

## A incerteza de medição de higrômetro de ponto de orvalho experimental

### The measurement uncertainty of experimental dew point hygrometer

Margarido GN\*§, Frajuba C\*£, Bortoli FS\*

\*Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, IFSP, São Paulo, SP, Brasil. §Universidade Federal do ABC, UFABC, Santo André, SP, Brasil. £Universidade Federal do Rio Grande, FURG, Rio Grande, RS, Brazil.

**Resumo.** Este artigo apresenta o cálculo de incerteza do tipo B de um higrômetro de ponto de orvalho experimental. A metodologia considera as características de funcionamento do dispositivo que mede a umidade a partir das medidas de temperatura de condensação do vapor de água contido no ar, com a formação de gotículas de água (ponto de orvalho), e da temperatura ambiente do ar. Assim sendo, são trabalhadas as incertezas envolvidas dos instrumentos de medição de temperatura e suas relações com o conjunto. A incerteza pode ser calculada com as equações deduzidas neste trabalho e os valores medidos de temperatura.

**Palavras-chave.** *higrômetro de espelho resfriado, medição de umidade, incerteza de medição.*

**Abstract.** This article presents the uncertainty calculation type B a hygrometer experimental dew point. The methodology considers the device operating characteristics that measures moisture from condensing temperature measurements of the water vapor contained in air, with the formation of droplets of water (dew point), and ambient air temperature. Thus, the uncertainties involved are worked of temperature measuring instruments and their relationship to the whole. The uncertainty can be calculated with the equations deduced in this work and the measured values of temperature.

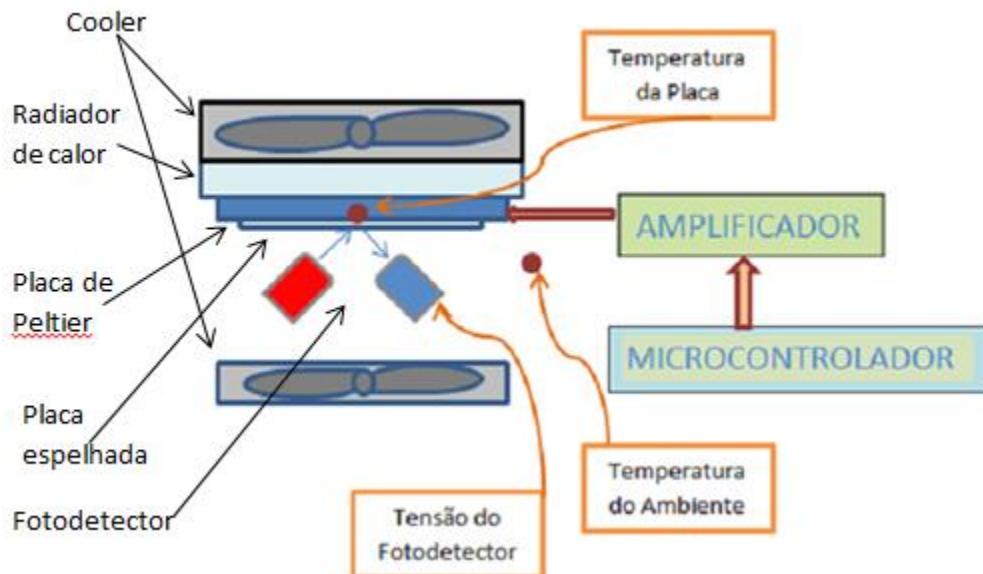
**Key words.** *chilled mirror hygrometer, dew point, humidity metering, uncertainty measurement.*

**Introdução.** O instrumento utilizado para a realização de medição da umidade do ar é chamado de higrômetro. Geralmente, os higrômetros apresentam a medição da umidade relativa

expressando em percentagem (%). A umidade relativa pode ser entendida como o quociente de vapor de água presente no ar e a máxima quantidade possível para as condições termodinâmicas consideradas. De acordo com sua natureza de funcionamento e construção, o higrômetro pode ser do tipo mecânico, químico ou eletro-eletrônico (1). O higrômetro de ponto de orvalho é considerado um instrumento preciso, utilizando um procedimento onde se avalia a temperatura de uma superfície onde ocorre o fenômeno de condensação do vapor de água presente na atmosfera, sendo que isto ocorre quando sua temperatura abaixa além do ponto de orvalho (8).

