

IMPORTÂNCIA DA CALIBRAÇÃO DE ANEMÔMETROS NOS EMPREENDIMENTOS EÓLICOS

Jorge Antonio Villar Alé, Gabriel da Silva Simioni, Pedro da Silva Hack.
CE-EÓLICA - Centro de Energia Eólica - PUCRS, Porto Alegre, Brasil, villar@pucrs.br

Tema: Velocidade de Fluidos, Desenvolvimento de tecnologias e métodos de calibração e de ensaios.

Resumo: O trabalho descreve a importância da calibração de anemômetros no mercado eólico, apresentando de modo geral a metodologia utilizada na calibração de anemômetros de copos em túnel de vento tomando como referência o procedimento da MEASNET. São apresentados resultados obtidos em túnel de vento projetado para tal finalidade.

Palavras chave: anemometria, energia eólica, túnel de vento, sistemas eólicos.

1. INTRODUÇÃO

A energia eólica tem apresentado nos últimos anos um acentuado crescimento no mundo e também no Brasil. Trata-se de uma energia limpa e renovável a qual permite, nos países que possuem potencial, uma diversificação da matriz energética. Em 2007 a capacidade instalada no mundo alcançou 94.000 MW. Até 2006, a Europa concentrava a maior parte deste mercado, representando mais de 50% da capacidade eólica instalada no mundo. Em 2007, pela primeira vez mais de 50% da capacidade instalada veio de países não europeus. Os países com maior capacidade instalada em 2007 foram Estados Unidos, Espanha, Índia e China. O Atlas do Potencial Eólico do Brasil [1] mostra que existe um potencial estimado de 140GW. Atualmente a capacidade eólica no país é de 247 MW, muito pequena comparada com o potencial existente. Através do PROINFA, programa de incentivos as fonte alternativas se esperava que pelo menos 1100 MW tivessem sido instalados até final de 2007. Lamentavelmente essa meta não foi atingida e atualmente o mercado eólico aguarda seu crescimento em função de leilões específicos para energia eólica com custos que sejam atrativos para uma viabilidade técnica e econômica dos empreendimentos. A evolução do mercado eólico também depende de políticas objetivas a longo prazo, assim como ações que permitam o desenvolvimento científico e tecnológico propiciando condições para a fabricação nacional de equipamentos eólicos.

O levantamento do potencial eólico com qualidade é um dos passos iniciais e principais para quantificar o recurso energético e verificar se ele apresenta condições apropriadas para implantação de parques eólicos. Neste contexto os sistemas anemométricos auxiliam na prospecção eólica, sendo utilizados na indústria eólica nas seguintes aplicações:

- Levantamento do potencial eólico, incluindo velocidade e direção do vento, intensidade de turbulência.
- Determinação do perfil de velocidade da camada limite atmosférica no local da torre.
- Avaliação da energia gerada de parques eólicos.
- Levantamento da curva de potência de turbinas eólicas.
- Monitoramento da turbina para operar em sistemas de controle.
- Monitoramento dos dados de vento de parques eólicos para alimentar modelos computacionais de meso-escala que permitem a previsão da energia produzida.

Para estas aplicações podem ser utilizados anemômetros de copos, anemômetros tipo hélice e anemômetros sônicos. No mercado atual prevalece a utilização dos *anemômetros de copos* devido a sua simplicidade, robustez e favorável custo benefício.

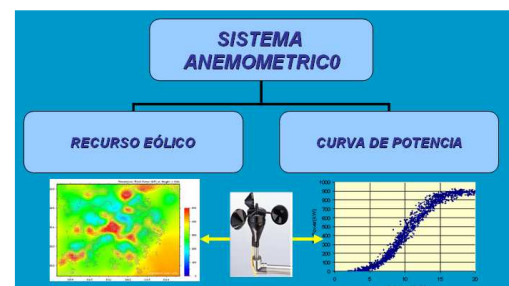


Fig. 1 Aplicações do anemômetro de copos.

Como se observa, a indústria eólica depende de medições de qualidade, principalmente dos dados de velocidade do vento. No processo de financiamento de parques eólicos, os bancos nacionais e internacionais apresentam exigências específicas para assegurar que a energia prevista do empreendimento tenha a menor margem de erro possível. Uma das exigências é que a campanha de levantamento de dados de vento seja realizada com anemômetros de qualidade com certificados de calibração. No Brasil, em função de leilões, o EPE (Empresa de Pesquisa Elétrica), vinculado ao MME, solicita certificação dos dados de vento para a habilitação técnica de empreendimentos eólicos.

