

## RESPOSTA ANGULAR DE ANEMÔMETROS DE COPOS EM TÚNEL DE VENTO

Jorge Antonio Villar Alé, [villar@pucrs.br](mailto:villar@pucrs.br)  
Gabriel Cirilo da Silva Simioni, [simioni@pucrs.br](mailto:simioni@pucrs.br)  
Cássia Pederiva de Oliveira, [cassia.oliveira@pucrs.br](mailto:cassia.oliveira@pucrs.br)  
Fabrício Petry de Abreu de Souza, [fabriciopetry87@yahoo.com.br](mailto:fabriciopetry87@yahoo.com.br)

Centro de Energia Eólica (CE-EÓLICA), Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), Av. Ipiranga 6681 – Porto Alegre (RS) – Brasil – [www.pucrs.br/ce-eolica](http://www.pucrs.br/ce-eolica)

**Resumo:** O Centro de Energia Eólica da PUCRS (CE-EÓLICA) conta com uma estrutura laboratorial capacitada para teste de aerogeradores de eixo vertical e eixo horizontal, além de túnel de vento específico para calibração de anemômetros de copos. No âmbito da calibração de anemômetros existem novos desafios como, por exemplo, conhecer a resposta destes anemômetros quando existe uma mudança angular em relação a sua posição vertical. Pode-se estudar o efeito da resposta angular dos anemômetros de copos no interior da seção de testes de um túnel de vento existindo atualmente recomendações européias específicas para realizar este tipo de ensaio. O presente trabalho aborda esta metodologia de maneira inédita no Brasil com resultados até agora promissores.

**Palavras-chave:** anemômetro de copos, ângulo de inclinação, velocidade do vento

### 1. INTRODUÇÃO

Os anemômetros de copos são utilizados amplamente em torres meteorológicas, em especial para monitoramento do potencial eólico. Em campo estes anemômetros podem sofrer diversos efeitos das condições externas já seja pela fixação do mesmo na torre meteorológica, assim como pelas possíveis oscilações ou vibrações que estas torres sofrem em campo. Isso requer que o anemômetro seja de qualidade com certificados de calibração, tomando como referência procedimentos e recomendações tais como as apresentadas pela MEASNET (2009). No CE-EÓLICA a calibração de anemômetros é realizada num túnel de vento (Fig. (1)) de seção de teste de 1,0m x 1,0m e consiste em instalar o anemômetro na seção de teste e correlacionar à frequência de saída do anemômetro para diferentes velocidades. A velocidade de referência na seção de teste é determinada utilizando tubos de Pitot. O procedimento é realizado na faixa de 4m/s a 16m/s. Após o levantamento dos dados se realiza uma análise de regressão linear determinando parâmetros estatísticos como os coeficientes angular e linear que definem a equação da reta que representa a velocidade do vento em função da rotação do anemômetro. O procedimento de calibração é considerado satisfatório quando o coeficiente de correlação é maior que 0,99995 (MEASNET). Resultados obtidos no túnel de vento do CE-EÓLICA descrevendo a metodologia de calibração já têm sido publicados (Alé et al 2008).

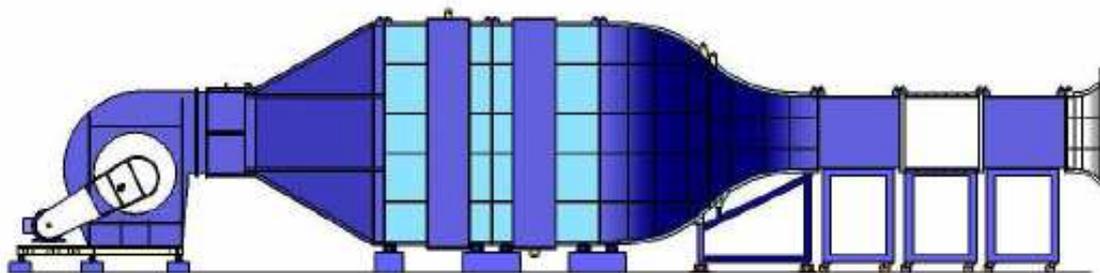


Figura 1. Túnel de vento para calibração de anemômetros

Erros associados a medições da velocidade do vento são as maiores fontes de incerteza nos testes de curvas de potência de aerogeradores. Um projeto de pesquisa Europeu, denominado CLASSCUP (Pedersen, 2003) tem por objetivo quantificar os erros associados com o uso de anemômetro de copos e determinar os requerimentos necessários para contar com um desenho otimizado de anemômetros de copos assim como poder desenvolver uma metodologia para a classificação destes anemômetros e identificar a qualidade dos mesmos. Um posterior projeto de pesquisa europeu

denominado ACCUWIND (Accurate Wind Speed Measurements in Wind Energy) foi implementado para desenvolver metodologias de ensaios que permitam realizar uma classificação com alta qualidade dos anemômetros de copos e sônicos (Dahlberg et al 2006). O ACCUWIND também fornece subsídios metodológicos para a norma IEC 61400-12-1(2005) que trata do levantamento da curva de potência de aerogeradores. Na avaliação do ACCUWIND as características mais importantes que devem ser avaliadas num anemômetro são: (a) o efeito do atrito dos rolamentos, (b) efeitos dinâmicos com caracterização do torque e (c) resposta angular do anemômetro. O estudo de resposta angular do anemômetro é um dos ensaios propostos pelo ACCUWIND o qual foi utilizado como referência neste trabalho e cuja metodologia e resultados são apresentados.