**Texto principal.** O funcionamento do higrômetro ótico se baseia na utilização de uma bomba de calor para abaixar e regular a temperatura de uma superfície espelhada. Se o espelho estiver submetido à temperatura de ponto de orvalho, o ar (ou gás), em sua superfície, libera umidade sob a forma de gotículas de água, promovendo alteração das propriedades reflexivas do espelho que pode ser detectada por um fotodetector apropriado (1), e, nesse momento, a umidade do ar pode ser calculada pela relação entre a temperatura da superfície do espelho e a temperatura do ar.

O sistema do higrômetro experimental, de funcionamento eletrônico, foi montado utilizando-se uma placa de Peltier, que realizaria o resfriamento de uma placa com superfície espelhada em conjunto com um emissor-detector de luz, um termômetro para medição da temperatura da placa e um termômetro para medição da temperatura do ar (6).



**Figura 1.** Representação do sistema de medição (Autor)

Quando se utiliza um instrumento, é necessário considerar, no mínimo, o erro e a incerteza no processo de medição. O erro é apontado pelo processo de calibração, apresentando grande importância para o correto uso do instrumento ou medida materializada e também estando diretamente ligado à característica metrológica referente à exatidão. O valor do erro é definido pelo Vocabulário Internacional de Metrologia (3), como: “Diferença entre o valor medido duma grandeza e um valor de referência”.

A incerteza de medição é definida como (3): “Parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas”.

Ao considerar as incertezas envolvidas nos processos de medição e calibração, podemos separar em dois tipos distintos de incertezas, de acordo com sua origem, as incertezas do tipo A e do tipo B (2, 7). A avaliação do tipo A da incerteza de medição, é feita a partir da distribuição estatística dos valores provenientes de séries de medições e podem ser caracterizadas por desvios-padrão. A avaliação do Tipo B da incerteza de medição, pode também ser caracterizadas por desvios-padrão estimados a partir de funções de densidade de probabilidade baseadas na experiência ou em outras informações (2).

Para o cálculo da incerteza de medição do tipo A, que está relacionada à dispersão dos valores obtidos pela realização das medidas, é fundamental o cálculo da variância dos valores obtidos, como é definido no “Guia para a expressão de incerteza de medição” (GUM do inglês “guide to the expression of uncertainty in measurement”), sendo que a incerteza pode ser expressa pela variância média das medidas, da seguinte forma (2):

$$u^2(x_i) = s^2(\bar{X}_i) \quad (1)$$

Já as incertezas do tipo B não são obtidas através das variâncias das medições, mas sim através de avaliação baseada em informações (4), tais como: medições anteriores, experiência ou conhecimento do comportamento e propriedades dos materiais e instrumentos, especificações fornecidas pelo fabricante, dados de calibração e certificados, incerteza obtida de manuais, etc.

Para o cálculo da combinação das incertezas (para a incerteza total), deve ser aplicada a seguinte equação (3, 5):

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (2)$$

Considera-se nesta análise o cálculo da incerteza relativa ao instrumento montado, estimando a influência de suas características nos resultados quando empregado em medições. Essa combinação das componentes de incertezas relativas à montagem e utilização do instrumento, ora analisada, se esbarra no conceito de incerteza do tipo B.