2. VELOCIDADE DO VENTO E ENERGIA GERADA

Num sistema anemométrico, a incerteza depende do anemômetro, do condicionador de sinal, do pré-processador e do sistema de aquisição de dados. O anemômetro converte a velocidade do vento num sinal físico, geralmente um sinal elétrico em forma de pulso. O condicionador de sinal transforma o sinal do anemômetro num apropriado sinal para amostra. Durante o pré-processamento é determinada a velocidade média, a velocidade máxima e o desvio padrão. Durante a coleta de dados todos os dados são armazenados numa memória com resolução apropriada. Posteriormente os dados processados podem ser transferidos a um microcomputador para o tratamento estatístico e análise de energia gerada. Os sensores (anemômetros) são dentro deste sistema os que mais comprometem os resultados desta incerteza.

Uma análise do efeito da incerteza do sistema anemométrico nos resultados de energia gerada é apresentada no trabalho de Peter e van Emden [2]. A energia disponível pelo vento esta relacionada com o cubo da velocidade do vento (V^3). A importância da qualidade da medição da velocidade do vento para obter a energia disponível pode ser observada fazendo uma análise da variação da energia em função da incerteza. A Fig.3, mostra que existe um aumento da variação da energia em função da incerteza para diferentes velocidades médias. Observa-se que, por exemplo, para uma velocidade média de 7,0m/s, e utilizando um sistema anemométrico que apresenta uma incerteza de $\pm 0,5$ m/s a variação na energia gerada pode ser maior que $\pm 21\%$. Para tornar confiáveis os resultados de energia disponível no vento, Peter e van Emden [2] recomendam a utilização de anemômetros com baixa incerteza compreendida entre 0,1 m/s a 0,2 m/s.

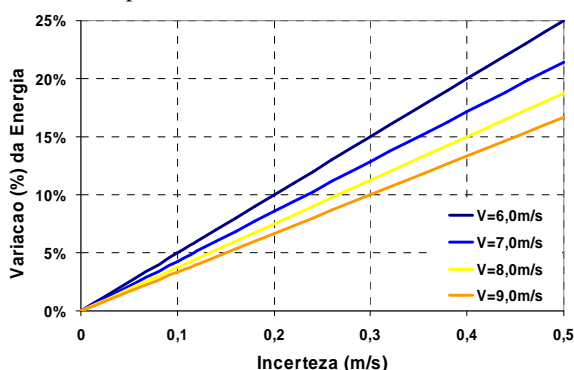


Fig.2 Efeito da incerteza na energia do vento.

De modo geral, em um levantamento de potencial eólico, outros fatores contribuem para o aumento da incerteza da velocidade medida. No trabalho de Albers e Klug [3] mostra-se que num parque eólico a determinação da velocidade do vento para a estimativa da produção de energia apresenta diversos fatores que contribuem para a incerteza. Esta incerteza depende da qualidade do anemômetro e sua calibração, da correta instalação na torre, do período da campanha das medições, das correlações a longo prazo de estas medições assim como da extrapolação

da velocidade do vento. O resumo da faixa de incertezas é apresentado na Tab.1. Observa-se que campanhas de medições poderão apresentar incertezas de 1,5% até 14%. Isto representa uma incerteza na produção de energia de um parque eólico na ordem de 3,0% a 30%. Desta forma um levantamento de potencial eólico apropriado poderá ter uma incerteza para a estimativa da energia produzida da ordem de 3,0%.

Tab.1. Incertezas na velocidade do vento.

Componente de incerteza	Incerteza (%)
Calibração do anemômetro.	0,5 a 3,0
Tipo anemômetro	0,5 a 4,0
Instalação do anemômetro na torre.	0,2 a 3,0
Escolha do local para medir a velocidade.	0,5 a 5,0
Período da campanha de medições	0,3 a 3,0
Correlação a longo prazo (MCP)	0,5 a 5,0
Extrapolação da velocidade e micro-sítio.	1,0 a 10
Incerteza total na velocidade	1,5 a 14
Incerteza total na energia	3,0 a 30

Fonte: Albers e Helmut [3]

Para prospecção eólica são utilizadas torres anemométricas com alturas de 50m, 80m e 100m de altura.

