

QUALIFICAÇÃO METROLÓGICA DE UM HIGRÔMETRO DE MICROONDAS

HELBER S.HUAQUIPACO – e-mail sucah@hotmail.com

ALCIR F.ORLANDO – e-mail afo@mec.puc-rio.br

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio

Departamento de Engenharia Mecânica

R.Marquês de S. Vicente 225, Gávea, 22453-900, Rio de Janeiro, Brasil

ALBERTO J.F.Orlando – e-mail albfrida@directnet.com.br

Instituto Tecnológico de Aeronáutica

Departamento de Engenharia Eletrônica

LUIZ C.CIPRIANO –

INMETRO

***Resumo.** A presença do vapor d'água no ar ou em outros gases, tem importância em processos físicos, químicos e biológicos. Medições numa faixa ampla de umidade são necessárias na indústria, pois ela pode ser importante na composição dos custos comerciais, na qualidade do produto, na saúde e na segurança. O presente trabalho explora uma técnica de medição do teor de umidade que utiliza uma cavidade ressonante retangular, projetada para uma frequência fundamental de ressonância de 2,45 GHz, correspondente à situação em que o ar seco ocupa a mesma cavidade. Variando-se o conteúdo de umidade no seu interior, medida com um padrão de ponto de orvalho existente no INMETRO, foi determinada a sua relação com a frequência de ressonância da cavidade, medida com um analisador de espectro. Uma modelação do fenômeno foi feita a partir da teoria existente, ajustando-se os coeficientes com os dados experimentais obtidos. A incerteza das medições foi então determinada e um diagnóstico da influência de diferentes parâmetros foi realizado para a otimização de sua resposta, ao longo da faixa de utilização.*

***Palavras-Chave:** Higrômetro, Microondas, Metrologia*

1. INTRODUÇÃO

O teor de umidade no ar é uma grandeza de relativa dificuldade para medir-se na prática. A exatidão obtida não é tão boa como para muitas outras áreas da medição, podendo ser medida com uma incerteza típica no resultado de $\pm 3\%$ ($k=2$).

As diferentes grandezas usadas para medição de umidade são interrelacionadas, algumas delas como função da temperatura e da pressão. A medição da umidade relativa, em particular, pode ser obtida diretamente usando-se alguns tipos de instrumentos, mas pode ser obtida indiretamente a partir da medição do ponto de orvalho (ou outra medição absoluta de

umidade). Os parâmetros utilizados pela maioria dos higrômetros no setor industrial são: o ponto de orvalho, a umidade relativa e a temperatura de bulbo úmido.

Podem-se normalmente distinguir duas grandes categorias de transdutores utilizados nos instrumentos medidores de umidade (Higrômetros).

A primeira, se baseia num princípio físico que permite relacioná-lo diretamente a um parâmetro característico da umidade, como por exemplo o ponto de orvalho ou a temperatura de bulbo úmido. Este é o caso do higrômetro a condensação, do higrômetro eletrolítico, do higrômetro de absorção e do psicrômetro. Os instrumentos que se utilizam dos transdutores desta categoria (principalmente os higrômetros de condensação) são normalmente considerados como padrão de referência ou de transferência, de acordo com a solicitação da qualidade metrológica cada vez mais exigente.

A segunda, se baseia na medição da modificação de uma propriedade de algumas substâncias em função da umidade. Este é o caso do higrômetro a variação de impedância ou do higrômetro mecânico. Os instrumentos que se utilizam destes transdutores devem ter sua indicação periodicamente verificada entre duas calibrações, por serem menos confiáveis.

O higrômetro padrão NBS está baseado no bem conhecido método gravimétrico de medição de vapor de água. Ele mede diretamente a quantidade de umidade no ar. No higrômetro, a massa de vapor de água misturada com um volume de gás é absorvido através de secagem físico-química, assim, as massas de vapor de água e de ar seco são medidas separadamente, conhecendo-se o volume de gás seco diretamente medido. Considerando que a massa e volume são grandezas fundamentais, este método produz uma medição absoluta da umidade, que pode ser expressa como a relação entre a massa de água e a massa de gás seco.

