



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe



Desenvolvimento e Calibração de um Termohigrômetro para uso em Pesquisas de Micrometeorologia, Agrometeorologia e Climatológica

Geraldo Aparecido Rodrigues Neves^{1*}, João Basso Marques², José de Souza Nogueira³, Marcelo Sacardi Biudes⁴, Paulo Henrique Zanella de Arruda⁵, Leone Francisco Amorin Curado⁶, Rafael da Silva Palácios⁷

¹Doutor em Física Ambiental pelo Programa de Pós-graduação em Física Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT). Av. Fernando Corrêa da Costa, 2367. Cidade Universitária, Bloco de Física Ambiental, Cep: 78060-900 - Cuiabá – MT. Fone: (65) 3615-8738, Fax (65) 3615-8738, garneves@fisica.ufmt.br (autor correspondente).

²Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), Av. Fernando Corrêa da Costa, 2367. Cidade Universitária, Bloco de Física Ambiental, Cep: 78060-900 - Cuiabá – MT. Fone: (65) 3615-8738, Fax (65) 3615-8738, jbassofisico@gmail.com.

³Doutor em Física Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), Av. Fernando Corrêa da Costa, 2367. Cidade Universitária, Bloco de Física Ambiental, Cep: 78060-900 - Cuiabá – MT. Fone: (65) 3615-8738, Fax (65) 3615-8738, nogueira@ufmt.br.

⁴Doutor em Física Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), Av. Fernando Corrêa da Costa, 2367. Cidade Universitária, Bloco de Física Ambiental, Cep: 78060-900 - Cuiabá – MT. Fone: (65) 3615-8738, Fax (65) 3615-8738, marcelo.biudes@gmail.com.

⁵Doutor em Física Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), Av. Fernando Corrêa da Costa, 2367. Cidade Universitária, Bloco de Física Ambiental, Cep: 78060-900 - Cuiabá – MT. Fone: (65) 3615-8738, Fax (65) 3615-8738, paulo.zanella@fisica.ufmt.br.

⁶Doutor em Física Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), Av. Fernando Corrêa da Costa, 2367. Cidade Universitária, Bloco de Física Ambiental, Cep: 78060-900 - Cuiabá – MT. Fone: (65) 3615-8738, Fax (65) 3615-8738, leonecurado@gmail.com.

⁷Doutorando em Física Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), Av. Fernando Corrêa da Costa, 2367. Cidade Universitária, Bloco de Física Ambiental, Cep: 78060-900 - Cuiabá – MT. Fone: (65) 3615-8738, Fax (65) 3615-8738, rafael.pgfa@gmail.com.

Artigo recebido em 12/02/2015 e aceite em 10/09/2015

RESUMO

A utilização de sensores para medidas de temperatura e umidade relativa do ar são fundamentais para o desenvolvimento da micrometeorologia, na agrometeorologia para o manejo de irrigação, clima urbano, pesquisas ambientais de microclima e climatologia. Apesar de simples, o alto custo de sensores de elevada acurácia, restringe sua aquisição a poucos grupos de pesquisa, reduzindo a medida de séries temporais dessas, variáveis, em cidades e em ambiente natural. Nesse contexto, o objetivo desse trabalho foi desenvolver um termohigrômetro para medir a temperatura e umidade relativa do ar em ambientes externos, de acordo com a Organização Mundial de Meteorologia e com eficiência compatível com os mais conceituados disponíveis no mercado. Após o desenvolvimento, foram feitas as calibrações dos sensores construídos com equipamentos similares comerciais certificados, denominados aqui de referência. Realizamos comparações através do ajuste de modelos lineares dos dados. Os resultados mostraram que houve alta correlação entre os valores obtidos pelos sensores construídos e os de referência, com R^2 acima de 0.99 e redução de custos de até 90%.

Palavras-chave: Sensor, Temperatura do ar, Umidade Relativa do Ar, Micrometeorologia, Agrometeorologia.

Development and calibration of a Thermohygrometer for use in Research Micrometeorology, Agrometeorology and Climatological

ABSTRACT

The use of sensors for temperature measurements and relative humidity are key to the development of micrometeorology in agrometeorology for managing irrigation, urban climate, environmental research microclimate and climatology. Though simple, the high cost of high accuracy sensors, restricts its acquisition a few research groups, reducing the time series as such, variables in cities and natural environment. In this context, the aim of this study was to develop a thermohygrometer for measuring temperature and relative humidity outdoors, according to the World Meteorological Organization and efficiency compatible with the most highly available. After development, the

¹ E-mail para correspondência: garneves@fisica.ufmt.br (Neves, G.A.R)

calibrations of sensors built with similar commercial equipment certificates, denominated reference equipment were made. We perform comparisons by adjusting linear models of data. The results showed a high correlation between the values obtained by the sensors constructed and reference with R^2 above 0.99 and cost reduction of up to 90%.