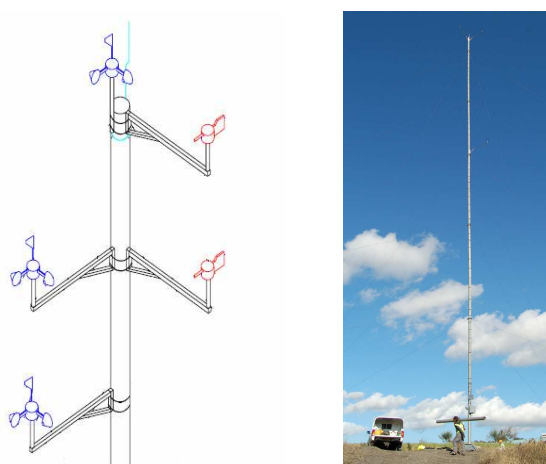


Fig.3 Sistema anemométrico com 03 anemômetros.

Nessas torres são instalados sistemas de aquisição de dados, sensores de velocidade do vento (anemômetros), sensores de direção do vento (wind vanes) e outros sensores complementares como sensores de temperatura, umidade e pressão atmosférica. Através da velocidade medida pelo anemômetro é possível coletar informações que são processadas estatisticamente obtendo-se velocidades médias, desvios padrão, intensidade de turbulência e distribuição de velocidade. Essas informações permitem determinar a energia contida no vento, denominada *densidade de potência* (W/m^2). Para determinar o perfil de velocidade e poder extrapolar a velocidade na altura da turbina são instalados 03 anemômetros a diferentes alturas (Fig.3). A qualidade dos resultados obtidos esta diretamente relacionada com a qualidade dos anemômetros utilizados, sendo a calibração do anemômetro o principal mecanismo de confiabilidade da sua correta operação.

Como foi assinalado na descrição de aplicações gerais, o sistema anemométrico também ocupa papel relevante na

avaliação do desempenho de turbinas eólicas. Uma das informações mais importantes de uma turbina eólica é sua *curva de potência*. Essa relaciona à potência de saída da máquina em função da velocidade do vento. Num parque eólico, a utilização da informação do recurso eólico junto com a curva de potência de cada uma das máquinas utilizadas permite avaliar a energia gerada. Tal informação da produção de energia poderá ser utilizada numa avaliação financeira para verificar a atratividade ou não de um empreendimento eólico. Normas para levantar a curva de potência apresentam recomendações para a instalação e funcionamento dos anemômetros assim como a importância da calibração destes sensores no levantamento da curva.

3. RESPOSTA DOS ANEMÔMETROS DE COPO

Os anemômetros de copos (Fig.4) possuem um eixo vertical no qual são fixados elementos com configuração cônica ou semi-esférica (copos) que por efeito do vento giram solidários ao eixo em função do arrasto aerodinâmico.

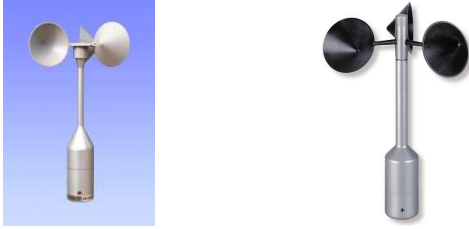


Fig. 4– Anemômetro de copos

Este tipo de anemômetro foi inventado pelo astrônomo irlandês Thomas R. Robinson em 1846 sendo originalmente formada por 04 copos. Atualmente são fabricados com 03 copos como se observa na Fig.4

A dinâmica do anemômetro de copos é apresentada no trabalho de Kristensen and Hansen [4]. Os anemômetros são calibrados em túnel de vento na faixa de velocidade de interesse. A calibração de um anemômetro mostra que para uma determinada velocidade do vento U (m/s), a velocidade angular S (rad/s) do anemômetro depende da *velocidade de partida* (U_0) e de uma *constante de calibração* ℓ . Desta forma a velocidade angular é expressa como:

$$S = \frac{U - U_0}{\ell} \quad (1)$$

A *velocidade de partida* (U_0) é muito menor que a velocidade medida (da ordem de 0,1m/s) conhecida como coeficiente linear (*offset*). A *constante de calibração*, pode ser interpretado como o comprimento de uma coluna de ar que passa através do anemômetro quando o rotor completa uma volta. Esta constante caracteriza a *inclinação angular* (slope) da Eq. característica do anemômetro. A constante de calibração não deve ser confundida com a *constante de*

distância que caracteriza a resposta dinâmica do anemômetro.

