

Avaliação da incerteza de medição na calibração de sensores de umidade relativa por meio de higrômetro de ponto de orvalho

Evaluation of the measurement uncertainty in the calibration of relative humidity sensors by means of dew-point hygrometer

Júlio D. Brionizio¹

¹ Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro)

E-mail: jnbrionizio@inmetro.gov.br

Resumo: Este trabalho tem por objetivo abordar aspectos relativos à avaliação da incerteza de medição na calibração de sensores de umidade relativa por comparação contra um higrômetro de ponto de orvalho do tipo espelho resfriado. Um exemplo da estimativa da incerteza de medição de um ponto de calibração de um sensor capacitivo é apresentado.

Palavras-chave: Incerteza de medição; umidade relativa; ponto de orvalho.

Abstract: The aim of this work is to consider some aspects related to the evaluation of measurement uncertainty in the calibration of relative humidity sensors by comparison with a cooled mirror dew-point hygrometer. The evaluation of measurement uncertainty for a calibration point of a capacitive sensor is presented as an example.

Keywords: Measurement uncertainty; relative humidity; dew-point temperature.

1. INTRODUÇÃO

Os higrômetros que medem umidade relativa são geralmente calibrados por comparação contra um padrão de umidade, que pode ser outro higrômetro de umidade relativa, um psicrômetro ou um higrômetro de ponto de orvalho (também chamado de higrômetro óptico ou higrômetro de espelho resfriado); sendo que este último resulta tipicamente em uma menor incerteza de medição.

O Laboratório de Higrometria do Inmetro (Lahig), referência nacional em umidade, utiliza em seus sistemas de calibração 05 higrômetros de espelho resfriado como padrão de referência, que

cobrem a faixa de -75 °C a 92 °C de temperatura de ponto de orvalho.

Este trabalho tem por objetivo apresentar a avaliação da incerteza de medição na calibração de sensores de umidade relativa (particularizando o sensor capacitivo) por comparação contra um higrômetro de ponto de orvalho do tipo espelho resfriado.

2. MÉTODO DE CALIBRAÇÃO

A calibração de um higrômetro é feita em um ambiente com umidade e temperatura uniformes e estáveis (geralmente produzido por uma câmara climática), onde as medições de umidade relativa

do instrumento em calibração e do padrão são comparadas. Contudo, quando da utilização de um higrômetro de ponto de orvalho como padrão, um termômetro calibrado se faz necessário para o cálculo da umidade relativa de referência. Um barômetro calibrado pode ainda ser utilizado nos casos em que uma maior exatidão do cálculo de umidade se faz necessário.

As fontes de incerteza na medição de umidade resultam então do meio de geração, do padrão de referência, do item em calibração e das condições ambientais [1].

3. TERMOS E EQUAÇÕES DE UMIDADE

3.1. Temperatura de ponto de orvalho

Temperatura na qual o vapor d'água se deposita na forma de orvalho (gotículas de água) quando do resfriamento do ar (ou outro gás).

3.2. Pressão de saturação do vapor d'água

Pressão máxima que o vapor d'água pode exercer no gás úmido em uma determinada temperatura. A pressão de saturação do vapor d'água p_{sv} (em Pa) pode ser calculada (em função da temperatura T em K) por meio da equação de Sonntag [2]:

$$\ln(p_{sv}) = \sum_{i=1}^4 \phi_i(T)^{i-2} + \phi_5 \ln(T) \quad (1)$$

Onde,

Tabela 1. Coeficientes da eq. (1)

	Água	Gelo
ϕ_1	-6096,9385	-6024,5282
ϕ_2	21,2409642	29,32707
ϕ_3	$-2,711193 \times 10^{-2}$	$1,0613868 \times 10^{-2}$
ϕ_4	$1,673952 \times 10^{-5}$	$-1,3198825 \times 10^{-5}$
ϕ_5	2,433502	-0,49382577

3.3. Fator de intensificação do vapor d'água

Fator pelo qual a pressão de saturação do vapor d'água na forma pura é multiplicada para se obter a pressão de saturação real do vapor que leva em

consideração a presença de outros gases e a pressão total do gás. O fator de intensificação do vapor d'água f no ar pode ser calculado por meio da seguinte equação para a faixa de pressão atmosférica até 2 MPa (20 atm) [2]:

$$f = \exp \left[\alpha \times \left(1 - \frac{p_{sv}}{P} \right) + \beta \times \left(\frac{P}{p_{sv}} - 1 \right) \right] \quad (2)$$

Onde, $\alpha = \sum_{i=1}^4 A_i \times T^{(i-1)}$, $\beta = \exp \sum_{i=1}^4 B_i \times T^{(i-1)}$, T é a temperatura em °C e P a pressão em Pa.

