

**COMISSÃO TÉCNICA DE VAZÃO CT-13**  
**DICLA - Divisão de Credenciamento de Laboratórios de Calibração do**  
**INMETRO**

**RELATÓRIO FINAL DO**  
**4º PROGRAMA DE COMPARAÇÃO INTERLABORATÓRIAL EM**  
**ANEMOMETRIA**

**Março/2020**

## Resumo

O presente relatório apresenta o detalhamento e os resultados do 4º Programa de Comparação Interlaboratorial em Anemometria (3º PI de Anemometria) organizado e desenvolvido no âmbito da Subcomissão do Programa Interlaboratorial em Velocidade de Fluidos da CT-13 Comissão de Assessoramento às Atividades de Acreditação da Cgcre do Inmetro. Esse programa foi concebido em 10.03.2013 e finalizado em 10.12.2017. Contou com a participação dos laboratórios de anemometria do INMETRO, IPT, LAC/UFRGS, IMFIA da Universidad de La Republica do Uruguai e LACLYFA da Universidad Nacional da Argentina. O artefato utilizado na comparação foi um anemômetro ultrassônico 2D, fabricante Thies Clima, modelo 4.3820.01.310, número de série 06112677, conectado ao módulo de aquisição de dados Ammonit Measurement. A faixa de velocidades de ar foi de 4 m/s até 16 m/s seguindo procedimento estabelecido na norma ABNT NBR IEC 61400 (2012). Foram realizadas análises utilizando como referência a calibração inicial do anemômetro, realizada pelo laboratório alemão Wind Guard e também utilizando o método de Cox. Somente o LAB 2 apresentou resultados de erro normalizado acima de 1 nos dois métodos utilizados. Ao utilizar o Wind Guard como referência, a grande maioria dos laboratórios apresentou erro normalizado acima de 1, e apenas o LAB 5 e a verificação da Estabilidade ficaram com erro normalizado inferior a 1. Por outro lado, ao utilizar o método de Cox, tanto o LAB 5 quanto o LAB 2 e o Wind Guard ficaram com erro normalizado acima de 1, enquanto os demais laboratórios e a verificação da Estabilidade apresentaram resultados de erro normalizado inferior a 1.

**Palavras-chave:** túnel de vento, calibração de anemômetro, anemometria, ensaio de proficiência, comparação interlaboratorial, velocidade de fluidos.

## Sumário

|  |    |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO:                                     | 4  |
| 2. OBJETIVO  | 5  |
| 3. PARTICIPANTES                                   | 6  |
| 4. VALOR DE REFERÊNCIA                             | 6  |
| 5. METODOLOGIA                                     | 6  |
| 5.1 Laboratório de referência                      | 7  |
| 5.2 Método de Cox para cálculo do Erro Normalizado | 8  |
| 5.3 Tipo de circulação                             | 8  |
| 6. RESULTADOS E ANÁLISES                           | 9  |
| 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS                            | 17 |
| 7. EQUIPE TÉCNICA                                  | 19 |
| 8. BIBLIOGRAFIA                                    | 19 |
| ANEXO A - PROCEDIMENTO PARA MONTAGEM DO ANEMÔMETRO | 20 |
| A1. FIXAÇÃO  | 20 |
| A2. INSTALAÇÃO ELÉTRICA                            | 20 |
| A3. LISTAGEM DOS ITENS ENVIADOS                    | 20 |

## 1. INTRODUÇÃO:

Na 15ª reunião da Comissão Técnica de Vazão CT-13, realizada em 10.03.2013, a Subcomissão do Programa Interlaboratorial em Anemometria se reuniu e iniciou as discussões sobre o 4º Programa de Intercomparação Internacional em Anemometria (4º PI de Anemometria) voltado à calibração de sensores de velocidades para parques eólicos, de acordo com o procedimento descrito na norma ABNT NBR/IEC 61400-12-1:2012 - Anexo F, “Aerogeradores Parte 12-1: Medições do desempenho de potência de aerogeradores”.

Nessa reunião, foi definido que o laboratório coordenador do 4º PI de Anemometria seria o IPT. Essa coordenação se manteve até o final do programa sob a gerência do pesquisador Gilder Nader.

Nas reuniões da CT-13 realizadas em 2013 foram definidos os participantes do programa e, também, o artefato a ser utilizado.

Os participantes do 4º PI de Anemometria foram:

- INMETRO (Rio de Janeiro - Brasil);
- IPT (São Paulo - Brasil);
- LAC (Porto Alegre - Brasil);
- IMFIA (Montevideu - Uruguai); e
- LACLYFA (La Plata - Argentina).

Em virtude do IPT ser o coordenador do programa, se propôs a fornecer o artefato para o programa, no caso um anemômetro de anemômetro ultra-sônico 2D, fabricante Thies Clima, modelo 4.3820.01.310, número de série 06112677, conectado ao módulo de aquisição de dados Ammonit Measurement, mostrado na **Figura 1**.

Inicialmente, em 2013, foi definido que seria utilizado o método de Cox (2002) para determinação do erro normalizado. Posteriormente foi acordado que a referência seria a calibração inicial do anemômetro, realizada pelo laboratório Wind Guard da Alemanha. No entanto, após as análises dos resultados e pelo fato da metodologia de calibração do Wind Guard ter sido diferente das realizadas pelos demais laboratórios (ver detalhes na Seção 5.1), nesse relatório são apresentados os resultados por ambos os métodos, e realizada uma discussão sobre estes.

**Figura 1.** Artefato utilizado na intercomparação - anemômetro ultrassônico



Fonte: IPT

Na 16ª reunião, realizada em 07.08.2013, foi estabelecido que o Sr. Maurício Soares da CGCRE do INMETRO ficaria responsável pela compilação dos resultados e descaracterização dos laboratórios.

O presente relatório apresenta os resultados obtidos pelos laboratórios participantes do programa e, também, as curvas dos erros normalizados e uma avaliação dos resultados.

## **2. OBJETIVO**

O 4º PI de Anemometria foi concebido como o objetivo de permitir a comparação de medidas realizadas pelos laboratórios de calibração acreditados pela Cgcre do Inmetro, e pelos laboratórios da Argentina e Uruguai que pleiteiam as creditações em seus respectivos países. Essas calibrações foram realizadas de acordo com o procedimento da ISO IEC 61400-12-1-Anexo F, de 2012, na faixa de velocidades de 4 m/s até 16 m/s.

### 3. PARTICIPANTES

Em comum acordo entre os representantes dos laboratórios pertencentes à Subcomissão em Velocidade de Fluidos do CT-13 foram incluídos no 4º Programa de Comparação Interlaboratorial em Anemometria os laboratórios listados na Tabela 1.