Keywords: Sensor; Air temperature; Relative Humidity; Micrometeorology; Agrometeorology.

Introdução

Nas últimas décadas os estudos relacionados as trocas de energia e massa no sistema solo-planta-atmosfera tem se intensificado consideravelmente, a análise dos fluxos de energia e massa sobre a superfície, tais como a evapotranspiração e o fluxo de dióxido de carbono (CO_2), auxiliam no entendimento sobre a dinâmica dos ecossistemas (Srbinovska et al., 2015 e Sousa, 2015). Pesquisas ambientais envolvendo fluxo e e-fluxo de CO_2 no solo utilizam medidas de umidade relativa do ar (UR) com altíssima precisão, uma vez que as medidas de dióxido de carbono necessitam de uma série de correções, já que a maioria dos sensores de CO_2 são baseados na absorção da radiação na faixa do infravermelho, onde há a sobreposição das linhas de absorção de CO_2 e água (H_2O). Nesse contexto, a temperatura e a UR são variáveis fundamentais para compreensão da dinâmica dos fluxos de CO_2 e taxas de evapotranspiração, sendo necessário obter medidas precisas e de confiabilidade para tais variáveis.

Outra necessidade em se dispor de medidas precisas de temperatura e UR é baseada em estudos de microclima e ambiente urbano. Vários estudos em ambientes urbanos, tal como a formação de ilhas de calor utilizam-se de análises de monitoramento remoto, ou seja, usam imagens de satélite. Entretanto, os detalhamentos dos efeitos na configuração urbana obtido através das imagens termais necessitam de levantamentos da temperatura e UR *in loco* (Santana, 2015).

Em micrometeorologia, é comum o uso das expressões temperatura do ar à superfície e temperatura do ar à sombra, essas expressões são utilizadas de modo equivalente e se referem à temperatura em um ponto da superfície, de forma mais simples essa expressão se refere a temperatura atual em um ponto da atmosfera próximo à superfície da Terra (Prihodko & Goward, 1997; Stisen et al., 2007).

Os estudos relacionados ao comportamento da temperatura do ar têm sido amplamente estudados em várias partes do mundo devido sua importância nos diversos processos ambientais: ciclo hidrológico, alterações no clima, nas mudanças climáticas globais (Shirvani, 2015; Stocker et al., 2013) avaliação da atividade humana na agricultura (Smith et al, 2009; Cobaner et al, 2014) bem como sua influência nas variações da UR.

Medidas de alta precisão da temperatura e da UR são necessárias em muitos sistemas de monitoramento sobre os fluxos de energia, assim como em estudos sobre a mudança do uso do solo, a aplicação de dados confiáveis fornecidos como entrada aos modelos de fluxos auxiliam na eliminação de erros no fechamento do balanço de energia (Foken & Oncley, 1995). A maneira mais comum de aferir a temperatura do ar é

por meio de medida da variação na resistência elétrica de metais, causada pela transferência de calor com o meio (Hannay et al., 1959).

Sensores de temperatura que apresentam funções de transferências não lineares exigem circuitos relativamente complexos para compensar a não linearidade do sistema, requerendo resistores de alta precisão e de calibração manual para proporcionar a exatidão desejada (Srbinovska et al., 2015).

Classicamente, a umidade relativa do ar é estimada por um sistema chamado psicrômetro, constituído por dois termômetros idênticos, de forma que um deles mede a temperatura do ar com o bulbo seco e o outro é envolvido por um material umedecido chamado de bulbo úmido, a diferença de temperatura causada pela evaporação do segundo termômetro é relacionada com a umidade relativa do ar (Doebelin, 1990). Esse método embora seja eficiente e muito importante historicamente, é inviável para medidas precisas e de longo prazo, para localizações remotas, torres micrometeorológicas e perfis de umidade relativa.

Atualmente, as medidas de UR são realizadas através das alterações produzidas pelo vapor d'água nas características elétricas de componentes inseridos em circuitos eletrônicos apropriados. Esses componentes podem ser do tipo cristal, resistores ou capacitores. Outro método utilizado é o resistivo, que utiliza alumínio revestido por filme de óxido de alumínio (Chen, et al., 2005). A estrutura desse filme apresenta poros cujo preenchimento por gotículas, de vapor d'água, condensado produz alteração do valor da sua resistência elétrica, medida através de um circuito em ponte.

Entretanto, esses sensores possuem limitações com relação à sua utilização em alguns ambientes, caso possa ocorrer a condensação do vapor de H_2O , pois o nesse caso o circuito estaria sujeito a oxidação devido ao contato direto com H_2O , consequentemente a eficiência para medir a UR estaria abaixo de 20%. Além disso, sua estabilidade é inferior em comparação com sensores capacitivos (Sensiron, 2005).