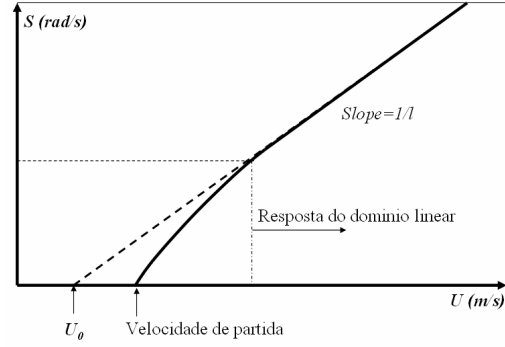


Fig. 5 curva da resposta de um anemômetro de copos.

Na Fig.5, a linha sólida representa a resposta real de um anemômetro. A linha segmentada representa a Eq.1 tendo um *coeficiente angular* (slope) que intercepta o eixo U em U_0 . A resposta do anemômetro real intercepta o eixo com um valor maior de velocidade indicada na Fig.3 como *velocidade de partida*. Desta forma a velocidade de partida de um anemômetro real é maior que a velocidade U_0 . Considera-se que um anemômetro fornece uma resposta exata quando opera no domínio linear onde a Eq.1 se ajusta a curva real.

No procedimento de calibração de anemômetros é determinado o *coeficiente linear* e o *coeficiente angular* sendo a equação resultante especificada como a relação entre velocidade (U) e a velocidade angular (S):

$$U[m/s] = U_0[m/s] + S[rad/s]\ell[m] \quad (2)$$

4. PROCEDIMENTOS PARA CALIBRAÇÃO

O procedimento de calibração apresentado segue as recomendações especificadas no documento da MESANET “Cup Anemometer Calibration Procedure” V.1, 1997 [5]. A MEASNET é uma rede internacional de metrologia que agrupa instituições e laboratórios de energia eólica com finalidade de padronizar os procedimentos para:

- Calibração de anemômetros
- Curva de potência de turbinas eólicas
- Nível de ruído de turbinas eólicas
- Qualidade de energia de turbinas eólicas.

A norma IEC 61400-12-1[6] que apresenta os procedimentos para curva de potência de turbinas eólicas aborda também orientações sobre a calibração de anemômetros utilizados para tal finalidade. Atualmente existem 15 instituições membros de 05 países, principalmente da Europa. A América Latina ainda não conta com laboratórios associados à MEASNET.

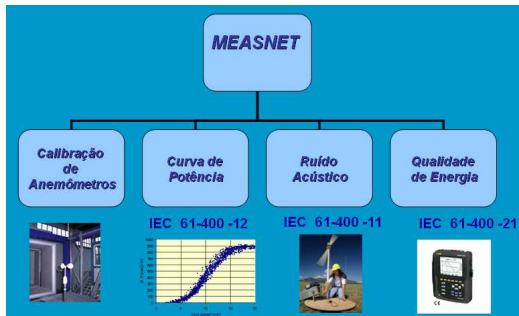


Fig. 6. Procedimentos padronizados na indústria eólica.

A calibração de anemômetros é realizada num túnel de vento e consiste em instalar o anemômetro na seção de teste e correlacionar para diferentes velocidades à frequência de saída do anemômetro. A velocidade nesta seção é determinada com auxílio de tubos de Pitot. No procedimento são utilizados transdutores para medir a pressão diferencial dos tubos de Pitot, temperatura média do ar, pressão atmosférica e umidade relativa. Um sistema de aquisição de dados permite o condicionamento dos sinais assim como o registro das variáveis envolvidas. 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 assim como os coeficientes angular e linear que definem a equação da reta que representa a velocidade do vento em função da rotação do anemômetro.