**Tabela 1.** Laboratórios participantes do 3º Programa de Comparação Interlaboratorial em Anemometria

| Número da Acreditação | Nome do Laboratório  | Instituição ou Empresa   |
|-----------------------|--|--|
|                       | INMETRO  | INMETRO  |
| CAL 0162              | Centro de Metrologia Mecânica, Elétrica e de Fluidos-CTmetro | Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT                              |
|                       | Divisão de Metrologia em Dinâmica dos Fluidos                | Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia–INMETRO/DIMCI |
| CAL 0534              | Laboratório de Aerodinâmica das Construções                  | Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS                        |
|                       | IMFIA – Uruguai  | Instituto de Mecânica dos Fluidos e Engenharia Ambiental               |
|                       | LACLYFA - Argentina  | Laboratório de Capa Limite e Fluidodinâmica Ambiental                  |

### 4. VALOR DE REFERÊNCIA

Foram utilizados dois métodos de cálculo:

- Valor de referência obtido na calibração realizada pelo laboratório Wind Guard da Alemanha, em 04.07.2011; e
- Utilizando o método de Cox (2002)

### 5. METODOLOGIA

O procedimento de calibração seguirá recomendações da norma NBR 61400-12-1:2012-Anexo F, a qual define os seguintes requisitos e configurações básicas:

- Razão entre a área projetada do anemômetro, incluindo suporte, pela área da seção transversal do túnel de vento: 10% se for túnel de seção fechada e 5% se for túnel de seção aberta.
- Velocidades de calibração **ajustadas no padrão itinerante**: (4 – 6 – 8 – 10 – 12- 14 – 16 – 15 – 13 – 11 – 9 – 7 – 5) m/s.

- Ângulo de incidência do vento no anemômetro: 45° (ajustar o ângulo pelo display do sistema de aquisição de dados, cujo tutorial se encontra no Anexo A desse documento).
- Foram realizadas 3 rampas de calibração. Por isso, recomendou-se que fossem realizadas num único turno, por exemplo, ou pela manhã, ou pela tarde.
- Na planilha de dados foram apresentados os valores médios de:
  - Velocidade do padrão itinerante;
  - Velocidade do túnel de vento (velocidade de referência);
  - Incertezas expandidas para cada velocidade de calibração;
  - Fator de abrangência (k)
  - Área da seção transversal do túnel de vento ( $A_T$ );
  - Área projetada do anemômetro mais suporte ( $A_A$ );
  - Razão das áreas em porcentagem:  $A_A / A_T * 100$ ;
  - Temperatura de bulbo seco média do período de calibração;
  - Umidade relativa média do período de calibração;
  - Pressão atmosférica média do período de calibração;
  - Massa específica do ar média do período de calibração.

Na Tabela 1 é mostrado um exemplo da apresentação dos dados de calibração no certificado.

**Tabela 1 – Sugestão da forma de apresentação dos resultados da calibração**

| Valor de referência (m/s) | Valor indicado (m/s) | Desvio padrão experimental da média (m/s) | Incerteza expandida (%) | Fator de abrangência (k) (-) |
|---------------------------|----------------------|---|-------------------------|------------------------------|
|                           | 4                    |   |                         |                              |
|                           | 6                    |   |                         |                              |
|                           | 8                    |   |                         |                              |
|                           | 10                   |   |                         |                              |
|                           | 12                   |   |                         |                              |
|                           | 14                   |   |                         |                              |
|                           | 16                   |   |                         |                              |
|                           | 15                   |   |                         |                              |
|                           | 13                   |   |                         |                              |
|                           | 11                   |   |                         |                              |
|                           | 9                    |   |                         |                              |
|                           | 7                    |   |                         |                              |
|                           | 5                    |   |                         |                              |

## 5.1 Laboratório de referência

Por decisão da subcomissão, o laboratório de referência será o *Deutsche WindGuard Wind Tunnel Services GmbH Varel*, acreditado ao *Deutscher Kalibrierdienst - DKD*, que realizou a calibração original do anemômetro em 07/2011, e desde então esse anemômetro foi mantido guardado em sua caixa. Deve ficar claro

que somente o coordenador desse 4º PI terá acesso aos dados do certificado de calibração original.

O erro normalizado ( $E_n$ ) será calculado para cada uma das 13 velocidades de calibração, conforme metodologia de cálculo descrita a seguir:

$$E_n = \left| \frac{v_{lab} - v_{ref}}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2}} \right| \leq 1 \quad (1)$$

onde:

$v_{lab}$  = velocidade medida no laboratório participante

$v_{ref}$  = velocidade no laboratório referência

$U_{lab}$  = Incerteza expandida do laboratório participante.

$U_{ref}$  = Incerteza expandida do valor médio de referência.

O laboratório Wind Guard utilizou um procedimento de calibração diferente dos demais laboratórios do 4º PI de Anemometria. Esse laboratório da Alemanha realizou a aquisição dos dados em sinal, transformando-os posteriormente em valores de velocidade. Enquanto os laboratórios participantes do 4º PI de Anemometria fizeram a leitura diretamente no display da datalogger. Esse display, apesar de indicar duas casas decimais, apresenta resolução de apenas uma casa decimal, com resolução de 0,1 m/s, valor superior ao das incertezas expandidas declaradas dos laboratórios.

## 5.2 Método de Cox para cálculo do Erro Normalizado

Devido à diferença de metodologia entre a calibração realizada pelo Wind Guard e pelos demais laboratórios do 4º PI de Anemometria, foi realizada, também, uma análise pelo método de Cox, que era, inclusive, a proposta original de análise desse programa. O procedimento de cálculo de Cox pode ser encontrado no artigo intitulado *The evaluation of key comparison data* (Cox, 2002) e foi realizada por meio do suplemento para planilha Excel denominado *setup\_Intercomp-IPT*, versão 1.6, desenvolvido pelo IPT (2018), o qual é utilizado como suplemento da planilha Excel. Maiores instruções da utilização desse suplemento, devem ser consultados os manuais do mesmo.

