

# Capítulo 5

## HIGROMETRIA

O objetivo das medidas de umidade da atmosfera é determinar a quantidade de vapor d'água presente na atmosfera através de peso, pelo volume, através da pressão parcial, ou pela uma fração (porcentagem) da pressão de vapor de equilíbrio com respeito a uma superfície plana d'água pura ou gelo. A medida de umidade atmosférica no campo foi, e continua sendo, problemática. Principalmente para estações meteorológicas automáticas onde são exigidos baixo custo, baixo consumo de potência e confiabilidade.

### 5.1 Pressão de vapor d'água

A pressão parcial dos componentes do vapor d'água na atmosfera independe da pressão parcial de qualquer outro componente. Assim, é útil o conceito de pressão parcial para a pressão de equilíbrio do vapor d'água sobre uma superfície plana d'água pura. Esta pressão é uma função da temperatura nas fases de vapor e líquida e pode ser obtida por integração da equação de Clausius-Clapeyron assumindo a dependência linear do calor latente de vaporização com a temperatura:

$$L = L_0[1 + \alpha(T - T_0)] e,$$

$$e_s = e_e \exp \left[ \frac{L_0}{R_v} \left( \frac{T - T_0}{T T_0} + \alpha \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) - \frac{\alpha(T - T_0)}{T} \right) \right] \quad (5.1)$$

onde;

$$T_0 = 273,15 \text{ K},$$

$$L_0 = 2,5008 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}, \text{ é o calor latente de vapor d'água à } T_0,$$

$$R_v = 461,51 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1} \text{ é a constante do gás para o vapor d'água,}$$

$$e_e = 611,21 \text{ Pa, é a pressão de vapor de equilíbrio em } T = T_0,$$

$$\alpha = -9,477 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}, \text{ é a taxa média de mudança do coeficiente do calor latente de vapor d'água com respeito a temperatura.}$$

Desde que o vapor d'água não é um gás perfeito a equação acima não é um ajuste exato. A pressão de vapor como uma função de temperatura foi determinada através de numerosas experiências. Wexler ajustou uma equação empírica para os dados experimentais de pressão de vapor.

$$e_s = c_o \exp \left( \frac{c_1}{T^2} + \frac{c_2}{T} + c_3 + c_4 T + c_5 T^2 + c_6 T^3 + c_7 T^4 + c_8 \ln T \right) \quad (5.2)$$

onde os coeficientes para a pressão de vapor sobre a água e sobre o gelo são dados na Tabela 5.1.

**Tabela 5.1** - Coeficientes para a equação empírica (5.2) para pressão de vapor de equilíbrio sobre uma superfície plana d'água pura e sobre o gelo.

Coefficiente	Água	Gelo
c <sub>0</sub>	0,01	0,01
c <sub>1</sub>	-2991,272	0,0
c <sub>2</sub>	-6017,0128	-5865,3696
c <sub>3</sub>	18,87643854	22,241033
c <sub>4</sub>	-0,028354721	0,013749042
c <sub>5</sub>	0,17838301 x 10 <sup>-4</sup>	-0,34031775 x 10 <sup>-4</sup>
c <sub>6</sub>	-0,84150417 x 10 <sup>-9</sup>	0,26967687 x 10 <sup>-7</sup>
c <sub>7</sub>	0,44412543 x 10 <sup>-12</sup>	0,0
c <sub>8</sub>	2,858487	0,6918651

As equações (5.1) e (5.2) são incômodas. Seria preferível uma equação que fosse fácil de inverter e com acurácia suficiente. Buck (1981) desenvolveu uma equação de fácil uso e suficientemente precisa no intervalo de temperatura de -30 a 50°C.

$$e_s = 6,1121 \exp\left(\frac{17,502T}{240,97 + T}\right) \quad (5.3)$$

onde T está em graus Celsius e, e<sub>s</sub> está em unidades de mb. As equações (5.1), (5.2) e (5.3) são comparadas na Tabela 5.2. Os erros da equação (5.1) são toleráveis, mas é preferível usar a equação (5.3) porque é mais fácil de inverter para obter a temperatura do ponto de orvalho.

**Tabela 5.2** - Comparação da equação teórica (5.1), para a pressão de vapor d'água, com a expressão obtida dos resultados experimentais (5.2) e a aproximação mais conveniente (5.3).

Temperatura a (°C)	Resultados experimentais Equação (5.2) (mb)	Erro na aproximação Buck Equação (5.3) (mb)	Erro teórico Equação (5.1) (mb)
0	6,1121	0,0000	0,0000
30	42,4520	-0,0169	-0,0789
50	123,4476	0,2447	-0,5831

Como notado acima, deveríamos usar o termo “pressão de vapor de equilíbrio” mas infelizmente o termo “pressão de vapor de saturação” é o mais comumente usado. É um termo incorreto porque nada está sendo saturado. Não têm sentido dizer que o ar segura vapor d'água. No entanto, será utilizado como convenção o termo “pressão de vapor de saturação”. Enquanto que o ar não segura vapor d'água, a pressão total do ar tem um pequeno efeito na pressão de saturação (pense equilíbrio), isto é chamado de efeito de intensificação. Assim, para pressões acima de aproximadamente 800 mb, a pressão de vapor calculada na equação (5.3) deveria ser multiplicada por 1,004. O fator de intensificação será incorporado em todas as equações de pressão de vapor, e assim a equação (5.3) se torna:

$$e_s = 6,1365 \exp\left(\frac{17,502T}{240,97 + T}\right) \quad (5.4)$$

e a pressão de vapor de equilíbrio sobre uma superfície de gelo é:

$$e_i = 6,1359 \exp\left(\frac{22,452T}{272,55 + T}\right) \quad (5.5)$$

onde, como antes, T está em unidades de °C para as equações acima.

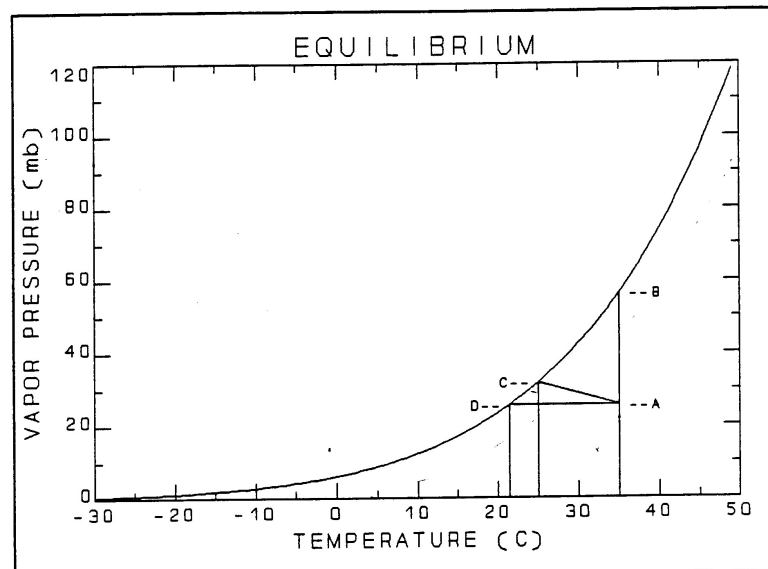
A pressão de vapor de saturação da água varia cerca de duas ordens de magnitude no intervalo de temperatura normal, como visto na Fig. 5.1. Com base nesta figura, esperaríamos que a acurácia de qualquer instrumento de umidade decrescesse com a diminuição da temperatura.