4.1. Requisitos para Calibração

Entre os requisitos gerais, a MEASNET recomenda que todos os transdutores devam ser calibrados e possuam rastreabilidade certificada. O cálculo de incerteza deve estar de acordo com a norma ISO 3534-1 sendo que no presente trabalho se tem utilizado como referência a versão brasileira do ISO-GUM [7]. Os tubos de Pitot devem cumprir a norma ISO 3966 [8]. O túnel de vento deve estar adequadamente equipado sendo que a presença do anemômetro não deve influir no campo de escoamento. Caso necessário deve ser utilizado o *fator de correção por efeito de bloqueio*. Recomenda-se que a intensidade de turbulência seja menor que 2% e que na seção de teste seja verificada uniformidade do escoamento (menor que 0,2%) na área coberta pelo rotor do anemômetro. Sendo os anemômetros sensíveis aos gradientes horizontais de velocidade, deve-se verificar este efeito utilizando 02 tubos de Pitot idênticos e realizando uma análise de regressão linear. A velocidade também corrigida em função do *coeficiente de correção do túnel de vento* o qual representa a relação entre a pressão dinâmica na posição do anemômetro e a pressão dinâmica medida pelo tubo de Pitot de referência. A instalação experimental deverá contemplar provas de repetibilidade de calibração de um anemômetro. Esta prova consiste na realização de no mínimo 5 calibrações do anemômetro de referência, com o objetivo de alcançar no máximo 0,5% de diferença entre calibrações a uma velocidade de referência de 10m/s. O procedimento da MEASNET recomenda que tanto os tubos de Pitot quanto o anemômetro sejam instalados com a maior exatidão possível e com uma inclinação máxima permitida de 1°. Antes de começar a calibração é necessário deixar o

anemômetro em funcionamento no mínimo 05 minutos evitando o efeito de grandes variações de temperatura que possam afetar o atrito de mancais e rolamentos dos anemômetros. A calibração é realizada na faixa de 4,0 a 16m/s, e se recomenda o aumento e diminuição gradual da velocidade para verificar existência de histerese no instrumento de medida. A frequência da amostra deve ser de pelo menos 1 Hz e a duração e registro da amostra de 30 segundos. A velocidade média de referência é determinada medindo a pressão diferencial no tubo de Pitot e levando em consideração as correções do coeficiente de correção do tubo de Pitot, do túnel de vento e do efeito de bloqueio. A massa específica do ar é determinada em função da temperatura média do ar, da umidade relativa, e da pressão atmosférica.

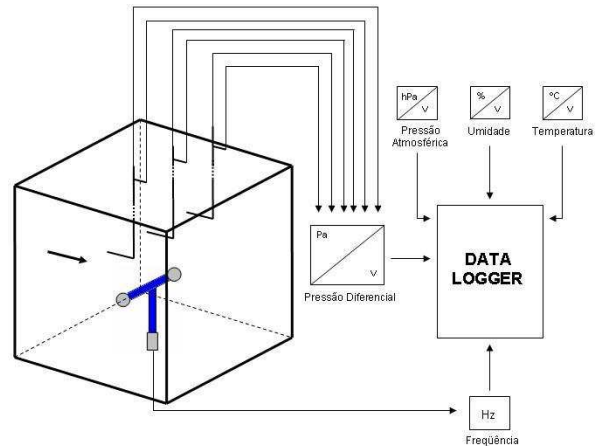


Fig.7 Esquema para calibração de anemômetros.

Após a coleta dos dados, deve-se realizar uma análise de regressão linear com o objetivo de obter os seguintes parâmetros da regressão: *coeficiente linear* (offset), *coeficiente angular* (slope), *desvio padrão*, e *coeficiente correlação*. Na regressão linear se correlaciona a velocidade de referência, obtida no túnel de vento a partir da pressão dinâmica dos tubos de Pitot, com a frequência de saída do anemômetro. O procedimento de calibração é considerado satisfatório quando o coeficiente de correlação é maior que 0,99995. A Fig.8 mostra um exemplo de curva de regressão satisfazendo esta condição.

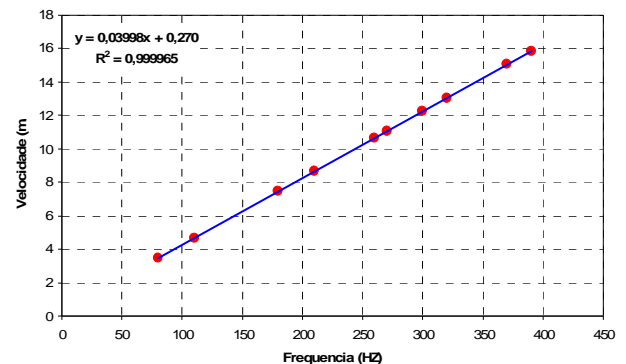


Fig.8 Curva de regressão linear de anemômetro.

