

PROJETO, CONSTRUÇÃO E TESTE DE SENSOR DE UMIDADE DO AR BASEADO EM TERMOPILHA

Manoel Antônio da Fonseca Costa Filho

Roberto de Souza

Rodrigo Ajuz Braga de Vasconcelos

Fábio Dias de Carvalho

Márcio Bastos Pinheiro

Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica,
Rio de Janeiro, RJ, Brasil. E-mail: costafh@ltdc.com.ufrj.br

Resumo

Este trabalho objetivou a construção e teste de sensor de umidade do ar baseado em termopilha. A construção seguiu as recomendações da norma BS 4194 (1967). A termopilha foi formada por 5 termopares do tipo E. Nas junções de bulbo seco foram soldadas esferas de bronze. As junções de bulbo úmido foram revestidas com tiras de tecido, cujas extremidades foram imersas em recipientes contendo água. A relação entre tensão elétrica e temperatura foi obtida através da calibração da termopilha. O teste foi realizado em câmara climática, cujas temperatura e umidade foram variadas, e os valores da umidade relativa foram registrados para o sensor construído e para um higrômetro usado como referência. Os resultados de calibração e teste foram satisfatórios. O objetivo proposto de construir um sensor de umidade simples, de baixo custo e com resposta elétrica foi satisfatoriamente atendido.

Palavras-chave: Sensor de Umidade do Ar, Medição de Umidade, Termopares

1. INTRODUÇÃO

A umidade é uma propriedade termofísica dependente da temperatura e da pressão. Medir a umidade é mais difícil que medir a maioria das outras propriedades físicas.

Medição e controle da umidade do ar representam um papel sempre crescente nas indústrias e laboratórios, permitindo melhorias na qualidade do produto, redução de custo, aumento do conforto humano e da segurança.

A medição da umidade do ar é comumente realizada com emprego de dois termômetros; o primeiro, denominado bulbo seco, mede a temperatura real do ar, e o segundo, denominado bulbo úmido, mede a temperatura na qual a água, evaporando para o ar, é capaz de trazê-lo para o estado de saturação adiabaticamente, para as mesmas temperatura e pressão.

Normalmente psicômetros de bulbos seco e úmido são construídos com termômetros de mercúrio, por questão de simplicidade e baixo custo. Entretanto, os instrumentos assim construídos não se prestam para fins de monitoração e registro contínuos nem automação.

O objetivo deste trabalho é apresentar a construção e testes de um sensor de bulbos seco e úmido baseado em termopilha. Além de suprir a necessidade de resposta elétrica de modo a vencer as limitações daqueles instrumentos baseados em termômetro de mercúrio, espera-se alcançar maiores sensibilidade e resolução.

Duas propriedades independentes mais a pressão são necessárias para determinar o estado termodinâmico do ar úmido. Usualmente sua pressão é considerada como sendo igual à atmosférica. A temperatura de bulbo úmido ou a temperatura do ponto de orvalho é usada para caracterizar a mistura. A terceira propriedade comumente escolhida é a temperatura de bulbo seco. A medição de quaisquer duas destas temperaturas é usada para calcular a umidade do ar a partir de equações apresentadas no *ASHRAE Handbook* (1977).

De um modo mais prático, pode-se recorrer a cartas psicrométricas ou tabelas também constantes no *ASHRAE Handbook* (1977) ou tabelas apresentadas na norma BS 4833 (1986).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Construção

Dentre os diversos tipos de termopares padronizados pelas normas IEC 584-2 e ASTM E-230, foi escolhido o tipo E para a construção do sensor devido a sua maior sensibilidade em comparação com os demais, bem como seu custo de aquisição e disponibilidade comercial. No termopar tipo E, o fio positivo Níquel-Cromo é conhecido comercialmente como Cromel e o negativo Cobre-Níquel é conhecido como Constantan. Sua faixa de utilização vai de -200°C a 900°C . Entretanto em temperaturas abaixo de 0°C em atmosferas úmidas sofre corrosão, restringindo desta forma o uso do sensor construído.

A construção do sensor de umidade seguiu as recomendações apresentadas no apêndice D da Norma BS 4194 (1967), que são equivalentes àquelas do apêndice H da Norma BS 4864. Ainda de acordo com as citadas normas, o instrumento servirá para monitoração e controle de ambientes fechados, bem como de câmaras de ensaios climáticos. A tabela 1 apresenta a relação de materiais empregados na construção do sensor.

