

LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO DE ANEMÔMETROS DO INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE DA USP

Ricardo Santos d'Avila (IEE/USP. Email: ravila@iee.usp.br)
Alcantaro Lemes Rodrigues (IEE/USP. Email: lemes@iee.usp.br)

Resumo

A expansão da indústria de parques eólicos no Brasil leva a uma demanda crescente de serviços de calibração para anemômetros que são usados tanto na fase de estudo e projeto como periodicamente durante a vida útil do parque eólico.

Até o momento, o Brasil possui dois laboratórios acreditados junto ao INMETRO.

No ano de 2015 o IEE / USP iniciou a montagem de um túnel de vento como parte do aumento da sua capacidade laboratorial tanto em escala quanto em variedade.

O túnel de vento do IEE / USP foi desenvolvido visando o apoio ao ensino e à pesquisa, à extensão com testes e calibrações, e para se preparar para atender a demanda remanescente de calibração de anemômetros no Brasil.

Atualmente, encontra-se nas fases iniciais de teste e calibração das instalações e de treinamento da equipe e com expectativa de finalização e acreditação em para o final de 2020.

Abstract

The expansion of the wind energy industry in Brazil leads to a growing demand for calibration services for anemometers that are used both in the study and design phases and periodically over the lifetime of the wind farm.

Presently in Brazil, we find two laboratories accredited to INMETRO for this purpose.

In the year 2015, the IEE / USP began to deploy wind tunnel as part of the process increase of its laboratory capacity in both scale and variety.

The IEE / USP wind tunnel was developed to support teaching and research, extension with tests and calibrations and to prepare to meet the remaining demand for anemometers calibration in Brazil.

Currently, the project is in the initial stages of testing and calibration of the facilities and the team training and with expected completion and accreditation in the end of 2020.

Keywords: Windpower, Wind Tunnel, Anemometer Calibration, Institute of Energy and Environment/USP; Brazil.

1. Introdução

Desde 2012, o Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo (IEE/USP) passa por um processo de reestruturação cuja principal característica consiste em reforçar as competências voltadas à pesquisa, desenvolvimento e inovação, com vistas a adequar-se às demandas contemporâneas da sociedade, aprimorando seu papel histórico de instituto especializado prestador de serviços. Em direção a um novo perfil de unidade de ensino e pesquisa, ou seja, gerador de conhecimento. Esse esforço incluiu a expansão de sua infraestrutura com a inserção de novas linhas e projetos de pesquisa afinados com a perspectiva da sustentabilidade e da multidisciplinaridade, refletidos na alteração de seu próprio nome, anteriormente, Instituto de Eletrotécnica e Energia. Este artigo trata de revisar o processo de implantação da linha de pesquisa “Laboratório de calibração de Anemômetros” ainda em curso e com suas perspectivas.

A expansão da instalação de parques eólicos e sua operação demandam calibração dos anemômetros utilizados na fase inicial dos estudos e da operação, e periodicamente, durante a vida útil da planta.

As medições de grandezas eólicas, em particular a velocidade, para cálculos e avaliações de geração de energia, utilizam estruturas providas de anemômetros tipo concha ou Robinson. São equipamentos de uso ao tempo, que produzem um sinal elétrico de tensão ou frequência variável e proporcional à velocidade de rotação de seu eixo, impulsionado pelo vento incidente sobre os copos. Estes sinais são gravados e processados, resultando em dados da velocidade do vento, associados a uma escala de tempo. São especificados para o setor de geração eólica anemômetros de copos das classes 1,9 (1,9% de erro@10m/s) e 5 (5% de erro@10m/s), dependendo das características do terreno [3].

O Gráfico nº1, a seguir, ilustra as classes e os respectivos erros permitidos.

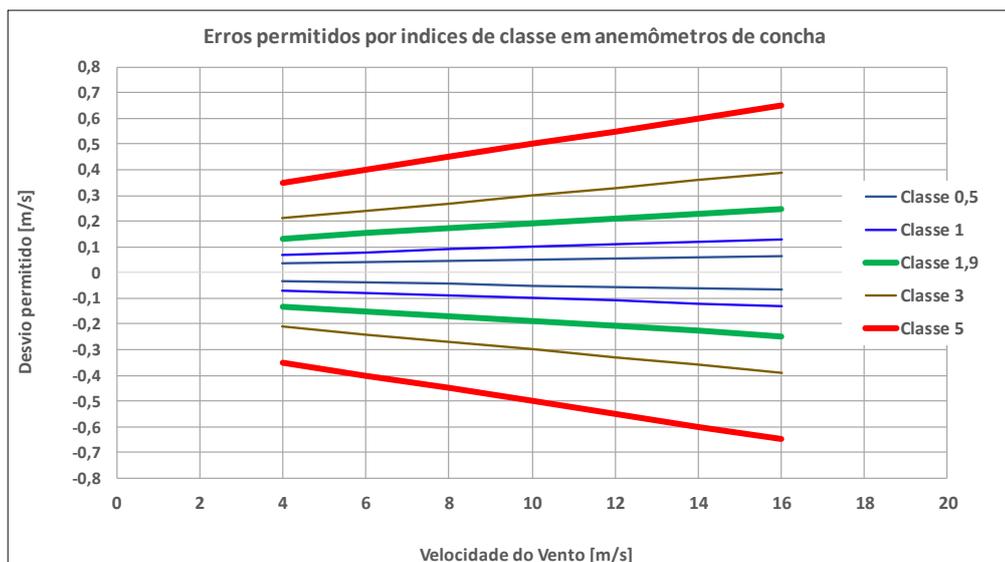


Gráfico nº1: Erros permitidos em anemômetros de copos. Adaptado de [15].

