

## DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE ANEMÔMETRO DE COPOS DE FÁCIL CONSTRUÇÃO E OPERAÇÃO

### DEVELOPMENT AND EVALUATION OF CUPS ANEMOMETER OF EASY CONSTRUCTION AND OPERATION

Carlos Augusto de Paiva Sampaio<sup>1</sup>, Mário Nestor Ullmann<sup>2</sup>, Mariana Camargo<sup>3</sup>

Recebido em: 24/05/2005; aprovado em: 11/10/2005.

#### RESUMO

Este trabalho teve como objetivos construir e avaliar um anemômetro de copos (protótipo) com leitura digital da velocidade instantânea, média e máxima do vento, utilizando materiais de baixo custo e de fácil construção. O sensor do protótipo é do tipo copos rotativos (3) presos em hastes que são unidas a um eixo central comum. O sistema medidor consiste de um magneto permanente, girando com o eixo central, produzindo um campo magnético variável, que indica diretamente a velocidade do vento no display de cristal líquido. A avaliação do protótipo foi realizada em um túnel de vento comparando a velocidade do protótipo com a de um anemômetro de alta precisão, denominado padrão. Os resultados mostraram que o protótipo apresentou velocidade de partida de  $0,70 \text{ m.s}^{-1}$  e o medidor digital apresentou sensibilidade para leituras de velocidades acima de  $0,85 \text{ m.s}^{-1}$ . As velocidades observadas pelo protótipo não apresentaram diferenças ( $P < 0,05$ ) em relação às velocidades do anemômetro padrão.

**PALAVRAS-CHAVE:** anemômetro de copos, velocidade do vento, túnel de vento.

#### SUMMARY

The objective of this study was to construct and evaluate a cups anemometer (prototype) with digital readings of instantaneous, average and maximum wind speeds, using cheap and easy building materials. The prototype sensor is compound of three ladles fixed to a rotor mounted on a spindle free. The gauge consists of a permanent magnet, where a spindle rotates the

pole. This produces a variable magnetic field, which indicates directly the wind speed in a crystal liquid display. The prototype calibration was performed in the laboratory, at a wind tunnel, comparing its speed with values measured by a highly accurate standard anemometer. The results showed that the prototype presented a starting speed of  $0.70 \text{ m.s}^{-1}$  and the digital measure presented sensibility for speed-readings above  $0.85 \text{ m.s}^{-1}$ . There were no differences ( $P < 0.05$ ) between the wind speeds measured with the prototype and the standard anemometer.

**KEY WORDS:** cup anemometer, velocity of wind, wind tunnel.

#### INTRODUÇÃO

A energia eólica resulta da transformação de parte do efeito térmico solar em energia cinética da atmosfera. A diferença de radiação solar sobre regiões distintas do planeta provoca o deslocamento de camadas de ar, os ventos. A velocidade do vento varia com a localização geográfica e altitude, constatando-se alterações instantâneas, diárias, sazonais e anuais (SILVA, 2003 e JENKINS, 1993). Os instrumentos usados para medir velocidades de fluidos, sejam gasosos ou líquidos, são os anemômetros e, as medidas são efetuadas a partir de algum efeito físico originado a partir do movimento do fluido, como a pressão, a energia cinética ou suas propriedades termodinâmicas. Os anemômetros de uso generalizado para medir velocidade de vento baseiam-se no princípio de transferência de quantidade de movimento, conhecidos como anemômetros mecânicos. Geralmente, estes instrumentos são confec-

<sup>1</sup> Professor do Departamento de Engenharia Rural, Engenheiro Agrícola, D.Sc., Centro de Ciências Agroveterinárias CAV/UDESC, Lages/SC, 88.520-000, a2caps@cav.udesc.br

<sup>2</sup> Professor, Engenheiro Agrônomo, M.Sc., CAV/UDESC.

<sup>3</sup> Estudante de Agronomia CAV/UDESC. Participante.

cionados de materiais resistentes e por isso podem ser usados e colocados em locais abertos, porém a grande maioria, caracteriza-se pela elevada inércia inicial ou elevada zona morta, normalmente superior a  $0,50 \text{ m.s}^{-1}$ , devido a sua própria constituição (OWER e PANKHURST, 1977; FOX e MCDONALD, 1981; ROSENBERG et al., 1983; PEARCY et al., 1989; KIMURA et al., 2001).