## 2. ENSAIO DE INCLINAÇÃO ANGULAR

O ensaio de resposta angular visa avaliar o comportamento do anemômetro para diferentes inclinações e velocidades de referência no túnel de vento. Para se estudar o efeito da inclinação dos anemômetros é necessário que o anemômetro possa variar sua posição angular no interior da seção de testes do túnel de vento. Conforme estabelecido pelo ACCUWIND (Dahlberg et al 2006) o intervalo máximo de inclinação recomendado é de  $\pm 50^\circ$ . Outro requerimento importante é o tempo em que o anemômetro deve estar sujeito ao teste de movimentação angular. O tempo máximo recomendado é de 20 minutos, período no qual o anemômetro é submetido a movimentação angular, com oscilação para frente e para trás em relação a velocidade predominante no túnel de vento.

O teste consiste em variar a inclinação do eixo do anemômetro de  $+\theta^\circ$  para  $-\theta^\circ$  (Fig. (2)), sendo  $\theta^\circ$  o ângulo de inclinação. Considera-se que o anemômetro inicia e conclui o ensaio na posição de  $\theta^\circ=0$ , isto é na posição vertical. Este movimento repete-se 3 vezes para cada uma das velocidades de referências adotadas na seção de teste do túnel de vento:  $V_{ref1}=5,0\text{m/s}$ ,  $V_{ref2}=8,0\text{m/s}$  e  $V_{ref3}=11,0\text{m/s}$ . Como mostra a Figura (2), convencionou-se que o anemômetro oscila com ângulo positivo quando é inclinado para frente em relação ao sentido a velocidade do vento na seção de teste.

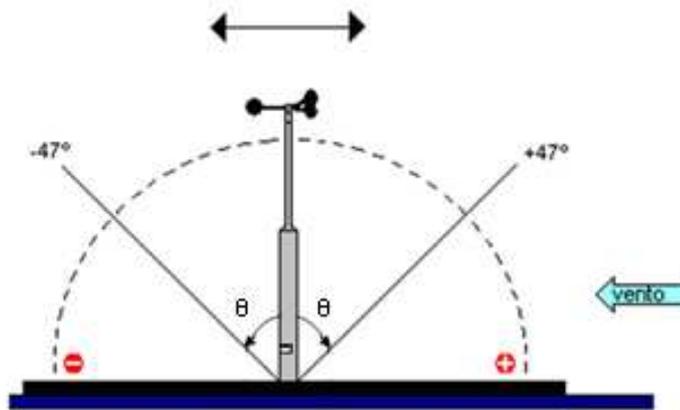
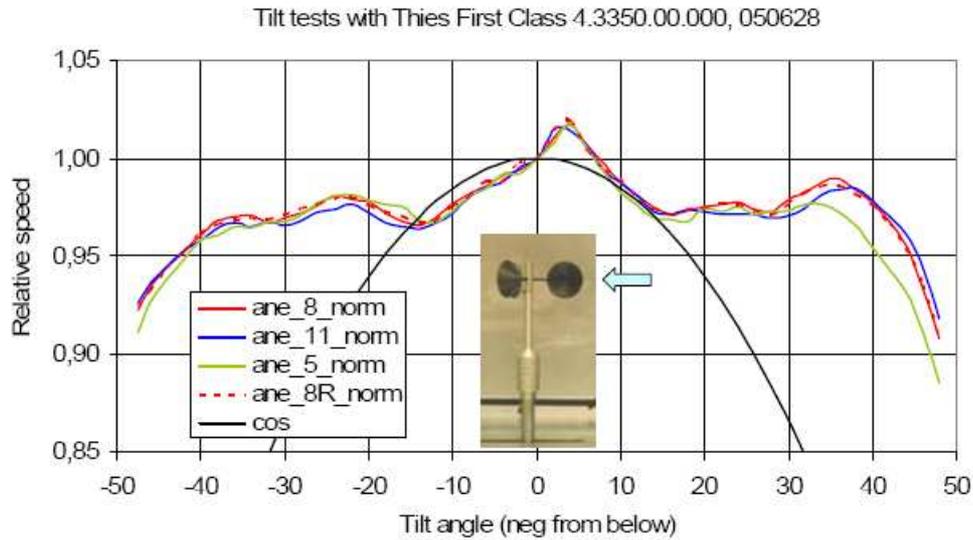


