

AVALIAÇÃO DA MEDIÇÃO DE UMIDADE RELATIVA EM REPRODUÇÃO SIMPLIFICADA DE HIGRÔMETRO DE ESPELHO RESFRIADO

EVALUATION OF MOISTURE MEASUREMENT CONCERNING SIMPLIFIED REPRODUCTION OF COOLED MIRROR HYGROMETER

Data de entrega dos originais à redação em: 02/10/2017
e recebido para diagramação em: 14/09/2018

Gustavo Neves Margarido ¹

Carlos Frajuca ²

Fábio da Silva Bortoli ³

Este artigo apresenta o desenvolvimento de um sistema que utiliza componentes de baixo custo para a reprodução do higrômetro de espelho resfriado, que é um sistema muito preciso de medição de umidade relativa do ar (considerado um higrômetro de referência quando é utilizado na medição de umidade relativa). O sistema de medição baseia-se no fenômeno do ponto de orvalho, utilizando sensor com resfriamento controlado por uma placa de Peltier. Após a montagem, é realizada uma série de medições e comparações com padrões, para promover uma análise dos erros de medição, relativos ao método e ao instrumento montado.

Palavras-chave: Higrômetro de Espelho Resfriado. Ponto de Orvalho. Higrômetro de Referência. Medição de Umidade.

This paper presents the development of a system using low cost components for the reproduction of the cooled mirror hygrometer, which is an very precise system of relative humidity measurement (considered a reference hygrometer when it is used in the measurement of relative humidity). This system is based on the dew point phenomenon, and works using a sensor with controlled cooling with a Peltier cooler. After assembly, a series of measurements and comparisons with standards are performed to promote an analysis of measurement errors relating to the method and the assembled instrument.

Keywords: Chilled Mirror Hygrometer. Dew point. Reference Hygrometer. Humidity Metering.

1 INTRODUÇÃO

O conhecimento da quantidade de vapor de água presente em um gás, mostra considerável importância em diversas situações, quer seja no estudo científico ou no tecnológico. Quando tratamos do ar atmosférico, tal conhecimento é utilizado, no estudo de condições de conforto ambiental em sistemas de condicionamento de ar, ou ainda no controle ambiental em locais sensíveis onde a umidade presente no ar possa influir no trabalho exercido ali, tais como em laboratórios, ou armazéns de grãos e cereais, cimento, cal, ou mesmo para o funcionamento de certos equipamentos, tais como: circuitos eletrônicos de alta impedância, componentes sensíveis à eletricidade estática, dispositivos de alta tensão, mecanismos finos, etc. (FRADEN, 2008, p. 393).

O higrômetro é o instrumento utilizado para a medição da umidade de um gás ou atmosfera, sendo que os principais tipos são: o mecânico, o eletroeletrônico, o químico e os psicrômetros. Geralmente, os higrômetros apresentam a medição da umidade relativa atmosférica: que pode ser entendida como o quociente de vapor de água realmente presente no ar e a máxima massa possível de vapor de água no ar. A umidade relativa se expressa geralmente como percentagem (%).

2 O HIGRÔMETRO DE ESPELHO

A psicrometria realiza a medição de umidade relativa através da comparação da temperatura do ar, cuja umidade quer se medir, com a temperatura

apresentada pelo ar na condição de saturação (umidade relativa de 100%). Assim, a temperatura de ponto de orvalho, é definida como a temperatura na qual o resfriamento de ar úmido conduz a formação de água de condensação, ou seja, sua umidade relativa sobe a 100%.

O método do “espelho de ponto de orvalho”, resulta em um procedimento muito preciso para a medição de umidade relativa. Neste método, uma superfície refletora (espelho) é resfriada até o aparecimento de condensação da umidade do gás. A temperatura medida neste ponto corresponde à temperatura do ponto de orvalho, a qual se pode ser utilizada para calcular a quantidade de umidade presente no gás. Esses medidores geralmente utilizam aparatos óticos e controle de temperatura da superfície espelhada, com sistema de resfriamento do espelho (geralmente feita através de refrigeração com compressor), e podendo ainda apresentar sistema para aquecimento. Esse sistema de medição acaba sendo menos utilizado frente aos demais devido ao custo.

Para a determinação da umidade do o ar atmosférico, pode ser aplicado o conceito de que a pressão total de uma mistura de gases ideais é igual à soma das pressões parciais dos gases ideais componentes (TIPLER; MOSCA, 2009, p. 578), já que a umidade é simplesmente vapor de água, e também pode ser considerada como um gás. Assim a pressão do ar atmosférico será a soma das pressões parciais dos gases componentes e também por vapor de água (POTTER; SCOTT, 2007, p. 250). Utilizando o conceito

1- Mestre em automação e controle de processos - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - IFSP. <gnmargarido@ifsp.edu.br >.