Teoricamente, o método gravimétrico tem grandes repetitividade e exatidão. Na prática, muitos cuidados devem ser tomados para se garantir uma elevada confiabilidade de medição, tornando-a bastante demorada. Para maior operacionalidade o higrômetro gravimétrico pode ser usado com um gerador de umidade que produz um gás a umidade constante. O método é usado principalmente para trabalho de pesquisa ou para fazer calibrações fundamentais.

O higrômetro gravimétrico NBS tem uma faixa nominal de medição de 0.19 mg/g a 27 mg/g de relação de mistura. Uma temperatura do ar ambiente exterior ao equipamento ligeiramente acima de 30 °C é tolerável para um período pequeno. Para prevenir condensação nas linhas, a temperatura do ar exterior deve ser superior ao ponto de orvalho do ar no higrômetro. Isto limita o ponto de orvalho a um valor de 30°C, correspondente a uma relação de mistura nominalmente de 27 mg/g, o que é principalmente determinado a partir de considerações de erros sistemáticos de vazamentos, e de absorção incompleta de vapor de água.

A incerteza máxima estimada ao longo da faixa operacional do instrumento é $\pm 12,7$ partes em 10^4 , ou $\pm 0.13\%$ do valor medido.

A bancada gravimétrica do NIST, que é considerada como referência para a umidade, permite que se determine a umidade de uma mistura de ar e vapor d'água com uma incerteza de $\pm 0,1\%$ do valor lido, numa faixa da variação do ponto de orvalho de -30 °C a 30 °C. Existem sistemas semelhantes no NPL (Grã Bretanha) e no PTB (Alemanha).

A construção de uma bancada gravimétrica é extremadamente complexa e cara, só sendo justificada quando uma grande exatidão é desejada.

Outros métodos de calibração são baseados na medição de um parâmetro derivado, como o ponto de orvalho, umidade relativa ou a pressão parcial. Tais métodos necessitam geralmente do uso de um instrumento de grande exatidão.

Existe ainda um método que utiliza soluções saturadas de sais em equilíbrio com o ar úmido, produzindo incertezas do padrão na faixa de $\pm 2\%$ do valor lido. Eles são adequados à calibração de instrumentos como os higrômetros à variação de impedância. Conforme a incerteza requerida, sensores de bulbo seco e bulbo úmido podem ser utilizados como padrão.

O método usado no INMETRO (Brasil) para a medição de umidade é o que se baseia na medição do ponto de orvalho. O sistema envolve basicamente um gerador de ponto de orvalho, um sistema de secagem de ar, um fornecimento de ar comprimido isento de óleo, um higrômetro certificado por um laboratório de referência internacional e uma câmara climática onde são realizadas as calibrações. A grandeza de umidade depende das grandezas de temperatura e pressão, que dependem da umidade. A faixa de calibração é de 0 – 98% com uma incerteza em torno de $\pm 1\%$ (pontos percentuais da escala de umidade relativa, %).

Segundo (Hasegawa S.,1986), higrômetros aceitáveis para serem usados como padrões secundários, são instrumentos caracterizados por uma alta exatidão e resposta estável a longo prazo, e cujos resultados são previsíveis por meio de uma fórmula teórica ou empírica. Alguns dos dispositivos adequados para uso como padrões secundários são: higrômetro de condensação de ponto de orvalho, higrômetros eletrolíticos, psicrômetro de saturação adiabática, e psicrômetros aspirados. Os higrômetros seguintes, são adequados para seu uso como padrões de transferência, e foram desenvolvidos no NBS: Higrômetro pneumático, Psicrômetro de saturação adiabática, pontos fixos – sistemas químicos, soluções salinas saturadas e higrômetro de microondas.