Figura 2. Movimentação do anemômetro

O ensaio começa com a menor velocidade de referência ( $V_{ref1}$ ) na seção de teste do túnel de vento. A partir da posição vertical o braço inicia sua movimentação com velocidade de aproximadamente  $2^\circ/\text{s}$  ( $0,035\text{rad/s}$ ). O anemômetro se movimenta para frente e para trás três vezes completando três ciclos, voltando finalmente a sua posição vertical. Neste processo é realizada a coleta de dados. A seguir se modifica a velocidade no túnel de vento aumentando a mesma para a segunda velocidade de referência ( $V_{ref2}$ ) permanecendo o anemômetro na posição vertical por um intervalo de 60 segundos para garantir a estabilização do escoamento na seção de teste. Após a estabilização do escoamento é repetido o processo incluindo a coleta específica dos dados. Finalmente o processo é repetido para a 3ª velocidade de referência ( $V_{ref3}$ ). O tempo total do ensaio incluindo as 03 velocidades de referência é de 1206 segundos (aprox. 20 minutos). A coleta de dados começa após a estabilização da velocidade no túnel de vento (1 minuto), iniciando, assim, o movimento angular do anemômetro. Depois de encerrado os três ciclos os dados são tratados, onde é feita a média em intervalos de  $2^\circ$ . Cabe assinalar que o processo de testes é inteiramente automatizado e controlado pelo operador via aplicativo computacional. O sistema mecânico utilizado para movimentar o anemômetro é composto por um motor elétrico instalado embaixo do túnel com um tubo metálico acoplado ao seu eixo. Este tubo metálico serve de suporte para o eixo do anemômetro e se comunica com o túnel de vento através de um rasgo na superfície inferior do mesmo. Ao redor do tubo foi utilizada uma borracha flexível de 3 mm para vedar o escape de ar. O movimento angular do conjunto que inclui um braço mecânico é controlada por um inversor de frequência ligado ao motor elétrico.

A metodologia utilizada permite levantar dados das variáveis tais como ângulo de inclinação do anemômetro, velocidade do vento, frequência do anemômetro e tempo da resposta angular. Desta forma é possível correlacionar a resposta do anemômetro em termos de frequência e velocidade com o ângulo de inclinação do anemômetro. A Figura (3) mostra resultados da resposta do anemômetro em função da sua posição angular (Dahlberg et al 2006). Nesta figura

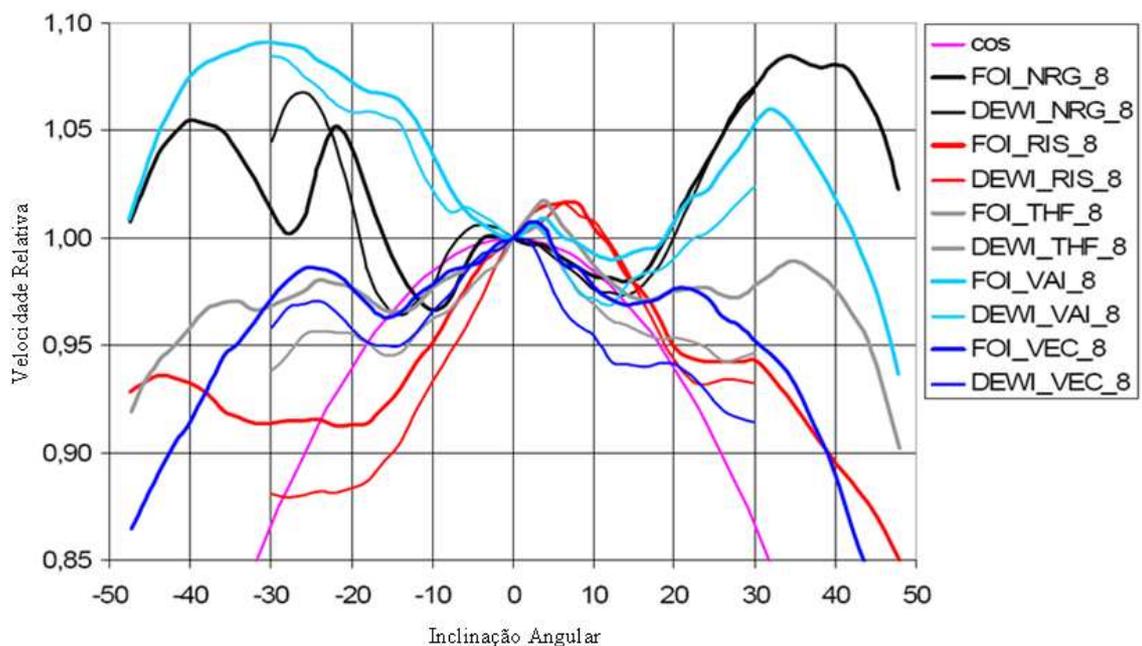
a velocidade relativa é a adimensionalização entre a velocidade medida pelo anemômetro dividida pela velocidade de referência do túnel de vento. Observa-se que os testes são realizados para as 03 velocidades de referência apresentando também uma curva teórica que representa o desvio angular da velocidade em função do co-seno do ângulo de inclinação, equivalente a um resultado teórico simplificado da resposta do anemômetro.