5. INCERTEZAS NA CALIBRAÇÃO

A incerteza de um anemômetro operando em campo depende da incerteza da sua curva de calibração, da correta instalação na torre, do sistema de aquisição de dados e das condições ambientais como turbulência e estabilidade atmosférica.

Na calibração de anemômetros, a análise de incerteza é determinada seguindo a norma ISO 3534-1. A incerteza de um anemômetro calibrado num túnel de vento é determinada em função de análises estatísticas de séries de observações (incertezas tipo A) e outros meios que não a análise estatística (incertezas tipo B). As incertezas tipo B dependem de fatores como erros máximos, resoluções e incertezas dos instrumentos, e das incertezas dos coeficientes de correção (Pitot, e bloqueio). As incertezas tipo A levam em conta dispersões ou variações randômicas, quantificadas por desvios padrão das medições. Eecen, and Noord [9] apresentam um detalhamento destas incertezas. A magnitude da incerteza total da velocidade do vento é avaliada levando em conta a incerteza medida da velocidade e as correções por efeitos de calibração do túnel e uniformidade do fluxo no em torno do anemômetro.

A documentação relacionada com a calibração deve incluir os procedimentos adotados, descrição do equipamento, instrumentação e resultados das calibrações incluindo o certificado de calibração.

De acordo com o ISO-GUM [7], a incerteza tipo A é obtida pelo desvio padrão experimental da média das medições realizadas durante o processo, no caso da velocidade do vento:

$$u_a = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (V_k - \bar{V})^2}{n(n-1)}} \quad (3)$$

Onde u_a representa a incerteza tipo A, n o número de medições realizadas, V_k a k -ésima velocidade medida e \bar{V} a média de todas as velocidades medidas.

A incerteza tipo B é composta pelo somatório das contribuições de incertezas de cada padrão e sensor envolvido no processo. Cada variável componente da velocidade resultante possui pelo menos uma contribuição para a incerteza total tipo B, de forma que:

$$u_b = f(u_a, u_b, u_c, u_d, u_e, u_f, \dots) \quad (4)$$

Onde cada termo u representa uma contribuição diferente para a incerteza total tipo B (u_b). Na Tab.2 mostram-se os componentes da incerteza considerados no procedimento de calibração de anemômetros.

Tab.2. Incertezas no processo de calibração.

u_f	Correção de bloqueio do túnel
u_c	Correção de calibração do túnel
u_h	Correção do tubo de Pitot.
$u_{p,t}$	Transdutor de pressão diferencial
$u_{p,d}$	Conversão analógico/digital do sinal de pressão diferencial
$u_{T,t}$	Transdutor de temperatura
$u_{T,d}$	Conversão analógico/digital do sinal de temperatura
$u_{B,t}$	Transdutor de pressão atmosférica
$u_{B,d}$	Conversão analógico/digital do sinal de pressão atmosférica
u_p	Correção da massa específica.

A incerteza total expandida de medição (U_T) resulta em:

$$U_T = k\sqrt{u_a^2 + u_b^2} \quad (5)$$

Onde k representa um *fator de abrangência*, que é utilizado para aumentar a probabilidade de abrangência da incerteza total. Para um nível de confiança de aproximadamente 95% o fator de abrangência é igual a 2.

6. CALIBRAÇÕES NO CE-EÓLICA.

O CE-EÓLICA foi inaugurado na PUC-RS em outubro de 2007 recebendo recursos do Banco Mundial através de uma parceria com a ELETROBRÁS/PROCEL para capacitação laboratorial na área energia eólica. A partir de março de 2008 foram iniciadas as atividades para calibração de anemômetros seguindo as recomendações da MEASNET.

Para realizar os procedimentos de calibração no CE-EÓLICA é utilizada a infra-estrutura, equipamentos e instrumentação do laboratório de aerodinâmica e anemometria. O laboratório consta com um túnel de vento (Fig.9 e Fig.10) projetado pela própria equipe do CE-EÓLICA o qual, opera por insuflamento acionado por um ventilador centrífugo de 70 kW cuja rotação é controlada por um inversor de frequência.

Na seção de teste de 1,0m x 1,0m pode ser alcançada uma velocidade de 25m/s. No procedimento de calibração o túnel operado numa faixa de 4,0m/s a 16m/s conforme recomenda a MEASNET.