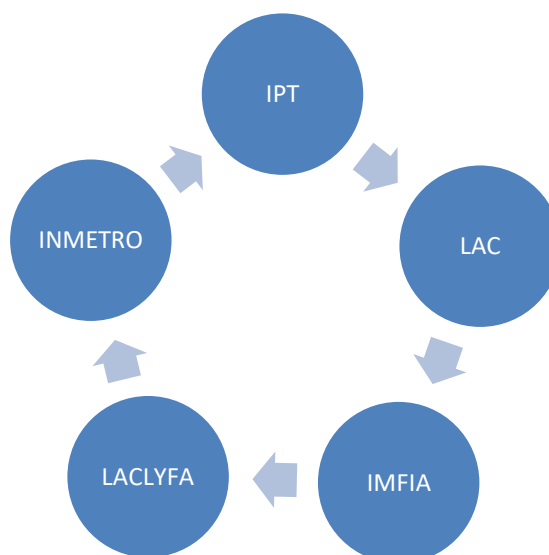
## 5.3 Tipo de circulação

A ordem de circulação em “roda” foi adotada para este programa, e definida por logística motivada por localização geográfica dos laboratórios participantes. A ordem de circulação é apresentada nas Figuras 1.

No caso de suspeita de instabilidade ou defeito de algum padrão, o laboratório deverá reportar o fato à subcomissão para decisão da continuidade ou não do PI.



**Figura 2.** Ordem de circulação do padrão itinerante



## 6. RESULTADOS E ANÁLISES

Os laboratórios foram descaracterizados pelo representante da Dicla na CT-13 e receberam as identificações: LAB 1, LAB 2, LAB 3, LAB 4, LAB 5 e LAB 6. Os resultados das calibrações de cada um desses laboratórios estão apresentados nas Tabelas 2 até 7. Pelo fato dos LAB 1 e LAB 6 não terem apresentado os resultados das calibrações nos valores inteiro de velocidades indicadas, como solicitado nesse programa, foi realizada uma regressão linear dos valores obtidos.

**Tabela 2.** Resultados da calibração realizada pelo LAB 1. Na regressão linear foi obtido como coeficiente angular  $a = 1,000604$ , coeficiente linear  $b = -0,02302$  e coeficiente de correlação  $R^2 = 0,999986$

| Valor de referência (m/s) | Valor indicado (m/s) | Regressão linear |            | Desvio padrão experimental da média (m/s) | Incerteza expandida (%) | Fator de abrangência (k) (-) |
|---------------------------|----------------------|------------------|------------|---|-------------------------|------------------------------|
|                           |                      | Ref (m/s)        | Ind. (m/s) |   |                         |                              |
| 3,97                      | 4,01                 | 3,98             | 4          | 0,01                                      | 1,65                    | 2,15                         |
| 6,01                      | 6,03                 | 5,98             | 6          | 0,01                                      | 0,75                    | 2,13                         |
| 7,97                      | 7,99                 | 7,98             | 8          | 0,02                                      | 0,46                    | 2,11                         |
| 10,01                     | 10,05                | 9,98             | 10         | 0,03                                      | 0,33                    | 2,11                         |
| 12,00                     | 12,01                | 11,98            | 12         | 0,03                                      | 0,28                    | 2,13                         |
| 13,99                     | 14,01                | 13,99            | 14         | 0,02                                      | 0,34                    | 2,04                         |
| 16,03                     | 16,04                | 15,99            | 16         | 0,04                                      | 0,30                    | 2,07                         |
| 15,07                     | 15,09                | 14,99            | 15         | 0,02                                      | 0,32                    | 2,05                         |
| 13,02                     | 13,02                | 12,98            | 13         | 0,02                                      | 0,38                    | 2,02                         |
| 10,97                     | 11,00                | 10,98            | 11         | 0,03                                      | 0,30                    | 2,13                         |
| 8,96                      | 8,96                 | 8,98             | 9          | 0,02                                      | 0,38                    | 2,11                         |
| 7,03                      | 7,04                 | 6,98             | 7          | 0,02                                      | 0,57                    | 2,13                         |
| 5,01                      | 5,02                 | 4,98             | 5          | 0,01                                      | 1,06                    | 2,13                         |

Fonte: LAB 1

**Tabela 3.** Resultados da calibração realizada pelo LAB 2.

| Valor de referência (m/s) | Valor indicado (m/s) | Desvio padrão experimental da média (m/s) | Incerteza expandida (%) | Fator de abrangência (k) (-) |
|---------------------------|----------------------|---|-------------------------|------------------------------|
| 4,07                      | 4                    | 0,09                                      | 2,11                    | 2,05                         |
| 6,14                      | 6                    | 0,17                                      | 1,59                    | 2,04                         |
| 8,14                      | 8                    | 0,18                                      | 1,43                    | 2,04                         |
| 10,15                     | 10                   | 0,20                                      | 1,40                    | 2,06                         |
| 12,18                     | 12                   | 0,24                                      | 1,32                    | 2,07                         |
| 14,17                     | 14                   | 0,23                                      | 1,40                    | 2,12                         |
| 16,22                     | 16                   | 0,29                                      | 1,29                    | 2,09                         |
| 15,21                     | 15                   | 0,29                                      | 1,32                    | 2,10                         |
| 13,20                     | 13                   | 0,26                                      | 1,37                    | 2,10                         |
| 11,16                     | 11                   | 0,22                                      | 1,32                    | 2,06                         |
| 9,16                      | 9                    | 0,20                                      | 1,36                    | 2,04                         |
| 7,10                      | 7                    | 0,14                                      | 1,46                    | 2,03                         |
| 5,14                      | 5                    | 0,16                                      | 1,75                    | 2,04                         |

Fonte: LAB 2

**Tabela 4.** Resultados da calibração realizada pelo LAB 3.

| Valor de referência (m/s) | Valor indicado (m/s) | Desvio padrão experimental da média (m/s) | Incerteza expandida (%) | Fator de abrangência (k) (-) |
|---------------------------|----------------------|---|-------------------------|------------------------------|
| 4,02                      | 4                    | 0,02                                      | 1,74                    | 2                            |
| 6,00                      | 6                    | 0,02                                      | 1,34                    | 2                            |
| 8,03                      | 8                    | 0,02                                      | 1,19                    | 2                            |
| 10,04                     | 10                   | 0,03                                      | 1,12                    | 2                            |
| 12,06                     | 12                   | 0,04                                      | 1,09                    | 2                            |
| 14,04                     | 14                   | 0,04                                      | 1,07                    | 2                            |
| 16,06                     | 16                   | 0,04                                      | 1,05                    | 2                            |
| 15,06                     | 15                   | 0,04                                      | 1,06                    | 2                            |
| 13,07                     | 13                   | 0,01                                      | 1,07                    | 2                            |
| 11,02                     | 11                   | 0,06                                      | 1,10                    | 2                            |
| 9,04                      | 9                    | 0,02                                      | 1,15                    | 2                            |
| 7,03                      | 7                    | 0,02                                      | 1,24                    | 2                            |
| 5,02                      | 5                    | 0,03                                      | 1,48                    | 2                            |