Os coeficientes A_i e B_i foram atualizados com base na Escala Internacional de Temperatura de 1990 (EIT-90) e estão disponíveis em [3].

3.4. Umidade relativa

Umidade relativa UR é a relação percentual entre a pressão parcial do vapor d'água p_v e a pressão de saturação do vapor d'água p_{sv} a mesma temperatura.

$$UR = \frac{p_v}{p_{sv}} \times 100 \quad (3)$$

Considerando-se que a temperatura de ponto de orvalho T_d é a temperatura na qual a pressão de saturação do vapor d'água é igual à pressão parcial do vapor d'água na temperatura T , e levando-se em conta o fator de intensificação do vapor d'água para T_d e para T , para uma maior exatidão do cálculo de umidade relativa, a eq. (3) pode então ser reescrita da seguinte forma:

$$UR = \frac{p_{sv}(T_d) \times f(P, T_d)}{p_{sv}(T) \times f(P, T)} \times 100 \quad (4)$$

4. INCERTEZA DE MEDIÇÃO

A avaliação da incerteza de medição apresentada a seguir, baseada nas diretrizes do GUM [4], não é definitiva, mas sim orientativa. Cada situação deve ser cuidadosamente analisada na prática, o que pode levar à conclusão de que certas fontes

descritas a seguir não são aplicáveis (ou são desprezíveis) e outras precisam ser consideradas.

4.1. Ponto de orvalho, temperatura e pressão

As incertezas das medições de temperatura de ponto de orvalho, de temperatura e de pressão foram estimadas (para cada caso) combinando-se diversas fontes:

$$u = \sqrt{\left(\frac{U}{k} \times c_i\right)^2 + \left(\frac{\delta_r}{2\sqrt{3}} \times c_i\right)^2 + \left(\frac{\delta_d}{\sqrt{3}} \times c_i\right)^2 + \dots} \\ \sqrt{\dots + \left(\frac{\delta_s}{1} \times c_i\right)^2 + \left(\frac{\delta_f}{1} \times c_i\right)^2} \quad (5)$$

Onde, U é a incerteza expandida do padrão; k é o fator de abrangência declarado no certificado de calibração; c_i é o coeficiente de sensibilidade (derivada parcial de como UR varia em relação ao ponto de orvalho, à temperatura e à pressão: $\partial UR/\partial T_d$, $\partial UR/\partial T$, $\partial UR/\partial P$, respectivamente); δ_r é a resolução da indicação digital; δ_d é a deriva; δ_s é a repetibilidade das medições, estimada por meio do desvio padrão experimental da média; e δ_f é o erro padrão da estimativa referente ao ajuste da curva de correção do padrão.

Quando instrumentos elétricos forem usados, como multímetro digital ou ponte de Wheatstone, as incertezas destes itens devem ser levadas em consideração.

Quanto à pressão atmosférica, opcionalmente o cálculo de UR poderia ser feito utilizando-se um valor padrão de pressão local, considerando-se então na incerteza de UR apenas uma estimativa da variação máxima de pressão possível.

No Lahig, no caso da medição de temperatura, a incerteza da atualização mensal da resistência do sensor no ponto de gelo (que é estimada levando-se em consideração a incerteza da realização, a resolução do indicador digital, a estabilidade do sensor e a repetibilidade das

leituras) é adicionada à incerteza de calibração do termômetro.

4.2. Incerteza na geração de umidade relativa

A umidade absoluta no interior de uma câmara climática pode ser considerada homogênea e medida em um único ponto [5, 6]. Sendo assim, a incerteza na geração de umidade relativa u_g é estimada por meio da estabilidade térmica δ_{et} e da uniformidade térmica δ_{ut} do equipamento.

$$u_g = \sqrt{\left(\frac{\delta_{et}}{\sqrt{3}} \times \frac{\partial UR}{\partial T}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{ut}}{\sqrt{3}} \times \frac{\partial UR}{\partial T}\right)^2} \quad (6)$$

4.3. Incerteza do higrômetro em calibração

A incerteza do higrômetro em calibração u_h é estimada considerando-se as seguintes fontes:

$$u_h = \sqrt{\left(\frac{\delta_r}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\delta_s}{1}\right)^2 + \left(\frac{\delta_e}{\sqrt{3}}\right)^2} \quad (7)$$

Onde, δ_e é a estabilidade do instrumento.

Para os casos em que o laboratório oferece ao usuário uma curva de calibração, a incerteza do ajuste deve ser considerada na estimativa da incerteza de calibração.

Quando o laboratório calibra um higrômetro de impedância elétrica para uso em uma faixa de temperatura, ao invés da calibração num único ponto de temperatura, o efeito da dependência da temperatura deve ser avaliado e considerado na estimativa da incerteza de calibração.