O método capacitivo baseia-se na alteração das características do meio dielétrico pelo vapor d'água e consequentemente pode ser usado para medir a UR. Ao utilizar um polímero como dielétrico, esse meio absorve ou libera água de maneira proporcional à umidade relativa do ambiente, este dielétrico irá alterar sua capacitância que, acoplado a um circuito eletrônico, possibilita determinar o valor da umidade relativa do ar (Sensiron, 2005).

Em todos os métodos de medição da temperatura e UR são necessárias as construções de abrigos de acordo com normas internacionais, de forma a minimizar as interferências externas como incidência direta de chuva, radiação solar e aerossóis.

Devido às respostas não lineares e à baixa amplitude nas saídas dos sensores, torna-se necessário

o condicionamento dos sinais, seja amplificando ou compensando a não linearidade antes de qualquer outro processamento adicional (Glynne-Jones, 2004).

Geralmente, quando as saídas analógicas dos sensores são processadas por sistemas digitais, há ainda a necessidade de condicionamento do sinal para que os sinais provenientes dos sensores sejam adequados às características do conversor analógico digital (Van de Plassche, 2003).

Existe um grande número de transdutores de temperatura integrados à ADC's (conversor analógico digital) de alta resolução para disponibilizar saídas digitais, o que permite a linearização e calibração de forma digital, reduzindo o custo e a complexidade na utilização destes circuitos, (Kester, 2004). Assim, com o emprego de um microcontrolador na regulação dos processos, o valor analógico convertido para digital pode ser manipulado por software de controle de acordo com decisões lógicas baseadas em comparações. Pode-se também executar operações matemáticas que definam as funções de controle.

Geralmente os medidores de UR são comercializados com certificações apenas se forem utilizados com o *logger* apropriado, do mesmo fabricante, aumentando significativamente o orçamento das pesquisas ambientais experimentais. Nesse contexto, o objetivo desse trabalho foi desenvolver um termohigrômetro para medir a temperatura e UR em ambientes externos, de acordo com a Organização Mundial de Meteorologia e com eficiência compatível com os mais conceituados sensores disponíveis no mercado.

Material e Métodos

O experimento foi conduzido sobre uma área urbana da capital Cuiabá, (15°36' Sul e 56°03' Oeste) (estado de Mato Grosso), Figura 1, no prédio do Programa de Pós-graduação em Física Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso, UFMT, na parte superior do prédio, onde foram fixados os sensores de temperatura e UR de referência, lado a lado instalados em uma plataforma de suporte.

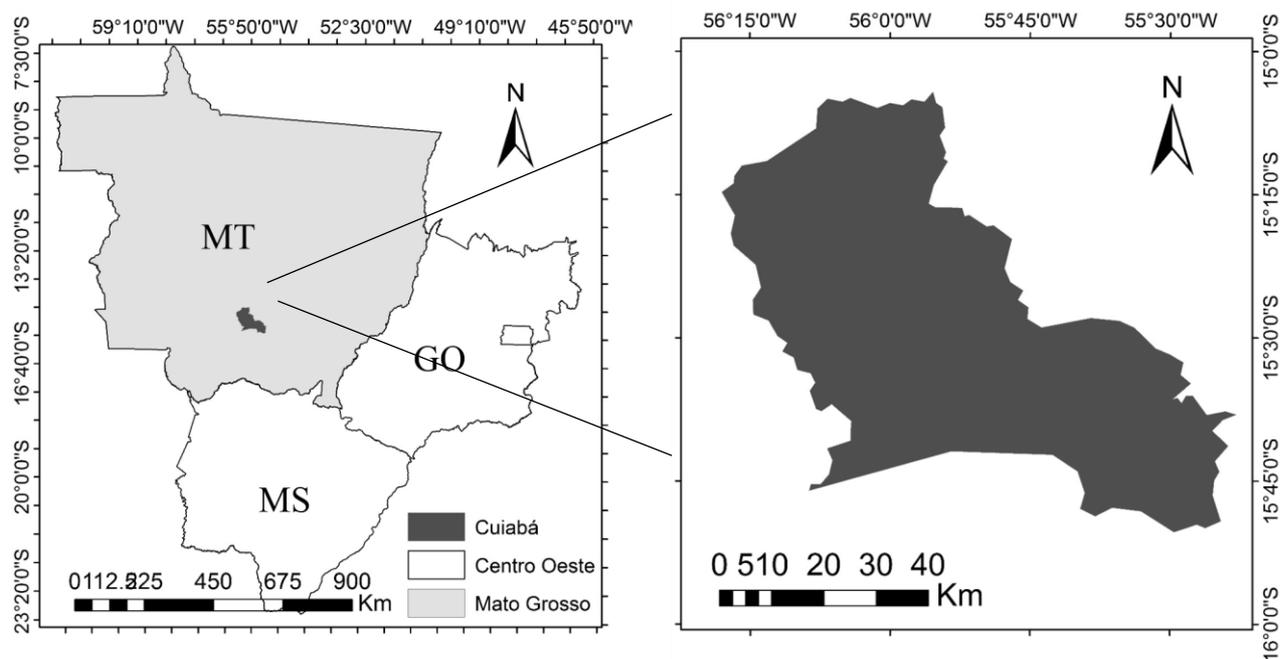


Figura 1. Localização da área de estudo, no detalhe a capital Cuiabá.