O higrômetro digital de microondas, automático, desenvolvido pelo NBS (Hasegawa,1975), foi projetado para medir a umidade do ar atmosférico, com uma pressão de vapor d'água na faixa de 3-7400 Pa (0,03-74 mbar). O instrumento é uma adaptação de um refratômetro de microondas que usa duas cavidades e opera a 12 GHz. Uma cavidade é exposta ao ar úmido de teste e a outra é exposta para a mesma amostra, com todo o vapor de água removido. Mantém-se as duas cavidades a uma mesma temperatura constante e a mesma pressão total. Técnicas de microondas foram usadas no laboratório para fazer medidas com exatidão do índice de refração de meios gasosos. Estas técnicas estão incorporadas a projetos de refratômetros com leitura direta. Refratômetros são usados em aeronaves e torres meteorológicas para medir o índice de refração da atmosfera. Refratômetros de microondas foram convertidos em higrômetros de leitura direta, mantendo-se um ressonador de cavidade no teste a uma temperatura e pressão constante ou comparando-se as frequências de ressonância das duas cavidades; uma com gás úmido e a outra com gás seco, em condições isobáricas e isotérmicas.

O objetivo do presente trabalho é qualificar metrológicamente um higrômetro de microondas para ser utilizado como um medidor de umidade do ar atmosférico, comparando seu desempenho com o de outros padrões disponíveis.

Foi construída uma cavidade ressonante retangular, projetada para uma frequência fundamental de ressonância de 2,45 GHz, correspondente à situação em que o ar seco ocupa a mesma cavidade. Variando-se o conteúdo de umidade no seu interior, medida com um padrão de ponto de orvalho existente no INMETRO, foi determinada a sua relação com a frequência de ressonância da cavidade, medida com um analisador de espectro. Uma modelação do fenômeno foi feita a partir da teoria existente, ajustando-se os coeficientes com os dados experimentais obtidos. A incerteza das medições foi então determinada e um diagnóstico da influência de diferentes parâmetros foi realizado para a otimização de sua resposta, ao longo da faixa de sua utilização.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

O índice de refração, n_s foi obtido a partir da Eq. (2) (Gardiol F.,1984) a partir do seguinte: quando as propriedades eletromagnéticas, permissividade elétrica (ϵ_r) e permeabilidade (μ), são aproximadamente iguais a do vácuo ($\epsilon_r \cong 1$, $\mu_r \cong 1$) eles não são rigorosamente idênticos. Quando considera-se uma trajetória dentro da atmosfera, as variações devido a pressão p , temperatura T e o nível de umidade devem de ser consideradas.

A permissividade relativa do ar com microondas é igual ao quadrado do índice de refração é dado pela Eq. (1):

$$\epsilon_r = n_s^2 = \left[1 + \left(\frac{79p}{T} - \frac{11p_w}{T} + \frac{3,8 \times 10^5 p_w}{T^2} \right) \times 10^{-6} \right]^2 \quad (1)$$

Onde :

- ϵ_r : permissividade relativa
- p : pressão barométrica, mbar
- T : temperatura, K
- p_w : pressão parcial do vapor de água, mbar
- n_s : índice de refração no meio

Portanto o índice de refração pode ser escrito como:

$$n_s = 1 + \left(\frac{79p}{T} - \frac{11p_w}{T} + \frac{3,8 \times 10^5 p_w}{T^2} \right) \times 10^{-6} \quad (2)$$

O índice de refração de um meio para uma determinada cavidade é definido pela Eq.(3) (Hasegawa S., 1975):

$$n = \frac{v^o}{v} = \frac{f^o}{f} \quad (3)$$

Onde

- n : índice de refração no meio.
- v^o : velocidade de uma onda eletromagnética no vácuo.
- v : velocidade da mesma onda no meio.
- f^o : frequência de ressonância no vácuo.
- f : frequência de ressonância no meio.

