

PSICRÔMETRO

MEDIDA DA UMIDADE RELATIVA DO AR

F 809 – Instrumentação Para Ensino

Relatório Final

Jurandi Leão – 991981

Orientadora: Profa. Maria José P. M. de Almeida



2005 – Ano Internacional da Física

1 – Resumo

Este projeto de ensino consiste na elaboração de experimentos para serem utilizados no ensino médio e superior. Neste caso, o experimento desenvolvido consistiu na montagem de um aparelho denominado Psicrômetro que visa medir a umidade relativa do ar por diferença de temperatura entre dois termômetros.

2 – Objetivos

O objetivo deste trabalho é a construção de um Psicrômetro que poderá ser utilizado, dentre várias situações, numa sala de aula do Ensino Médio e Superior. Procuramos manter um nível matemático relativamente acessível neste relatório para que ele possa ser lido e compreendido por estudantes de Ensino Médio.

Um outro objetivo será analisar uma carta psicrométrica para que possamos, com o uso do psicrômetro construído e das equações apresentadas neste relatório, obtermos resultados a respeito do ar atmosférico.

3 – Introdução

Este projeto consiste na montagem de um aparelho denominado **Psicrômetro de Funda** para medidas e estudo da umidade relativa do ar. Um Psicrômetro de Funda é um aparelho que consiste em dois termômetros, fixados sobre um mesmo suporte: um com o seu bulbo seco, chamado de *termômetro de bulbo seco*, e o outro com o seu bulbo molhado, chamado de *termômetro de bulbo molhado*. Este último tem esse nome porque seu bulbo é envolvido por um tecido, algodão, ou algo do gênero, embebido em água. Sua temperatura é sensivelmente menor do que a do termômetro de bulbo seco, que marca a temperatura ambiente. Essa diferença de temperatura entre os termômetros é o dado fundamental para o estudo de umidade relativa.

A **Psicrometria** (do grego *psukhros* – frio) é um capítulo da termodinâmica que trata do estudo do comportamento de sistemas constituídos por uma mistura de ar e vapor de água, tal que a concentração de vapor d'água é relativamente baixa.

As condições de conforto humano estão relacionadas não somente com a temperatura do ar, mas também com a concentração do vapor d'água contido no ar atmosférico (*umidade do ar*) visto que o equilíbrio térmico que se estabelece intervém do fenômeno de evaporação. Mais concretamente, quanto mais elevada for a temperatura do ambiente, o equilíbrio térmico do corpo humano depende mais fortemente da evaporação que da radiação e convecção e, por isso, o teor de vapor d'água contido no ar atmosférico deve ser tanto menor quanto maior for a temperatura ambiente.

A título de exemplo, os valores recomendáveis do teor de umidade no ar, de acordo com Marques¹ em seu livro *Termodinâmica Térmica*, expressos em gramas de vapor por grama de ar seco, são:

<i>Temperatura</i> (°C)	<i>Teor de Umidade</i> (g vapor/g ar seco)
20,0	12,40
25,0	12,10
30,0	11,80
35,0	11,30
40,0	9,70

Este trabalho permite a partir de alguns cálculos matemáticos e tabelas, facilmente encontrados na Internet²⁻⁶, medir a umidade relativa do ar. A grande vantagem desse experimento é a sua simplicidade e baixo custo de realização. Apesar de sua importância, visto que trabalha com algo que está totalmente relacionado com o bem estar da vida na terra, a *umidade do ar*, o experimento é relativamente simples.

Os termômetros utilizados neste experimento devem ser sensíveis à variação de temperatura ambiente. No caso do Brasil, termômetros que variam de -10 à 50 °C são ideais. Esses instrumentos podem ser encontrados na faixa de R\$ 3,00 à R\$ 25,00, dependendo de sua qualidade e escala. Locais interessantes para se conseguir esses termômetros são em lojas de produtos para aquários.

Posto em locais de circulação livre de ar, a evaporação da água, contida no tecido que envolve o termômetro de bulbo molhado, rouba calor do bulbo e o termômetro de bulbo molhado indica temperaturas mais baixas do que as do outro termômetro igual, com o reservatório livre, que se coloca ao lado, e mede a temperatura ambiente. Essa evaporação é tanto maior quanto mais seca está a atmosfera e é nula quando a atmosfera está saturada de vapor de água.