A medição da umidade relativa, utilizando-se o higrômetro de ponto de orvalho, é feita através de cálculo, considerando a pressão de vapor saturado ( $e_s$ ), e a pressão de vapor atual do ar ( $e_a$ ), pela seguinte relação:

$$UR = \frac{ea}{es} \times 100\% \quad (3)$$

Os valores da pressão de vapor depende da temperatura, e são calculados usando a relação encontrada em “A guide to the measurement of humidity” (9), chamada de Magnus formula (Eq. 4):

$$\ln e_w(t) = \ln 611,2 + \frac{17,62 \cdot t}{243,12 + t} \quad (4)$$

Nesta equação,  $t$  é a temperatura, dada em graus Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ), e o valor de  $e_w$  é dado em pascal (Pa). A Eq. 4 também pode ser escrita da seguinte forma:

$$e_w(t) = 611,2 \times \exp\left(\frac{17,62 \times t}{243,12 + t}\right) \quad (5)$$

A relação da Eq.5 pode, então, ser utilizada para o cálculo da pressão de vapor atual do ar (ea), considerando parte isso a temperatura ambiente do ar ( $t_a$ ), na ocasião da medição. Entretanto, a mesma equação pode ser utilizada para o cálculo da pressão de vapor saturado (es), utilizando para o cálculo o valor da “temperatura de saturação” ou “temperatura de ponto de orvalho” ( $t_p$ ), que será a mesma temperatura apresentada na ocasião em que há a condensação do vapor de água presente neste ar (ponto de orvalho).

Utilizando a temperatura ambiente do ar ( $t_a$ ), para o cálculo da pressão de vapor atual do ar (ea), e a temperatura de ponto de orvalho ( $t_p$ ), para o cálculo da pressão de vapor saturado (es), pode ser combinado a Eq.3 e Eq.5, originando a seguinte equação para o cálculo da umidade relativa do ar:

$$UR = \frac{611,2 \times \exp\left(\frac{17,62 \times t_a}{243,12 + t_a}\right)}{611,2 \times \exp\left(\frac{17,62 \times t_p}{243,12 + t_p}\right)} \times 100 \% \quad (6)$$

onde,

$t_a$  é a temperatura ambiente do ar, dada em graus Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$t_p$  é a temperatura de ponto de orvalho, dada em graus Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ).

As incertezas do tipo B desse higrômetro montado, serão então, principalmente compostas pelas próprias incertezas dos dois termômetros utilizados no processo, já que a medição é feita indiretamente através dos valores de temperatura dos dois termômetros no momento da condensação da placa.

Assim sendo, o cálculo da incerteza de medição ( $U_U$ ) do tipo B, relativa ao método utilizado para a medição de umidade, foi feito através da composição das incertezas dos instrumentos envolvidos, pela seguinte equação:

$$U_U = k \times \sqrt{(c_{tp} \times u_{tp})^2 + (c_{ta} \times u_{ta})^2} \quad (7)$$

O valor da incerteza do termômetro usado para a leitura da temperatura do ar do ambiente ( $u_{ta}$ ), foi composta pelas incertezas de leitura (tipo B) e a constante em seu certificado de calibração (tipo A). Para a incerteza de leitura, como se tratava de um instrumento digital, foi considerado o valor de sua resolução dividido por  $\sqrt{2}$ , considerando uma distribuição retangular para a medida. O valor da incerteza ficou então:

$$u_{ta} = \sqrt{\left(\frac{0,1}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{0,14}{2}\right)^2} \quad (8)$$

Para a composição da incerteza do termômetro usado para a leitura da temperatura da placa, que seria a mesma que a temperatura de ponto de orvalho do ar ( $u_{tp}$ ), foi considerada a incerteza de leitura (tipo B), e a constante em seu certificado de calibração (tipo A). Como foi usado um termômetro digital, foi considerado o valor de sua resolução dividido por  $\sqrt{2}$ , considerando uma distribuição retangular para a medida. O valor da incerteza ficou então:

$$u_{tp} = \sqrt{\left(\frac{0,1}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{0,16}{2}\right)^2} \quad (9)$$