A Fig.5.1 pode ser usada para ilustrar as várias relações de umidade. Para uma pressão ambiente de 1000 mb, o ponto “A” representa uma dada temperatura ambiente e uma pressão de vapor (35,0°C, 24,9 mb, UR = 44%). Então, a pressão de vapor de saturação,  $e_s$ , é igual a 56,5 mb (ponto B). Se a parcela de ar fosse esfriada a uma pressão constante, até que começasse a condensar, a nova temperatura do ar seria a temperatura do ponto de orvalho  $T_d = 21,0$  °C, e a pressão de vapor ambiente ficaria inalterada e seria agora igual a pressão de vapor de saturação e  $T_d$  no ponto D ( $T_d = 21,0$  °C,  $e_s = 54$  mb). Começando novamente do ponto “A”, o bulbo do termômetro coberto com água deveria esfriar por evaporação e a pressão de vapor em sua vizinhança mais próxima aumentaria devido ao aumento da taxa de evaporação das moléculas de vapor d’água até a temperatura do bulbo úmido se tornar a temperatura de bulbo úmido  $T_w = 24,7$  °C, e a nova pressão de vapor seria a pressão de vapor de saturação a  $T_w$ ,  $e_{sw} = 31,3$  mb (ponto C).

## 5.2 Definições

Há muitas variáveis comumente encontradas no estudo de umidade.

Umidade absoluta,  $d_v$ , é a razão entre a massa de vapor d’água,  $m_v$ , e o volume total de ar úmido,  $V$ , em unidades de  $\text{kg m}^{-3}$ .



**Fig. 5.1** Pressão de vapor de saturação como uma função da temperatura do ar.

Temperatura de ponto de orvalho,  $T_d$ , é a temperatura na qual o vapor d’água ambiente se condensa.

Temperatura do ponto de congelamento,  $T_f$ , é a temperatura a qual o vapor d'água ambiente se congela. A temperatura do ponto de orvalho, ou do congelamento, podem ser obtidas da pressão de vapor ambiente invertendo as equações (5.4) ou (5.5):

$$\begin{aligned} T_d &= 240,97 \ln(e / 6,1365) / (17,502 - \ln(e / 6,1365)) \\ (5.6) \\ T_f &= 272,55 \ln(e / 6,1359) / (22,452 - \ln(e / 6,1359)). \end{aligned}$$

Temperatura ou temperatura do bulbo seco,  $T$ , é a temperatura do ar ambiente, é medido, por exemplo, pelo termômetro de bulbo seco de um psicrômetro.

Razão de Mistura,  $w$ , é a razão entre a massa de vapor d'água,  $m_v$ , e a massa de ar seco,  $m_d$ .

Umidade relativa,  $UR$ , é definida como a razão, expressa em porcentagem, da pressão de vapor atual,  $e$ , pela pressão de vapor de saturação,  $e_s$ , à temperatura do ar,  $T$ .

$$UR = 100 e / e_s \quad (5.7)$$

Umidade específica,  $q$ , também conhecida como concentração de massa, é a razão entre a massa de vapor d'água,  $m_v$ , e a massa de ar úmido,  $m_v + m_d$ .

Pressão de vapor,  $e$ , é a pressão parcial do vapor d'água expressa em mb.

Temperatura do bulbo úmido,  $T_w$ , é a temperatura indicada pelo termômetro de bulbo úmido de um psicrômetro, isto é, a temperatura de um sensor coberto com água pura que evapora livremente em um fluxo de ar ambiente.

As seguintes relações são aproximações utilizadas, as quais são precisas para a maioria das aplicações. As temperaturas estão em graus Celsius e as pressões estão em milibares.

$$\begin{aligned} w &= 0,622 e / (p - e) \\ e &= w p / (0,622 + w) \\ q &= w / (1 + w), \quad \text{quando } e \ll p, w \approx q \approx 0,622 e / p \\ d_v &= 0,2167 e / (T+273,15) \text{ kg m}^{-3} \end{aligned}$$

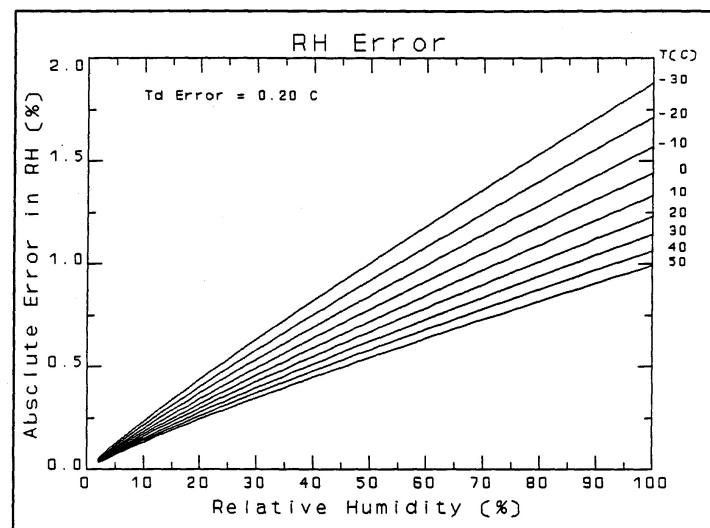
A fórmula da razão mistura,  $w$ , e da umidade específica,  $q$ , são adimensionais. Da definição destas variáveis, as unidades são kg/kg. Frequentemente,  $w$  e  $q$  são multiplicados por 1000 porque é mais fácil escrever 15,2 do que 0,0152, e estas unidades são expressas em g/kg.

Os instrumentos que respondem diretamente a umidade relativa e indicam a temperatura do ponto de orvalho são predominantes. A conversão do erro, expresso em umidade relativa, para um erro, na temperatura do ponto de orvalho, é um processo não linear como mostrado nas Figs. 5.2 e 5.3.