Atualmente, o uso de anemômetros constitui a forma mais disseminada e acessível de produção de dados de velocidade de vento no país. Todavia, com o aumento do rigor exigido pelas entidades de regulação e planejamento setorial (critério P90), bem como o óbvio impacto da precisão dos cálculos sobre o desempenho e os custos desse tipo de geração, o IEE/USP concluiu pela pertinência de sua atuação neste campo. E trabalha para que se opere com a implantação de uma estrutura capacitada e qualificada para calibração de anemômetros, dentro dos mais altos critérios metrológicos exigidos. Além do evidente impacto nos trabalhos de extensão, essa estrutura será um importante instrumento para a consecução de outros objetivos de pesquisa acadêmica e apoio ao ensino.

Assim, em 2015, o IEE/USP iniciou a montagem de um túnel de vento, como parte da ampliação da capacidade laboratorial mencionada, em escala e escopo, com implantação a cargo de uma equipe Inter unidades, formada, à época, por cinco profissionais com formação em física, engenharia e informática (IEE/USP), e experiência em pesquisa, rotinas laboratoriais, certificação de produtos e em metrologia. A montagem, executada com recursos e mão de obra próprios, foi concluída e, atualmente, estão em curso os passos necessários para a entrada em operação. Todo esse processo visou assegurar consistência metodológica através do cumprimento sequencial de etapas, que se iniciou com o estudo de casos e terminará com a submissão aos procedimentos de acreditação junto ao Instituto Nacional de

Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO). Como meta adicional, será avaliada a acreditação junto à MEASNET (*Measuring Network of Wind Energy Institutes*).

A escolha do projeto do túnel de vento contou com o apoio do prof. Dr. Fernando Martini Catalano (Laboratório de Aerodinâmica da Escola de Engenharia de São Carlos/USP). A adaptação do projeto foi viabilizada pela equipe do serviço técnico, que desenvolveu soluções próprias para contornar as limitações encontradas, preservando a qualidade da instalação. O túnel é de circuito aberto; seção de ensaios aberta; faixa de velocidade de trabalho de 4-16 m/s (estabelecida para a calibração de anemômetros) e máx. 25 m/s, instalado no interior de edificação erigida em estrutura metálica e vedada com paredes de alvenaria.

Atualmente encontra-se em fase de testes iniciais da instrumentação primária e secundária de medição, simultânea ao treinamento da equipe. A expectativa de conclusão, incluindo a acreditação, é de meados de 2020.

2. Calibração de anemômetros

O processo de calibração de um instrumento de medição é definido pelo *Vocabulário Internacional de Metrologia* [1] como a “Operação que estabelece, sob condições especificadas, numa primeira etapa, uma relação entre os valores e as incertezas de medição fornecidos por padrões e as indicações correspondentes com as incertezas associadas; numa segunda etapa, utiliza esta informação para estabelecer uma relação visando à obtenção dum resultado de medição a partir duma indicação”. E pode ser resumido, aqui no caso dos anemômetros, como a comparação e o estabelecimento das relações entre os valores de velocidades de vento fornecidos pelo túnel de vento (padrão com sua respectiva medição) e os valores resultantes da medição nos sensores sob calibração (anemômetros).

Especificamente na área eólica com vistas à produção de energia elétrica, a norma técnica brasileira “ABNT NBR IEC 61400-12-1:2012, no Anexo F (Procedimento de calibração do anemômetro de copo)” [2] , fornece instruções, orientações e referências para o processo de calibração e dividido em oito tópicos: Requisitos do túnel de Vento, Requisitos de configuração da instrumentação e calibração, Procedimento de calibração, Análise de dados, Análise de Incerteza,

Formato do relatório e Exemplo de cálculo de incerteza. Adotado como base para definição dos equipamentos e projeto das instalações das atividades calibração.

A Empresa de Pesquisa Energética do Ministério das Minas e Energia (EPE) estabelece no documento “NT DEE 57/16 Leilões de Energia: Instruções para as medições anemométricas e climatológicas em parques eólicos” [3] condições e instruções para elaboração de relatórios de instalação e manutenção das estações anemométricas do Sistema de Acompanhamento de Medições Anemométricas (AMA), ressaltando as características dos anemômetros a serem utilizados, suas calibrações e recalibrações.