Para o caso onde existam duas cavidades idênticas, uma de referência contendo ar seco e outra de teste contendo ar úmido, a diferença nos índices de refração entre as duas cavidades será:

$$n_s - n_r = \left[\frac{(f_r - f_s)}{f_s} \right] \cdot n_r \quad (4)$$

Onde as subscritos s e r referem-se às cavidades de teste e de referência, respectivamente. Utilizando-se um índice de refração N em escala aumentada definido como:

$N = (n-1) \times 10^6$, e substituindo-se N na Eq. (4) obtêm-se.

$$N_s - N_r = n_r \left[\frac{(f_r - f_s)}{f_s} \right] \times 10^6 \quad (5)$$

Segundo (Gardioli F., 1984), na ausência de umidade ($p_w=0$), a equação (2) se reduz a:

$$n_r = 1 + \left(\frac{79p}{T} \right) \times 10^{-6} \quad (6)$$

Então o índice de refração da cavidade de referência, n_r é expresso pela equação (6), onde existe somente ar seco.

A frequência de ressonância no vácuo, f^o é igual para ambas cavidades, de teste (amostra) e de referência (ar seco), então a frequência de referência é deduzida a partir desta afirmação e expressa por:

$$f_r = \frac{n_s \cdot f_s}{n_r} \quad (7)$$

A relação entre o índice de refração em escala aumentada e os componentes do ar úmido é determinado por (Essen e Frome, 1951), e os índices de refração das cavidades de referência e de teste (amostra) são expressos por:

$$N_r = \frac{a(p_a)_r}{T} + \frac{b(p_{CO_2})_r}{T} \quad (8)$$

$$N_s = \frac{a(p_a)_s}{T} + \frac{b(p_{CO_2})_s}{T} + \frac{c(p_w)_s}{T} + \frac{d(p_w)_s}{T^2} \quad (9)$$

Onde p_a , p_{CO_2} and p_w são as pressões parciais do ar seco livre de gás carbônico, pressão parcial do gás carbônico, e pressão parcial do vapor de água, respectivamente, T é a temperatura absoluta do ar em K; e a , b , c , e d são constantes experimentais.

Com as duas cavidades à mesma pressão total p e aplicando a lei de Dalton de pressões parciais, tem-se :

$$\Delta N = C_1(p_w)_s + C_2 \left[(p_{CO_2})_s - (p_w)_r \right] \quad (10)$$

$$C_1 = \frac{(c-a)}{T} + \frac{d}{T^2} \quad (11)$$

$$C_2 = \frac{(b-a)}{T} \quad (12)$$

$$\Delta N = N_s - N_r \quad (13)$$

Igualando Eqs. (10) e (5) e resolvendo para a pressão de vapor de água, a expressão seguinte é obtida:

$$p_w = n_r \frac{(f_r - f_s)}{C_1 f_s} \times 10^6 - \frac{C_2}{C_1} \left[(p_{CO_2})_s - (p_{CO_2})_r \right] \quad (14)$$

Pode ser demonstrado que o último termo na Eq. (14), tem um efeito no valor da medição de p_w de 1.4 partes em 10^5 , podendo portanto ser desprezado (Hasegawa S., 1975), e a Eq. (14) pode ser reduzida, para:

$$p_w = n_r \left[\frac{(f_r - f_s)}{C_1 f_s} \right] \times 10^6 \quad (15)$$

A constante C_1 depende dos valores selecionados para a , c e d . Os valores de a são obtidos da Eq. (16) para cada pressão atmosférica e temperatura. As constantes c e d foram avaliadas com a relação de Debye, para polarização molar. As constantes experimentais de Debye foram computadas e os pesos médios de c e d são dadas por vários pesquisadores e resumidas em (Hasegawa,1975). (Smith e Weintraub, 1953) converteram estes valores de pesos médios para as constantes $c=71.6$ e $d=3,747 \times 10^5$, e recomendam seu uso na equação para o índice de refração em rádio frequência.