Na Fig. 5.2, um erro de  $\Delta T_d = 0,20 \text{ }^\circ\text{C}$  é convertido a um erro equivalente na umidade relativa. Esta situação surgiria se o usuário desejasse calibrar um sensor de umidade relativa usando um instrumento que mede a temperatura do ponto de orvalho. O erro do instrumento do ponto de orvalho seria expresso em termos da temperatura do ponto de orvalho e o usuário precisaria conhecer o erro equivalente em porcentagem de  $UR$ . Este erro é uma função da umidade relativa e da temperatura ambiente, pois há uma família de curvas de temperaturas de

-30 a 50 °C. Para entender o papel da temperatura na conversão do erro, é necessário examinar as relações mostradas na Fig. 5.1.

Se alguém usar um sensor de absorção, que informa a umidade, em unidades de umidade relativa, e desejar saber a umidade em termos de temperatura de ponto de orvalho, a conversão, é mostrada na Fig. 5.3. Novamente a conversão do erro é uma função da temperatura, mas, neste caso, são mostradas só duas curvas, para -30 e 50 °C. Estas curvas indicam que um sensor de absorção com um inacurácia de  $\pm 2\%$  UR, terá um erro na temperatura do ponto de orvalho menor do que  $\pm 1$  °C para umidades maiores que 35%. Este erro aumenta dramaticamente para um ar mais seco. A razão da não linearidade desta relação pode ser vista na Fig. 5.1.



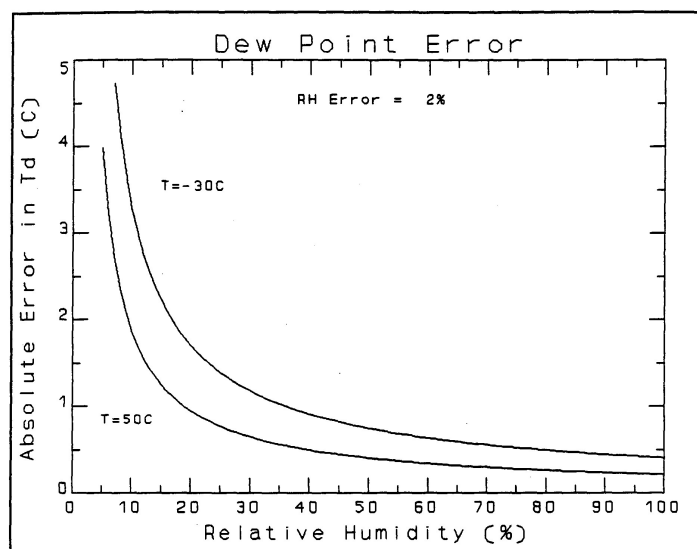
*Fig. 5.2 Conversão de um erro do ponto de orvalho de  $\Delta T_d = 0.20$  °C para um erro na umidade relativa.*

### 5.3 Métodos para medir a umidade

Wexler (1970) definiu seis classes de métodos higrométricos baseados em princípios físicos: remoção de vapor d'água do ar úmido; adição de vapor d'água ao ar úmido, absorção de vapor d'água no equilíbrio, obtenção de equilíbrio entre vapor-líquido ou vapor-sólido, medida das propriedades físicas de ar úmido, e através de reações químicas.

#### 5.3.1 Remoção do vapor d'água do ar úmido

A separação ou remoção do vapor d'água do ar úmido pode ser realizada usando um dissecante para absorver o vapor d'água, ou congelando o vapor d'água, ou por separação dos componentes do ar úmidos usando uma membrana semipermeável. Estas são técnicas padrão de laboratórios que utilizam uma amostra de ar úmido. Depois da remoção do vapor d'água por vários modos, a massa do vapor d'água e a amostra do ar restante são determinadas, para só então se calcular a umidade. Não há nenhum sensor de umidade operacional baseado neste método.



**Fig. 5.3** Conversão de 2% de erro na umidade relativa para um erro equivalente na temperatura do ponto de orvalho.

### 5.3.2 Adição de vapor d'água no ar

A umidade pode ser determinada medindo a quantidade de vapor d'água que deve ser adicionada a uma amostra de ar úmido para alcançar a saturação completa. Esta é uma técnica de laboratório, mas, para medidas em campo há uma variação satisfatória deste método.

A psicrometria é um método de adicionar vapor d'água no ar úmido enquanto não é alcançada a saturação completa. A umidade é determinada pelo esfriamento do bulbo úmido em relação a temperatura do ar ambiente. O psicrômetro é composto por dois sensores de temperatura expostos a um fluxo de ar ambiente. Um sensor, chamado de bulbo seco, mede a temperatura de ar ambiente. O outro sensor, chamado de bulbo úmido, é coberto com uma musselina umedecida com água e mede uma temperatura mais baixa causada pela evaporação da água no fluxo de ar ambiente. A musselina pode ser umedecida intermitentemente, se imerso em água, ou continuamente, por um fluxo capilar no material da musselina. Para um desempenho ótimo é necessário uma ventilação forçada. A ventilação natural pode ser adequada apenas quando o sensor de temperatura e a musselina são muito pequenos.

As fontes de erro em um psicrômetro tem sido bem documentadas e são prontamente controladas, como apresentado a seguir.

Sensibilidade, acurácia e emparelhando dos sensores de temperatura - Um psicrômetro é menos sensível ao erro absoluto dos sensores de temperatura do que ao erro relativo, ou ao erro de emparelhando, entre os sensores de bulbo úmido e seco.

Taxa de ventilação - Tipicamente a taxa de ventilação deveria ser de pelo menos 3 m/s, para maximizar a transferência de calor por convecção e evaporação, e para minimizar a transferência de calor por condução e radiação. A taxa de ventilação mínima necessária é uma função da massa térmica do sensor. Com sucesso, sensores feitos de termopares com diâmetro pequeno com uma musselina de pano fino tem sido utilizados sem ventilação forçada (Stigter e Welgraven, 1976).

Radiação incidente nos sensores de temperatura - Os sensores devem ser protegidos da radiação solar direta e da refletida, e da radiação de ondas longas ou da radiação terrestre. Esta é a principal fonte de erro em campo, que normalmente não é um fator importante em laboratório.

Tamanho, forma, material e umidescimento da musselina - A musselina do psicrômetro especialmente preparado pelos vendedores de instrumento, não deveria ser de um pano de algodão ordinário. A maioria dos panos de algodão comercial contém substâncias químicas hidrofóbicas, ou anti-molhamento, que eventualmente impedem o umidescimento da musselina. Quando usada continuamente em psicrômetros operacionais, até mesmo a musselina de um psicrômetro padrão, deve ser fervida em uma solução de "lye" e detergente, e então ser fervida em água destilada e enxaguada com água destilada antes do uso.