Na equação para o cálculo da incerteza, aparecem os seguintes coeficientes:  $c_{ta}$  e  $c_{tp}$ , sendo estes chamados coeficientes de sensibilidade da incerteza da temperatura do ar do ambiente e da temperatura da placa (ponto de orvalho), respectivamente. Os valores para esses coeficientes são achados em decorrência dos valores das variáveis envolvidas em um determinado ponto de medição quando aplicadas nas equações vindas das respectivas derivadas parciais em relação a cada variável analisada. Assim a fórmula para o cálculo de  $c_{ta}$  é achada derivando-se a fórmula geral para o cálculo da umidade relativa (UR), em relação a variável  $ta$ , e para  $c_{tp}$  deriva-se a fórmula geral em relação à  $tp$ , daí temos:

$$\frac{\partial}{\partial t_a} \left( \frac{611,2 \exp\left(\frac{17,62t_p}{243,12+t_p}\right)}{611,2 \exp\left(\frac{17,62t_a}{243,12+t_a}\right)} \right) = - \frac{4283,77 \times \exp\left(\frac{17,62t_p}{243,12+t_p} - \frac{17,62t_a}{243,12+t_a}\right)}{(243,12+t_a)^2} \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t_p} \left( \frac{611,2 \exp\left(\frac{17,62t_p}{243,12+t_p}\right)}{611,2 \exp\left(\frac{17,62t_a}{243,12+t_a}\right)} \right) = \frac{4283,77 \times \exp\left(\frac{17,62t_p}{243,12+t_p} - \frac{17,62t_a}{243,12+t_a}\right)}{(243,12+t_p)^2} \quad (11)$$

Para essa medição é considerado o fator de abrangência,  $k = 2$ , que corresponde ao fator multiplicativo para adequar a incerteza da medida para um intervalo de confiança, com aproximadamente 95% de probabilidade.

**Conclusão.** Verifica-se que para o instrumento montado, sua composição principal de incerteza do tipo B tem a influência de dois elementos sensores: o sensor de temperatura ambiente e o sensor de temperatura de ponto de orvalho, sendo que o mais comum em instrumentos é a dependência de apenas um elemento sensor. Deixa-se claro com a análise, que, devido influência dos coeficientes de sensibilidade ao mencionado, o ideal é usar sensores com precisões próximas, já que, se for utilizado algum deles com componente individual de incerteza muito maior que do outro, essa prática irá anular a precisão do instrumento. Os valores de incerteza poderão ser calculados, para cada valor lido das temperaturas medidas pelos sensores, usando as equações deduzidas neste trabalho.

**Divulgação.** Os autores não relatam conflitos de interesse neste trabalho.

## Referências.

- (1) Fraden J. Handbook of Modern Sensors - Physics, Designs and Applications. 3.ed. New York: Springer, 2004, 589p.

- (2) Inmetro. Avaliação de dados de medição: guia para a expressão de incerteza de medição – GUM 2008. Duque de Caxias, RJ: 2012, 141 p.
- (3) Inmetro. Vocabulário internacional de metrologia – VIM 2008. 1. ed. Edição Brasileira, 2008.
- (4) Lira FA. Metrologia na indústria. 7. ed. São Paulo: Érica, 2009, 248p.
- (5) Link W. Metrologia Mecânica – Expressão da Incerteza de Medição. 1. ed. IPT e Mitutoyo, 1997.
- (6) Margarido GN, Frajuba C, Bortoli F. Avaliação da umidade relativa em reprodução simplificada de higrômetro de espelho resfriado. Revista Sinergia, v. 20, n. 4, mar. 2019.
- (7) Margarido GN, Tchernov DP. Avaliação comparativa da exatidão de termômetros digitais do tipo “espeto” para utilização em ensaios e atividades de pesquisa. The Academic Society Journal, v. 01, p. 180-184, 2017.
- (8) Margarido GN. Avaliação de medição da umidade relativa do ar pelo método do ponto de orvalho usando materiais acessíveis e sistema de controle convencional. São Paulo, 2014, 128 p. Dissertação (Mestrado). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – IFSP.
- (9) NPL – National Physical Laboratory, Michell Instruments. A guide to the measurement of humidity. Londres: The Institute of Measurement and Control, 1996, 68 p.

## ORCID dos autores

Gustavo Neves Margarido  
ORCID: 0000-0003-1186-5694

Carlos Frajuba  
ORCID: 0000-0001-8463-3451

Fabio da Silva Bortoli  
ORCID: 0000-0001-7082-5209