Tabela 1. Relação de Materiais Empregados na Construção do Sensor

Material	Descrição
Fio de Cromel	5 m de comprimento com 0,5 mm de diâmetro
Fio de Constantan	5 m de comprimento com 0,5 mm de diâmetro
Isolamento termo-retrátil (espaguete)	8 m de comprimento com 1,6 mm de diâmetro
Isolamento termo-retrátil (espaguete)	0,8 m de comprimento com 9,2 mm de diâmetro
Esferas de bronze	4,5 mm de diâmetro
Mangueiras de PVC flexível	0,2 m de comprimento com 10 mm de diâmetro
Solda de estanho	Quantidade pequena, não especificada
Recipientes plásticos	Padronizados para exames clínicos
Multímetro	Fabricante Minipa, modelo ET 2600
Tecido de algodão	Tipo cadarço de tênis
Fio de cobre	1 m de comprimento com 0,5 mm de diâmetro
Água destilada	
Ventilador	Diâmetro de 300 mm; potência de 40 W; rotação de 1380 rpm

As normas acima mencionadas recomendam que o sensor seja construído com no mínimo 3 pares de junções, de modo a alcançar uma sensibilidade de $0,1^{\circ}\text{C}$ ou melhor. Decidiu-se construir o sensor com 5 pares para aumentar a sensibilidade e precisão.

Os fios de Cromel e de Constantan foram cortados no comprimento de 1000 mm e fixados em uma placa de isopor, de modo a compor a termopilha da figura 1. Este arranjo objetivou facilitar a montagem para garantir a soldagem de cada junção em sua correta posição.

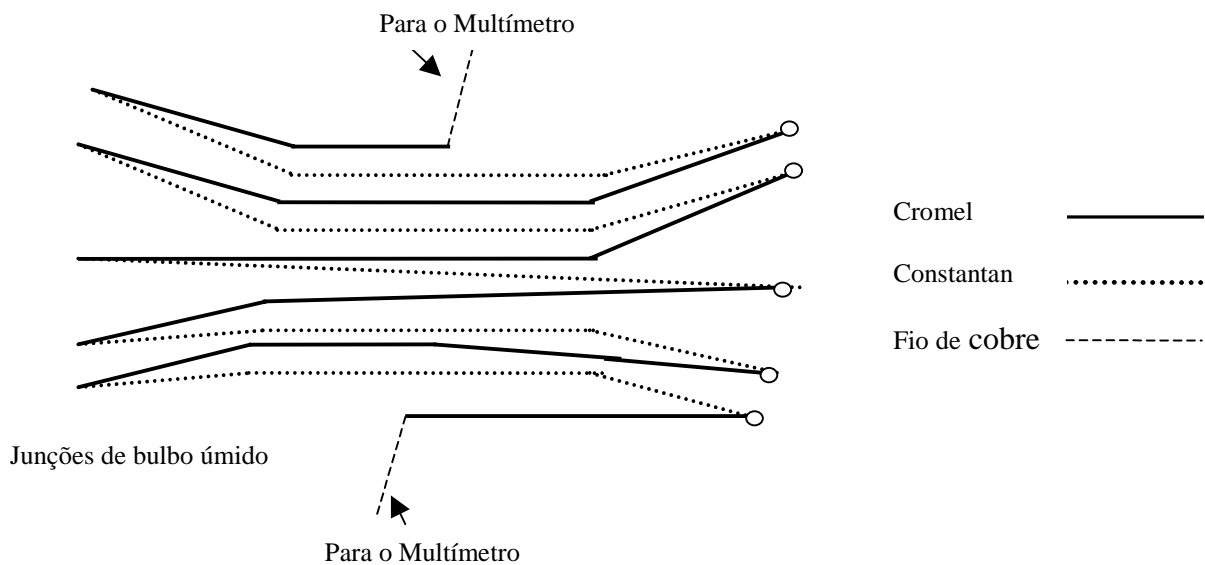


Figura 1. Representação esquemática da termopilha

Então os termopares foram isolados eletricamente através da introdução de cada fio em um espaguete termo-retrátil de 1,6 mm de diâmetro. O material termo-retrátil foi utilizado para facilitar a introdução dos fios. Em seguida os espaguetes foram aquecidos até adquirirem a espessura desejada. Durante o encapsulamento foi deixada uma sobra de 25 mm de fio de cada lado para facilitar a soldagem.