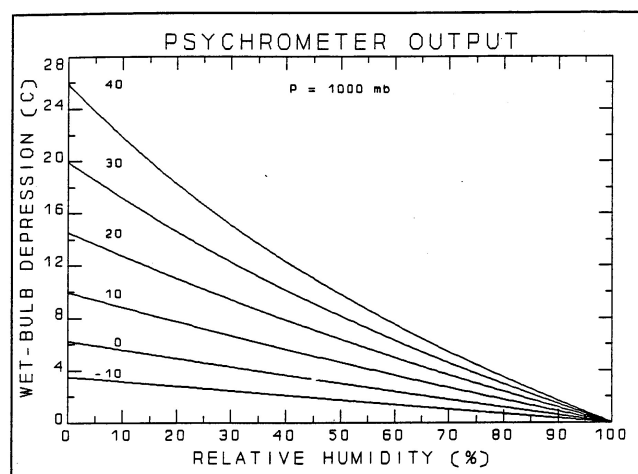
As posições relativas do sensor de bulbo úmido e seco - O ar não deve fluir do bulbo úmido esfriando o bulbo seco.

Pureza da água da musselina úmida - Só a água destilada ou desionizada deve ser usada.

Uma fórmula empírica, a fórmula psicrométrica, é usada para converter as temperaturas do bulbo úmido e seco para umidade.

$$e = e_{sw} A p (T - T_w) \quad (5.8)$$

As temperaturas são em °C e as pressões em mb. O coeficiente psicrométrico, de acordo com Wylie e Lalas (1985), deve ser,  $A = 0,00062$  para quando houver água no bulbo úmido, e  $A = 0,00054$  para quando houver gelo. O coeficiente do psicrômetro é uma função do diâmetro da sonda, da velocidade do vento e da pressão. Estes valores de  $A$  podem ser usados para pressões acima de 800 mb, para velocidades do vento maiores do que  $2 \text{ m s}^{-1}$  com uma sonda de 2 mm diâmetro, e para velocidade maiores do que  $4 \text{ m s}^{-1}$  com uma sonda de 8 mm de diâmetro. A chamada pressão de vapor de equilíbrio à temperatura do bulbo úmido,  $e_w$ , é obtida usando a pressão de vapor de saturação da equação (5.4), substituindo  $T$  por  $T_w$ .



**Fig. 5.4** Saída de um psicrômetro; depressão X umidade relativa. Cada curva mostra a depressão do bulbo úmido para temperaturas ambientes de -10 a 40 °C.

Com um instrumento bem projetado e corretamente usado, é possível alcançar uma inexatidão menor do que 1% UR no intervalo de 5 a 65 °C da temperatura do bulbo seco. A Figura 5.4

apresenta curvas de entrada-saída ou transferência de um psicrômetro. Cada curva mostra a depressão do bulbo úmido como uma função da umidade relativa para várias temperaturas do ar ambiente. A sensibilidade estática é a rampa da curva. A sensibilidade aumenta acentuadamente com o aumento da temperatura e ligeiramente com a diminuição da umidade relativa. O erro na umidade relativa causada por um erro de 0,1 °C na depressão do bulbo úmido é mostrado na Fig. 5.5. Seria extremamente difícil de alcançar inexatidões menores do que 1% UR para temperaturas do ar abaixo de 10°C.

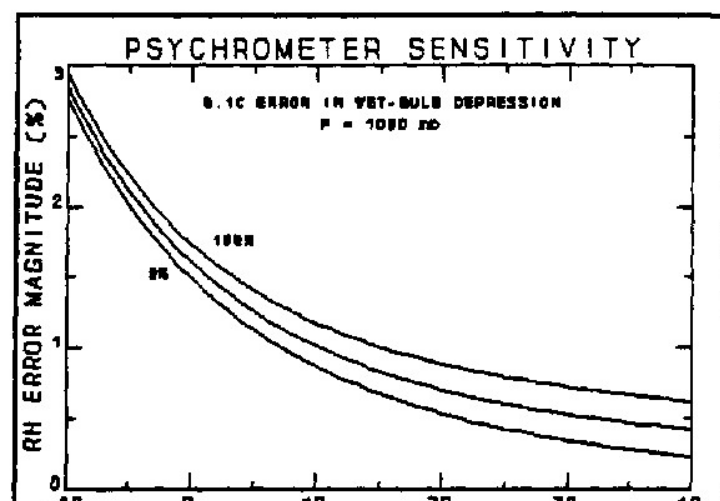
A vantagem especial de um psicrômetro é que as fontes de erro são documentas e são prontamente conferidas. O psicrômetro de Assmann é um exemplo excelente de instrumento relativamente barato, de mão, que pode ser usado para conferir outros sensores de umidade no campo. O usuário deve conferir periodicamente o sensor de temperatura e verificar se a musselina está limpa e saturada com água destilada e que instrumento está corretamente exposto. A entrada de ar não deve estar direcionada para o sol ou para qualquer outra superfície quente como o solo em um dia ensolarado e o observador deve ter o cuidado de não obstruir a ventilação do instrumento.

Psicrômetros de baixa potência e de operação contínua foram usados por Munro (1980) e Pike et al. (1983). O último tipo de psicrômetro é mostrado na Fig. 5.6. Porém, este tipo de psicrômetro apresenta falhas às baixas temperaturas (abaixo de 0°C) e na presença de sais.

### 5.3.3 Absorção de vapor d'água no equilíbrio

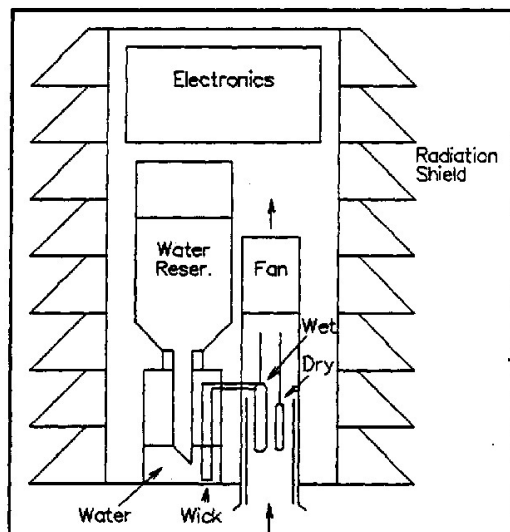
O vapor d'água interage com quase toda substância, geralmente pelo processo de absorção (absorção ou adsorção) e algumas vezes através de reação de química. Quando um material exibe uma mudança que é suficientemente reversível e reproduzível, ele pode ser usado como um sensor de umidade.

Higrômetros elétricos – São sensores que utilizam uma substância que exibe uma mudança em um parâmetro elétrico como a resistência ou a capacitância. Há quatro tipos básicos: soluções eletrolíticas aquosas, sólidos impermeáveis, sólidos porosos, e materiais dimensionalmente variáveis.