$$a = \frac{TN}{p} \quad (16)$$

A Equação de Magnus pode ser uma forma alternativa para encontrar valores de ponto de orvalho a partir da pressão parcial de vapor d'água. Para a pressão de vapor d'água p_w , (ajustado) em Pa, sobre a água, o ponto de orvalho t_d em °C, é dado por:

$$t_d = \frac{243,12 * \ln\left(\frac{p_w}{611,2}\right)}{17,62 - \ln\left(\frac{p_w}{611,2}\right)} \quad (17)$$

A incerteza em valores de ponto de orvalho t_d , dadas por esta equação é menor que $\pm 0,04$ °C, na faixa de -45 °C a $+ 60$ °C (NPL,1996).

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Atualmente é muito comum fazer medições de parâmetros de umidade através de higrômetros tradicionais, como: psicômetros, ponto de orvalho, capacitivos, resistivos.

O NBS, desenvolveu um higrômetro a microondas para a medição de umidade do ar atmosférico sobre a faixa de pressão de vapor de 3-7400 Pa. O instrumento apresentava duas cavidades idênticas ressonantes (uma de referência e outra de teste) que operavam a 12 GHz. O higrômetro era uma adaptação que utilizava o princípio de operação do refratômetro de Birnbaum.

No presente trabalho utiliza-se uma parte do desenvolvimento teórico aplicado neste higrômetro para estimar a pressão parcial do vapor de água. Considera-se uma mesma cavidade para simular a cavidade de referência e a cavidade de teste, e com um adequado desenvolvimento teórico calcular-se a pressão parcial do vapor de água na cavidade.

Para o desenvolvimento da cavidade ressonante foram utilizadas as recomendações propostas por (Martins de Andrade, 1981). Neste trabalho foi utilizado o método de perturbação de cavidades para a determinação da permissividade de alguns líquidos.

Este estudo apresenta uma análise experimental da mudança em frequência de ressonância de uma amostra de ar úmido em relação a variação do conteúdo de vapor de água da amostra.

O projeto de uma cavidade, em geral, apresenta um grande número de variáveis, algumas previamente fixadas por exigências "a priori". No caso da cavidade, procurou-se orientar o projeto no sentido de obter, dentro do possível, dimensões tais que conduzissem a uma otimização do tamanho físico adequado para a utilização da amostra, bem como procurando o maior afastamento possível de modos indesejáveis frente ao modo principal, na frequência especificada de 2,45 GHz.

A cavidade foi confeccionada em latão, sendo que a espessura das paredes foi fixada em 10 mm, dando maior rigidez ao dispositivo e diminuindo o efeito da dilatação térmica.

O caso a ser considerado é o de uma cavidade retangular, onde se introduz uma amostra de ar úmido por um orifício de 1 mm de diâmetro instalado no centro da parte frontal da cavidade. A amostra de ar flui de forma constante por outro orifício, do mesmo diâmetro, localizado na parte central posterior da cavidade, visto que, segundo recomendações da norma NBR 6740 para a medição de umidade é recomendável que amostra de ar circule permanentemente para realizar uma medição apropriada.

Para uma cavidade retangular a frequência de ressonância pode ser calculada a partir das dimensões largura (a), altura (b) e comprimento (L), (Gardioli F., 1984):

O primeiro passo num projeto de cavidade retangular consiste em fixar as dimensões a e b , procurando otimizar o volume da cavidade para o volume previsto da amostra. No presente caso, optou-se por utilizar as dimensões padronizadas de um guia de ondas retangular, o qual propaga na frequência de 2.45 GHz. Assim sendo, as dimensões fixadas são: $a = 8,6$ cm e $b = 4,3$ cm da expressão e $L = 26,0$ cm.