As esferas de bronze foram furadas em torno mecânico com broca de 1 mm de diâmetro. Uma vez preparadas, estas foram soldadas nas junções de bulbo seco para conferir-lhes inércia térmica. Foi utilizada solda a base de estanho (solda fria), com anterior aplicação de ácido muriático para limpeza e melhor acabamento da superfície da esfera. É importante que a junção dos fios fique no furo da esfera, pois se a junção ficar do lado de fora do furo a esfera perde a sua função. A figura 2 mostra detalhes da solda de uma esfera com o termopar.

Obteve-se assim 10 junções, sendo 5 de bulbo seco (com as esferas) e 5 de bulbo úmido para posterior encamisamento conforme figura 3. Essa termopilha foi totalmente encapsulada em um espaguete termoretrátil de 9,2 mm de diâmetro para formar cabo único. A termopilha foi introduzida a partir das junções de bulbo úmido, ficando expostos somente 10 mm de cada lado. As extremidades da termopilha, formadas por fios de cromel e com polaridade negativa, foram soldadas a fios de cobre para condução da tensão elétrica ao milivoltímetro. Estas duas últimas soldas devem permanecer o mais próximas entre si possível, com objetivo de assegurar que a diferença de temperatura entre as mesmas não seja superior a 0,5 °C de acordo com recomendação das referidas normas, fundamentada na teoria da termoeletricidade.

As junções de bulbo úmido foram soldadas através da utilização de um capacitor com uma carga de 30 V DC, determinada em função da pequena espessura do termopar. O pólo negativo do capacitor foi ligado através de um fio de cobre ao termopar e o pólo positivo foi conectado a um borne, também com fio de cobre e inserido num recipiente de vidro contendo mercúrio e óleo. Então o termopar foi inserido neste recipiente, ocorrendo uma descarga

elétrica quando sua ponta entrou em contato com o mercúrio, efetuando-se então a soldagem sem a presença de oxigênio. O procedimento foi repetido para cada termopar.

De acordo com as normas citadas, as tiras de tecido onde são introduzidas as junções úmidas não devem ter menos do que 50 mm de comprimento. Antes das tiras serem colocadas, as pontas das junções foram curvadas por aproximadamente 3 mm para evitar que as mesmas escapem. Em cada junção, as tiras foram amarradas 25 mm acima da extremidade curva. Finalmente estas foram protegidas por um tubo plástico de 30 mm de comprimento.

As tiras das junções de bulbo úmido formam pavios, os quais ficam mergulhados em recipientes distintos contendo água destilada e devem permanecer sempre molhados. A figura 3 mostra detalhes de uma junção de bulbo úmido.