O intervalo de tempo utilizado nessa avaliação foi de 48 horas, dias 15 e 16 de março de 2013. A Figura 1 representa a capital Cuiabá, local em que foi desenvolvido o estudo.

A metodologia utilizada para a construção dos sensores, foi baseada nas normas da WMO (World Meteorological Organization) em que os sensores meteorológicos, neste caso o termohigrômetro (medidas de temperatura e UR), devem ser protegidos da radiação solar direta e possuir um sistema que permita a ventilação e a dissipação rápida do calor. Esses cuidados, são necessários para que os valores obtidos representem o ambiente local à sombra e de

forma que a dinâmica ambiental não seja medida com atraso pelos sensores.

Apesar do sensor utilizado ter garantias de funcionamento emitidas pelo fabricante, assim como curvas de funcionamento com máximos e mínimos definidos, nesse trabalho foi utilizado como referência os sensores comerciais aplicados a micrometeorologia, calibrados e certificados para comparar as medidas sistematicamente, afim de obter uma curva de calibração para os novos sensores.

Os valores certificados de temperatura e UR reportados nesse trabalho foram obtidas por meio de medidas de um termohigrômetro comercial, projetado especialmente para ambientes externos e uso em

micrometeorologia, modelo (HMP 45 C., Vaisala, Inc. Helsinki, Finland), muito utilizado por pesquisadores do mundo todo.

Para o desenvolvimento deste trabalho, o sensor escolhido foi o chip termohigrômetro (SHT75, Sensirion AG, Zurich, Suíça). O tamanho foi determinante para a escolha deste sensor, bem como o fato desse sensor possuir interface digital integrada para conversão e obtenção dos dados. Esse último fator elimina alguns problemas de ruídos, associados a medida direta existentes em outros sensores que não são digitais.

A escolha desse sensor também levou em consideração a precisão, tempo de resposta e frequência de medida. Outro fator foi a existência de elementos sensores individuais para temperatura do ar e UR no mesmo encapsulamento.

O chip SHT75 Figura 2 possui um sensor PTAT bandgap, que responde linearmente à temperatura absoluta, e um sensor capacitivo para medir a temperatura e UR, respectivamente.

Para minimizar a influência de agentes externos como poeira, precipitação, radiação solar direta e ataque de insetos, os sensores (SHT75) foram soldados a uma placa de circuito impresso de fenolite de face simples, com dimensão de 2,0 x 2,5 cm. Os sensores foram conectados a um cabo de telefone de categoria 4 com 50,0 cm de comprimento, o cabo possui dois pares metálicos e um conector RJ-11 em sua extremidade Figura 2.

A placa de circuito impresso com o sensor, foi fixada no interior de uma caixa de PVC de tamanho 5,0 x 3,3 x 0,5 cm, ventilada e com filtro poroso, para evitar movimentação mecânica. Esse encapsulamento proporciona mobilidade e agilidade, tanto na instalação do sensor como em sua manutenção.

Por fim, o abrigo termométrico foi construído de acordo com as normas da Organização Mundial de Meteorologia (WMO). Este foi construído com o uso de cinco pratos quadrados com bordas arredondadas de PVC de cor branca e dimensões 7,0 x 7,0 x 2,9 cm, sustentados por duas barras roscadas galvanizadas de 16 cm de tamanho e 0,4 cm diâmetro, de modo a fixar os pratos sobrepostos mantendo um espaçamento de 1,7 cm entre si, Figura 3. A Figura 3 representa o processo de montagem para o abrigo termométrico, evidenciando a simplicidade do processo, no detalhe os pratos quadrados com bordas arredondadas de PVC de cor branca perfurados com duas barras roscadas galvanizadas ao lado, assim como os conectores utilizados para a fixação, foi utilizado uma pequena caixa de PVC, na qual, encontra-se a placa de circuito impresso com os sensores fixo por soldagem.

Para a calibração dos sensores de temperatura e UR do termohigrômetro construído, foram utilizadas medidas sincronizadas com o termohigrômetro HMP45C. A leitura e armazenamento dos sinais

fornecidos pelo termohigrômetro construído foram realizadas através do protocolo de comunicação I2C, e utilizando um microcontrolador (datalogger-microcontrolador), e para o registro das medidas feitas pelo termohigrômetro de referência foi utilizado um datalogger (CR1000, Campbell Scientific, Inc., USA) largamente utilizado para medidas em ciências ambientais. O conjunto termohigrômetro construído e de referência foram dispostos nas mesmas condições em uma área externa Figura 4.