A maneira mais conveniente de acoplamento entre os sinais de entrada e saída da cavidade é através da instalação de duas pontas de prova de campo elétrico nas posições em que este é máximo. As duas pontas de prova foram instaladas uma em cada face da cavidade, procurando-se assim minimizar um possível efeito de acoplamento direto entre as mesmas. A admissão da amostra é feita pela parte frontal da cavidade e a saída pela parte posterior, portanto o ar estará circulando pela cavidade ocupando todas as superfícies dentro dela.

As superfícies internas da cavidade receberam um tipo de tratamento especial denominado de "polimento tipo espelhado com pasta de diamante", com uma planicidade de suas superfícies de no máximo 8 micra.

O INMETRO é o único laboratório para a calibração de umidade no Brasil. Não existe qualquer outro laboratório credenciado à Rede Brasileira de Calibração para umidade. Utiliza para suas calibrações um gerador de ponto de orvalho da Michell, um medidor padrão de ponto de orvalho MBW, modelo DP30-SH-k2, com faixa de -40 °C a $+90$ °C com uma incerteza de $\pm 0,2$ °C do valor exibido, sensibilidade de $0,01$ °C e repetitividade de $0,1$ °C em temperatura de ponto de orvalho. Seu sensor opera numa faixa da escala de umidade relativa de $0,5$ % a $99,9$ % e seu monitor opera com uma resolução de $0,01$ °C. Também utiliza uma câmara climática Weiss Technik, onde são calibrados os sensores de umidade. Um termômetro Pt100, com incerteza de $\pm 0,045$ °C, foi utilizado para a medição de temperatura. Para a medição da pressão atmosférica, um barômetro com incerteza de $\pm 0,02\%$ da leitura.

Para conversões entre grandezas de umidade utilizou-se um programa Humicalc. Ele é um programa feito para fazer conversões complexas de umidade. Contém uma alta exatidão das fórmulas que usa e aplica automaticamente correções em temperatura, pressão e fatores de correção, (Hardy, 1998), (Wexler, 1976) e (Wexler, 1977). Cálculos típicos de umidade requerem só da temperatura t , pressão atmosférica p , e um parâmetro de umidade. Com estas entradas mínimas o programa calcula grandezas de umidade de interesse. A faixa de cálculos em escala de umidade relativa é de $0,0001$ % a $100,00$ %, em ponto de orvalho de $-99,99$ °C a

100 °C, em temperatura de -99,99 °C a 200 °C e pressões de 0 psia a 5000 psia (34473,79 kPa).

4. RESULTADOS E ANÁLISE

Foram realizados testes com a variação do ponto de orvalho de 0°C a 20°C, correspondentes à variação de temperatura de 20°C a 25°C e umidades relativas na faixa de 20% a 90%. O resultado medido da pressão de vapor d'água foi comparado com o do modelo teórico. As incertezas foram estimadas segundo a metodologia (Guia para Expressão da Incerteza de Medição, 1997), incorporando o desvio médio quadrático do ajuste.

A correlação entre a pressão parcial de vapor d'água obtida com o modelo matemático utilizado e a pressão parcial de vapor d'água obtida experimentalmente (padrão) é apresentada na Fig.1, e dada pelo seguinte polinômio de 2º grau,

$$p_w = 0,0003744 + 0,9879589x - 0,0092508x^2 \quad (18)$$

Onde,

x é a pressão parcial do vapor d'água obtida pelo modelo matemático utilizado, em kPa, e p_w é a pressão parcial de vapor de água ajustada pelo polinômio.