O aumento da capacidade laboratorial do IEE-USP com esta atividade de calibração de anemômetros se integrará tanto ao sistema da qualidade do IEE-USP baseado na norma técnica brasileira *ABNT NBR ISO/IEC 17025:2017* [4] quanto à RBC (Rede Brasileira de Calibração) pelos regramentos e práticas de acreditação laboratorial do país realizados pelo INMETRO, ampliando o escopo dos ensaios do certificado CAL014 do INMETRO para o IEE-USP.

Adicionalmente, será avaliada a acreditação junto à MEASNET (*Measuring Network of Wind Energy Institutes*), que é uma rede internacional de centros de testes eólicos com sede na Espanha que busca aperfeiçoar procedimentos e medições de mesma qualidade permitindo mútua comparação e aceitação demandados pela indústria e o mercado globalizado da energia eólica.

3. O Túnel de vento e o Anemômetro de copos

O túnel de vento é um dispositivo que simula os efeitos do fluxo de ar sobre estruturas sólidas dinâmicas e estáticas e de utilidades distintas como construção civil [5] [6], aeronáutica [7], automobilística, acústica [7] e como fonte de ventos em várias velocidades para estudo do comportamento de um dispositivo de medição [8] [9]. Quanto às dimensões e velocidades, podem ser classificados em “baixa velocidade” (pequena e grande escala) e alta velocidade (transônico e supersônico) [10]. Os principais constituintes de um túnel são: propulsores; difusores (entrada e grande

angular); câmara de estabilização; cone ou bocal de contração; seção de teste; telas e colmeias [11] [12] (Figuras N°1 e N°2).

Há, basicamente, duas configurações de túnel de vento: de circuito fechado e de circuito aberto [11] [13]. No túnel de vento de circuito fechado (Figura N°1), ocorre a recirculação do ar e a alimentação se dá com ventiladores axiais. Pode ser construído em orientação vertical, porém o tipo horizontal é habitualmente utilizado devido às conveniências construtivas e alimentados com ventiladores axiais. Comparativamente, são mais vantajosos que tuneis do tipo aberto, pois demandam menos energia para a circulação do ar e permitem melhor regularidade e constância do fluxo de ar. [11].

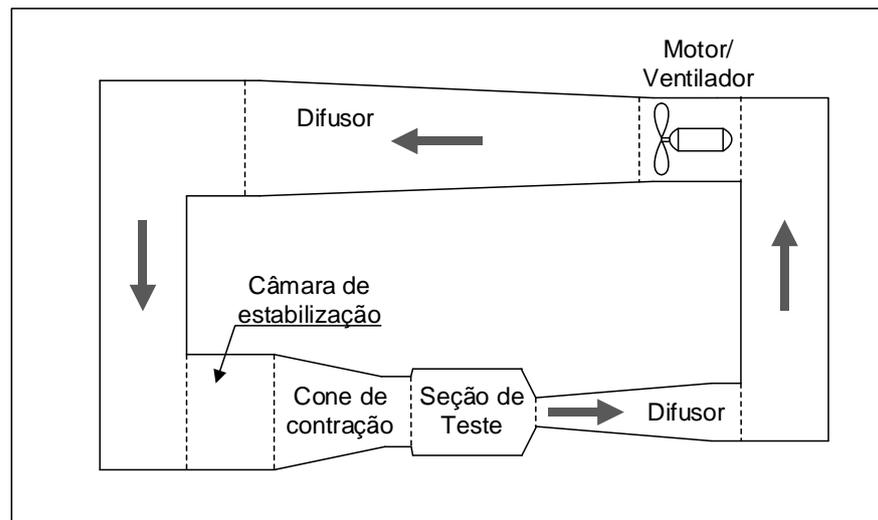


Figura n°1: Túnel de vento de circuito fechado. Adaptado de [11].

No túnel de vento de circuito aberto o ar não circula em um circuito fechado e este tipo de túnel é amplamente utilizado para fins de instrução e para investigações de fenômenos de fluxo fundamentais [11]. Neste tipo de túnel encontramos duas situações de alimentação: por sucção e soprada. Ilustradas nas Figuras n°2 e n°3.

O túnel de vento de circuito aberto de sucção utiliza um o ventilador axial (operando como um exaustor) do tipo axial na saída do difusor e tem custo de construção relativamente comparado ao túnel de vento aberto alimentado por soprador.

O túnel de vento de circuito aberto com soprador utiliza um ventilador centrífugo insuflando ar na entrada e, comparativamente ao túnel por sucção, tem a capacidade de trabalhar com maior carga e é utilizado para calibração de dispositivos de fluxo.