Figura 2. Sensor SHT75 e sua fixação em caixa de PVC ventilada com filtro poroso.

A calibração dos sensores, após o período de medidas comparativas, foi realizada por uma regressão linear simples, de onde se obteve os coeficientes angulares e lineares da reta e o coeficiente de determinação da reta. Também foram utilizados alguns indicadores: exatidão – índice de Willmott “d” Equação 1; raiz do erro quadrático médio “REQM” Equação 2 e o erro médio absoluto “EMA” Equação 3.

A exatidão está relacionada ao afastamento dos valores obtidos pelo termohigrômetro construído e o de referência. Matematicamente essa aproximação é dada por um índice designado de concordância que pode ser amplamente aplicado à comparação entre modelos (Willmott et al., 1985). Seus valores variam de 0 (zero), com nenhuma concordância, a 1 (um), com concordância perfeita.



Figura 3. Materiais utilizados e fases da montagem do abrigo e acomodação do conjunto sensor SHT75.



Figura 4. Termohigrômetro desenvolvido à esquerda e termohigrômetro de referência à direita.

$$d = 1 - \frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \quad (1)$$

Em que P_i é o valor obtido pelo termohigrômetro construído, O_i o valor obtido pelo termohigrômetro de referência e O a média dos valores obtidos pelo termohigrômetro de referência.

O *EMA* indica o afastamento (desvio) médio absoluto dos valores obtidos pelo termohigrômetro construído em relação aos valores obtidos pelo termohigrômetro de referência.

$$EMA = \sum \frac{|P_i - O_i|}{n} \quad (2)$$

O *EQM* indica o quanto as medidas do termohigrômetro construído apresentam erros ao estimar a variabilidade das medidas em torno da média. Esse índice mede a variação dos valores obtidos pelo termohigrômetro construído ao redor dos valores

obtidos pelo termohigrômetro de referência (Willmott e Matsuura, 2005).

$$REQM = \sqrt{\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (3)$$

O menor limite de *REQM* é 0, o que significa que há plena adesão entre medidas com o termohigrômetro construído e o de referência. O ideal seria que os valores do *EMA* e do *REQM* fossem próximo de zero (Willmott e Matsuura, 2005).

Resultados e Discussão

As medidas de temperatura e umidade relativa do ar realizadas com o termohigrômetro construído foram muito próximas às realizadas com o termohigrômetro de referência, com um ajuste satisfatório, pois o coeficiente linear aproxima-se de zero, o coeficiente angular se aproxima de 1 e o coeficiente de determinação (R^2) explica 99,9% dos dados observados Tabela 1.

Tabela 1. Coeficiente angular (*a*) e linear (*b*) da regressão entre a temperatura (T) e umidade relativa do ar (UR) medidas pelo sensor de referência e pelo protótipo, coeficiente de correlação (*r*), coeficiente de Willmott (*d*), erro médio absoluto (*EMA*) e raiz do erro médio quadrático (*REQM*).

Variáveis	T	UR
<i>a</i>	0,984	0,991
<i>b</i>	0,627	-0,023
<i>R</i>	1,000	1,000
<i>d</i>	1,000	0,999
<i>EMA</i>	0,131	0,621
<i>REQM</i>	0,143	0,683

O restante das variações observadas é justificado por outros fatores, denominados nesse trabalho como erro experimental. O coeficiente de determinação é definido como o quadrado do coeficiente de correlação dos dados. Em uma regressão linear, como utilizado na análise de dados, este coeficiente representa a proporção da variação total (ou variância) que pode ser explicada pela relação linear existente entre os dados obtidos pelo sensor protótipo e o sensor de referência.

Na Tabela 1, são apresentados os modelos ajustados por regressão linear incluindo as constantes para cada região. As regressões lineares utilizadas neste trabalho foram analisadas em função do coeficiente de correlação (r), índice de concordância de Willmott (d), erro médio absoluto (EMA) e raiz do erro médio quadrático ($REQM$), (Willmott et al., 1985; Willmott e Matsura, 2005).

Os resultados indicam uma ótima concordância entre os valores obtidos tanto para temperatura como para a UR do protótipo com o sensor de referência, os valores de a de 0,98 e 0,99 para a temperatura e UR, respectivamente, evidenciam que a inclinação da reta formada entre os dados do protótipo e o sensor de referência são de praticamente um para um (1 x 1).

Os sensores construídos foram submetidos a variações da ordem dos limites de trabalho dos sensores sem apresentar flutuações de borda, fornecendo uma estabilidade nas medidas no intervalo do range de detecção.