Alguns anemômetros que utilizam o princípio de quantidade de movimento são os anemômetros de copos, de deflexão e o anemômetro de pás rotatórias de tamanho reduzido (PEARCY et al., 1989). Outros utilizam o princípio físico da termoeletricidade, como os anemômetros de fio quente, de filme quente, de termistor aquecido, de termopilhas (OWER e ANKHURST, 1977; LOMAS, 1986).

Conforme a velocidade do vento e os motivos para sua medição, deve-se utilizar anemômetros com características de construção e operação diferentes. O de uso generalizado é o anemômetro de copos, que totaliza o vento que passa em um determinado local num intervalo de tempo considerado. Este instrumento fornece a velocidade do vento unidirecional, sendo a velocidade representada por uma equação linear (PLATT e GRIFFITHS, 1972; ROSENBERG et al, 1983; PEARCY et al., 1989).

De acordo com Pearcy et al. (1989) e Platt e Griffiths (1972), o anemômetro de copos é formado por uma parte móvel e um mecanismo contador, com a velocidade dos copos sendo proporcional à do vento. Os copos (geralmente 3) são fixos nas extremidades de hastes presas a um eixo central vertical e girável formando ângulos iguais entre si de  $120^\circ$ , de forma que suas partes côncavas fiquem sempre voltadas no mesmo sentido para que girem com a pressão do vento em torno do eixo central. O mecanismo contador é constituído por um conjunto de engrenagens que é acionado pelo movimento dos copos através do eixo central. Os mesmos autores citam que o anemômetro padrão é formado por copos de 5 polegadas de diâmetro, os quais formam um círculo de giro correspondente a 12,6 polegadas a partir do centro do copo e que, os anemômetros de três copos são mais sensíveis em situações que ocorrem mudanças na velocidade do ar.

Segundo Rosenberg et al. (1983), Lomas

(1986) e Pearcy et al. (1989), os anemômetros podem ser calibrados em túnel de vento, onde se pode obter um fluxo uniforme e controlado do ar.

Stout (1974) descreve que qualquer variação de uma grandeza física, como resistência, indutância e capacitância, pode ser convertida em uma grandeza elétrica (digital ou analógica) controlada por um circuito apropriado com um sensor específico.

Os anemômetros de copos podem ser usados para diversas finalidades, porém seu uso mais generalizado é em estações meteorológicas. Na agricultura, para a otimização das práticas agrícolas com tomadas de decisões mais precisas, seu uso é ainda pouco comum e, as razões principais, obtidas de depoimentos de agricultores, são pelo desconhecimento e/ou, principalmente, pelo custo destes instrumentos isolados ou fazendo parte de estações climáticas automatizadas.

Este trabalho teve como objetivos construir e avaliar um anemômetro de copos com leitura digital da velocidade instantânea, média e máxima do vento, utilizando materiais de baixo custo na sua confecção.

## MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado no Centro de Ciências Agroveterinárias, em Lages/SC, com latitude de  $27^\circ 49' \text{ S}$ , longitude de  $50^\circ 20' \text{ W}$  e altitude de 920 m. O clima predominante da região, de acordo com KÖPPEN é Cfb (temperado úmido, sem estação de seca).

O anemômetro foi construído conforme proposto por Pearcy et al. (1989) e Platt e Griffiths (1972). A calibração foi realizada em túnel de vento conforme sugerem Lomas (1986), Pearcy et al. (1989) e Rosenberg et al. (1983).

### Sensor

O sensor do protótipo é formado por três copos fixos nas extremidades de três hastes de 0,15m de comprimento unidas a um cabeçote central, vertical e girável, preso a um eixo central móvel formado por um parafuso que passa por dois rolamentos colocados no interior de um tubo, permitindo o livre movimento do parafuso. O cabeçote, o tubo e as hastes são de nylon tecnil, confeccionados em torno indus-

trial.

Os copos são de plástico, formato hemisférico, com diâmetro interno de 0,0786 m, profundidade de 0,0369 m e 0,0023 m de espessura de parede, que foram dispostas no plano horizontal formando ângulos de 120° entre si. Suas partes côncavas são orientadas no mesmo sentido e, desta forma, a pressão do vento faz com que estas girem sempre no sentido das partes convexas, juntamente com o eixo central. A circunferência gerada pela rotação dos copos foi de 0,34 m medidas a partir do centro dos copos.