Fonte: (Dahlberg et al 2006)

**Figura 3. Relação entre a velocidade relativa e o ângulo de inclinação do anemômetro**

Os resultados do ACCUWIND (Dahlberg et al 2006) mostram que diferentes anemômetros apresentam respostas angulares diferentes. A Figura (4) mostra o resultado do ensaio de resposta angular para 05 anemômetros de copos realizados em 02 túneis de ventos de diferentes instituições. Observa-se que cada anemômetro apresenta uma resposta angular diferente o que é esperado já que cada um possui um desenho ou projeto próprio. Na figura também observa-se que para um mesmo anemômetro os resultados de túneis diferentes não são plenamente concordantes, sendo que não existe até o momento alguma publicação específica explicando estes desvios, no trabalho de Dahlberg et al (2006) somente se assinala que se trata de um túnel de circuito aberto e outro de circuito fechado. Ensaios em túneis de vento em condições diferentes podem apresentar resultados diferenciados, contudo qualquer túnel de vento no qual seja aplicada a mesma metodologia e com a mesma qualidade deverá obter para o mesmo anemômetro resultados convergentes, quando comparados com resultados de outros túneis de vento. Desta forma deverá existir no futuro testes comparativos inter-laboratoriais que permitam demonstrar esta hipótese.



Fonte: (Dahlberg et al 2006)

**Figura 4. Resposta angular de 05 anemômetros de copos em ensaios em 02 túneis de vento diferentes.**

## 2.1. Resultados

São apresentados resultados utilizando 02 anemômetros comerciais: 01 da Met One Instruments modelo 10C, e outro da Thies modelo First Class. Para estes anemômetros foram obtidos resultados relacionando ângulo de inclinação e resposta do anemômetro para as velocidades de referência (5m/s, 8m/s e 11m/s). A Figura (5) mostra a mudança de posição do anemômetro dentro da seção de teste do túnel de vento.



Figura 5. Anemômetro em seção de teste do túnel de vento em diferente posição angular.

A Figura (6) mostra um detalhe do tempo de normalização do anemômetro que se encontra na posição vertical ( $0^\circ$ ) e o três ciclos de movimentação angular do anemômetro de copos dentro do túnel de vento. A assimetria apresentada no ângulo ( $-47^\circ$  a  $40^\circ$ ) foi corrigida para os testes posteriores.

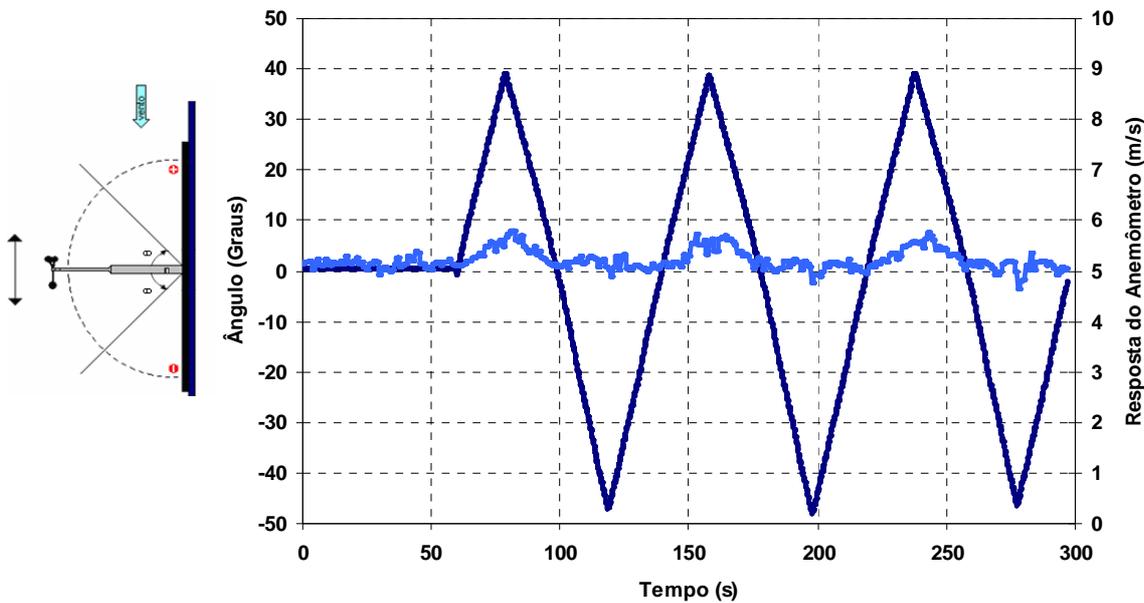


Figura 6. Resposta do anemômetro para movimentação angular  $V_{refl} = 5,0\text{m/s}$ .