Fonte: LAB 3

**Tabela 5.** Resultados da calibração realizada pelo LAB 4.

| Valor de referência (m/s) | Valor indicado (m/s) | Desvio padrão experimental da média (m/s) | Incerteza expandida (%) | Fator de abrangência (k) (-) |
|---------------------------|----------------------|---|-------------------------|------------------------------|
| 4,01                      | 4                    | 0,02                                      | 0,76                    | 2                            |
| 6,02                      | 6                    | 0,02                                      | 0,51                    | 2                            |
| 8,00                      | 8                    | 0,01                                      | 0,25                    | 2                            |
| 10,00                     | 10                   | 0,01                                      | 0,12                    | 2                            |
| 12,03                     | 12                   | 0,06                                      | 0,96                    | 2                            |
| 14,03                     | 14                   | 0,06                                      | 0,82                    | 2                            |
| 16,00                     | 16                   | 0,01                                      | 0,07                    | 2                            |
| 15,00                     | 15                   | 0,01                                      | 0,08                    | 2                            |
| 13,00                     | 13                   | 0,01                                      | 0,18                    | 2                            |
| 11,00                     | 11                   | 0,01                                      | 0,10                    | 2                            |
| 9,02                      | 9                    | 0,03                                      | 0,58                    | 2                            |
| 7,04                      | 7                    | 0,01                                      | 0,16                    | 2                            |
| 4,97                      | 5                    | 0,04                                      | 1,61                    | 2                            |

Fonte: LAB 4

**Tabela 6.** Resultados da calibração realizada pelo LAB 5.

| Valor de referência (m/s) | Valor indicado (m/s) | Desvio padrão experimental da média (m/s) | Incerteza expandida (%) | Fator de abrangência (k) (-) |
|---------------------------|----------------------|---|-------------------------|------------------------------|
| 3,91                      | 4                    | 0,01                                      | 2,23                    | 2                            |
| 5,93                      | 6                    | 0,00                                      | 1,26                    | 2                            |
| 7,88                      | 8                    | 0,00                                      | 1,02                    | 2                            |
| 9,91                      | 10                   | 0,08                                      | 0,94                    | 2                            |
| 11,81                     | 12                   | 0,01                                      | 0,91                    | 2                            |
| 13,88                     | 14                   | 0,08                                      | 0,90                    | 2                            |
| 15,80                     | 16                   | 0,09                                      | 0,89                    | 2                            |
| 14,84                     | 15                   | 0,00                                      | 0,90                    | 2                            |
| 12,87                     | 13                   | 0,01                                      | 0,90                    | 2                            |
| 10,84                     | 11                   | 0,00                                      | 0,92                    | 2                            |
| 8,92                      | 9                    | 0,01                                      | 0,97                    | 2                            |
| 6,89                      | 7                    | 0,00                                      | 1,11                    | 2                            |
| 4,95                      | 5                    | 0,01                                      | 1,56                    | 2                            |

Fonte: LAB 5

**Tabela 7.** Resultados da calibração realizada pelo LAB 6. Na regressão linear foi obtido como coeficiente angular  $a = 0,987063$ , coeficiente linear  $b = 0,011189$  e coeficiente de correlação  $R^2 = 0,999988$

| Valor de referência (m/s) | Valor indicado (m/s) | Regressão linear |            | Desvio padrão experimental da média (m/s) | Incerteza expandida (%) | Fator de abrangência (k) (-) |
|---------------------------|----------------------|------------------|------------|---|-------------------------|------------------------------|
|                           |                      | Ref (m/s)        | Ind. (m/s) |   |                         |                              |
| 3,850                     | 3,905                | 3,96             | 4          | não fornecido                             | 1,30                    | 2                            |
| 6,098                     | 6,163                | 5,93             | 6          |   | 0,82                    | 2                            |
| 8,247                     | 8,331                | 7,91             | 8          |   | 0,61                    | 2                            |
| 10,306                    | 10,458               | 9,88             | 10         |   | 0,49                    | 2                            |
| 12,290                    | 12,429               | 11,86            | 12         |   | 0,41                    | 2                            |
| 14,301                    | 14,494               | 13,83            | 14         |   | 0,35                    | 2                            |
| 16,083                    | 16,277               | 15,8             | 16         |   | 0,31                    | 2                            |
| 15,092                    | 15,273               | 14,82            | 15         |   | 0,33                    | 2                            |
| 13,300                    | 13,456               | 12,84            | 13         |   | 0,38                    | 2                            |
| 11,333                    | 11,479               | 10,87            | 11         |   | 0,44                    | 2                            |
| 9,293                     | 9,389                | 8,89             | 9          |   | 0,54                    | 2                            |
| 7,237                     | 7,326                | 6,92             | 7          |   | 0,69                    | 2                            |
| 4,972                     | 5,010                | 4,95             | 5          |   | 1,01                    | 2                            |

Fonte: LAB 6

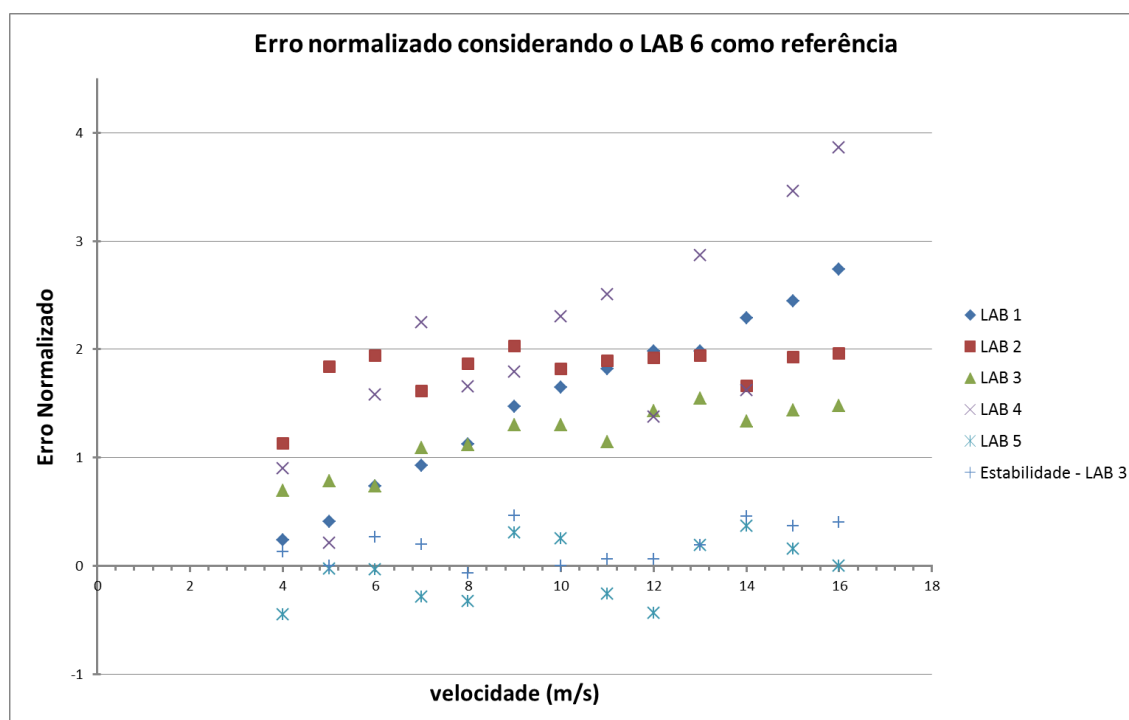
**Tabela 8.** Resultados da avaliação da estabilidade do anemômetro realizada pelo LAB 3.