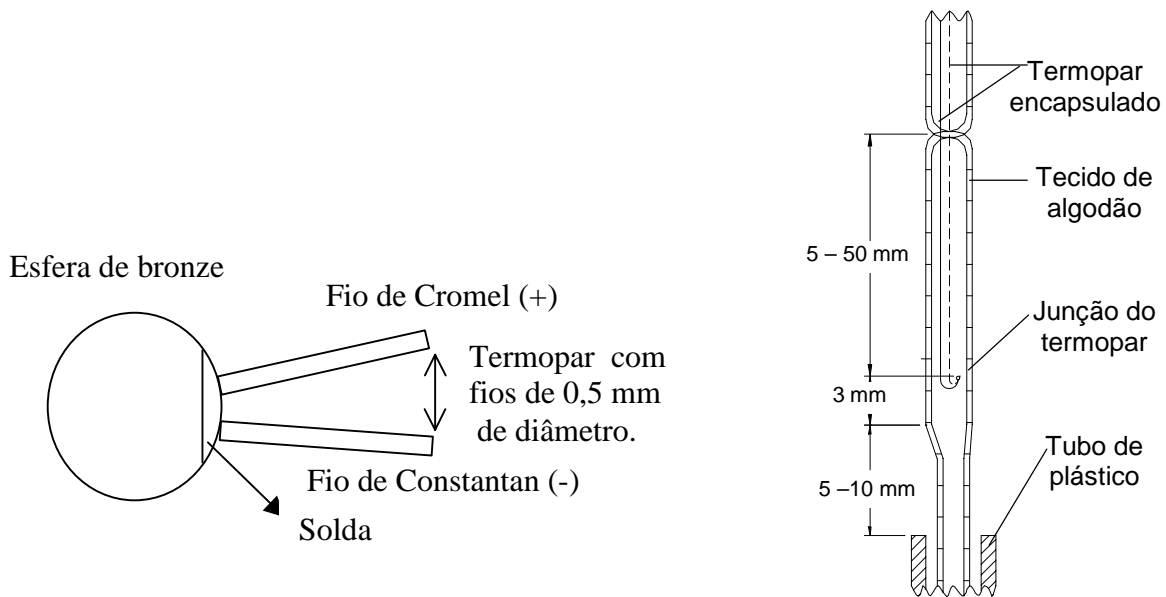


Figura 2. Detalhe de uma Junção de Bulbo Seco.

Figura 3. Detalhe de uma Junção de Bulbo Úmido.

A depressão de bulbo úmido é função da taxa de evaporação. Para assegurar exatidão na medição da umidade, é necessário o emprego de ventilação forçada. O ventilador deve ser posicionado em relação aos sensores conforme mostrado na figura 4, reproduzida da norma BS 4194 (1967). A velocidade do ar deve estar compreendida entre 1 e 2 m/s no sentido da aspiração.

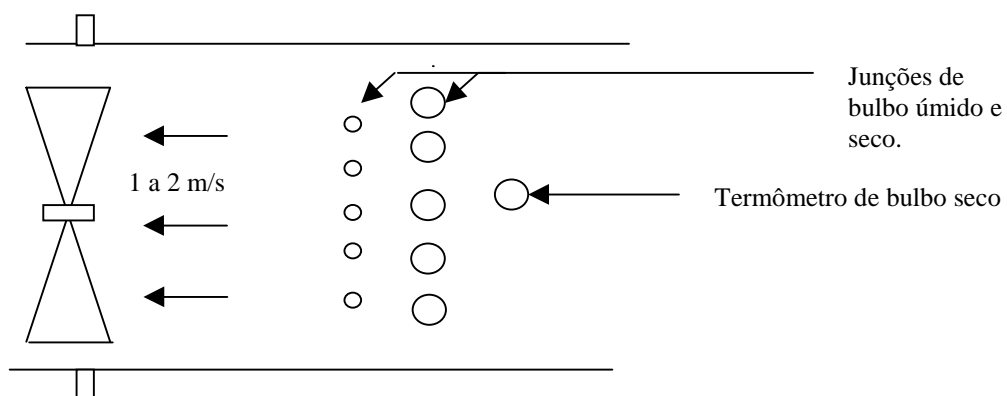


Figura 4. Esquema da Posição do Ventilador.

2.2 Calibração da termopilha

Na calibração da termopilha foram utilizados os seguintes equipamentos: garrafa térmica com água e gelo; equipamento para banho termostático (Polystat Circulator; Cole Parmer); multímetro 1 (A.W. Sperry; modelo DM-8300); termômetro rastreado ao NIST (ERTCO; n° de série H98-345; faixa de medição de -1 °C até 101 °C; divisão de escala de 0,1° C); multímetro 2 (ECB; modelo MD-045; n° série 84103).

A temperatura do banho termostático foi variada através de ajuste próprio, a partir da temperatura ambiente de 22,3 °C até a temperatura de 75,6 °C com incrementos sucessivos de aproximadamente 5 °C. Para cada temperatura selecionada, foram registrados os valores lidos no termômetro padrão, no termômetro do próprio banho termostático e as tensões elétricas correspondentes, geradas na termopilha e lidas nos dois multímetros. A temperatura na garrafa térmica com água e gelo foi repetidas vezes verificada no decorrer do experimento de modo a assegurar-se que seu valor desejado de 0 °C tivesse sido mantido.

A curva de calibração foi construída com os valores de temperatura fornecidos pelo termômetro padrão e com os valores de tensão elétrica fornecidos pelo multímetro 2. Os pares de valores foram plotados em um gráfico e uma reta regressora foi traçada entre os mesmos. Os valores de temperatura indicados no termômetro do banho e de tensão elétrica indicados no multímetro 1 serviram para verificação complementar. Uma vez conhecida a relação tensão/temperatura, a depressão de bulbo úmido é também conhecida.

2.3 Teste do sensor de umidade

No teste do sensor foram utilizados os seguintes equipamentos: câmara climática fabricada pela FEUTRON; termômetro da própria câmara; higrômetro fabricado pela SUND0 com resolução de 1%, usado como referência para fins de comparação; multímetro fabricado pela Minipa, modelo ET 2600.

