, **Proceedings of the Royal Society of London A**: 65-78 pp., London, 1991.
- Lumley, J. L. Some Comments on Turbulence, **Physics of Fluids**, A4, 2: 203-211, February, 1992.
- Tennekes, H.; Lumley, J. L. **A first course in turbulence**. MIT Press, Massachusetts, p. 300, 1972.
- Tsallis, C. Possible generalization of Boltzmann-Gibbs statistics. **Journal of Statistical Physics**, 52, 1-2, 1988.
- Tsallis, C., Levy, S. V. F., Souza, A. M. C. e Maynard, R., 1995: Statistical-mechanical foundation of the ubiquity of Levy distributions in nature. **Phys. Rev. Lett.**, 75, 3589-3593.
- Zhu, Y.; Antonia, R. A. e Hosokawa, I. Refined similarity hypotheses for turbulent velocity and temperature fields. **Physics of Fluids**, v. 7, n. 7, 1637-1648, July 1995