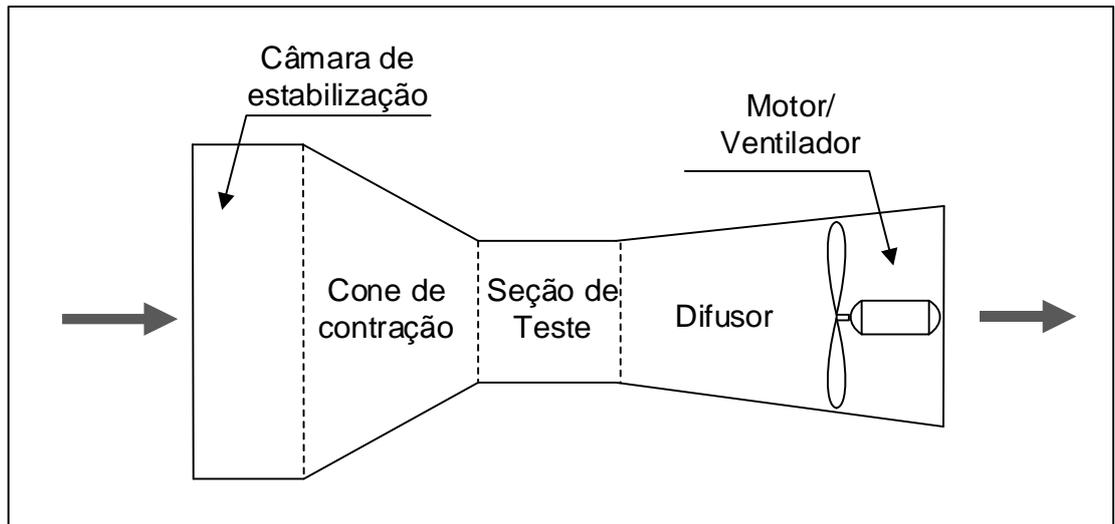


Figura nº2: Túnel de vento de circuito aberto por sucção. Adaptado de [11].

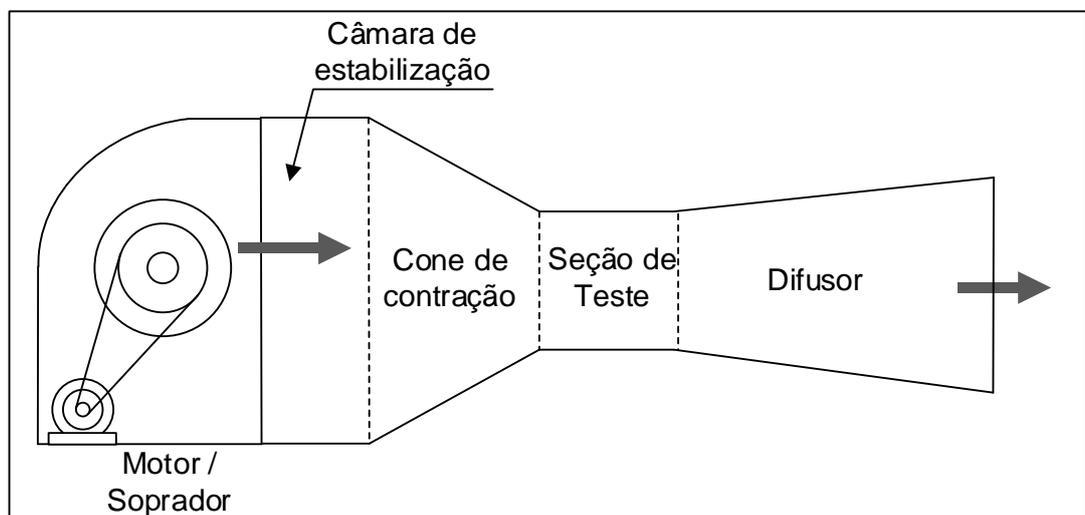


Figura nº3: Túnel de vento de circuito aberto por soprador e com seção de teste.

O típico anemômetro de copos utilizado em empreendimentos de energia eólica é um sensor eletromecânico que, preferencialmente, fornece um sinal elétrico de frequência variável proporcional à velocidade do vento (entre 20Hz e 500Hz e tensões até 5V). É um gerador de pulsos elétricos e tem basicamente duas concepções: ou um gerador eletromecânico com uma bobina móvel em torno de imã permanente ou um circuito com disco perfurado rotativo localizado entre um fotodiodo

e um receptor de infra vermelho, por exemplo, sendo que este último necessita de fonte externa de geralmente 5Vdc. Em ambos os casos, o sinal elétrico de saída passa por um processo de conversão analógico digital e então armazenado em um registrador eletrônico (data-logger) permitindo seu tratamento e leitura. A Fotografia nº1, a seguir, exhibe um anemômetro de copos típico.



Fotografia nº1: Anemômetro de copos típico.

4. Diretrizes para calibração

De acordo com o Anexo F da norma técnica brasileira *ABNT NBR IEC 61400-12-1:2012* [2] a sequência operacional básica para calibração dos anemômetros é:

- Funcionamento por 5 minutos do anemômetro antes das medidas, para estabilização da temperatura decorrente do atrito mecânico nos mancais;
- Calibrar para valores crescentes e decrescentes das velocidades na faixa de 4m/s a 16m/s em intervalo de 1m/s ou menor;
- Para cada valor de velocidade obter o sinal elétrico de saída do anemômetro durante 30s e com uma taxa de amostragem de 1Hz.