### Medidor da velocidade

O medidor digital (Cycle Computer Modelo Echo -7) é um instrumento compacto, com visor de cristal líquido que usa um microprocessador de 4 bits, conforme mostra a Figura 1. Possui dimensões de 41mm x 46mm x 14mm e peso de 22,5g. Funciona com uma bateria de 1,5V e em temperaturas entre 0 a 60°C, fornecendo a velocidade em  $\text{km.h}^{-1}$  ou

$\text{milhas.h}^{-1}$ . As especificações do medidor estão mostradas na Tabela 1.

O princípio de funcionamento do medidor baseia-se nas Leis do eletromagnetismo. Ao passar próximo do sensor, o ímã ocasionará um sinal de natureza elétrica no interior do medidor que será reconhecido, sendo este sinal convertido em velocidade. Para isso, na extremidade inferior do eixo central fica preso o ímã, que ao passar próximo do sensor fornecerá a leitura digital. Sendo a velocidade dos copos proporcional à do vento, conseqüentemente, o espaço percorrido pelos copos é integrado pelo medidor, fornecendo a velocidade média do vento, como também a velocidade instantânea e máxima.

O medidor foi calibrado de acordo com o diâmetro proporcionado pela rotação dos copos (0,34m). Esta calibração foi realizada com a determinação do número integrador apropriado para o medidor que foi de 1980, obtido de intervalos entre 1100 a 2999.

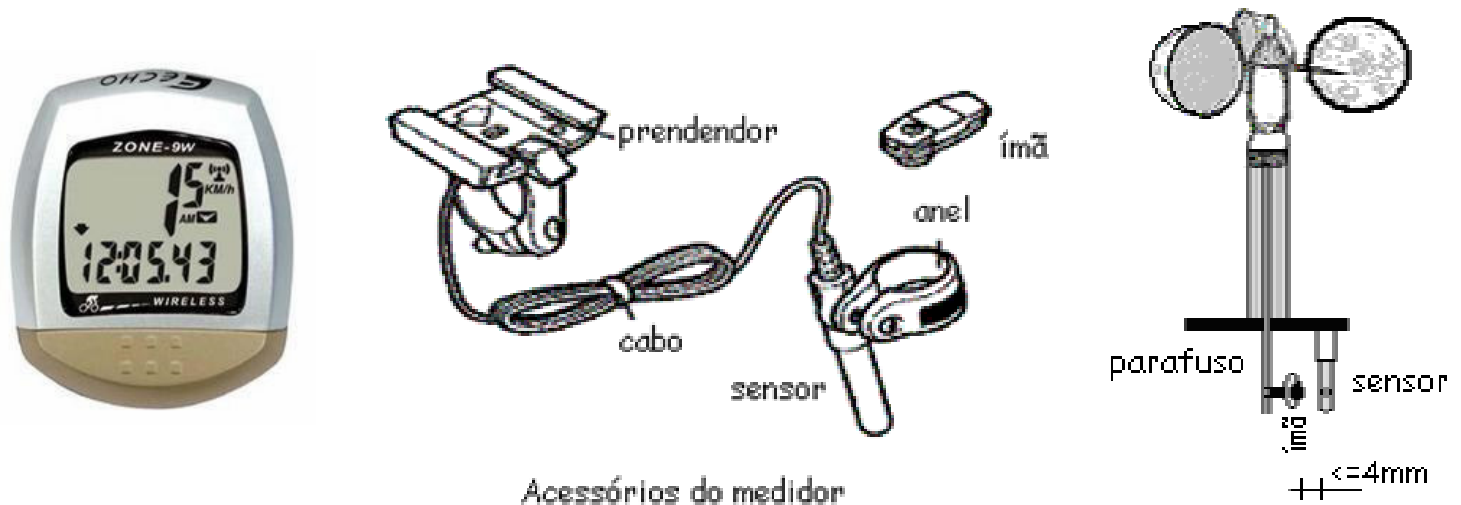


Figura 1-Medidor digital (modelo e marca Echo), acessórios do medidor e do anemômetro (protótipo).

Tabela 1- Especificações do medidor digital de velocidade.