Observa-se na Fig. (6) que para o caso do anemômetro Met One sua resposta tende a aumentar a velocidade comparada com a velocidade de referência, que neste caso é de 5,0m/s. Cabe assinalar que este comportamento é específico para o anemômetro em teste, sendo que cada anemômetro poderá ter diferentes respostas quando submetido a movimentação angular.

Na Figura (7), mostra-se para o mesmo anemômetro (Met One) a relação da velocidade do vento em função do ângulo de inclinação para as três velocidades de referência valores que correspondem a velocidade média do anemômetro para a posição vertical ( $0^\circ$ ).

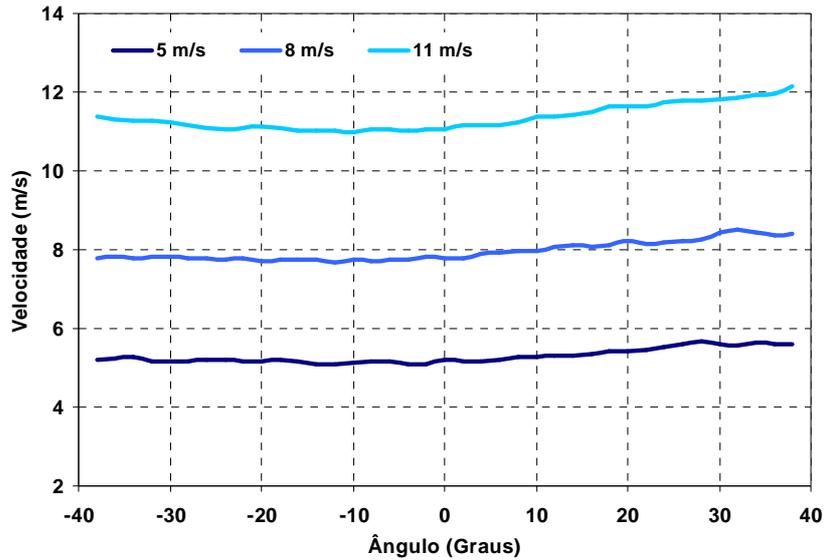


Figura 7. Relação da velocidade do vento em função do ângulo da inclinação do anemômetro.

A Figura (8) mostra o desvio relativo (%) da velocidade em relação a estas velocidades de referências. Esta figura mostra com maior detalhe como o anemômetro apresenta uma resposta com velocidades maiores quando o mesmo está inclinado para frente em relação ao vento predominante, alcançando uma diferença de 8 a 10% quando o ângulo é próximo de  $40^\circ$ . No entanto, quando o anemômetro está inclinado para trás mantém uma resposta muito próxima da velocidade para a posição vertical não superando 2% da velocidade de referência.

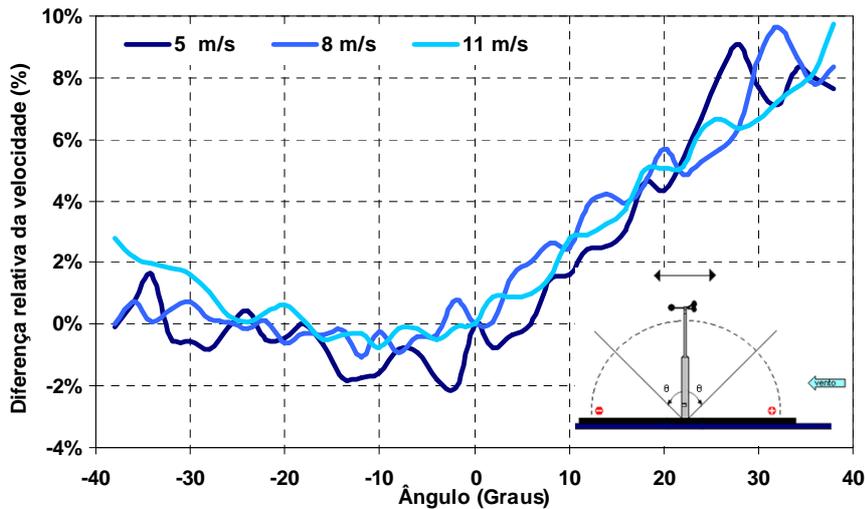


Figura 8. Diferença relativa da velocidade do anemômetro em função do ângulo da inclinação.

A Figura (9) apresenta o resultado dos testes realizados com o anemômetro da Met One. A velocidade relativa mostrada na figura é a adimensionalização da velocidade do anemômetro dividida pela velocidade de referência. Observa-se que para as três velocidades de referência existe uma maior uniformidade da velocidade entre os ângulos  $\theta^\circ = -28^\circ$  a  $\theta^\circ = 10^\circ$ . Também se mostra na Figura (9) que para a inclinação com ângulos positivos existe um desvio maior da velocidade que quando o anemômetro é inclinado para ângulos negativos. A Figura (9) mostra também que a curva com velocidade de referência de 5,0m/s apresenta uma maior dispersão dos pontos para diferentes ângulos, comparando com as outras velocidades de referências (8,0m/s e 11,0m/s).