Os dados obtidos (velocidades do ar e frequências ou tensões de saída do anemômetro) são analisados por regressão linear para obtenção dos parâmetros: Desvio, Inclinação, Coeficiente de Regressão, Incerteza Padrão na Inclinação, Interceptação da Covariância da Inclinação e Interceptação da Velocidade do Vento.

A calibração deve ser repetida para o coeficiente de correlação dos dados, r^2 , menores que 0,99995.

As incertezas sobre os valores das velocidades horizontais do vento incidentes sobre o anemômetro devem ser analisadas e estimadas segundo orientações do documento *ISO Guide to the expression of uncertainty in measurement* [14] devem contemplar as incertezas tipo A e tipo B, sendo a incerteza líquida estatisticamente avaliada considerando: Incerteza da medição da velocidade de escoamento (tubos de Pitot, transdutores, avaliação da massa específica do ar etc.); Medições de frequência; Calibração do túnel de vento, incluindo o efeito de bloqueio; Variabilidade de fluxo nas proximidades do anemômetro.

O relatório de calibração deverá conter, no mínimo, as informações:

- Marca, tipo, número de série e diâmetro do tubo de montagem do anemômetro;
- Marca, tipo, número de série e de conversores externos, se utilizados;
- Nome endereço do cliente;
- Assinaturas das pessoas que realizaram a calibração, que verificaram os resultados e que aprovaram a emissão;
- Nome do túnel de vento;

Condições ambientais durante a calibração (temperatura, pressão e umidade relativa do ar);

- Parâmetros de regressão e apresentação tabular e gráfica dos pontos de calibração e resultados de regressão.

5. Adesão ao sistema da qualidade do IEE-USP e acreditação INMETRO

O IEE-USP mantém um Sistema de Gestão da Qualidade único conforme a norma técnica brasileira *ABNT NBR ISO/IEC 17025:2017* [5] e considerado, para efeito de atividades de laboratório, todo o Instituto como contendo dois laboratórios um de ensaios e outro de calibrações. Todo e qualquer ensaio e calibração executada pelo IEE-USP segue o sistema de gestão da qualidade e assim será para a calibração de anemômetro de copo aqui tratada.

A norma técnica [5] compreende os tópicos abaixo, divididos em Requisitos da Direção e em Requisitos Técnicos que integrados permitem assegurar a qualidade e confiabilidade metrológica dos processos laboratoriais.

São os Requisitos da Direção: Organização; Sistema de gestão; Controle de documentos; Análise de pedidos, propostas e contratos; Subcontratação de ensaios e calibrações; Aquisição de serviços e suprimentos; Atendimento ao cliente, Reclamações; Controle de ensaio e/ou calibração não conforme; Melhoria; Ação corretiva; Ação Preventiva; Controle de registros; Auditorias internas e Análise crítica pela direção.

São os Requisitos Técnicos: Pessoal; Acomodações e condições ambientais; Métodos de ensaio e calibração e validação de métodos; Equipamentos; Rastreabilidade de medição; Amostragem e Manuseio de itens de ensaio e calibração.

Ainda, o Sistema de Gestão da Qualidade do IEE-USP é acreditado junto ao INMETRO para também em dois escopos (calibração e ensaios), embora nem todos ensaios e calibrações do IEE-USP façam parte dos escopos acreditado junto ao INMETRO. A calibração de anemômetros de copo será, após a adesão ao Sistema de Qualidade do IEE-USP, objeto de acreditação junto ao INMETRO e integrará o escopo de calibrações acreditadas da instituição.

A acreditação do laboratório é voluntária e concedida para qualquer laboratório que realize serviços de calibração e/ou ensaio, em atendimento à própria demanda interna ou de terceiros, independente ou vinculado a outra organização, de entidade governamental ou privada, nacional ou estrangeiro, independente do seu porte ou área de atuação.

A acreditação de laboratórios é concedida por endereço e por natureza dos serviços, se calibração, ensaio ou exame. As informações dos laboratórios obtidas pela Cgcre, incluindo a equipe de avaliação, são tratadas com estrita confidencialidade.

Em linhas gerais o procedimento para acréscimo do ensaio ao escopo acreditado é, sequencialmente: Participação do laboratório em programa de ensaio de proficiência, Auditoria interna, Envio de documentos de solicitação incluindo comprovação das duas atividades anteriores; Auditoria externa pelo INMETRO da atividade a ser estendida; Obtenção da acreditação.

6. O Túnel de vento do IEE-USP

A Figura nº4 ilustra a solução adotada no IEE-USP, baseada na cooperação e apoio do prof. Dr. Fernando Catalano (Laboratório de Aerodinâmica da Escola de

Engenharia de São Carlos/USP) e as características técnicas e os valores adotados para projeto são mostrados na Tabela nº1, a seguir.