Função	Especificação	Resolução	Precisão
Velocidade atual	SPD 0 – 199 $\text{km.h}^{-1}$	1, 0 $\text{km.h}^{-1}$	1, 0 $\text{km.h}^{-1}$
Velocidade média	AVG 0 – 199 $\text{km.h}^{-1}$	0,1 $\text{km.h}^{-1}$	0,1 $\text{km.h}^{-1}$
Velocidade máxima	MAX 0 – 199 $\text{km.h}^{-1}$	1,0 $\text{km.h}^{-1}$	1,0 $\text{km.h}^{-1}$

### Calibração do protótipo

A calibração do protótipo foi realizada em túnel de vento construído de acordo com a National Association of Fan Manufactures (NAFM, 1952), mostrado na Figura 2. A calibração consistiu em submeter o protótipo e o anemômetro padrão a um escoamento de ar, controlado por um regulador de fluxo, obtendo-se velocidades no intervalo de 0,0 a 14,0 m.s<sup>-1</sup>.

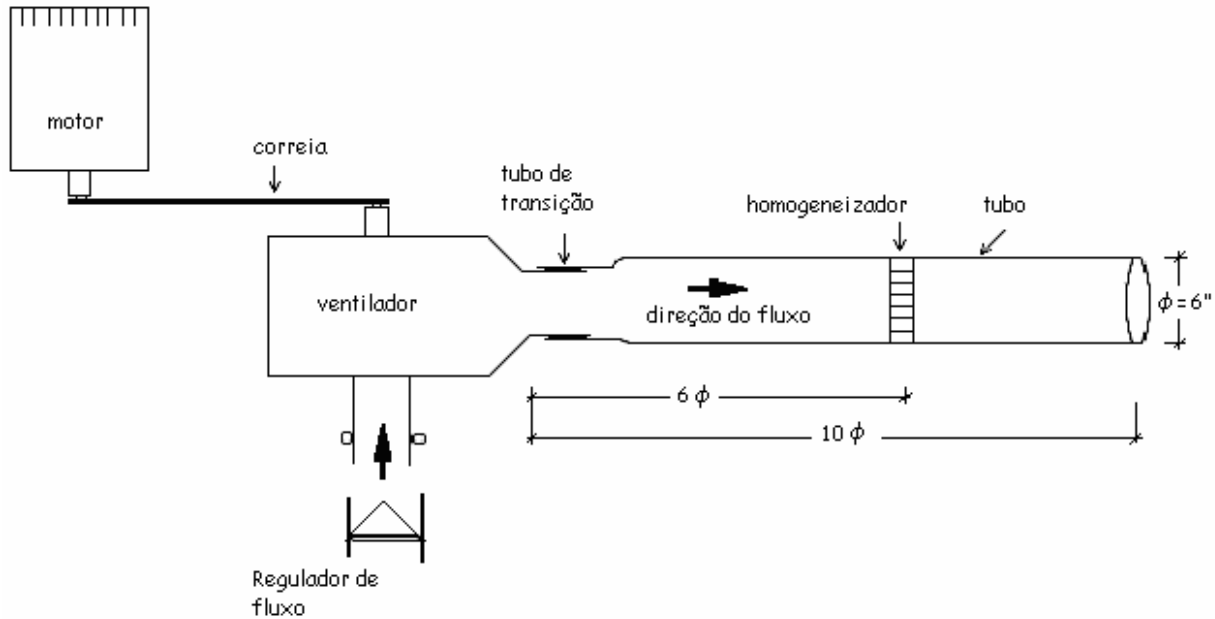


Figura 2- Dispositivo para calibração.

A velocidade do ar foi conhecida mediante um termo-anemômetro denominado de anemômetro padrão, modelo GGA-65 - ALNOR. Seu sensor de velocidade é um termistor aquecido que opera a uma corrente e tensão elétrica de 200 mA e 3,6 V, respectivamente, com compensação automática para temperaturas do ar entre -40 a 80° C e que fornece a velocidade do ar entre 0,1 a 30 m.s<sup>-1</sup>. A precisão do instrumento padrão é de 0,05 m.s<sup>-1</sup> entre 0,10 a 0,49 m.s<sup>-1</sup> e de 1 dígito para velocidades entre 0,50 a 30,0 m.s<sup>-1</sup>. A resolução é de + 0,01 m.s<sup>-1</sup> para velocidades entre 0,10 a 4,99 m.s<sup>-1</sup>, de 0,10m.s<sup>-1</sup> entre 5 a 20,9 m.s<sup>-1</sup> e de 1 m.s<sup>-1</sup> entre 21 a 30 m.s<sup>-1</sup>.

Para calibração, o protótipo (P) e o anemômetro padrão (pd) foram alinhados na direção perpendicular ao fluxo a 40 cm da extremidade do

tubo, e as leituras foram contabilizadas somente após a completa estabilização na leitura dos anemômetros para uma mesma velocidade do ar, proporcionada pelo túnel de vento.