*Fig. 5.5 Erro induzido em um psicrômetro devido a 0.1 °C de erro na depressão do bulbo úmido.*





**Fig. 5.6** Diagrama esquemático de um psicrômetro projetado para uso em uma estação meteorológica automática. O reservatório d'água é suficiente para uma a duas semanas de operação contínua.

A condutividade de uma solução eletrolítica aquosa é uma função de sua concentração que, por sua vez, é uma função da umidade relativa e da temperatura. Um filme fino de uma solução pode ser aplicado à superfície de um material isolante impermeável e a sua condutividade pode ser medida. O substrato é apenas um veículo para segurar a solução e permite que esta responda à umidade ambiente. A solução eletrolítica aquosa pode ser dispersa em uma camada orgânica e então aplicada a um substrato isolante, como no higrômetro de Dunmore, ou pode ser usado para impregnar fibras orgânicas porosas, como no higrômetro de Gregory.

O vapor d'água é adsorvido na superfície de sólidos impermeáveis que formam um filme cujas propriedades são uma função da umidade relativa ambiente e da temperatura. Este filme provê um caminho para a passagem da corrente elétrica. Quantidades minuciosas de sais solúveis e gases presentes na superfície contribuem para a condutividade. A célula de Pope é um exemplo do uso de uma resina de troca de íons. A resistência aumenta com o decréscimo da temperatura.

Outro sensor neste grupo é o Humicap (Salasmaa e Kostamo, 1975). Este sensor utiliza a variação de capacitância em um capacitor de filme fino de polímero. É projetado para medir umidade relativa no intervalo 0 a 100% UR no intervalo de temperatura de -40 a 80 °C, com um coeficiente de temperatura de 0.05% UR por °C.

O vapor d'água é absorvido por materiais porosos que mudam de resistividade pela variação de volume. São exemplos: argila de "**underfired**", fibras naturais e tecidos.

Muitos materiais exibem mudanças dimensionais quando eles absorvem vapor d'água. Alguns exemplos são cabelo, madeira e fibras vegetais. Quando estes materiais são cobertos ou são impregnados com substâncias eletricamente condutoras, a mudança dimensional é convertida a uma mudança de resistividade. Um exemplo é o elemento carbono, que consiste em um substrato isolante coberto com um filme de plástico dimensionalmente variável no qual são

dispersas partículas finas de carbono. Se expandem com o aumento da umidade relativa aumentando a resistividade.

Higrômetros elétricos normalmente são pequenos, baratos, e, também, são satisfatórios para a operação remota. Eles requerem calibração e normalmente têm um significativo coeficiente de temperatura. Alguns têm um atraso em longos períodos de tempo e muitos têm uma marcada histerese. O atraso de tais sensores aumenta exponencialmente com o decréscimo da temperatura. A calibração pode ser afetada pela exposição ao ar saturado, chuva, névoa e nuvens que podem lavar a superfície sensível do sensor. Alguns são afetados por contaminantes, especialmente os que são eletricamente condutivos. Sensores que exibem alta impedância elétrica em ambos extremos da escala de umidade são especialmente sensíveis às mudanças na calibração causadas pela contaminação.

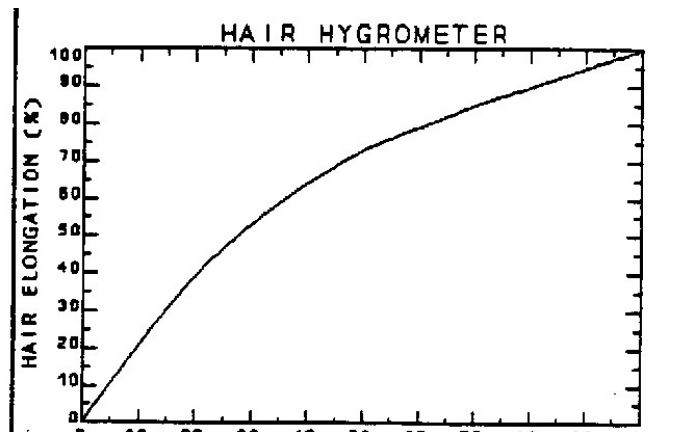


Fig. 5.7 - Gráfico de transferência de um higrômetro de cabelo.

Higrômetros mecânicos são feitos de materiais que variam dimensionalmente, acoplados mecanicamente a um indicador ou transdutor. Já foram utilizados como elementos sensíveis vários tipos de materiais tais como: cabelo humano, algodão de pele, seda, fibra sintética (“nylon”), papel e madeira. Os defeitos principais destes são falta de estabilidade, grande histerese e tempos de atraso grandes.

**Tabela 5.1** Alongamento médio do cabelo humano como uma porcentagem do total alongado como uma função da umidade relativa.

Alongamento do cabelo %	0	21	39	53	64	73	79	85	90	95	100
Umidade relativa %	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

Em adição a não linearidade mostrada na tabela, a calibração de um higrômetro de cabelo pode mudar quando exposto a um ar muito seco, abaixo de 20% de UR.

#### 5.3.4 Medidas das propriedades físicas do ar úmido

As propriedades físicas do ar, tais como; o índice de refração, a absorção de radiação, a condutividade térmica, a viscosidade, a densidade e a velocidade do som, variam com a quantidade de vapor d’água presente.

Higrômetro espectroscópico - Um higrômetro espectroscópico mede a atenuação de certas faixas no espectro devido a absorção do vapor d'água. Estas faixas ocorrem principalmente no ultravioleta e no infravermelho (a linha de Lyman-alfa no ultravioleta foi usado pelo Buck (1976)). Exemplos de higrômetros infravermelhos são descritos por Hyson e Hicks (1975), Moore (1983), Ohtaki (1984), e Raupach (1978).

A fração de radiação incidente transmitida através de um caminho atmosférico,  $\tau$ , é determinada pela lei de Beer:

$$\tau = \frac{I}{I_0} = \exp(-k_{\lambda} d_v x) \quad (5.9)$$

onde;

$x$  = caminho da trajetória em m,

$d_v$  = umidade absoluta em  $\text{kg m}^{-3}$  reduzido a atmosfera padrão ( $p = 1013,25 \text{ mb}$ ,  $T = 273,15 \text{ K}$ ),

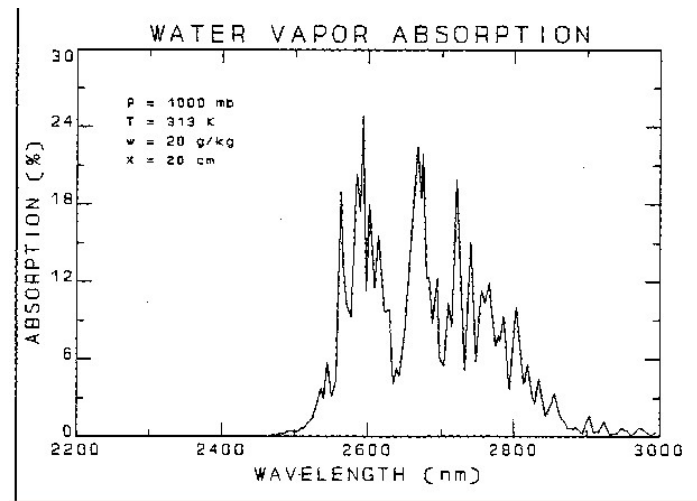
$k_{\lambda}$  = coeficiente de absorção em  $\text{m}^2 \text{ kg}^{-1}$ ,

$I$  e  $I_0$  representam a intensidade da fonte e a intensidade da luz depois de atravessar a atmosfera absorvedora.