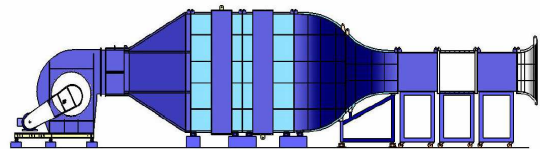


Fig.9 Túnel de vento para calibração de anemômetros.



Fig. 10 Túnel de vento vista lateral.

4.1 Automação do processo de Calibração

Para a automação do processo, foi desenvolvido um conjunto de aplicativos computacionais que reproduzem, conforme o procedimento MEASNET, a faixa de velocidades necessárias para calibração de anemômetros.

Esses aplicativos têm por finalidade controlar a velocidade do túnel de vento assim como controlar a aquisição de dados pelo data logger. Essa automação minimiza os erros por interferência humana na calibração. Depois de instalado o anemômetro na seção de teste, o operador somente dá o comando para iniciar o procedimento monitorando as variáveis adquiridas, não sendo necessária nenhuma intervenção dele ou de outras pessoas durante este processo. Também foi aperfeiçoado o procedimento para determinar a massa específica do ar, resultando numa menor incerteza na velocidade do vento. Para acompanhamento do processo de calibração foi desenvolvido um aplicativo supervisor (Fig.11) que permite o monitoramento on-line de todo o processo em andamento. Após completar o processo, os dados coletados são inseridos numa planilha eletrônica, também automatizada, calculando as incertezas resultantes das variáveis coletadas, gerando automaticamente o armazenamento da informação e emitindo o relatório e o certificado de calibração.

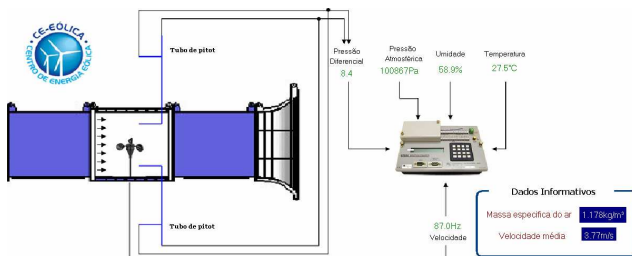


Fig. 11 Supervisor do processo de calibração

Nesse procedimento as variáveis são adquiridas com taxa de amostragem de 1Hz onde são coletadas 180 amostras em cada velocidade descrita no procedimento.

A velocidade controlada pelo software inicia em 4 m/s e incrementa no passo de 2 m/s até a velocidade de 16 m/s, logo após a velocidade do vento é decrementada para 15 m/s e continua sendo decrementada em intervalos de 2m/s até o valor de 5m/s assim varrendo todas as velocidades necessárias para a calibração do anemômetro.

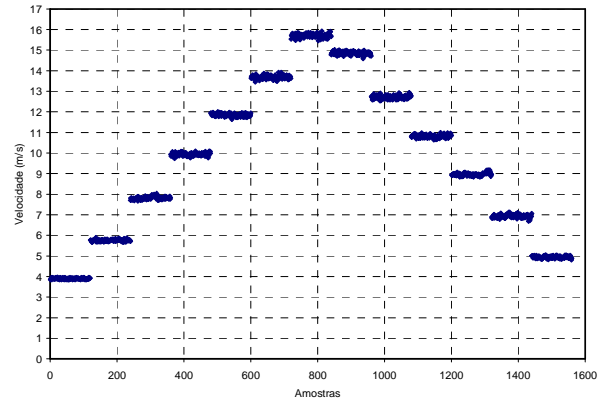


Fig. 12 Velocidades varridas pelo processo.

Antes de iniciar a calibração de um anemômetro, todo o processo é realizado com um anemômetro de referência a fim de verificar o correto funcionamento de todo o procedimento assim como a repetibilidade dos resultados.

7. RESULTADOS

A Fig.13 mostra o resultado de uma calibração de anemômetro para um anemômetro de copos. Da regressão linear são obtidos o coeficiente angular (0,04010) e o coeficiente linear (0,22194). Verifica-se para este exemplo, que o coeficiente de correlação é maior que o recomendado, atendendo as exigências da MEASNET. Na Tab.3 são apresentados os resultados das velocidades e frequências do anemômetro junto com as incertezas resultantes no processo de calibração. Observa-se que incerteza percentual é sempre menor que 1,5% para todos os intervalos de velocidades.