O higrômetro de referência foi colocado dentro da câmara climática junto com o sensor construído, que teve seus fios de cobre passando através de abertura lateral da câmara, que por sua vez foi vedada com tampa de borracha. A umidade e a temperatura no interior da câmara foram variadas através de ajuste do próprio equipamento. Os valores de umidade relativa, de depressão de bulbo úmido e de temperatura, fornecidos respectivamente pelo higrômetro, sensor construído e termômetro foram registrados para cada ponto de ajuste da câmara. Com a depressão de bulbo úmido e com o valor da temperatura (de bulbo seco), calculou-se a umidade relativa indicada pelo sensor, usando tabelas apropriadas fornecidas pela norma BS 4833 (1986). Todo procedimento foi feito considerando a pressão barométrica como sendo 1 atm.

Como a câmara climática possui ventilação interna, o sensor foi testado sem seu ventilador associado.

3. RESULTADOS

3.1 Calibração

A tabela 2 apresenta os valores de temperatura e tensão elétrica obtidos na calibração da termopilha.

Na calibração da termopilha, encontrou-se aproximadamente uma tensão elétrica correspondente ao quádruplo da tensão elétrica individual do termopar tipo E.

A figura 5 mostra a curva de calibração da termopilha.

3.2 Testes

A tabela 3 compara os valores de umidade relativa medidos no higrômetro usado como referência contra aqueles obtidos pelo sensor construído. Na mesma também são apresentados os valores da temperatura, da depressão de bulbo úmido e da tensão elétrica, que foram usados na determinação da umidade relativa indicada pelo sensor.

Tabela 2. Resultados da calibração da termopilha

Padrão (°C)	Banho (°C)	Multímetro 1 (mV)	Multímetro 2 (mV)
22,3	22,3	6,6	6,74
25,4	25,4	7,5	7,66
29,4	29,4	8,7	8,85
35,5	35,4	10,6	10,74
40,5	40,0	12,2	12,30
45,4	45,0	13,8	13,88
50,5	50,0	15,3	15,46
55,7	55,3	17,0	17,08
60,6	60,02	18,5	18,62
65,5	65,0	20,0	20,13
70,6	70,0	21,6	21,74
75,6	75,0	23,3	23,35

Curva de Calibração da Termopilha

Equação da Reta

$$Y = -0.168917 + 0.309785 * X$$

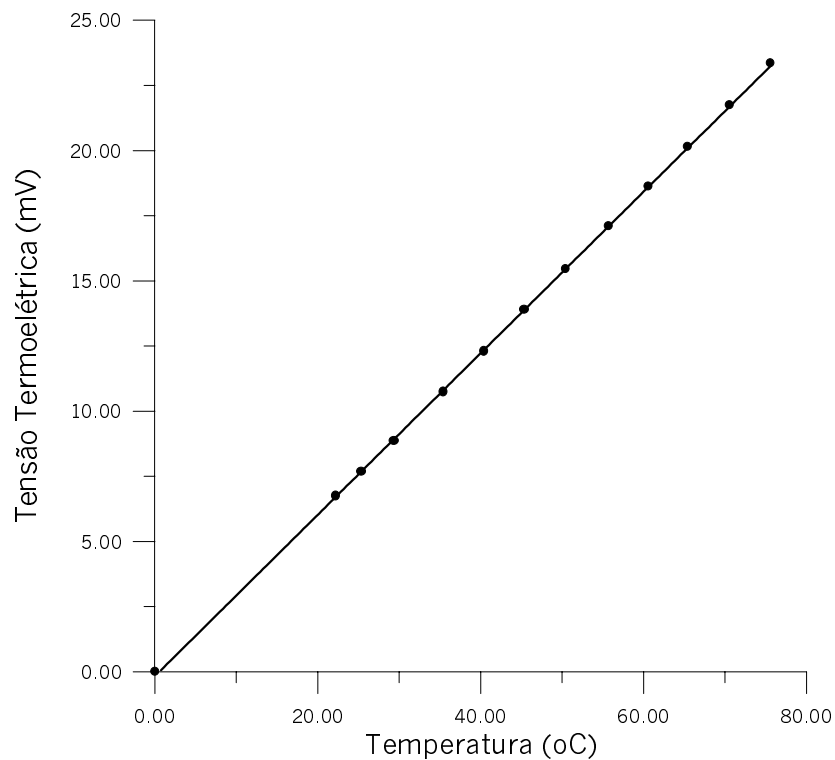


Figura 5. Curva de Calibração da Termopilha

Os valores de umidade relativa fornecidos pelo sensor construído estão próximos daqueles indicados pelo higrômetro usado como referência, cuja precisão não é inferior a 3%. É necessário testar o sensor contra um higrômetro padrão e rastreado. O teste aqui conduzido serviu apenas para verificação do correto funcionamento do sensor construído.