2- Doutor em Física - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - IFSP.

3- Doutor em Física - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - IFSP.

de pressão dos gases, a umidade relativa fica definida como a razão entre a pressão de vapor de água atual do ar (ea), e a pressão de vapor saturado (es). A relação da umidade relativa fica da seguinte forma:

$$UR = \frac{ea}{es} \times 100\% \quad \text{Eq. 01}$$

onde:

ea - pressão de vapor de água atual do ar [Pa]
 es - pressão de vapor saturado [Pa]

Para o conhecimento da pressão de vapor saturado (es), a mesma é calculada utilizando-se modelos matemáticos empíricos, sendo um dos primeiros e mais conhecido, o modelo de Magnus (1844), definido por:

$$es = \alpha \cdot e^{\frac{\beta \cdot t}{\lambda + t}} \quad \text{Eq. 02}$$

A fórmula é escrita em função de t, que é a temperatura do ar úmido, sendo utilizada a temperatura ambiente do ar que se procura medir a umidade. Temos os valores de α , β e λ , que são constantes determinadas de forma experimental ou por simulação computacional. Encontramos em *A guide to the measurement of humidity* (NPL, 1996, p. 53), a recomendação de utilização do modelo com as seguintes constantes:

$$\ln e_w(t) = \ln 611,2 + \frac{17,62 \cdot t}{243,12 + t} \quad \text{Eq. 03}$$

onde:

e_w = es (pressão de vapor saturado) [Pa]
 t - temperatura do ar úmido [°C]

O valor da pressão de vapor atual (ea), pode ser calculada com o auxílio da equação do psicrômetro, encontrada em *A guide to the measurement of humidity* (NPL, 1996, p. 53), que é descrita como:

$$ea = es(t_u) - AP(t_s - t_u) \quad \text{Eq. 04}$$

onde:

P - pressão atmosférica [Pa]
 A = $6,66 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para psicrômetros com ventilação forçada
 A = $8,0 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para psicrômetros sem ventilação forçada
 t_u - temperatura de bulbo úmido (saturação) [°C]
 t_s - temperatura do ar do ambiente [°C]

Quando se está trabalhando com medições, um fator importante que deve ser observado são as incertezas de medição envolvidas no processo. De acordo com a origem, podemos dividi-las em dois tipos distintos, como explica o Vocabulário Internacional de Metrologia - VIM (INMETRO, 2012, p. 24):

A incerteza de medição geralmente engloba muitas componentes. Algumas delas podem ser estimadas por uma avaliação do Tipo A da incerteza de medição, a partir da distribuição estatística dos valores provenientes de séries de medições e podem ser caracterizadas por desvios-padrão. As outras componentes, as quais podem ser estimadas por uma avaliação do Tipo B da incerteza de medição, podem também ser caracterizadas por desvios-padrão estimados a partir de funções de densidade de probabilidade baseadas na experiência ou em outras informações.

Para a medição indireta de umidade relativa do ar, a qual utiliza valores de temperaturas, devem ser consideradas as incertezas relativas a estas medições. Assim, temos que, para o cálculo da combinação das incertezas (para a incerteza total), deve ser aplicada a seguinte fórmula (INMETRO, 2012, p. 19):

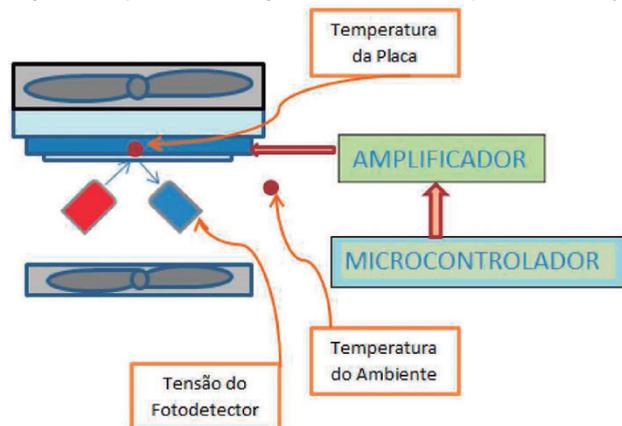
$$u_c^2(y) = \sum_{i=1} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad \text{Eq. 04}$$

Como já mencionado, o sistema funciona com o resfriamento da superfície espelhada, até a temperatura de ponto de orvalho. O sistema de resfriamento convencional (com compressores), pode ser substituído por placas de Peltier, que desempenham o mesmo papel como bomba de calor. Essas placas são montadas com pastilhas de materiais semicondutores, e utilizam o efeito Peltier para proporcionar o resfriamento.