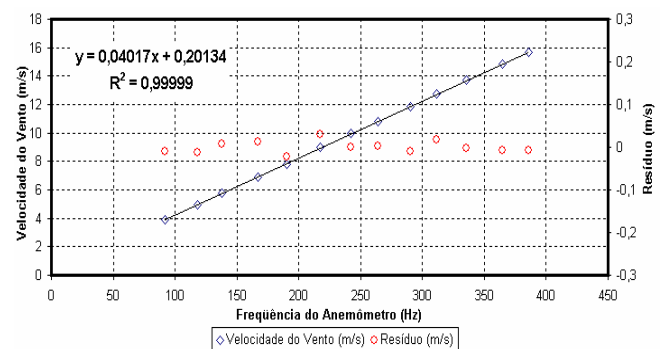


Fig.13 Curva de calibração

Tabela 3. Incertezas do resultado de calibração.

Velocidade de Referência (m/s)	Frequência do Anemômetro (Hz)	Incerteza na velocidade de referência (m/s)	Incerteza percentual na velocidade de referência	Resíduo (m/s)
3,90	92,23	0,04	1,10%	-0,009
5,75	138,03	0,06	1,10%	0,009
7,81	190,10	0,09	1,10%	-0,023
9,94	242,38	0,11	1,07%	0,001
11,85	290,29	0,12	1,05%	-0,010
13,69	335,80	0,14	1,06%	-0,003
15,70	385,99	0,17	1,06%	-0,006
14,85	364,90	0,15	1,04%	-0,009
12,72	311,13	0,13	1,06%	0,017
10,82	264,16	0,12	1,07%	0,003
8,97	217,49	0,10	1,09%	0,030
6,93	167,16	0,08	1,16%	0,013
4,94	118,29	0,06	1,15%	-0,012

A Tab.3 mostra o intervalo de velocidades de 4,0m/s até 16m/s conforme recomenda a MEASNET. Trabalhos recentes como o de Coquilla e Obermeier [10] sugerem a diminuição das incertezas aumentando a faixa de velocidades até 25m/s. Certamente esta será uma discussão que poderá no futuro modificar os procedimentos da MEASNET.

8. CONCLUSÕES

O trabalho apresentou uma revisão dos principais fatores que devem ser considerados para minimizar as incertezas em empreendimentos eólicos. O CE-EÓLICA, após a sua inauguração em outubro de 2007, iniciou os procedimentos para calibração de anemômetros seguindo as recomendações da MEASNET. Os resultados mostram que o túnel de vento do centro apresenta qualidade para poder realizar estes procedimentos.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [1] do Amarante, O.C.A. Brower, M. Zack, J. “Atlas Eólico Potencial Eólico Brasileiro” MME/ELETROBRÁS/CEPEL. 2001.
- [2] Peter H. van Emden “Accuracy of Wind Speed Data: a key-factor in the economic analysis of wind energy projects” www.ekopower.nl/know_how_accur.htm (2008).
- [3] Albers A. and Klug H. High Quality Speed Measurement for Site Assessment” EWI Magazin (1999) No 15, pag.6-16.
- [4] Kristensen and Hansen O.F. “Distance Constant of the Risø Cup Anemometer” Risø-R-1320(EN) 2002
- [5] MEASNET “Cup anemometer Calibration Procedure” V.1 Sept. 1997.
- [6] IEC 61400-12-1 1st ed 2005-12 (2005). “Wind turbines – Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines ”.

[7] Guia para Expressão da Incerteza de Medição Ed. Brasileira, ABNT, INMETRO 2003.

[8] ISO 3966, “Measurement of fluid flow in closed conduits – Velocity area method using Pitot static tubes”.

[9] Eecen, P.J. and M. de Noord (2005). ECN-C-05-66, “Uncertainties in cup anemometer calibrations: Type A and Type B uncertainties “. Energy Center Netherlands.

[10] Coquilla, R. V. and Obermeier J. “Calibration Speed Range for Rotating Anemometers used in Wind Energy” Applications AIAA-ASME Symposium 2008 (Paper 97003)

[11] Coquilla R.V., Obermeier J and White B. R. “Calibration Procedures and Uncertainty in Wind Power Anemometers” Wind Engineering. V.31, No. 5, 2007.