Abaixo temos uma ilustração de um psicrômetro:

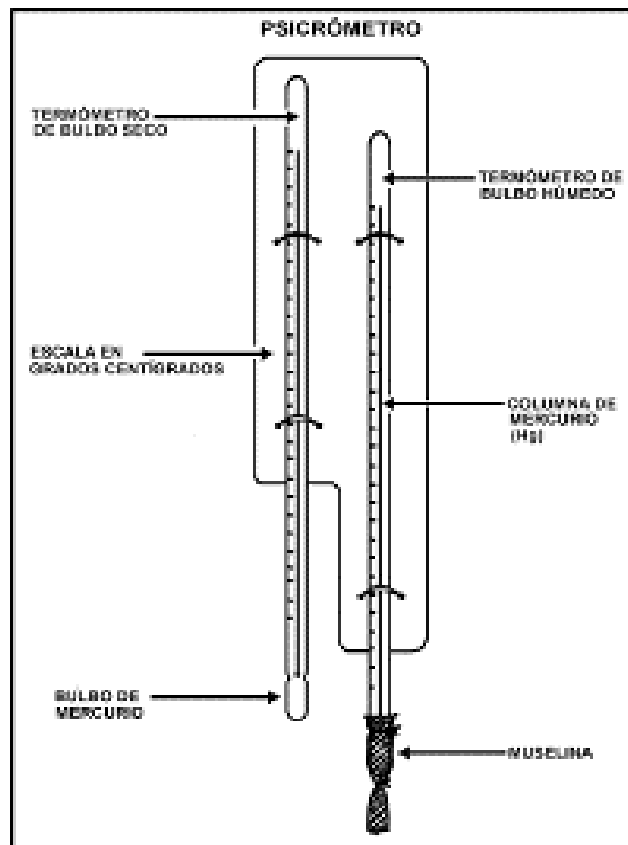


FIG. 1: Psicrômetro. Alcançado o equilíbrio, a temperatura do termômetro de bulbo molhado é sempre menor, quando o ar atmosférico não é saturado.

Hoje em dia já existem Psicrômetros digitais, nos quais a sensibilidade é bem maior.

Além da medida da umidade relativa do ar em ambientes livres, com fins meteorológicos, os psicrômetros são bastante utilizados em ambientes com ar condicionado, laboratórios, armazéns de alimentos, etc. E aqui fica uma observação, visto que a maioria dos ambientes na Unicamp possui ar condicionado e que em alguns laboratórios de física ou química as condições do ar é fundamental, esse trabalho pode ainda servir de estímulo para o efetivo controle do ar nestes ambientes.

2 – Algumas Noções

2.1 – Ar Úmido:

Dentre as misturas de gases e vapores, salienta-se o ar atmosférico, também denominado ar úmido, constituído de ar seco e de vapor de água.

2.2 – Ar Seco:

A mistura dos gases que constituem o ar atmosférico, com exceção do vapor de água, é chamada de ar seco. A composição do ar seco é representada por 78% de Nitrogênio, 21% de Oxigênio e 1% de Argônio. Para efeito de cálculos, considera-se que o ar seco é formado, basicamente, por 79% de Nitrogênio e 21% de Oxigênio.

2.3 – Ar Saturado:

Quando a mistura de vapor de água na atmosfera é máxima, diz-se que esse ar é saturado; porém, quando o vapor está superaquecido, diz-se que o ar é não-saturado.

Observa-se que o vapor de água na atmosfera pode achar-se superaquecido, em temperaturas muito abaixo de 100 °C, mesmo que a pressão atmosférica seja normal. É que a pressão indicada por um barômetro qualquer não é a pressão parcial do vapor de água, e sim a soma desta pressão com a do ar seco. Considera-se, sem inconvenientes, que o vapor de água na atmosfera obedece as Leis dos Gases Perfeitos, porque está submetido a pressões muito baixas.

2.4 – Umidade Específica ou Razão de Umidade:

Define-se Umidade Específica do ar como sendo a razão da massa do vapor d'água para a massa de ar seco em um dado volume de mistura; ou, matematicamente:

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} \quad (1)$$

onde ω é a umidade específica; m_v a massa de vapor d'água em um dado volume da mistura e m_a a massa do ar seco no mesmo volume da mistura. Como o ar seco e o vapor d'água ocupam, cada um, o volume todo da mistura, a umidade específica pode também ser definida em função dos volumes específicos, ou das densidades, do vapor d'água e do ar seco.

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = \frac{\rho_v}{\rho_a} = \frac{\left(\frac{p_v}{R_v T}\right)}{\left(\frac{p_a}{R_a T}\right)} = 0,622 \frac{p_v}{p_a}, \quad (2)$$

onde p_v é a pressão parcial do vapor de água na mistura e p_a é a pressão de ar seco no mesmo volume da mistura.