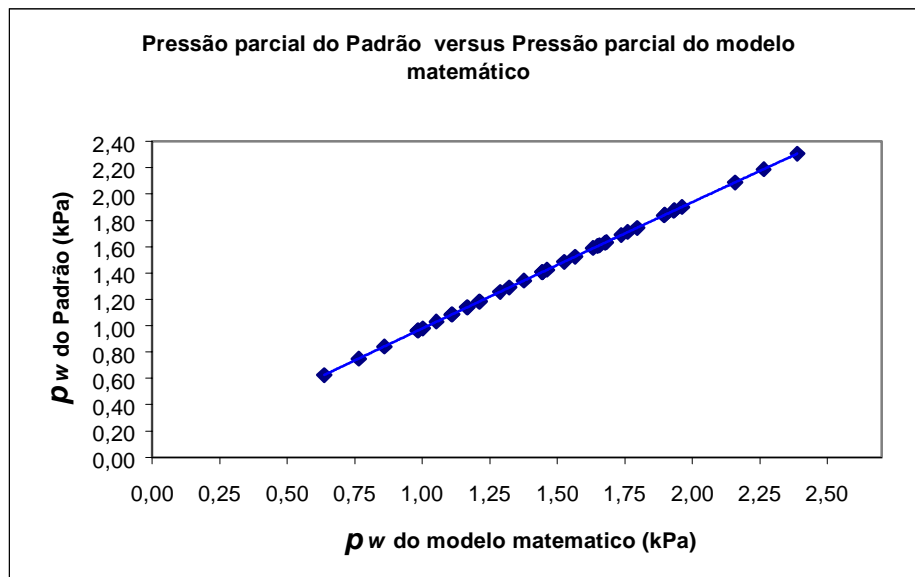


Figura 1 : Ajuste dos dados experimentais com os do padrão

•Foi mostrado teórica e experimentalmente que existe uma relação bem definida, resultado deste trabalho, entre a frequência de ressonância de uma cavidade ressonante e o teor de vapor de água na amostra de ar úmido nela contida, quanto maior o conteúdo de vapor de água no ar, menor será a frequência de ressonância para uma mesma temperatura de teste. As grandezas características associadas ao conteúdo de vapor de água no ar (umidade), variam inversamente com a frequência de ressonância; assim um aumento na umidade relativa ou razão de umidade, ponto de orvalho e pressão parcial de vapor de água, implicará em uma diminuição da frequência de ressonância.

•Um ajuste por um polinômio do segundo grau entre os valores teórico e experimental reflete um desvio da idealidade da cavidade real, sugerindo que todas as cavidades devem ser calibradas antes de seu uso.

•A sensibilidade da cavidade em relação à variação da frequência de ressonância, para uma mesma umidade relativa (40 %, 50 %, 60 % e 70%) aumenta diretamente com a temperatura na faixa de 20 °C a 25 °C.

•O parâmetro que mais contribui para a incerteza combinada geral, da pressão parcial de vapor de água, obtida com o modelo matemático disponível, é a incerteza do higrômetro de ponto de orvalho (padrão), que é de $\pm 0,2$ °C. A influência dos outros parâmetros como a temperatura, a pressão atmosférica e a frequência de ressonância é desprezível. Assim, quanto menor a incerteza de medição do padrão, menor a incerteza da pressão parcial do vapor de água. Trabalhos futuros deverão levar este fator em consideração para a redução da incerteza do higrômetro de microondas proposto neste trabalho.

•Grandezas de umidade podem ser estimadas com mais um parâmetro além da temperatura de teste e da pressão atmosférica. No Brasil o INMETRO, através de seu laboratório de umidade utiliza um higrômetro padrão de ponto de orvalho para determinar a umidade relativa. Com o modelo matemático proposto, neste trabalho, juntamente com a medição da frequência de ressonância, pode-se evitar o uso deste higrômetro para obter valores de grandezas associadas à umidade.

•A incerteza relativa da pressão parcial do vapor de água é menor para valores mais elevados de umidade relativa, na faixa de 50 % a 90 % com uma incerteza relativa, em torno do 2 % a 3 %. Para valores mais baixos, na faixa de 50 % a 20 %, a incerteza relativa aumenta para a faixa de 3 % a 5 %.

•A incerteza relativa da pressão parcial de vapor de água com a razão de umidade e a umidade relativa é menor para valores mais elevados de concentração de vapor de água na amostra. No caso oposto a incerteza relativa para ambos parâmetros de umidade aumenta.