O monitoramento da temperatura e UR são de extrema importância em áreas como micrometeorologia, agrometeorologia e climatologia, de modo que os modelos de microclima e de agricultura de precisão, bem como as estimativas por sensoriamento remoto, necessitam de medidas de referência em estações centrais e extrapolam os resultados (Sousa, 2015). Com sensores de baixo custo é possível viabilizar novas séries temporais de outras localidades.

Outro fator importante no estudo do comportamento da temperatura do ar está no fornecimento de informações a respeito das mudanças

climáticas globais (Shirvani, 2015; Stocker et al., 2013) impacto humano sobre o clima (Smith et al, 2009; Cobaner et al, 2014) e sua relação com a UR.

A construção do termohigrômetro foi cuidadosamente pensada para que pesquisadores não encontrasse dificuldade em reproduzi-lo, desde materiais simples e elemento sensor bem estabelecido no mercado, e com solda de apenas três fios. A viabilidade do sensor desenvolvido está relacionada ao seu ótimo desempenho e diferenças de custo final. Enquanto um termohigrômetro comercial para torres micrometeorológica custa em torno de \$720,00 o sensor desenvolvido neste trabalho não passou de \$70,00 com margem para flutuações da moeda local no Brasil. Isso mostra a relevância deste estudo para a área de micrometeorologia, agrometeorologia e climatologia, onde as variáveis aqui estudadas são fundamentais para a interpretação de fenômenos climáticos.

A distribuição temporal dos valores de temperatura (T) e UR medida através do protótipo assim como as pelo sensor de referência são representadas na Figura 5. Observa-se que para o intervalo analisado (dois dias) ocorreram dois máximos de T, para os quais os dois sensores registraram valores acima de 40°C para o primeiro pico e valores acima de 42°C para o segundo.

Graficamente (Figura 5a) os valores de T do protótipo parecem ser menores durante os registros de altas temperaturas e maiores durante os registros de temperaturas mais baixas. Já para a UR o processo inverso é observado, ou seja, graficamente os valores medidos para altos valores de UR são menores enquanto que os valores medidos para baixos valores de UR são maiores.

As variações encontradas graficamente são mínimas quando ressaltado a complexidade de tais medidas, esse fato foi verificado estatisticamente, tanto os parâmetros da regressão como o coeficiente de determinação e a análise dos erros reforçam a validade da metodologia proposta nesse trabalho.

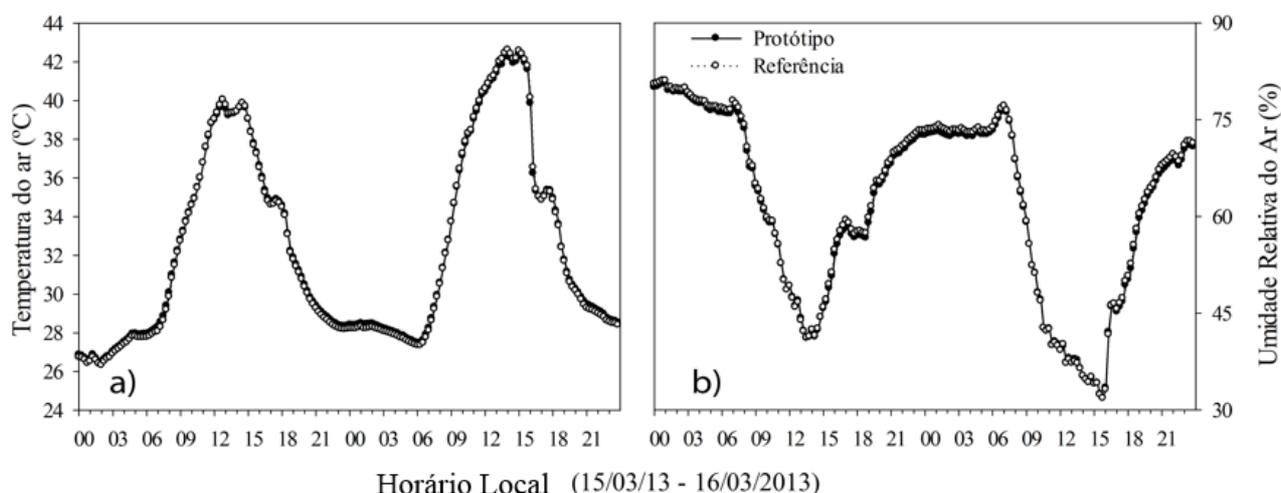


Figura 5. Serie temporal das medidas realizadas com o protótipo e o sensor de referência em a) para a temperatura T e b) umidade relativa do ar UR.

A Figura 5b indica que ambos sensores também registraram valores de UR próximos a 30% para o dia 16/03/2013 e que suas amplitudes máximas ultrapassaram 80% na madrugada do dia 15/03/2013. As regressões lineares entre os dados medidos através do protótipo e o sensor de referência para T e UR são representados na Figura 6. Os valores registrados na Tabela 1 tem origem nessas regressões.