A absorção no caminho atmosférico é dada por  $a = (1 - \tau)$ .

Para aplicar esta técnica precisa-se conhecer  $I_0$  ou a intensidade da fonte em um comprimento de onda conhecido, em um comprimento fixo da trajetória,  $x$ , isto é, ter um detector com sensibilidade conhecida. Precisa-se conhecer, também, o coeficiente de absorção,  $k_{\lambda}$ , no intervalo do comprimento de onda determinado pela largura da faixa da fonte e do detector. A faixa ideal do comprimento de onda deveria ser aquela onde nenhum outro gás atmosférico é um absorvedor, onde as fontes e detectores são disponíveis, e onde existem janelas de materiais transparentes (incluindo a fonte e detector).

Na porção infravermelha do espectro, a faixa compreendida entre aproximadamente 1000 nm a 3000 nm, é atraente porque nela há uma radiação solar e terrestre menor. O vidro é transparente para fora a aproximadamente 2800 nm. Fontes e detectores são disponíveis e há faixas com forte absorção de vapor d'água. (veja Fig. 5.8).



**Fig. 5.8** Absorção de vapor d'água da radiação infravermelha. São mostradas faixas com uma pequena ou nenhuma absorção e faixas com uma forte absorção.

A absorção do vapor d'água acontece principalmente em linhas distintas. Há uma forte linha de vibração-rotação nos comprimentos de onda de 2663, 2734, 3163 e 6271 nm. Cada uma destas linhas é alargada pela pressão atmosférica total e pelo movimento molecular (alargamento Doppler), que é uma função da temperatura. A lei de Beer se manteria se o vapor d'água fosse o único gás absorvedor e se a resolução do comprimento de onda do instrumento fosse pequena quando comparada com as linhas de absorção alargadas. A primeira condição pode ser quase totalmente satisfeita para alguns comprimentos de onda. A segunda condição pode ser satisfeita usando uma fonte com faixa estreita, como um laser. Higrômetros à laser são muito caros e não são completamente satisfatórios para as aplicações de campo, por conseguinte os higrômetros IR, usam fontes de bandas largas e filtros para definir as faixas de onda. Fontes reais e detectores tendem a desviar com o tempo, e as janelas mudam ou apanham sujeira, todos estes fatores afetam a intensidade aparente da fonte,  $I_0$ . Para compensar, estes higrômetros de IR utilizam duas faixas, uma na região absorvente, em torno de 2600 nm, e outra em uma região (ou faixa) de referência de não absorção, em torno de 2300 nm. Na Fig. 5.8 temos um gráfico da absorção, de 2200 até 3000 nm, para uma trajetória de absorção de 20 cm, e uma razão mistura de 20 g/kg.

O esquema de um higrômetro IR simples que emprega este conceito é mostrado na Fig. 5.9. É um exemplo de dispositivo de um feixe único, com uma fonte e um detector, ambos funcionando na região entre 2300 e 2600 nm. Dois filtros, um na faixa de referência e o outro na faixa de absorção são girados na frente do feixe. O disco, onde estão os filtros, é opaco. O sinal de saída medido pelo detector é mostrado na Fig. 5.9, onde são apresentados três tempos distintos durante a rotação do disco contendo os dois filtros:

- VW - sinal de saída obtido quando o feixe passa pelo filtro de absorção,
- VD - sinal quando o feixe não passa por nenhum dos dois filtros e
- VR - sinal obtido quando o feixe atravessou o filtro de referência.

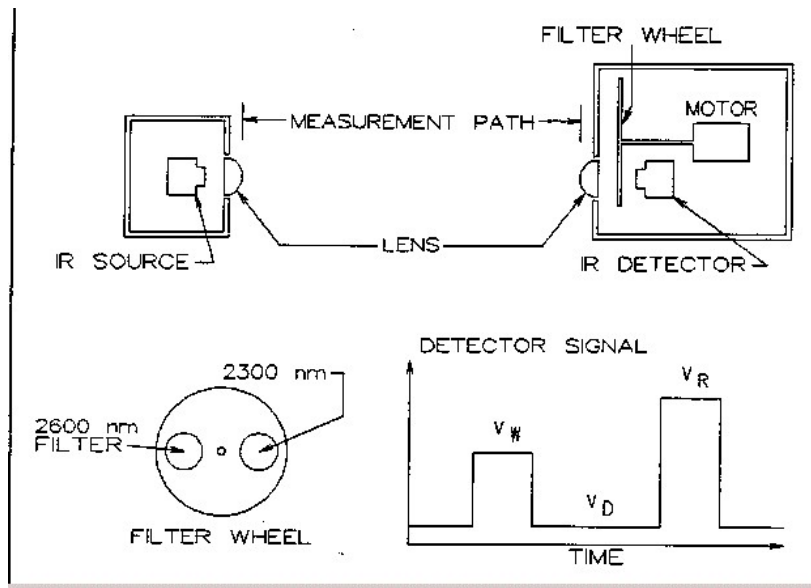


Fig. 5.9 Esquema de uma possibilidade de implementação para um higrômetro simples.

A equação de transferência do higrômetro IR é:

$$V_{\lambda} = I_{0\lambda} \tau_{o\lambda} \tau_{g\lambda} \tau_{a\lambda} R_{\lambda} + B \quad (5.10)$$

onde;

$I_{0\lambda}$  é a intensidade de fonte no comprimento de onda  $\lambda$  (na faixa de referência ou de absorção),

$\tau_{g\lambda}$  é a transmissividade dos componentes ópticos (janelas e lente),

$\tau_{a\lambda}$  é a transmissividade do caminho atmosférico absorvente, e,

$R_{\lambda}$  é a responsividade do detector.

Também pode haver algum viés, B, devido ao vazamento de luz, a corrente de fuga do detector etc. O comprimento de onda e o intervalo espectral do comprimento de onda são determinados pelos filtros.