3 MONTAGEM DO DISPOSITIVO

A parte principal de funcionamento do higrômetro de ponto de orvalho é formada pelos seguintes componentes: a placa de Peltier (que irá proporcionar o resfriamento da superfície espelhada), o dispositivo de emissão de luz e o dispositivo de detecção de luz. Esses componentes deverão atuar em conjunto, de forma que a luz proporcionada pelo dispositivo emissor seja refletida pela superfície espelhada (que estará sendo resfriada), e detectada pelo dispositivo de detecção. Dessa forma este conjunto irá atuar como um sensor de condensação da superfície espelhada, para a indicação do momento de leitura do sensor de temperatura da placa, que usa um termopar do tipo "k" (figura 01).

Figura 1 - Esquema de montagem dos módulos do dispositivo de medição

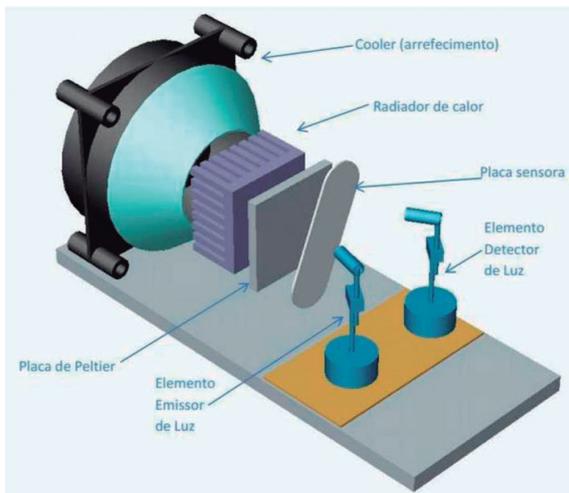


Fonte: elaborada pelo autor

A placa de Peltier é um dispositivo termoelétrico baseada no efeito Peltier, que consiste na produção de um diferencial de temperatura quando uma corrente elétrica é aplicada a uma junção formada por dois materiais diferentes, tendo seu acionamento controlado no dispositivo pelo microcontrolador. Duas ventoinhas foram montadas, sendo que uma promovia a exaustão do calor gerado pela placa de Peltier e a outra seria utilizada para insuflar ar na superfície espelhada da placa sensora (figura 02), para a realização de ensaio com ventilação forçada (ar circulante).

Os ensaios foram realizados com o dispositivo dentro de uma caixa de acrílico de aproximadamente 30 litros, utilizando dessecantes e outras práticas para controle da umidade.

Figura 2 - Vista explodida do conjunto principal do projeto



Fonte: Elaborada pelos autores

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios de medições foram realizados para cinco faixas de umidade relativa, com cinco medições para cada faixa, sendo registrados os valores de temperaturas (do ar e da placa resfriada). Os ensaios foram realizados com a insuflação de ar direto à placa sensora do dispositivo montado para medição de umidade, e posteriormente, sem a insuflação de ar. Os valores médios de erro e desvio padrão, de cada método, são apresentados no Quadro 01.

Quadro 1 - Comparação dos valores de erros das duas metodologias

Tipo de Ensaio		Faixas Ensaçadas (Pontos) - % (UR)					
Ventilação:		1	2	3	4	5	
	Com	Erro	4,122	0,470	2,981	0,545	1,425
	Desv. P.	1,051	0,413	0,349	0,194	0,550	
Sem		Erro	0,574	0,537	-0,009	-1,393	0,135
	Desv. P.	0,568	0,216	0,247	0,208	0,538	

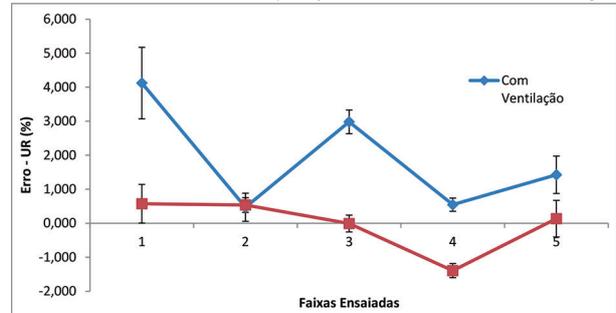
Fonte: elaborada pelos autores

Os erros foram calculados a partir dos valores de umidade relativa, encontrados pelo método ensaiado, e comparados com os valores encontrados nos padrões de umidade que acompanhavam o processo, através da seguinte relação:

$$\text{Erro} = \text{Valor medido} - \text{Valor de referência (Padrão)} \quad \text{Eq. 06}$$

Um gráfico com a comparação das duas metodologias foi montado a partir dos dados anteriores (Gráfico 01). Para cada valor de erro médio exibido, pela respectiva faixa ensaiada, acompanha uma barra horizontal, que corresponde à apresentação do desvio-padrão calculado para aquele valor.