•Finalmente a incerteza da umidade relativa, medida neste trabalho é aproximadamente igual à a incerteza de medição da pressão parcial de vapor de água, e comparável com as dos higrômetros dos tipos resistivo e capacitivo, assim como os higrômetros de bulbo seco e bulbo úmido (psicrômetro). Entretanto, existe um potencial para sua redução desde que as medições do ponto de orvalho pelo padrão sejam mais exatas.

5. CONCLUSÕES

Foi mostrado neste trabalho que o modelo teórico disponível é adequado para medição da umidade relativa com um higrômetro de microondas. Um refinamento foi proposto através de uma correlação entre os valores teórico e experimental . Se um padrão com incerteza mais baixa puder ser utilizado, as incertezas de medição da umidade poderão ser reduzidas.

REFERÊNCIAS

- Essen e Frome, 1951. Proc. Phys. Soc. Lond. B 64, 862.
- Gardiol F., 1984. Introduction to Microwaves, Copyright, ARTECH HOUSE, INC. 610 Washington Street Dedham, MA 02026.
- Guia para Expressão as Incerteza de Medição, 1997. INMETRO
- Hardy, 1998. ITS-90 Formulations for vapor pressure, frostPoint, temperature, dewpoint temperature, and enhancement factors in the range -100 to +100 °C, Thunder Scientific Corporation, Albuquerque, NM, USA.
- Harrison, 1965. Fundamentals concepts and definitions relating to humidity. In humidity and moisture measurement and control in sciencie and industry 3:289. A Wexler and W. H.

- Wildhack, eds. Reinhold publishing Corp., New York
- Hasegawa S., 1975. Automatic digital microwave hygrometer, National Bureau of Standards, Washington.
- Hasegawa S., 1986. National Basis of Accuracy in Humidity Measurements, ISA Transactions, Vol. 25, No. 3.
- Martins de Andrade, 1981. Um método para Medida de Permittividades em microondas utilizando uma Cavidade Ressonante, Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- NPL, 1996. (National Physical Laboratory), A guide to the Measurement of Humidity, The Institute of Measurement and Control, London.
- Smith e Weintraub, 1953. J. Res. Natl. Bur. Stand. (U.S.) 50, 39.
- Wexler, 1976. Vapor Pressure Formulation for Water in Range 0 to 100 °C. A revision, Journal of Research of the National Bureau of Standards – A Physics and Chemistry, September – December 1976, Vol. 80A, Nos. 5 and 6, 775-785.
- Wexler, 1977. Vapor Pressure Formulation for Ice. Journal of Research of the National Bureau of Standards – A Physics and Chemistry, January – February 1977, Vol. 81A, No. 1, 5-19.

Agradecimento

Os autores agradecem ao CENTRO TÉCNICO AEROESPACIAL (CTA) em S.José dos Campos (S.P.) por ter proporcionado todo o apoio técnico para a medição por microondas.

Abstract. *The water content in air or in other gases is important for controlling biological, chemical and physical processes, Measurements are made in industry within a wide range of humidity. They contribute to the composition of the final cost and quality of products, health and safety. The present work deals with a measurement technique for the water content in air. The resonance frequency of a rectangular cavity, designed for a fundamental frequency of 2,45 GHz (dry air), was measured by a spectrum analyser for different values of the water content. A standard dew point apparatus was used in INMETRO for measuring the partial pressure of water vapor in air inside the cavity. The partial pressure of water vapor in air was calculated by an existing theory as a function of temperature and resonance frequency of the cavity, and it was compared to the measured one. The resulting second degree polynomial curve fit between the two values reflects the deviation from ideality of the real cavity, suggesting that all cavities should be calibrated before being used. The uncertainty of measurement was estimated together with the influence of several parameters on the equipment response, which was compared to the available ones. This completes the metrological qualification of the device. As a result, it was demonstrated that the uncertainty of the dew point measurement by the standard apparatus is the parameter that mostly affects the overall uncertainty of the calibration.*