| Valor de referência (m/s) | Valor indicado (m/s) | Desvio padrão experimental da média (m/s) | Incerteza expandida (%) | Fator de abrangência (k) (-) |
|---------------------------|----------------------|---|-------------------------|------------------------------|
| 3,98                      | 4                    | 0,01                                      | 3,56                    | 2                            |
| 5,97                      | 6                    | 0,01                                      | 2,37                    | 2                            |
| 7,9                       | 8                    | 0,04                                      | 1,79                    | 2                            |
| 9,88                      | 10                   | 0,01                                      | 1,44                    | 2                            |
| 11,87                     | 12                   | 0,01                                      | 1,20                    | 2                            |
| 13,9                      | 14                   | 0,02                                      | 1,03                    | 2                            |
| 15,87                     | 16                   | 0,01                                      | 1,03                    | 2                            |
| 14,88                     | 15                   | 0,01                                      | 1,03                    | 2                            |
| 12,87                     | 13                   | 0,03                                      | 1,12                    | 2                            |
| 10,88                     | 11                   | 0,01                                      | 1,31                    | 2                            |
| 8,96                      | 9                    | 0,01                                      | 1,58                    | 2                            |
| 6,95                      | 7                    | 0,01                                      | 2,04                    | 2                            |
| 4,95                      | 5                    | 0,01                                      | 2,86                    | 2                            |

Fonte: Teste de Estabilidade – LAB 3.

Na Figura 3 é mostrado o gráfico com os erros normalizados obtidos por cada laboratório em função das velocidades de referência do LAB 6. Percebe-se por meio desses resultados que apenas o LAB 5 e a Estabilidade ficaram com o erro normalizado inferior a 1. A grande discrepância dos resultados obtidos dos demais laboratório, levou à realização da análise pelo método de Cox, com resultados mostrados na Figura 4.

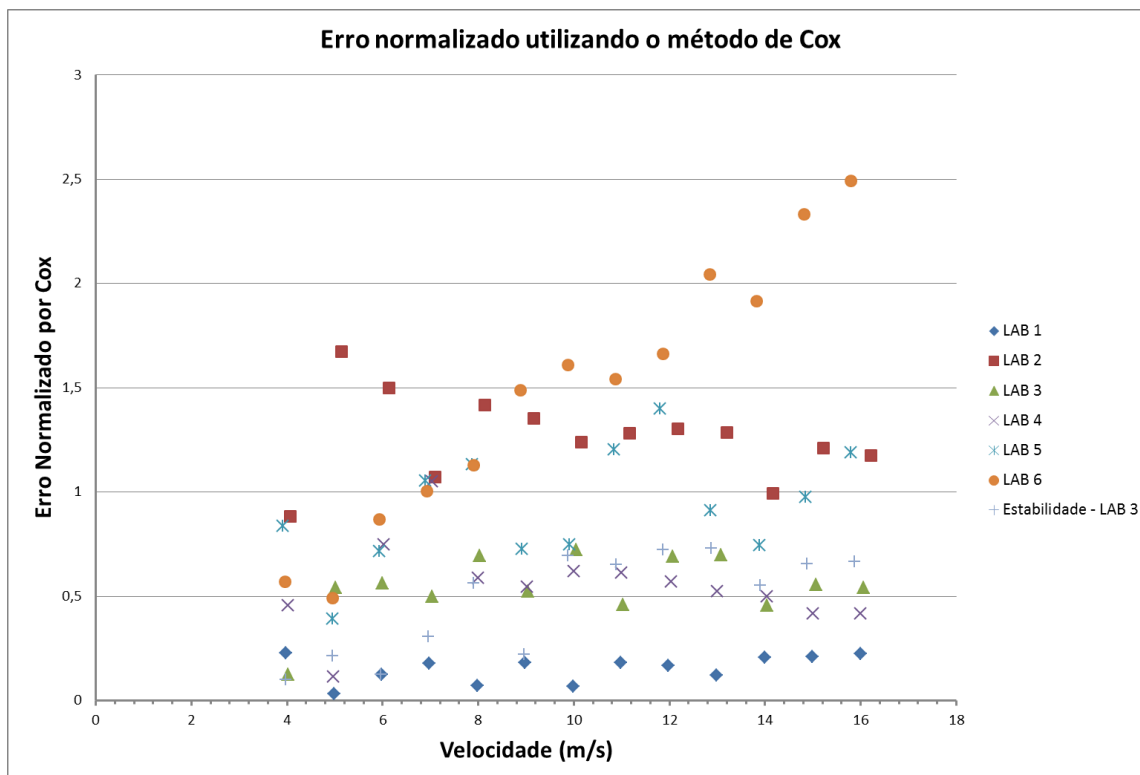
**Figura 3.** Resultados dos erros normalizados de cada laboratório, utilizando como referência o LAB 6, Wind Guard, da Alemanha



Fonte: autores

Como era de se esperar, ao realizar a análise pelo método de Cox, que toma como base os resultados de todos os laboratórios, nota-se que o Laboratório de Referência, o LAB 6, é que mais destoa dos demais. Além dele, outro laboratório que apresentou erro normalizado acima de 1 foi o LAB 2. Também foram obtidos quatro pontos do LAB 5 acima do erro normalizado 1. A análise dessa discrepância está realizada a seguir, e deve ser analisada por meio da Figura 5.