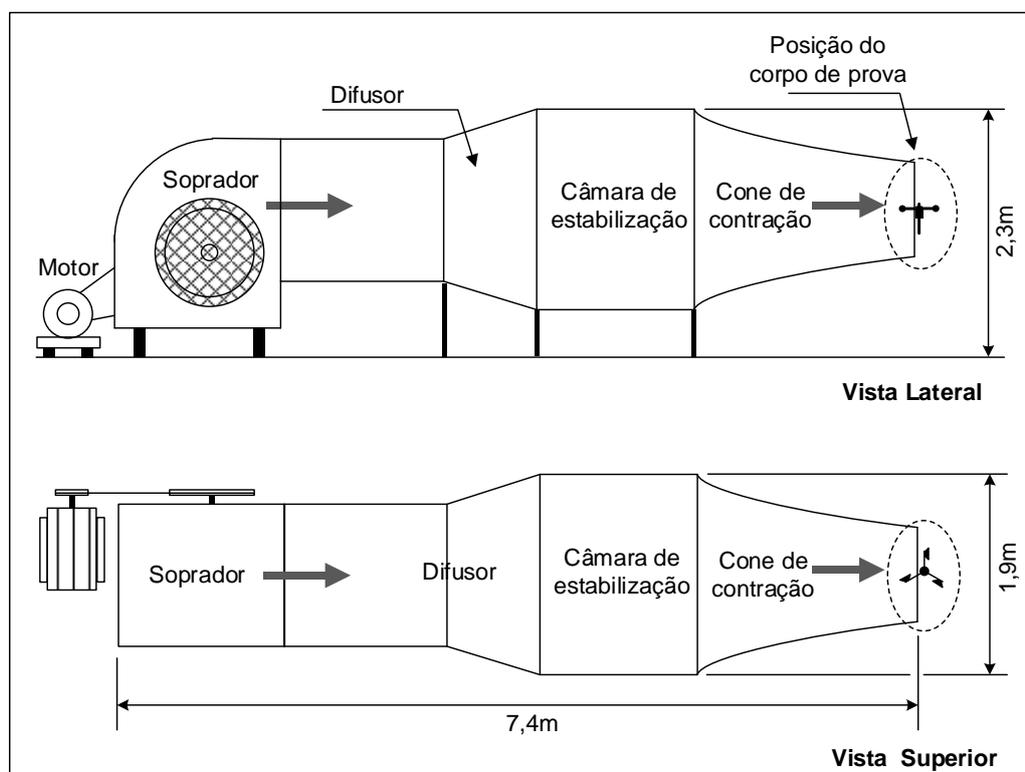


Figura nº4: Túnel de vento do de circuito aberto por soprador e sem seção de teste construído no IEE-USP.

Característica	Valor
Velocidade	25 m/s
Massa específica do Ar	1,225 kg/m ³
Pressão dinâmica	382,8125 Pa
Viscosidade dinâmica	1,79E-05 Pa.s
Vazão volumétrica	1917 m ³ /s
Área da seção da saída (seção de testes)	0,801 m ²
Relação de contração	4
Pressão atmosférica	101325 Pa
Temperatura	25 °C
Potência do soprador	22,5 kW

Tabela nº1: Características técnicas e valores adotados para projeto do túnel de vento construído no IEE-USP.

O esquema ilustrado na Figura nº5, a seguir, apresenta os dispositivos computacionais a serem utilizados para o monitoramento e controle do túnel de vento. Partiu-se do requisito de que a calibração seria feita por um operador, ou seja, não

haveria a necessidade de dois ou três operadores para realizar o serviço de calibração.