Foi observado um R^2 de 0.99 para ambas regressões, o que indica que o termohigrômetro construído (protótipo) explica 99% dos dados medidos através do sensor de referência. A Figura 6 ainda aborda o grau de significância das regressões realizadas, assim com as equações de cada regressão.

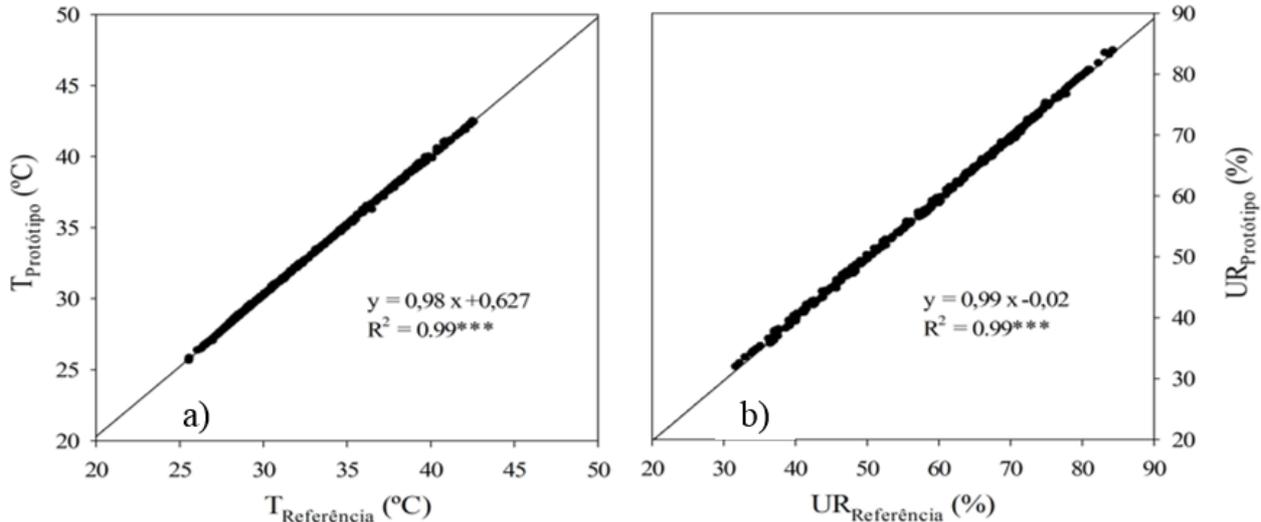


Figura 6. Regressão elação entre a) temperatura e b) umidade relativa do ar medidas pelo termo higrômetro desenvolvido e o de referência. *** significativo $p < 0,001$.

Levando-se em consideração que a flutuação das amplitudes da temperatura e UR é maior no verão do que no inverno. Os valores mais elevados de UR, Figura 5, foram registradas durante a madrugada, quando a temperatura do ar atinge seu valor mínimo, e mais baixo no início da tarde, correspondentemente ao máximo da temperatura de bulbo seco (Butera, 1995).

Considerando a UR como medida da variação das propriedades físicas do dielétrico com a quantidade de água existente no ambiente em relação a dada temperatura, os resultados mostram que a variação da capacitância descrita como uma diferença de potencial (Silva, 2000) representa de forma satisfatória a variação da UR.

O coeficiente de determinação, R^2 , que é uma medida de ajustamento de um modelo estatístico linear generalizado, evidenciou um ajuste altamente significativo, Figura 6, entre os dados medidos através do protótipo e o sensor de referência, de forma que a metodologia proposta por esse trabalho possa ser estendida a aplicações de estudos que envolvam medidas de temperatura e umidade relativa do ar.

Um dos pontos marcantes desse estudo foi o desenvolvimento desse sensor a um preço extremamente baixo quando comparado ao sensor que foi utilizado como referência. O fato de se obter sensores de alta precisão a baixo custo possibilita que inúmeras pesquisas, antes limitada pelos recursos financeiros, sejam desenvolvidas em diversas subáreas das ciências ambientais.

Um próximo passo objetivado é o desenvolvimento de todos os sensores utilizados em uma torre

micrometeorológica, pois a aplicação de baixo custo para a obtenção dos fluxos de energia em superfície, tais como fluxo de calor sensível, fluxo de calor latente e os balanços de radiação de ondas curtas e ondas longas integrariam todas as possíveis análises de ecossistema como um todo.

A aplicação do protótipo desenvolvido nesse estudo pode ser realizada tanto na obtenção de medidas de temperatura e UR para caracterização quanto para validação de modelos ou estimativas por sensoriamento remoto. Sendo possível se realizar as medidas em uma localização urbana e também sobre diferentes tipos de ecossistemas.