A intensidade da fonte, a responsividade do detector e o viés do sensor são funções do tempo, da voltagem da fonte e do sensor de temperatura. Nem sequer a transmissividade dos componentes ópticos podem ser considerados constantes uma vez que é afetada devido a acumulação de sujeira nas janelas. Usando  $\lambda = w, d$  ou  $r$ , dependendo de quando o sinal é amostrado, pode-se então obter um sinal normalizado:

$$V_n = \frac{V_w - V_d}{V_r - V_d} = \frac{I_{0w} \tau_{gw} \tau_{aw} R_w}{I_{0r} \tau_{gr} \tau_{ar} R_r} = S \tau_{aw} \quad (5.11)$$

onde S é o sensor de sensibilidade estática.

O sinal normalizado elimina a deriva e é insensível às variações na força da fonte. Finalmente, é necessário medir a temperatura do ar e a pressão para obter:

$$d_v = f(T, p, \tau_{aw}) \quad (5.12)$$

onde a função pode ser obtida teoricamente mas deve ser confirmado através da calibração. O higrômetro de Lyman-alfa (Buck, 1976) usa a linha de emissão de Lyman-alfa do hidrogênio atômico a 121,56 nm no ultravioleta como uma de fonte radiação. O vidro e a maioria dos outros materiais são opacos a este comprimento de onda desde que as janelas sejam feitas de fluoreto de magnésio que transmite de 115 nm até 132 nm. O vapor d'água é fortemente absorvido a 121,56 nm, assim uma trajetória curta, de 0,2 a 5 cm, é adequada. O oxigênio e o ozônio absorvem a radiação de 121,56 nm. O oxigênio é um fraco absorvedor e este efeito pode ser corrigido usando a temperatura e pressão atmosférica para estimar a densidade do oxigênio. A contribuição do ozônio na absorção é pequena na troposfera.

É difícil usar um comprimento de onda de referência para cancelar a deriva assim o desenho do instrumento é mais simples do que o higrômetro IR mostrado na Fig. 5.9; o motor e o disco com os filtros não são usados. Enquanto a fonte e o detector são bastante estáveis, a transmissão das janelas muda a uma taxa de cerca de 0.5 a 5% por hora do tempo operacional devido a interação do fluoreto de magnésio com constituintes atmosféricos. Esta taxa deve ser corrigida usando um instrumento de referência, como o higrômetro de espelho frio, para as comparações periódicas. A vantagem do higrômetro de Lyman-alfa é que é mais simples, menor, e muito mais rápido que o higrômetro de IR. O ganho com a velocidade vem de não ter que girar os filtros no caminho de absorção. O higrômetro de Lyman-alfa é satisfatório para aeronaves de pesquisa e para as medidas da flutuação turbulenta da umidade em torres.

Higrômetro refrativo. - O índice refrativo do ar varia com temperatura, pressão e com o conteúdo de umidade. As medidas podem ser feitas usando as frequências ópticas, rádio e microondas.

### 5.3.5 Obtenção do equilíbrio do vapor líquido ou do vapor sólido

Higrômetro de Ponto de Orvalho e de Congelamento - A umidade atmosférica pode ser determinada esfriando uma superfície até o equilíbrio do vapor líquido ou do vapor sólido ser alcançado. Os componentes principais de um higrômetro de espelho frio, mostrados na Fig. 5.10. São um sistema de entrada de ar, uma superfície de espelho, um método para aquecimento e esfriamento do espelho, um método para detectar a formação de congelamento ou de orvalho, um sensor para medir a temperatura da superfície do espelho, e um sistema de controle para regular a temperatura e a taxa de aquecimento ou esfriamento da superfície do espelho.

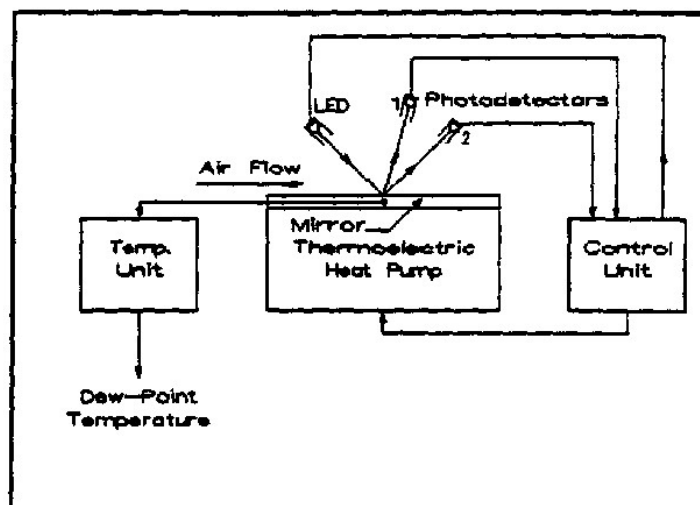
O sistema de entrada de ar provê um fluxo uniforme de ar ambiente e pode incluir filtros para remover as partículas de pó. Os filtros podem ser problemáticos se submetidos à umidade, pois depois disso umedecerão o ar. A entrada de ar no sistema deve estar a alguns metros do ponto de medida. Todos os materiais na entrada do ar do sistema devem ser não higroscópicos.

Um espelho de superfície pequena é provido de um fluxo de ar cuja temperatura pode ser controlada e a formação de orvalho ou congelamento podem ser sentidas. O espelho normalmente é um espelho metálico.

O espelho é aquecido ou esfriado usando uma bomba de calor ou termopar que utiliza o efeito de Peltier. Este é um sistema razoavelmente compacto e completamente reversível. A

velocidade com que o espelho pode ser aquecido ou pode ser esfriado determina a frequência de resposta do sistema.

A formação de orvalho ou congelamento no espelho é detectada opticamente com um LED (*Light Emitting Diode* - diodo emissor de luz) e um ou mais fotodetectores que são sensíveis às variações da luz espalhada quando se forma gelo ou gotas de orvalho. Dois fotodetectores são mostrados na Fig. 5.10 onde o detector número 2 recebe a luz refletida de uma superfície lisa, e o detector número 1 não será iluminado a menos que a luz seja difundida na superfície pelo orvalho ou pelo congelamento. Neste esquema, a unidade de controle usa a razão da luz recebida pelos dois detectores. Em um detector de esquema simplificado, a unidade de controle usa a intensidade do sinal recebido do detector.



*Fig. 5.10 - Diagrama de bloco de um higrômetro de espelho frio. O LED é a fonte de luz e o dois fotodetectores sentem a luz difundida (#1) e a refletida (#2). Um sistema de controle regula a temperatura de espelho.*

Um sensor de temperatura, um termistor ou um RTD, é embutido logo abaixo da superfície do espelho, de modo que não afetará as propriedades ópticas ou térmicas do espelho. Deve estar no centro do espelho e muito perto da superfície de espelho para minimizar os gradientes de temperatura entre o sensor e a superfície ativa.