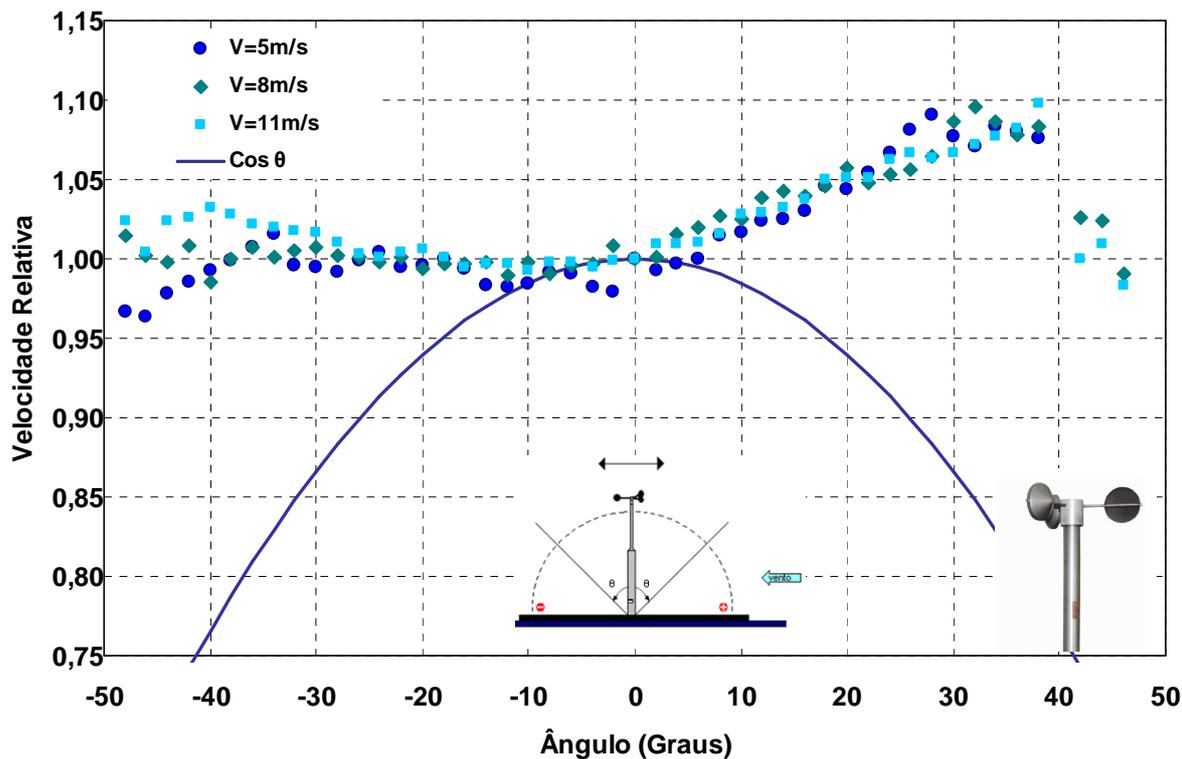


Figura 9. Velocidade relativa em função da resposta angular - Anemômetro Met One 10C.

A Figura (10) mostra os resultados obtidos no túnel de vento do presente trabalho para as três velocidades de referência. O anemômetro First Class apresenta uma resposta com velocidade relativa menor que 1 isto é velocidades menores que a velocidade de referência tanto para ângulos positivos como para ângulos negativos e com desvios menores que os apresentados pelo anemômetro da Met One.