Para higrômetros com sonda, recomenda-se que a calibração seja realizada com a sonda totalmente inserida no interior do meio térmico (câmara climática). Na imersão parcial, a sonda está sujeita a um fluxo de calor induzido pela diferença de temperatura, o que pode influenciar na medição do higrômetro [1]. Erros de imersão em sondas de umidade relativa foram avaliados e apresentados em [7].

No Lahig, a estabilidade do instrumento é estimada repetindo-se, no mínimo, dois pontos de calibração. A estabilidade equivale então à maior diferença encontrada entre as correções dos pontos repetidos, podendo, dependendo de quais pontos foram repetidos, ser adotada para toda a faixa, por subfaixas ou ponto a ponto.

4.4. Incerteza das equações de higrometria

Segundo [2], a eq. (1) possui incerteza menor do que 0,01% do valor, com uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95% ($k = 2$), para a faixa de 0 °C a 100 °C.

Já a incerteza relativa da eq. (2), u_{rf} , foi estimada através da equação abaixo apresentada por Lovell-Smith [8] para a faixa de -90 °C a +100 °C e 0,05 MPa a 2 MPa.

$$u_{rf} \leq (1,68 \times 10^{-3} P - 10^{-5}) \times \exp[(2,2 \times 10^{-5} \times \dots \dots \times \ln(P) - 0,0136) \times T] \quad (8)$$

Assim, a incerteza referente à utilização de (1) e (2), u_e , é estimada através da seguinte equação:

$$u_e = \sqrt{\left(\frac{\delta_{eq.1}(T_d)}{k} \times \frac{\partial UR}{\partial p_{sv}(T_d)}\right)^2 + \dots \sqrt{\left(\frac{\delta_{eq.1}(T)}{k} \times \frac{\partial UR}{\partial p_{sv}(T)}\right)^2 + \dots \sqrt{\left(\delta_{eq.2}(T_d) \times \frac{\partial UR}{\partial f(T_d)}\right)^2 + \dots \sqrt{\left(\delta_{eq.2}(T) \times \frac{\partial UR}{\partial f(T)}\right)^2} \quad (9)$$

Onde, $\delta_{eq.1}(T_d) = 0,01\% \times p_{sv}(T_d)$; $\delta_{eq.1}(T) = 0,01\% \times p_{sv}(T)$; $\delta_{eq.2}(T_d) = u_{rf}(T_d) \times f(T_d)$; e $\delta_{eq.2}(T) = u_{rf}(T) \times f(T)$.

4.5. Incerteza combinada de UR

A incerteza combinada u_c de umidade relativa é obtida combinando-se as fontes de incerteza descritas anteriormente, ou seja:

$$u_c = \sqrt{u_{T_d}^2 + u_T^2 + u_P^2 + u_g^2 + u_h^2 + u_e^2} \quad (10)$$

Onde os subscritos T_d , T e P referem-se às medições de ponto de orvalho, temperatura e pressão, respectivamente.

4.6. Incerteza expandida de UR

A incerteza expandida U de umidade relativa é finalmente obtida multiplicando-se (10) por k , que para uma probabilidade de abrangência de 95,45% equivale a 2.

$$U = k \times u_c \quad (11)$$

4.7. Exemplo

Em um ponto de calibração, os valores médios corrigidos de dez medições, obtidas a cada um minuto, da temperatura de ponto de orvalho e da temperatura foram, respectivamente, 12,72 °C e 22,14 °C. Cinco medições da pressão atmosférica foram realizadas e o valor médio corrigido foi de 101,33 kPa. Sendo assim, o cálculo da umidade relativa padrão resultou no valor de 55,12 %ur. A seguir, uma estimativa da incerteza de medição deste ponto de calibração é apresentada por meio da tabela 2.

Tabela 2. Exemplo da estimativa da incerteza de medição de um ponto de calibração

	Valor	d	c_i	u_i
U	0,04	2	3,6151	0,0723
δ_f	0,005	1,73	3,6151	0,0104
δ_{T_d}	0,02	1,73	3,6151	0,0417
δ_f	0,02	1	3,6151	0,0723
δ_{T_d}	0,02	1	3,6151	0,0723
Inc. de ponto de orvalho (u_{T_d})				0,1324
U	0,015	2	-3,3601	-0,0252
δ_f	0,005	1,73	-3,3601	-0,0097
δ_{T_d}	0,000	1,73	-3,3601	0,0000
δ_f	0,005	1	-3,3601	-0,0168
δ_{T_d}	0,010	1	-3,3601	-0,0336
Inc. de temperatura (u_T)				0,0463