O sistema de controle aceita as entradas do detector óptico, e algumas vezes as entradas do sensor de temperatura, e controla a corrente da bomba de aquecimento do termopar. O sistema de controle deve regular a temperatura do espelho para o ponto onde o orvalho ou o congelamento começa a se formar. Isto pode ser feito mantendo uma espessura uniforme de orvalho ou do congelamento. Também tem de se regular a taxa de aquecimento ou esfriamento para evitar excessos, ser sensível a rápidas mudanças de umidade no ambiente.

O método do ponto de orvalho pode parecer ser uma técnica fundamental para determinar a umidade, mas este tipo de higrômetro é influenciado por vários fatores que fazem da calibração uma necessidade.

É difícil medir a temperatura da superfície frontal do espelho sem interferir na detecção do orvalho ou do congelamento. Se o sensor de temperatura é encaixado no espelho, pode haver

um gradiente de temperatura entre ele e a camada onde se forma o orvalho ou o congelamento.

O mecanismo controlador deve ser sensível às variações de umidade na temperatura do ar ambiente.

A presença de quantidades extremamente pequenas de materiais solúveis em água na superfície de condensação pode abaixar a pressão de vapor e, conseqüentemente, o ponto de orvalho.

Se formar condensação, com gotículas extremamente pequenas, a pressão interna aumenta devido à tensão superficial da superfície curva da gotícula. Este fato aumenta a pressão de vapor e o ponto de orvalho. Os Serviços Meteorológicos usam uma fonte d'água com uma concentração de núcleos de condensação conhecida para limpar o espelho. Alguns instrumentos incorporam um mecanismo automático de autolimpeza periódica para assegurar que o espelho não adquira muita sujeira com o passar do tempo.

Em temperaturas abaixo do ponto de congelamento, a condensação inicial pode ser úmida ou congelada. A formação de orvalho tem sido observada a temperaturas abaixo de  $-27^{\circ}\text{C}$ . Apesar da mudança de fase do orvalho super resfriado para gelo ocorrer rapidamente, não tem sido observado nenhuma mudança por horas. A pressão de vapor de saturação da água super resfriada a  $-20^{\circ}\text{C}$ , corresponde a um ponto de congelamento de  $-18^{\circ}\text{C}$ , o que causa um erro de  $2^{\circ}\text{C}$ .

O sistema de controle de alguns higrômetros de espelho frio pode falhar quando a umidade ambiente muda rapidamente. Quando isto acontece o indicador do ponto de orvalho pode estar grosseiramente errado.

O higrômetro de espelho frio pode operar continuamente na operação sem acompanhamento de um operador, e com manutenção qualificada, possui alta acurácia. O seu intervalo típico de operação é  $-70 \leq T_d$  e  $T_f \leq 60^{\circ}\text{C}$ . É possível obter uma imprecisão que varia de  $0,4^{\circ}\text{C}$  para temperaturas de ponto de orvalho antes de congelar a  $2^{\circ}\text{C}$ , para uma temperatura do ponto de congelamento de  $-70^{\circ}\text{C}$ , quando a umidade atmosférica ambiente é constante.

O objetivo é medir o vapor d'água presente no ar livre. Assim o local deve estar antes da fonte de vapor artificial, como um irrigador de gramado ou uma torre de resfriamento. Deve estar longe de superfícies pavimentadas que podem ser molhadas, e longe de árvores e edifícios. Pó ou partículas salgadas afetam o instrumento. É essencial manter uma programação de limpeza do espelho.

Solução de sal saturada - A razão de mistura do ar úmido em equilíbrio com uma superfície plana de uma solução aquosa salgada saturada é função da temperatura e da pressão. A célula de orvalho contém uma solução saturada de LiCl que é aplicada a lâ de vidro ou a uma musselina que envolve o dispositivo de medição de temperatura. Um aquecedor e um circuito simplificado de controle aquece a solução, e mantém ela a uma temperatura de equilíbrio. Alguns fatores que afetam o desempenho de uma célula de orvalho são:

- A célula de orvalho pode operar em temperaturas ambientes no intervalo de  $-30$  a  $100^{\circ}\text{C}$  provendo a umidade relativa ambiente em torno de 100% e o valor de equilíbrio de uma solução saturada de LiCl que é de 11% em  $50^{\circ}\text{C}$ , e 15% a  $0^{\circ}\text{C}$ .



- A célula de orvalho deve ser protegida de uma forte ventilação que poderia causar excessiva perda de calor, reduzindo sua temperatura e fornecendo uma leitura errônea.

- A perda de potência causa esfriamento e saturação com a água líquida, a qual pode lavar o sal da musselina. O sal pode ser restabelecido facilmente aplicando uma solução de LiCl fresca.

- A velocidade de resposta depende da taxa à qual pode ser aquecida ou a qual perde calor para o ambiente. Isto, em troca, afeta o consumo de energia.

### 5.3.6 Reações químicas

Métodos químicos são normalmente usados em laboratório. Um método é remover o vapor d'água pelo uso de um reagente químico no qual a água resultante é pesada.

### 5.4 Calibração de Sensor de Umidade

O ar com uma razão de mistura conhecida pode ser obtido misturando uma quantidade de ar saturado, a uma temperatura conhecida, com uma quantidade de ar seco. Este método pode ser usado para produzir uma quantidade de vapor com uma umidade constante e conhecida. O ar pode ser trazido à pressão de vapor de saturação borbulhando através de um banho d'água.

Um dos métodos mais simples de calibrar a absorção do sensor de umidade é expondo o sensor a um espaço limitado e em uma solução salgada aquosa. O ASTM (1984) desenvolveu uma prática recomendada para manter a umidade relativa constante usando tais soluções. Algumas soluções salgadas mais utilizadas são listadas em Tabela 5.2.

**Tabela 5.2** Valores de equilíbrio da umidade relativa para soluções aquosas saturadas de sal. Os valores listados são para temperaturas de 20, 25 e 30°C.

Sal	T(°C) = 20	25	30	
<b>Cloreto de Lítio</b>	<b>11,1</b>	<b>11,3</b>	<b>11,3</b>	<b>LiCl</b>
Acetato de Potássio	23,1	22,5	21,6	KC <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub>
Cloreto de Magnésio	33,1	32,8	32,4	MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O
Carbonato de Potássio	43,2	43,2	43,2	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
Nitrato de Magnésio	54,4	52,9	51,4	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O
Cloreto de Sódio	75,5	75,3	75,1	NaCl
Cloreto de Potássio	85,1	84,3	83,6	KCl
Cloreto de Bário	91,0	90,0	89,0	BaCl <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O
Nitrato de Potássio	94,6	93,6	92,3	KNO <sub>3</sub>
Sulfato de Potássio	97,6	97,3	97,0	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>