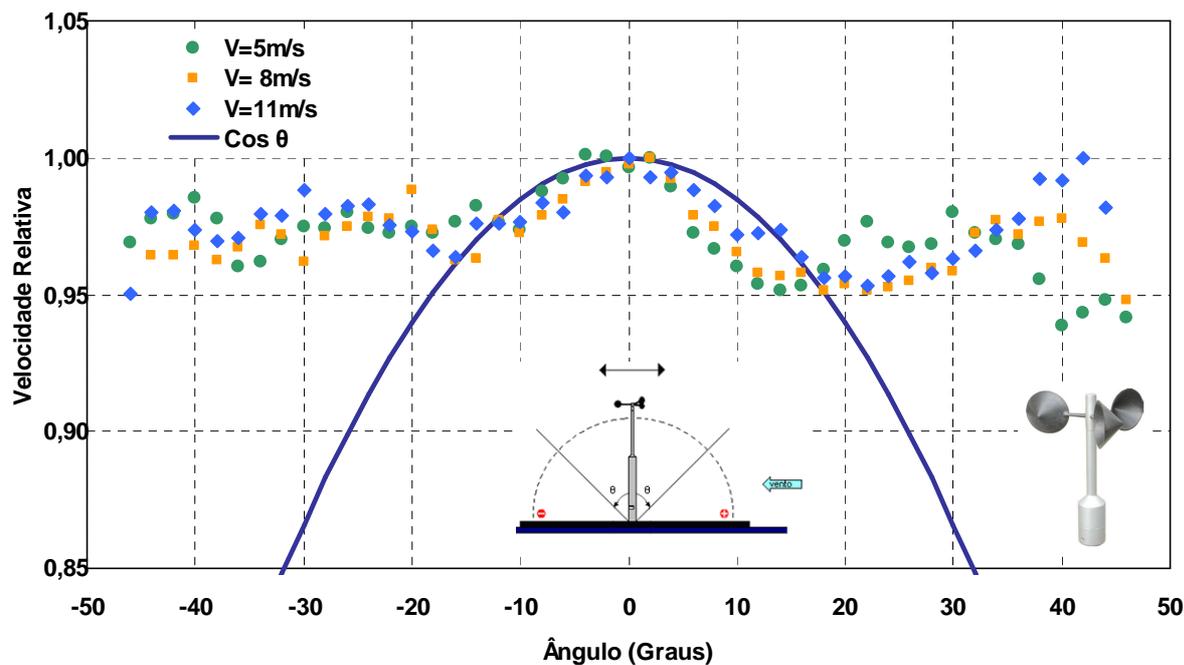


Figura 10. Velocidade relativa em função da resposta angular - Anemômetro Thies First Class.

Na Figura (11), Figura (12) e Figura (13) mostram-se resultados do anemômetro First Class comparados com os encontrados no trabalho de Dahlberg et al (2006) para as três velocidades de referência. Os gráficos obtidos no CE-EÓLICA se aproximam dos resultados da ACCUWIND, diferenciando-se por apresentarem menores amplitudes, maior oscilação e valores mais baixos de velocidade relativa para ângulos positivos. Estas diferenças podem ser influenciadas pelas características de cada anemômetro, pelo sistema de inclinação e tipo de túnel de vento utilizado. Ensaios intercomparação laboratorial se fazem necessários a fim de estudar estas diferenças.

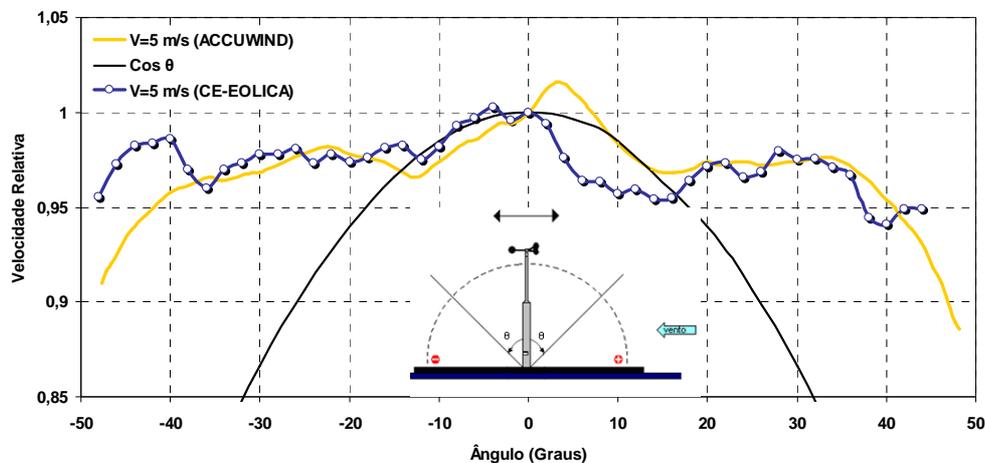


Figura 11. Resultados comparativos para o anemômetro Thies - First Class V=5,0m/s.

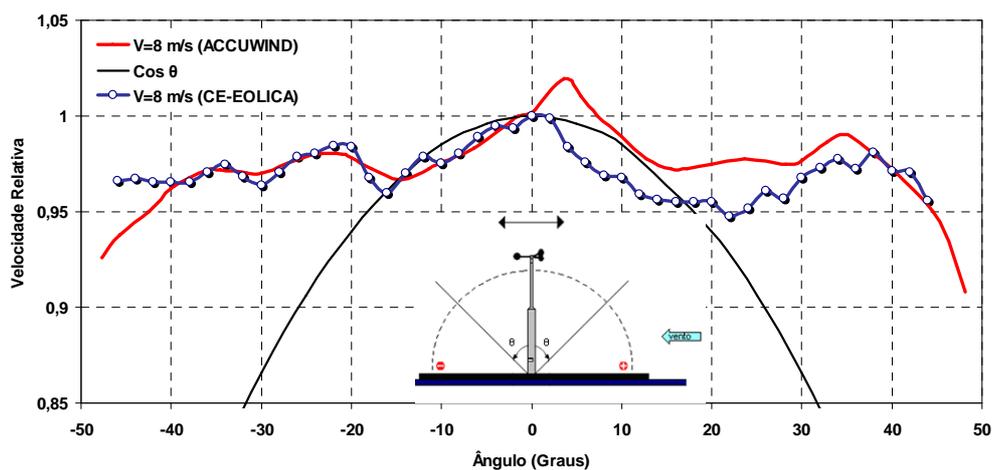


Figura 12. Resultados comparativos para o anemômetro Thies - First Class V=8,0m/s.