**Figura 4.** Resultados dos erros normalizados utilizando o método de Cox



Fonte: autores

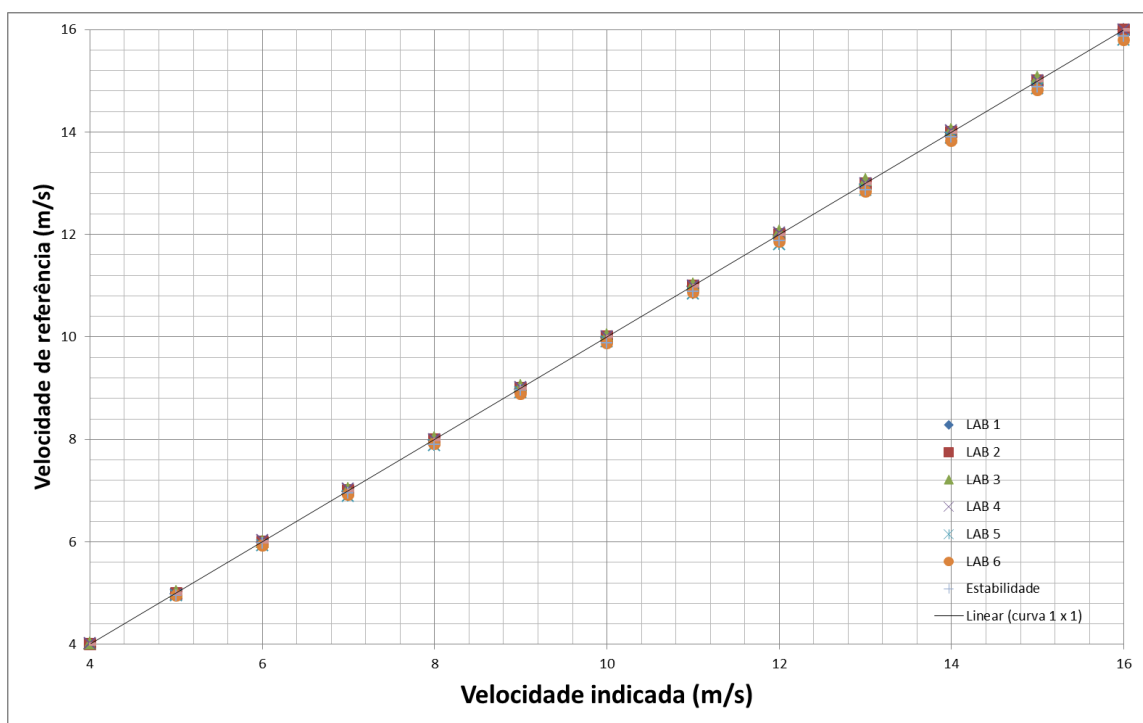
Na Figura 5 são mostradas as curvas de velocidade indicada por velocidade de referência obtida por cada laboratório participante do 4º PI. A linha cheia delimita a relação para a qual a velocidade indicada e velocidade de referência são exatamente as mesmas, ou seja, essa linha foi utilizada no gráfico apenas para delimitar os laboratórios que apresentaram erros positivos e erros negativos nas calibrações.

Analisando os resultados mostrados na Figura 5, observa-se que os laboratórios LAB 5, LAB 6 (referência) e Estabilidade apresentam valores de referência abaixo da linha cheia e os demais laboratórios, LAB 1, LAB 2, LAB 3 e LAB 4 apresentam erros acima da linha cheia. A análise do LAB 3 e Estabilidade será realizada à parte, por serem o mesmo laboratório, com calibrações realizadas num intervalo de 3 anos.

O LAB 6 é acreditado pelo DKD e também pela MEASNET. Fez a aquisição de sinais, o que garantiu uma aquisição de dados com maior resolução. Esse laboratório declarou uma taxa de blocagem ao escoamento, devido ao posicionamento do anemômetro, de 0,027, e também informou no certificado que não realizou correção de blocagem. No entanto, esse laboratório declara que todas as incertezas expandidas, para toda a faixa de calibração é de 0,05 m/s. Porém, os erros do anemômetro são

positivos, de 0,05 m/s para as velocidades mais baixas e de 0,20 m/s para as velocidades mais altas. Ou seja, as incertezas expandidas estão bem abaixo dos erros das calibrações.

**Figura 5.** Resultados de velocidade indicada por velocidade de referência de cada laboratório



Fonte: autores

O LAB 5 ajustou os valores lidos por meio do display do datalogger, e como já foi informado, a resolução desse display era de 0,1 m/s. Essa laboratório declarou uma taxa de bloqueio ao escoamento, devido ao posicionamento do anemômetro, de 0,027. Não foi informado se realizou correção de bloqueio. As incertezas expandidas variam de 0,08 m/s para velocidades mais baixas até 0,14 m/s para velocidades mais altas. E os erros, também positivos, são da ordem de 0,05 m/s para as velocidades mais baixas e de 0,20 m/s para as velocidades mais altas. Nota-se, nesse caso, uma concordância entre os erros do LAB 5 com o LAB 6, o que justifica a curva do erro normalizado ter sido inferior a 1, quando foi utilizado o LAB 6 como referência. E, o fato do LAB 5 ter utilizado incertezas expandidas superiores em até 3 vezes ao do LAB 5, também justifica o fato deste laboratório apresentar um erro normalizado aceitável ao ser calculado pela metodologia de Cox.

O LAB 1 também ajustou os valores lidos por meio do display do datalogger. No entanto, esse laboratório não ajustou todas as leituras para que se fossem lidos somente os valores inteiros, e dessa forma, foi necessário realizar uma regressão linear dos dados. Esse laboratório declarou uma taxa de blocagem ao escoamento, devido ao posicionamento do anemômetro, de 0,013. Não foi informado se realizou correção de blocagem. As incertezas expandidas variam de 0,03 m/s para velocidades entre 9 m/s e 12 m/s, 0,05 m/s para velocidades mais altas, e foi obtido um valor de 0,07 m/s para a velocidade de 4 m/s. E os erros, também positivos, ficaram entre 0,00 e 0,04 m/s. Nota-se que os erros obtidos por esse laboratório foram bem inferiores aos obtidos pelo LAB 6, justificando assim esse laboratório ter apresentado valores de erro normalizado acima de 1 ao utilizar o LAB 6 como referência, enquanto que pelo método de Cox apresentou erro normalizado bem abaixo de 1. Deve ser notado também que esse laboratório apresentou valores de incerteza expandida bem inferiores às de outros laboratórios, e que seu erro normalizado por Cox ficou baixo, exatamente porque o erro do equipamento também foi baixo.