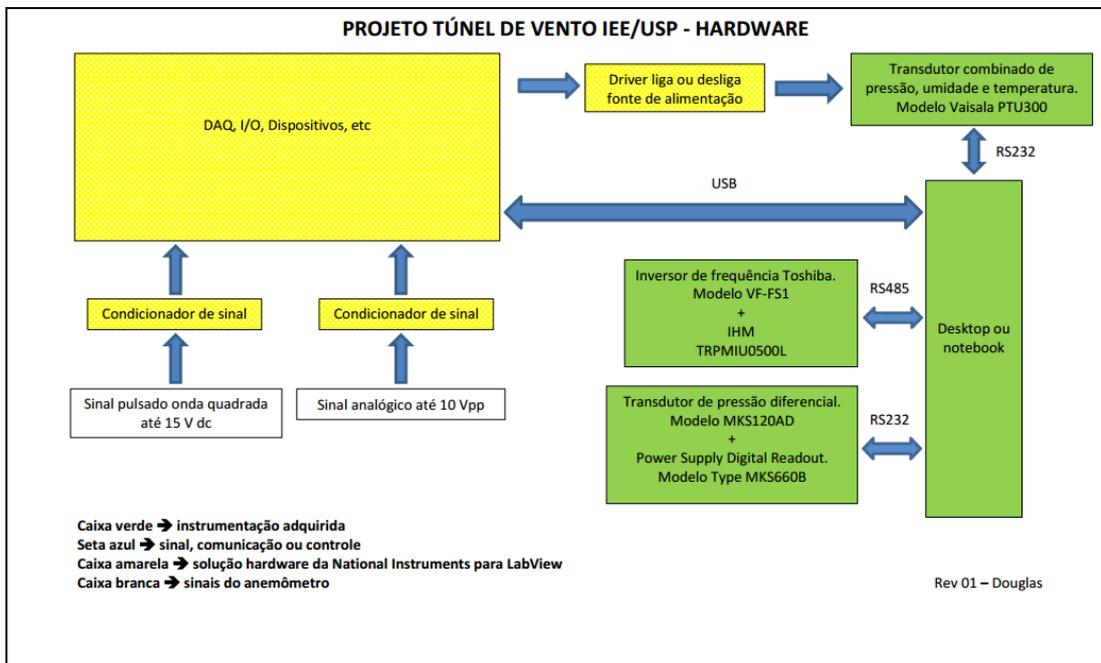
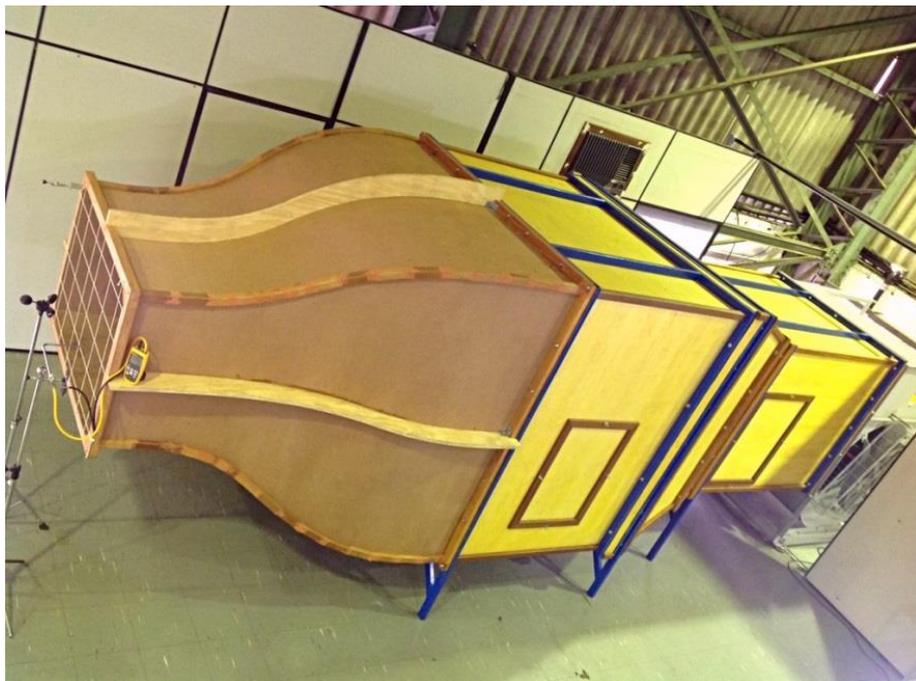
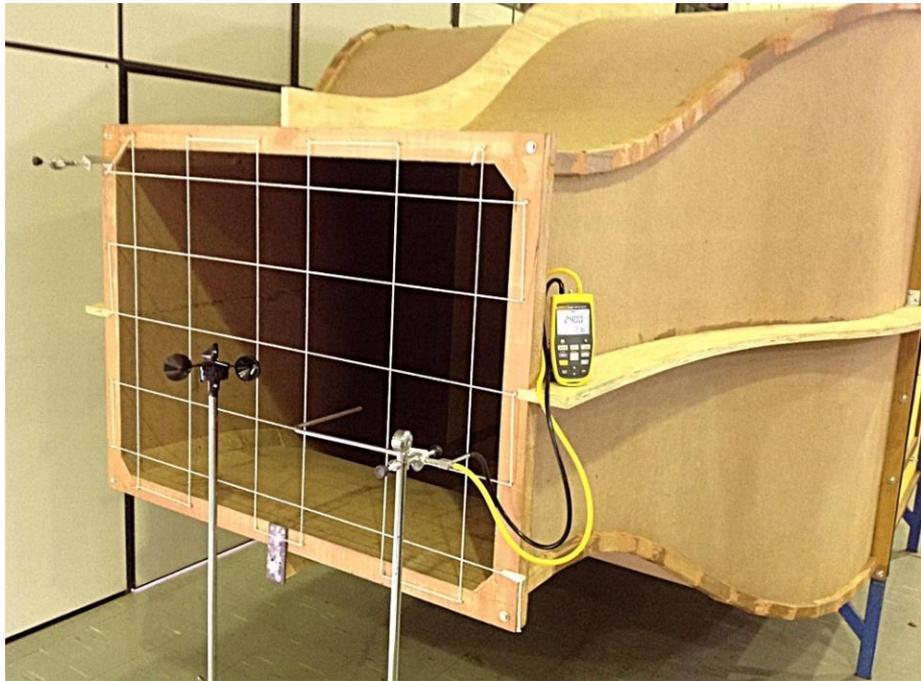


Figura nº5: Dispositivos serem utilizados para o monitoramento e controle do túnel de vento.