Tabela 3. Resultados do teste do sensor de umidade

Temperatura (°C)	Tensão elétrica (mV)	Umidade higrômetro padrão (%)	Depressão de bulbo úmido (°C)	Umidade sensor (%)	Desvio entre sensor construído e padrão (%)
23,25	0,67	82,0	2,33	81,6	0,49
24,25	0,78	79,0	2,69	79,1	-0,13
27,75	1,14	71,0	3,85	73,0	-2,82
28,00	1,67	58,0	5,60	62,0	-6,90
28,50	1,40	64,0	4,69	67,6	-5,62
28,50	1,25	69,0	4,20	71,0	-2,90
29,00	1,46	63,5	4,90	67,0	-5,51
29,50	1,44	64,5	4,81	67,6	-4,81
30,00	1,44	64,5	4,81	67,6	-4,81
31,50	1,46	67,5	4,88	68,4	-1,33
31,50	1,30	69,0	4,40	71,3	-3,33
33,00	1,78	59,5	5,90	63,1	-6,05
35,00	1,82	64,0	6,04	64,3	-0,47
35,25	1,70	64,5	5,70	65,4	-1,40
37,50	2,22	60,0	7,30	58,8	2,00
39,00	2,56	57,0	8,43	55,5	2,63
40,00	2,70	54,0	8,88	53,0	1,85
40,00	3,36	45,0	11,05	44,6	0,89
41,00	3,03	47,5	9,94	49,4	-4,00
41,50	3,10	48,0	10,20	48,6	-1,25

4. CONCLUSÕES

Apesar do sensor de umidade ter sido construído seguindo todas as recomendações das normas BS 4194 (1967) e BS 4864 (1973), este poderá ser aprimorado através de vários artifícios, entre eles: aumento do número de termopares empregados; efetuando-se em paralelo a medição da pressão barométrica para correção da pressão.

Ainda que possa ser melhorado, o objetivo proposto de construir um medidor de umidade simples, de baixo custo e com resposta elétrica foi satisfatoriamente atendido.

5. BIBLIOGRAFIA

- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 1977, "ASHRAE Handbook 1977 Fundamentals", ASHRAE, New York, USA, p.6.1-6.12.
- American Society of Mechanical Engineers, 1985, "Instruments and Apparatus Part 3 Temperature Measurement", ASME, New York, USA, "ANSI/ASME PTC 19.3".

- British Standards Institution, 1967, “Recommendations on The Design Requirements and Testing of Controlled-Atmosphere Laboratories”, BSI, London, England, “BS 4194”.
- British Standards Institution, 1986, British Standard Schedule for Hygrometric Tables for Use in the Testing and Operation of Environmental Enclosures”, BSI, London, England, “BS 4833”.
- British Standards Institution, 1973, “Recommendations on The Design and Testing of Enclosures for Environmental Testing”, BSI, London, England, “BS 4864”.
- Benedict, R. P., "Fundamentals of Temperature, Pressure, and Flow Measurements", John Wiley, New York, USA.
- Carvalho, F. D., Pinheiro, M. B. & Vasconcelos, R. A. B. de, 1999, “Projeto e Construção de Sensor de Umidade com Base em Termopares”, Projeto de Graduação, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 78p.
- DeBat, R.J., 1996, “Humidity ; the Great Equalizer”, HPAC Heating/Piping/Air Conditioning, October, p.66-71.
- Holman, J. P., 1989, “Experimental Methods for Engineers”, McGrawHill, New York, USA.
- Threlkeld, J. L., 1965, “Thermal Environmental Engineering”, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, USA, p.157-306.
- Wiederhold, P. R., 1998, “Fundamentals of Moisture & Humidity; Part1 – Definitions and Specifications”, Measurements & Control, p.97-108.