Continuação

	Valor	d	c_i	u_i
U	10	1,96	$1,2 \times 10^{-7}$	$5,9 \times 10^{-7}$
δ_f	5	1,73	$1,2 \times 10^{-7}$	$3,3 \times 10^{-7}$
δ_d	100	1,73	$1,2 \times 10^{-7}$	$6,7 \times 10^{-6}$
δ_f	0	1	$1,2 \times 10^{-7}$	0,00
δ_s	55	1	$1,2 \times 10^{-7}$	$6,4 \times 10^{-6}$
Inc. de pressão (u_p)				$9,27 \times 10^{-6}$
δ_{et}	0,14	1,73	-3,3601	-0,2716
δ_{ut}	0,02	1,73	-3,3601	-0,0388
Inc. na geração de UR (u_g)				0,2744
δ_f	0,05	1,73	1	0,0289
δ_s	0,02	1	1	0,0200
δ_e	0,20	1,73	1	0,1155
Inc. do higrômetro em calibração (u_h)				0,1207
$\delta_{eq.1}(T_d)$	0,1471	2	0,0375	0,0028
$\delta_{eq.1}(T)$	0,2668	2	-0,0207	-0,0028
$\delta_{eq.2}(T_d)$	$1,62 \times 10^{-4}$	1	54,9063	0,0089
$\delta_{eq.2}(T)$	$1,63 \times 10^{-4}$	1	-54,8980	-0,0090
Inc. das equações (u_e)				0,0132
Inc. combinada de UR (u_c)				0,33
Inc. expandida de UR (U)				0,66

d – divisor; u_i – contribuição para a incerteza combinada.

5. CONCLUSÃO

Recomendações e uma metodologia de avaliação da incerteza de medição na calibração de sensores de umidade relativa por comparação contra um higrômetro de ponto de orvalho (do tipo espelho resfriado) foram apresentadas. Neste método de calibração, o cálculo de diversos coeficientes de sensibilidade se faz necessário, pois as unidades de várias fontes de incerteza são distintas daquela da estimativa de saída. Coeficientes de sensibilidade para UR a partir da temperatura de ponto de orvalho são apresentados em [9].

Em muitos casos, a incerteza na geração de umidade relativa é a fonte dominante, pois as incertezas relacionadas aos padrões principais (higrômetro e termômetro) são geralmente baixas.

Outra fonte de incerteza que pode apresentar impacto bastante significativo na estimativa da incerteza de medição é a estabilidade do item em calibração. As medições dos higrômetros sofrem alterações conforme seus sensores se desgastam,

o que impacta diretamente na estabilidade e na deriva do instrumento. É fundamental que esta fonte de incerteza seja avaliada na calibração de um higrômetro (capacitivo) de umidade relativa.

As fontes de incerteza referentes às medições de pressão atmosférica e às equações empregadas possuem baixo impacto na estima da incerteza de medição. Dependendo das circunstâncias, essas fontes de incerteza podem ser desprezadas em muitos casos.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Heinonen, M. *Uncertainty in Humidity Measurements*. Mikes Metrologia, J4/2006, Espoo, 2006.
- [2] Institute of Measurement and Control (IMC). *A Guide to the Measurement of Humidity*. ISBN 0904457249. 1996.
- [3] Hardy, B. *ITS-90 Formulations for Vapor Pressure, Frostpoint Temperature, Dewpoint Temperature, and Enhancement Factors in the Range -100 to +100 C*. Papers and Abstracts from the 3rd International Symposium on Humidity and Moisture, Londres, 1998.
- [4] Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro). *Avaliação de dados de medição: guia para a expressão da incerteza de medição – GUM 2008*. 1^a Edição Brasileira, 2012.
- [5] Deutscher Kalibrierdienst (DKD). *Guideline DKD-R 5-7: Calibration of Climatic Chambers*. Edição 07/2004.
- [6] International Electrotechnical Commission (IEC). *60068-3-11: Supporting Documentation and Guidance – Calculation of Uncertainty of Conditions in Climatic Test Chambers*. 2007.
- [7] Lovell-Smith, J. *Immersion Error in Relative Humidity Probes*. Proceedings of the 4th International Symposium on Humidity and Moisture, Taipei, 2002.
- [8] Lovell-Smith, J. *An Expression for the Uncertainty in the Water Vapour Pressure Enhancement Factor for Moist Air*. Metrologia, Vol. 44, L49–L52, 2007.
- [9] Brionizio, J. *Coefficientes de Sensibilidade para Umidade Relativa a partir da Temperatura de Ponto de Orvalho ou da Temperatura de Bulbo Úmido*. Em publicação nos anais deste evento (8^o Congresso Brasileiro de Metrologia), Bento Gonçalves, 2015.