A inércia do protótipo foi determinada quando um fluxo de ar incidindo nos copos permitia o início de movimento das mesmas, as quais saíam do estado de repouso.

Para se estudar as relações entre o protótipo (P) e o anemômetro padrão (pd), utilizou-se a análise de regressão simples ao nível de significância de 95%. A análise de resíduos ou desvios e o coeficiente de determinação R<sup>2</sup> foram usados para avaliar a qualidade da regressão. Para se comparar as velocidades fornecidas pelo padrão (pd) e pelo protótipo (P) para intervalos de velocidade (tratamentos) entre 1,0 e 11,0 m.s<sup>-1</sup> (devido à inércia do medidor para leituras inferiores a 0,85 m.s<sup>-1</sup>), foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado (DIC) com cinco repetições. Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A equação de regressão para o protótipo em função das observações do padrão encontra-se na Tabela 2, onde se pode observar que as velocidades médias fornecidas pelo protótipo e pelo padrão ficaram próximas, não apresentando diferenças estatísticas ao nível de 5% de significância nos intervalos medidos. No intervalo entre 1,0 a 11,0 m.s<sup>-1</sup>, as equações de regressão apresentaram um coeficiente de determinação ajustado R<sup>2</sup> superior a 60%.

mecânicos.

O medidor digital não apresentou leituras para velocidade inferior a 0,85 m.s<sup>-1</sup> devido a alta constante de comprimento do medidor com relação ao número integrador de 1980.

A relação para a velocidade fornecida pelo protótipo e pelo anemômetro padrão apresentou modelo linear ( $V_p = 1,0092.V_{pd} - 0,2635$ ), estando de acordo com o que descrevem Platt e Griffiths (1972), Rosenberg et al. (1983), com alto coeficiente de determinação R<sup>2</sup> (99%).

Tabela 2- Valores de velocidade do ar (média) fornecida pelo anemômetro (protótipo) e pelo anemômetro padrão e equações de regressão ao nível de significância de 95%.

Intervalo (m/s)	Velocidade média (m/s)		Equação de regressão	Coeficiente de determinação R <sup>2</sup>	F (5%)
	Padrão(pd)	Protótipo(P)			
1 - 2	1,61 ns	1,36 ns	P = 1,10pd - 0,42	0,74	20,42*
2 - 3	2,47 a	2,13 a	P = 1,16pd - 0,74	0,82	104,88*
3 - 4	3,55 a	3,32 a	P = 1,34pd - 1,43	0,79	86,04*
4 - 5	4,54 ns	4,33 ns	P = 1,42pd - 2,10	0,72	59,03*
5 - 6	5,42 ns	5,32 ns	P = 0,98pd + 0,01	0,71	57,15*
6 - 7	6,44 a	6,22 a	P = 0,99PD - 0,17	0,79	85,44*
7 - 8	7,41 ns	7,29 ns	P = 1,01pd - 0,23	0,72	60,99*
8 - 9	8,47 a	8,29 a	P = 0,93pd + 0,42	0,72	72,0477*
9 - 10	9,43 a	9,20 a	P = 0,86pd + 1,05	0,61	44,6741*
10 - 11	10,46 a	10,25 a	P = 0,87pd + 1,06	0,60	35,8068*

a,b na linha, não diferem pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.  
ns - não significativo pelo teste f.

A estimativa da velocidade fornecida pelo protótipo (P) em função da velocidade medida pelo padrão (pd) e a análise dos resíduos encontram-se nas Figuras 3 e 4, respectivamente. No diagrama de dispersão, verifica-se uma alta relação entre as duas variáveis e que pode ser considerada aproximadamente linear. Analisando os resíduos, não se constata a formação de figura que indicasse alguma tendência de distribuição dos dados, mostrando que estes estão aleatoriamente distribuídos em torno da reta  $y = 0$ . O protótipo apresentou uma inércia de 0,70 s<sup>-1</sup> estando de acordo com o que verificaram Ower e Pankhurst (1977); Fox e Mcdonal (1981) e Percy et al. (1989) para a grande maioria dos anemômetros