Atualmente, o projeto está quase que totalmente implementado com o túnel de vento já montado e em funcionamento, ilustrado nas Fotografias nº2 e nº3. A instrumentação (sensores, transdutores, medidores e sistema computacional).



Fotografia nº2: Vista geral do túnel de vento montado no IEE-USP.



Fotografia nº3: Vista parcial do túnel de vento do IEE-USP, em destaque a parte frontal (saída) com anemômetro e medidor portátil de velocidade do ar durante testes iniciais.

7. Conclusão

A participação da equipe envolvida nos trabalhos para desenvolvimento do laboratório resultou em grande aprendizado uma vez que se tratou de atividade não habitual das práticas do IEE-USP, colaborando sobremaneira para a integração e renovação da equipe em tempos de mudanças e novos direcionamentos da instituição.

O IEE-USP sempre teve atividades ligadas à praticas laboratoriais de eletricidade e o sistema de calibração de anemômetros redireciona pessoas a se envolver com novos equipamentos, novas grandezas e novas medidas nas práticas cotidianas de um laboratório.

Abre novas oportunidades ligadas a energia eólica em seus estudos específicos e também nas práticas laboratoriais. Além da própria calibração de anemômetros há oportunidades e possibilidades em atividades como avaliações e testes em outros dispositivos eólicos ou equipamentos que demandem testes e avaliações em túnel de vento que possam ser atendidos pela instalação disponível do Instituto. Atualmente, como apoio didático em dois projetos de microturbinas experimentais de alunos já foram executados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Prof. Dr. Fernando Martini Catalano pela cessão do projeto e ao IEE/USP pelo financiamento e apoio da oficina na construção do túnel de vento.

Referências:

[1] **Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012)**. Duque de Caxias, RJ. INMETRO, 2012.

[2] **ABNT NBR IEC 61400-12-1:2012 (Parte 12-1: Medições do desempenho de potência de Aerogeradores)**. Rio de Janeiro, RJ. ABNT, 2012.

[3] **NOTA TÉCNICA EPE-DEE-RE-057/2016 – r1 (Leilões de Energia: Instruções para as medições anemométricas e climatológicas em parques eólicos)**. Rio de Janeiro, RJ. EPE, Dezembro de 2016.

[4] **ABNT NBR ISO/IEC 17025:2017 Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração**. Rio de Janeiro, RJ. ABNT, 2017.

[5] CARRIL Jr., C.F. **Projeto, Construção e Calibração de um túnel de vento**. São Paulo, 1995. 100 f. Dissertação (Mestrado em engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

[6] UZUELI, A.G.; SHIMOMURA, A.R.P.; DUARTE, D. **Túnel de vento da FAUUSP - instrumento para ensaios de modelos físicos em conforto ambiental**. In: 1er Congreso Latinoamericano de Ingeniería del Viento, Montevideo, 2008.

[7] SANTANA, L.D.; CARMO, M.; CATALANO, F.M. **The Update of an Aerodynamic Wind Tunnel for Aeroacoustics Testing**. Journal of Aerospace Technology and Management. v. 6., n. 2, p. 111-118, 2014.

[8] DAHLBERG, J.Å. **An Investigation of Wind Tunnel Blockage Effects on Cup Anemometer Calibrations**. Technical Report FOI-R-2006-SE; Stockholm: Swedish Defence Research Agency, 2006.

[9] DAHLBERG, J.Å.; PEDERSEN, T.F.; BUSCHE, P. **ACCUWIND – Methods for Classification of Cup Anemometers**. Technical Report Risø-R-1555(EN). Roskilde: Risø National Laboratory, 2006.

[10] CATTAFESTA, L.; BAHR, C.; MATHEW, J. **Fundamentals of Wind-Tunnel Design**. In: Blockley, R.; Shyy, W. (Ed.). Encyclopedia of Aerospace Engineering. New York: John Wiley & Sons, 2010.

[11] BARLOW, B.J.; RAE W.H.; POPE, A. **Low Speed Wind Tunnel Testing**. 3ª ed. New York: John Wiley & Sons, 1999.

[12] MEHTA, R.D.; BRADSHAW, P. **Design Rules for Small Low-Speed Wind Tunnels**. Aeronautical Journal (Royal Aeronautical Society), v. 73, p. 443-449, 1979.

[13] NASA (National Aeronautics and Space Administration). **Wind Tunnel Testing**. Nancy Hall (Ed.). Washington – DC: NASA, 2005. Disponível em <<http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/tuntest.html>>. Acesso em: 24.05.2016.

[14] ISO Guide to the expression. of uncertainty in measurement (1995, ISBN 92-67-10188-9)

[15] Denmark Dahlberg, J-Å., Friis Pedersen, T., & Busche, P. **Methods for classification of cup anemometers..** - ACCUWIND -. Forskningscenter Risoe. Risoe-R, No. 1555(EN), 2006.