Gráfico 1 - Comparação de erros das duas metodologias



Fonte: Elaborado pelos autores

Foram calculadas as incertezas de medição (U_u), relativas ao dispositivo utilizado para a medição de umidade, através da composição das incertezas dos instrumentos envolvidos, usando a seguinte fórmula:

$$U_u = k \times \sqrt{(c_{t_p} \times u_{t_p})^2 + (c_{t_a} \times u_{t_a})^2} \quad \text{Eq. 07}$$

O valor das incertezas dos termômetros usados para a leitura da temperatura do ar do ambiente (u_{t_a}), e para a leitura da temperatura da placa (u_{t_p}), foram compostas pelas incertezas de leituras (tipo B) e as descobertas por calibração (tipo A). O maior valor da incerteza nas medições realizadas ficou em 1,36 %UR, considerando 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.

5 CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS

A metodologia ensaiada sem ventilação forçada (sem insuflação de ar à placa), apresentou, na maioria das faixas, erros menores, bem como menores valores de desvio-padrão. As variações de erros podem ser motivadas às possíveis contaminações pelas sucessivas condensações na superfície da placa, mesmo sendo adotada a metodologia de limpeza da mesma com álcool etílico após cada ensaio.

A utilização de poucos componentes comuns, juntamente com o projeto simplificado do dispositivo, torna a metodologia plenamente possível de ser reproduzida pelos laboratórios de medições, para o conhecimento do valor de umidade relativa e na utilização do instrumento como padrão em medições nesta área.

REFERÊNCIAS

MARGARIDO, Gustavo Neves. 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.

BRIONIZIO, Júlio D.; MAINIER, Fernando B. Artigo: Avaliação de temperatura e umidade em uma câmara climática. ENQUALAB-2006 - Congresso e Feira da Qualidade em Metrologia, REMESP - Rede Metrológica do Estado de São Paulo, 30 de maio a 01 de junho, 2006, São Paulo, Brasil.

____; ____; LIMA, Saulo G de. Artigo: Comparação intralaboratorial em higrometria. ENQUALAB-2005 - Encontro para a Qualidade de Laboratórios, REMESP - Rede Metrológica do Estado de São Paulo, 07 a 09 de junho, 2005, São Paulo, Brasil.

FRADEN, Jacob. Handbook of Modern Sensors - Physics, Designs and Applications. 3.ed. New York: Springer, 2004, 589p.

Avaliação de dados de medição: guia para a expressão de incerteza de medição - GUM 2008. Duque de Caxias, RJ: INMETRO/CICMA/SEPIN, 2012, 141 p.

MARIN, Fábio Ricardo et al. Construção e avaliação de psicrómetro aspirado de termopar. **Revista Scientia Agricola**, [s.l.], v.58, n.4, p.839-844, out./dez. 2001

MORAN, Michael J; SHAPIRO, Howard N. Princípios de termodinâmica para engenharia. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008, 681 p.

____; ____; MUNSON, Bruce R; DEWITT, David P. Introdução à engenharia de sistemas térmicos: termodinâmica, mecânica dos fluidos e transferência de calor. Rio de Janeiro: LTC, 2005, 604 p.

NPL - National Physical Laboratory; Michell Instruments. A guide to the measurement of humidity. Londres: The Institute of Measurement and Control, 1996, 68 p.

PAZ, Sidrak José da. Inferência do ponto de orvalho em amostra de gás natural processado. Natal, 2011, 93 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Disponível em: <http://btdt.bczm.ufrn.br/tde/arquivos/12/TDE-2012-08-24T001942Z-4319/Publico/SidrakJP DISSERT.pdf>, acessado em 12/07/13.

POTTER, Merle C; SCOTT, Elaine P Ciências térmicas: termodinâmica, mecânica dos fluidos e transmissão de calor. São Paulo: Thomson Learning, 2007, 772 p.

TIPLER, Paul A; MOSCA, Gene. Física para cientistas e engenheiros. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009, 1 v.

Vocabulário internacional de metrologia - VIM 2008. 1. ed. INMETRO, Edição Brasileira, 2008.