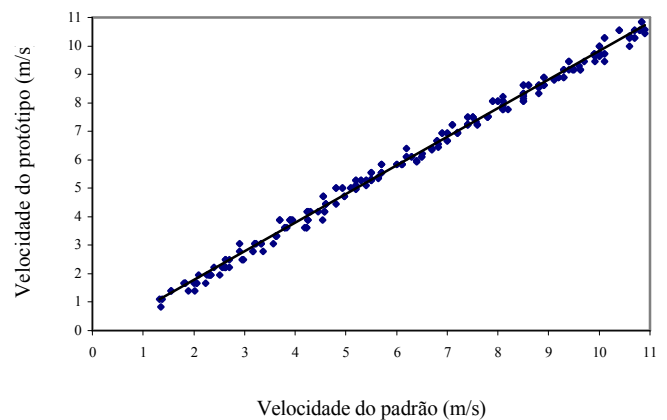


Figura 3- Correlação entre a velocidade do vento medida pelo protótipo (anemômetro de copos) e a velocidade do ar medida pelo anemômetro padrão.

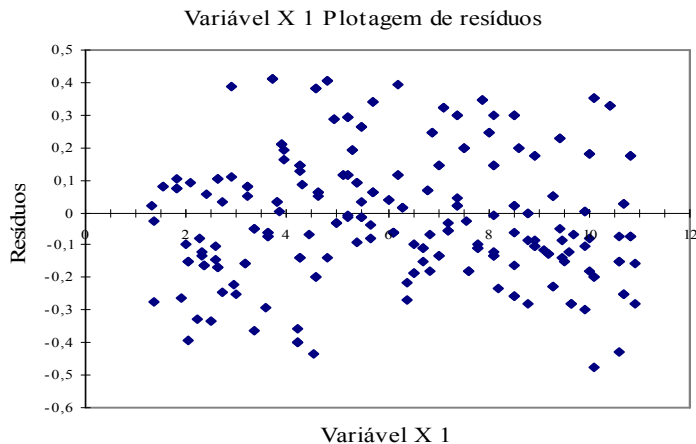


Figura 4- Plotagem dos resíduos ajustados (ajuste linear).

## CONCLUSÕES

A velocidade obtida pelo anemômetro de copos (protótipo) não apresentou diferenças estatísticas em relação à velocidade obtida pelo anemômetro padrão a partir de  $1,0 \text{ m.s}^{-1}$ ; os coeficientes de determinação ficaram no intervalo entre 60 a 82%; a velocidade de partida do protótipo ficou em  $0,70 \text{ m.s}^{-1}$ ; o medidor não apresentou leituras para velocidade inferior a  $0,85 \text{ m.s}^{-1}$ ; o custo do instrumento ficou em torno de US\$50,00 (R\$150,00).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- FOX, R. W.; MCDONALD, A. T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981. 557p.
- JENKINS, N. Engineering wind farms. **IEE Power Engineering Journal**, v.7, n.2. p.53-60. 1993.
- KIMURA, S.; ABE, K.; TSUBOI, K.; TAMMELIN, B.; SUZUKI, K. Aerodynamic characteristics of an iced cup-shaped body. **Cold Regions Science and Technology**, v.33, n.1, p.45-58, 2001.
- LOMAS, C. G. **Fundamentals of hot wire anemometry**. Cambridge, The University of Cambridge, 1986. 211p.
- NATIONAL ASSOCIATION OF FAN MANUFACTURES - NAFM. **Standards, definitions, terms and test codes for centrifugal,**

- axial and propeller fans**. 2.ed., Detroit, 1952. Bulletin, 110.
- OWER, E.; PANKHURST, R. C. **The measurement of air flow**. 5.ed. New York: Pergamon, 1977. 374 p.
- PEARCY, R. W.; EHLERINGER, J. R.; MOONEY, H. A.; RUNDEL, P. W. **Plant physiological ecology; field methods and instrumentation**. New York: Chapman and Hall, 1989. 442p.
- PLATT, R. B.; GRIFFITHS, J. F. **Environmental measurement and interpretation**. 3.ed. New York: Robert E. Krieger, 1972. 231p.
- ROSENBERG, N. J.; BLAD, B. L.; VERMA, S.B. **Microclimate; the biological environment**. 2.ed. New York: John Wiley, 1983. 495p.
- SILVA, S.R. Energia eólica. Disponível em: <<http://www.cpdee.ufmg.br/~selenios/Geracao/Energia%20Eolica2003.pdf>>. Acesso em 30 Maio. 2005.
- STOUT, M.B. **Curso básico de medidas elétricas**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1974. 195p.