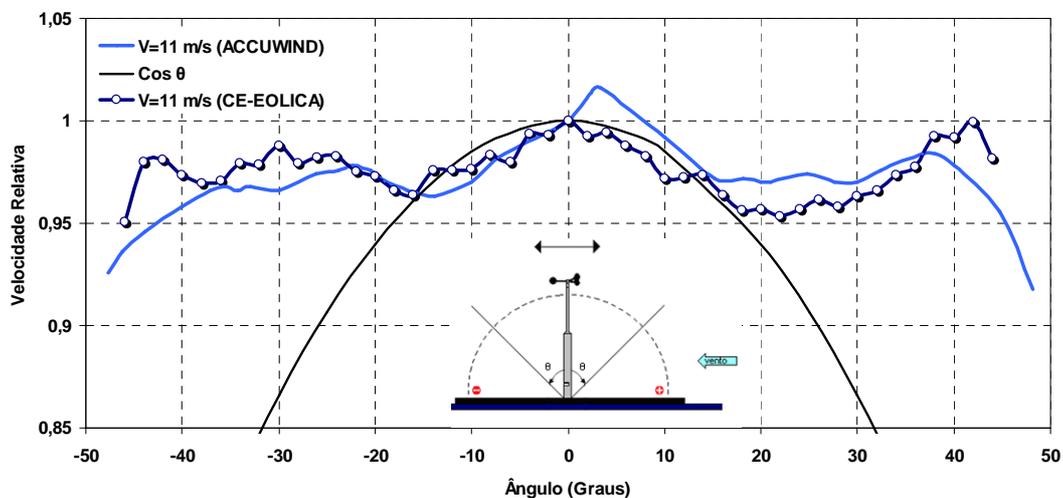


Figura 13. Resultados comparativos para o anemômetro Thies - First Class V=11,0m/s.

### 3. CONCLUSÕES

Os resultados mostram que foi possível implementar a metodologia ACCUWIND, utilizando instrumentação apropriada e automação do sistema, permitindo a variação angular do anemômetro e coleta de dados no processo de ensaio. Foram realizados testes com dois anemômetros para 03 velocidades de referência. No caso do segundo anemômetro ensaiado foi possível realizar uma comparação com os resultados experimentais de referência específica.

O anemômetro da Met One Instruments apresenta uma maior divergência da velocidade na inclinação para frente (ângulos positivos) obtendo-se velocidades até 10% maiores que velocidade do anemômetro na posição vertical. Quando o anemômetro está inclinado para trás (ângulos negativos) observa-se que o desvio da velocidade se mantém aproximadamente constante e com valores muito próximos da velocidade de referência. O anemômetro First Class da Thies apresenta uma resposta muito semelhante na inclinação para ângulos positivos e negativos e com desvios menores que os apresentados pelo anemômetro da Met One. Os desvios da velocidade deste anemômetro são geralmente menores que a velocidade de referência. Em geral foi observado que, os resultados de ambos os anemômetros, mostram claramente a influência da posição angular e o desvio da velocidade indicada pelo anemômetro comparada com a velocidade de referência quando o anemômetro se encontra na posição vertical.

O trabalho deverá ser continuado melhorando a metodologia, assim como realizar testes repetitivos e também testes com outros anemômetros que já tenham sido testados por outros laboratórios europeus afim de uma análise comparativa mais detalhada. Um planejamento de intercomparação laboratorial é também fundamental para consolidar metodologias e ensaios.

### 4. REFERÊNCIAS

- Alé, J. A. V., Simioni, G. S., Hack, P. S. Importância da Calibração De Anemômetros Nos Empreendimentos Eólicos In. Congresso Internacional de Metrologia Mecânica - CIMMEC, 1, 2008, Rio de Janeiro, *Anais...* Rio de Janeiro, 2008.
- Dahlberg, J.A., Pedersen, T.F., Busche, P. "ACCUWIND – Methods for Classification of Cup Anemometers", Riso – R 1555 (EN), 70 p. 2006.
- IEC 61400-12-1: "Wind Turbines - Part 12-1. – Power Performance Measurements of Electricity Producing Wind Turbines", Edição 1ª, 2005.
- Measnet. "Cup Anemometer Calibration Procedure", V.2. 2009
- Pedersen, T.F, Development of a Classification System for Cup Anemometers – CLASSCUP, Riso-R-1348(EN), April, 2003.