O LAB 2 foi o único laboratório a apresentar erros normalizados acima de 1 para ambas as metodologias utilizadas. Esse laboratório também ajustou os valores lidos por meio do display do datalogger. Esse laboratório declarou uma taxa de blocagem ao escoamento, devido ao posicionamento do anemômetro, de 0,028. Não foi informado se realizou correção de blocagem. As incertezas expandidas variam de 0,08 m/s para velocidades mais baixas até 0,21 m/s para velocidades mais altas. Esse laboratório apresentou erros negativos, variando entre -0,07 m/s para velocidades mais baixas e -0,22 m/s para velocidades mais altas. Embora as incertezas expandidas tenham sido altas, em relação aos demais laboratórios, o fato dos erros também terem sido altos, impactou na elevação do erro normalizado do LAB 2.

O LAB 4 também ajustou os valores lidos por meio do display do datalogger. Esse laboratório declarou uma taxa de blocagem ao escoamento, devido ao posicionamento do anemômetro, de 0,029. Não foi informado se realizou correção de blocagem. As incertezas expandidas não apresentaram valores crescentes com o aumento da velocidade do vento. Por exemplo, foi declarada uma incerteza expandida de 0,01 m/s para a velocidade de 15 m/s, e uma incerteza expandida de 0,11 m/s para a velocidade de 16 m/s. Além disso, foi necessário solicitar duas vezes a curva de calibração do anemômetro realizada pelo LAB 4, pois inicialmente as incertezas

expandidas declaradas variavam de 0,60 m/s para velocidades mais baixas até 5,8 m/s para velocidades mais altas. E, ao analisar esses resultados, comparando com os dos demais laboratórios verifica-se uma inconsistência dos valores das incertezas expandidas, tanto das primeiras incertezas expandidas, as de valores altos, quanto das incertezas expandidas corrigidas, as de valores extremamente baixos. Pelo método de Cox esse laboratório apresentou erro normalizado abaixo de 1, pois os erros indicados foram negativos e estavam entre 0 e -0,04 m/s. Ao utilizar o LAB 6 como referência, o LAB 4 apresentou erro normalizado muito alto, devido à baixa incerteza expandida declarada e ao fato de seu erro ser positivo, enquanto o erro do LAB 6 era negativo.

As análises dos resultados do LAB 3 e da verificação da Estabilidade chamam a atenção, pois ambas as calibrações foram realizadas pelo mesmo laboratório, e essas calibrações foram realizadas em 2014 e a verificação da estabilidade em 2017. Nota-se que na calibração de 2014 foram obtidos erros negativos, enquanto que na calibração de 2017 foram obtidos erros positivos. Ao analisar detalhadamente o que ocorreu nesse intervalo de tempo, foi verificado que o transdutor de pressão de 2014 apresentou defeito no ano de 2015, e dessa forma foi substituído por um com maior resolução e estabilidade. Também foi comentado ao longo das reuniões do CT-13, das subcomissões de velocidade do ar, a questão da resolução do display do artefato, que embora este apresentasse duas casas decimais, a resolução era de 0,1 m/s. Dessa forma, ao realizar o teste da estabilidade, esta ocorreu de forma mais criteriosa. Por exemplo, para cada ponto de leitura, foi realizada uma variação da velocidade do túnel de vento para as quais o valor lido no display não sofresse variação, e o valor apresentado na planilha de calibração era a média da leitura de cada um desses pontos, por isso, houve um aumento incerteza expandida da calibração, na verificação da estabilidade do artefato, especialmente para as velocidades mais baixas. Ambas as alterações, tanto do transdutor de pressão, quanto da metodologia de calibração, podem ter feito com que os resultados obtidos no teste de Estabilidade fizessem os resultados dessa calibração se aproximarem dos valores da calibração inicial realizada pelo LAB 6, o Wind Guard da Alemanha.

O LAB 3, que também ajustou os valores lidos por meio do display do datalogger e declarou uma taxa de blocagem ao escoamento, devido ao posicionamento do anemômetro, de 0,056, que é um valor aceito para túneis de vento de seção aberta, cujo limite é 0,1 para taxa de blocagem. Esse laboratório também não informou se



realizou correção de blocagem. As incertezas expandidas variam de 0,07 m/s para velocidades mais baixas até 0,17 m/s para velocidades mais altas. Esse laboratório apresentou erros negativos, variando entre -0,02 m/s para velocidades mais baixas e -0,07 m/s para velocidades mais altas. Na análise por Cox apresentou erro normalizado inferior a 1, e na análise, utilizando o LAB 6 como referência, apresentou erro normalizado superior a 1. Isso ocorreu porque seu erro foi negativo, enquanto o erro do LAB 6 foi positivo.

A verificação da Estabilidade, também realizada pelo LAB 3, apresentou incertezas expandidas variando de 0,14 m/s para velocidades mais baixas até 0,16 m/s para velocidades mais altas. Na verificação da Estabilidade esse laboratório apresentou erros positivos, variando entre 0,02 m/s para velocidades mais baixas e 0,13 m/s para velocidades mais altas, que foram erros compatíveis com os obtidos pelo LAB 6. Em ambas as análises, por Cox ou utilizando o LAB 6 como referência, os erros normalizados da verificação da Estabilidade foram inferiores a 1.

## **7. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Foram utilizados dois métodos para determinação do erro normalizado. Um dos métodos utilizou o LAB 6 como laboratório de referência e no outro foi utilizado o método de Cox. De acordo com o método utilizado algum laboratório apresentava erro normalizado superior a 1. Porém, somente o LAB 2 apresentou erro normalizado superior a 1 nos dois métodos de cálculo.

Verificou-se que as incertezas expandidas do LAB 1 e do LAB 4 eram muito inferiores às dos demais laboratórios, especialmente as incertezas expandidas do LAB 4, que mesmo para um valor crescente de velocidade apresentou resultados tais como: 0,01 m/s para a velocidade de 15 m/s e de 0,11 m/s para a velocidade de 16 m/s. Sugere-se que, especialmente o LAB 4 reveja seu procedimento de cálculo de incerteza. Pois, houve necessidade de solicitar por duas vezes os dados de calibração, porque inicialmente as incertezas expandidas declaradas variaram de 0,6 m/s até 5,8 m/s. Deve ser notado que o LAB 6, que passa por processos de acreditação do DKD da Alemanha e da MEASNET apresentaram incertezas expandidas de 0,05 m/s para toda a faixa, enquanto os LAB 1 e LAB 4 apresentaram valores inferiores a esse.

Assim, também se recomenda ao LAB 1 rever seu procedimento de cálculo de incerteza.

O LAB 2 apresentou erro normalizado superior a 1 em todas as análises realizadas.