Conclusão

O termohigrômetro construído neste trabalho apresentou medidas confiáveis de temperatura e umidade relativa do ar, com valores muito próximos aos medidos pelo termohigrômetro de referência.

Foi obtido elevado coeficiente de determinação (R^2), que explica mais de 99% dos dados medidos com o termohigrômetro construído comparados com o termohigrômetro de referência.

A metodologia aplicada neste estudo mostrou-se eficaz e confiável para o desenvolvimento e calibração dos sensores utilizados, podendo ser empregada em outros estudos relacionados às medidas de variáveis da Micrometeorologia, Agrometeorologia e Climatologia.

Esse trabalho motiva novas pesquisas em outros instrumentos dedicados aos estudos que utilizam medidas micrometeorológicas, como anemômetros, fluxímetros de calor no solo, piranômetros e saldo

radiômetros construídos em função de reais necessidades utilizando diferentes sensores e adaptações de modo a proporcionar medidas precisas e de baixo custo.

Agradecimentos

Os autores gostariam de expressar seus agradecimentos ao (PGFA) Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental da UFMT, à FAPEMAT (Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Mato Grosso), ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo financiamento para a realização deste estudo.

Referências

- Butera, F.M., 1995. *Architettura e ambiente: manuale per il controllo della qualità termica, luminosa e acustica degli edifici*. Milano: Etaslibri.
- Chen, Zhi, Lu, Chi, 2005. Humidity sensors: a review of materials and mechanisms. *Sensor letters* v. 3, n. 4, p. 274-295.
- Cobaner, M., Citakoglu, H., Kisi, O., Haktanir, T., 2014. Estimation of mean monthly air temperatures in Turkey. *Comput. Electron. Agric.* 109, 71–79.
- Doebelin, E. O., 1990. *Measurement Systems Application and Design*, Mechanical Engineering Series. 4. Ed. EUA, McGraw-Hill.
- Foken, T., Onkley, S., 1995. Workshop on instrumental and methodical problems of land-surface flux measurements.
- Glynn-Jones, P., 2004. An electromagnetic, vibration-powered generator for intelligent sensor systems. *Sensors and Actuators A: Physical* v. 110, n. 1, p. 344-349.
- Hannay, N.B., Sundheim, B. R., 1959. Semiconductors. *Journal of The Electrochemical Society* v. 106, n. 8, p. 226C-226C.
- Kester, W., 2004. *Power and Thermal Management Design Techniques*. Seção 2. Analog Device.
- Prihodko, L., Goward, S.N., 1997. Estimation of air temperature from remotely sensed surface observations. *Remote Sensing of Environment* v. 60, n. 3, p. 335-346.
- Santana, N.C., 2015. "Investigação de Ilhas de Calor em Brasília: Análise Multitemporal com Enfoque na Cobertura do Solo." *Revista Brasileira de Geografia Física* 7.6, 1044-1054.
- Silva, J.G., 2009. *Monitoramento e Controle de Unidade e Temperatura em Secadores de Massa Alimentícias*. 67f. Dissertação (Mestrado, Análise e Controle de Processos Químicos) Escola de Engenharia Mauá, Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul SP.
- Smith, B.A., Hoogenboom, G., McClendon, R.W., 2009. Artificial neural networks for auto-mated year-round temperature prediction. *Comput. Electron. Agric.* 68 (1), 52–61
- Sensirion, A.G. SHT 75 Datasheet. Disponível em www.sensirion.com, acessado em janeiro de 2015.
- Shirvani, A., 2015. Change point analysis of mean annual air temperature in Iran. *Atmospheric Research* vol. 16, 91-98.
- Sousa, I.F., 2015. "Balanço de Radiação e Energia no Perímetro Irrigado Califórnia – SE Mediante Imagens Orbitais." *Revista Brasileira de Geografia Física* 7.6, 1165-1173.
- Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M., 2013. *Climate change 2013: The physical science basis*. Inter-governmental Panel on Climate Change. Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report (AR5). Cambridge Univ Press, New York
- Srbínovska, M., Gavrovski, C., Dimcev, V., Krkoleva, A. & Borozan, V., 2015. Environmental parameters monitoring in precision agriculture using wireless sensor networks. *Journal of Cleaner Production* 88, 297-307.
- Stisen, S., Sandholt, I., Nørgaard, A., Fensholt, R. & Eklundh, L., 2007. Estimation of diurnal air temperature using MSG SEVIRI data in West Africa. *Remote Sensing of Environment* 110(2), 262-274.
- Van P., Rudy J., 2003. *CMOS integrated analog-to-digital and digital-to-analog converters*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Willmott, C.J., Matsuura, K., 2005. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research* v. 30, n. 1, p. 79.
- Willmott, C.J., Ckleson, S. G., Davis, R.E., Feddema, J.J., Klink, K.M., Legates, D.R., O'donnell, J., Rowe, C. M., 1985. Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research* v.90, n.C5, p.8995-9005.