Os LAB 5 e a verificação da Estabilidade apresentaram erro normalizado inferior a 1 quando utilizado o LAB 6 como laboratório de referência. Os demais laboratórios apresentaram erro normalizado superior a 1.

Os LAB 1, LAB 3, LAB 4 e a verificação da Estabilidade apresentaram erro normalizado inferior a 1 quando utilizado o método de Cox. O LAB 5 apresentou apenas quatro resultados acima do erro normalizado 1. Os LAB 2 e LAB 6 apresentaram erro normalizado superior a 1 em pelo menos 10 pontos.

Embora o LAB 3 tenha feito a verificação da Estabilidade do Artefato, os resultados são distintos, sendo o da Estabilidade melhor. A justificativa desse laboratório se deve à troca do transdutor de pressão por um com maior resolução e estabilidade e, principalmente, a terem realizado a calibração com maior cuidado, verificando todo o intervalo de variação da velocidade do vento, sem que ocorresse variação no valor indicado.

Como aprendizagem desse 4º PI de Anemometria deve ficar registrado que um artefato deve possuir a maior resolução e estabilidade possível, para se evitar que pequenos erros de leitura impactem nos valores dos erros lidos e conseqüentemente dos erros normalizados. O Artefato foi calibrado com um indicador com resolução baixa, o que pode ter impactado negativamente em todas as calibrações realizadas pelos laboratórios participantes de 4º PI de Anemometria.

Também deve ser destacado aos laboratórios que apresentaram incertezas muito baixas (menores de 0,05 m/s, utilizando o LAB 6, Wind Guard, como referência) que revejam seu procedimento de cálculo de incerteza.

## 7. EQUIPE TÉCNICA

- IPT: Gilder Nader e Andre Barsaglini da Costa.
- LAC/UFRGS: Acir Mércio Loredou-Souza.
- INMETRO: Fábio Ouverney Costa
- IMFIA: José Cataldo
- LACLYFA: Julio Marañion

São Paulo, 25 de março de 2020.

---

Divisão de Metrologia em Dinâmica dos Fluidos  
Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia -  
Inmetro

---

Centro de Metrologia Mecânica, Elétrica e de Fluidos  
Instituto de Pesquisas Tecnológicas-IPT

---

Instituto de Mecânica de Los Fluidos  
Universidad de la Republica do Uruguai

---

Laboratorio de Capa Limite Atmosférica  
Universidad Nacional da Argentina

---

Laboratório de Aerodinâmica das Construções  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## 8. BIBLIOGRAFIA

ABNT NBR IEC 61400-12-1-Anexo F – **Procedimento de calibração de anemômetros de copos**, 2012

COX, M.G. **The evaluation of key comparison data**, *Metrologia*, 2002.

LEGG, R.C., **The Calibration of Anemometers in a Six-inch Open Jet Wind Tunnel**, *Heating and Ventilation Engineering*, pp 57-63, agosto, 1970.

## ANEXO A - PROCEDIMENTO PARA MONTAGEM DO ANEMÔMETRO

### A1. FIXAÇÃO

O anemômetro deverá ser montado em um suporte tubular com diâmetro externo máximo de 48,3 mm e mínimo de 43 mm. Deverá ser fixado ao suporte através dos 4 parafusos laterais.

A calibração é realizada com o equipamento posicionado em 45°. Para se obter esse ângulo exata, deve-se ajustar o anemômetro até que a indicação de direção do vento no *data logger* seja 45°. A faixa vermelha em uma das hastes do sensor indica a direção norte (0°).

Durante a montagem é necessário ter cuidado com as hastes dos sensores ultrassônicos, pois qualquer deformação inutilizará as calibrações anteriores do equipamento. Não se deve segurar, tocar ou apoiar as hastes dos sensores do equipamento sob qualquer circunstância.

### A2. INSTALAÇÃO ELÉTRICA

Para a alimentação dos equipamentos será necessária uma fonte de alimentação capaz de fornecer tensão elétrica de saída estável de 24V DC. A conexão com a fonte deverá ser feita pelos fios vermelho (+) e transparente (-) conforme indicado na Figura A1. Não será necessária a inserção de baterias no *data logger* ou qualquer outra conexão entre os equipamentos.

Figura A1 - Cabo para conexão e alimentação dos equipamentos



Fonte: IPT

### A3. LISTAGEM DOS ITENS ENVIADOS

1. 01 Anemômetro Ultrassônico 2D Thies Clima 3.3820.01.310 nº de série 06112677 (Figura A2);
2. 01 Data Logger Ammonit METEO – 32 nº de série C12 0121 (Figura A3);

3. 01 Cabo para alimentação e conexão do anemômetro ao *data logger* (Figura A4);
4. 01 Manual do anemômetro (Figura A5); e
5. 01 Manual do *data logger* (Figura A6).

Figura A2 – Anemômetro Ultrassônico



Fonte: IPT

Figura A3 – Data Logger



Fonte: IPT

Figura A4 - Cabo



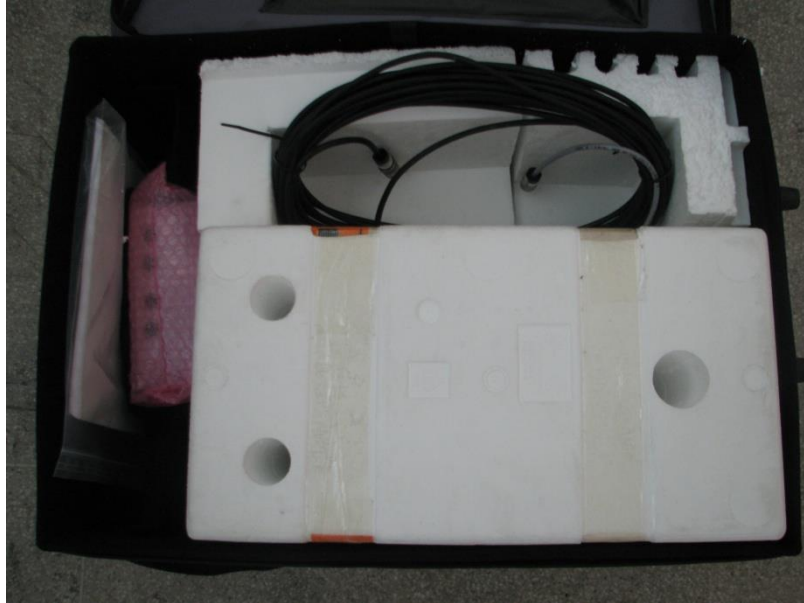
Fonte: IPT

Figura A5 – Manual do anemômetro e data logger



Fonte: IPT

Figura A6 – Disposição dos itens enviados na mala



Fonte: IPT