2.5 – A Umidade Relativa (Objeto de estudo):

Define-se como sendo a razão da pressão parcial do vapor d'água em uma mistura à pressão de saturação do vapor à mesma temperatura. A umidade relativa, representada por ϕ , é dada por:

$$\phi = \frac{p_v}{p_g}, \quad (3)$$

onde p_g é a pressão de saturação à mesma temperatura. Supondo válidas as relações para gás perfeito:

$$\phi = \frac{p_v}{p_g} = \frac{(RT/V_v)}{(RT/V_g)} = \frac{V_g}{V_v} = \frac{\rho_v}{\rho_g} \quad (4)$$

Comparando as equações (3) e (4), temos a relação entre a umidade específica e a umidade relativa:

$$\bar{\omega} = \phi \frac{\rho_g}{\rho_a} = \phi \frac{V_a}{V_g} = 0,622 \phi \frac{p_g}{p_a} \quad (5)$$

Aplicando, ainda, a Lei de Dalton, que diz: “a pressão total de uma mistura de gases é igual à soma das pressões parciais dos constituintes”, obtemos:

$$\bar{\omega} = 0,622 \frac{p_v}{(p - p_v)}, \quad (6)$$

onde p é a pressão total da mistura ou a pressão barométrica do ar atmosférico.

2.6 – Temperatura do ponto de orvalho:

Define-se como sendo a temperatura a qual o ar não-saturado torna-se saturado, ou seja, quando o vapor começa a condensar-se, seguindo um processo de resfriamento a pressão constante e umidade específica constante. É importante investigar o efeito de tal processo sobre a pressão parcial do vapor. Pela equação acima, obtemos:

$$p_v = \frac{\bar{\omega} p}{\bar{\omega} + 0,622} \quad (7)$$

E sendo constantes a pressão total da mistura e a umidade específica, segue-se que a pressão parcial do vapor também deve ser constante.

2.7 – Pressão de Vapor:

A idéia principal deste trabalho é apresentar uma maneira de medir a umidade relativa do ar mediante medidas de temperatura com o uso de dois termômetros. Para tal, uma maneira é apresentar uma equação para a pressão de vapor em função das temperaturas de bulbo seco e de bulbo molhado, assim como a umidade específica. Daí é conveniente apresentar a equação encontrada por Carrier:

$$p_v = p_w - \frac{(p - p_w)(t_d - t_w)}{2800 - 1,3t_w}, \quad (8)$$

onde p_w é a pressão de vapor correspondente à temperatura de bulbo molhado, e fornecida pelas Cartas Psicrométricas (definida abaixo); p_v a pressão real de vapor; t_d a temperatura do bulbo seco, t_w a temperatura do bulbo molhado e a p a pressão total barométrica. Nesta equação a pressão dada em Fahrenheit e a pressão em lbf/in^2 , visto que é assim que aparece a maioria das cartas psicrométricas na literatura.

Escrevendo a pressão em N/m^2 e a temperatura em $^{\circ}\text{C}$, a equação (8) fica:

$$p_v = p_w - \frac{(p - p_w)(t_d - t_w)}{1555 - 0,72t_w} \quad (9)$$

2.8 – Temperatura do bulbo seco, T:

É a temperatura de equilíbrio da mistura de ar e vapor.

2.9 – Temperatura termodinâmica de bulbo molhado, T_{bm}:

É a temperatura de equilíbrio alcançada quando a mistura de ar e vapor sofre um processo de resfriamento adiabático até chegar a saturação. O termômetro do bulbo molhado é idêntico ao termômetro de bulbo seco, exceto pelo bulbo, que é provido de um tecido embebido em água pura. O tecido mantém uma delgada camada de água sobre o bulbo, daí o termo *bulbo molhado*.

Os termômetros podem ser rapidamente girados no ar, a fim de induzir escoamento turbulento de ar sobre o bulbo molhado, provocando assim a transmissão de calor por convecção. Se o ar não está saturado, a água do tecido é resfriada por evaporação até que sua temperatura caia abaixo da temperatura de calor do ar ao tecido, prossegue o processo de evaporação, até que se atinja a temperatura de equilíbrio ou de bulbo molhado.

4 – Carta Psicrométrica

As propriedades da mistura de ar e vapor d'água que constitui a atmosfera podem ser convenientemente apresentadas em forma gráfica, no que se denomina *carta psicrométrica*. Toda carta psicrométrica, de modo geral, é um gráfico que tem por ordenadas a umidade específica e a pressão de vapor, e como abscissa a temperatura de bulbo seco. O *volume específico da mistura*, a *temperatura de bulbo molhado*, a *umidade relativa* e a *entalpia da mistura* aparecem como outros parâmetros.

É importante notar que uma carta psicrométrica é traçada para uma dada pressão barométrica, que geralmente é tomada como 1 atm (=14,7 lbf/in² = 1,013x10⁵ N/m² = 1,013 Bar = 760 mm Hg).

Para transformar a temperatura de Graus Fahrenheit para graus Celsius, usamos a equação:

$$\frac{\theta C}{5} = \frac{\theta F - 32}{9} \quad (9)$$

Veja abaixo exemplos de cartas psicrométricas:

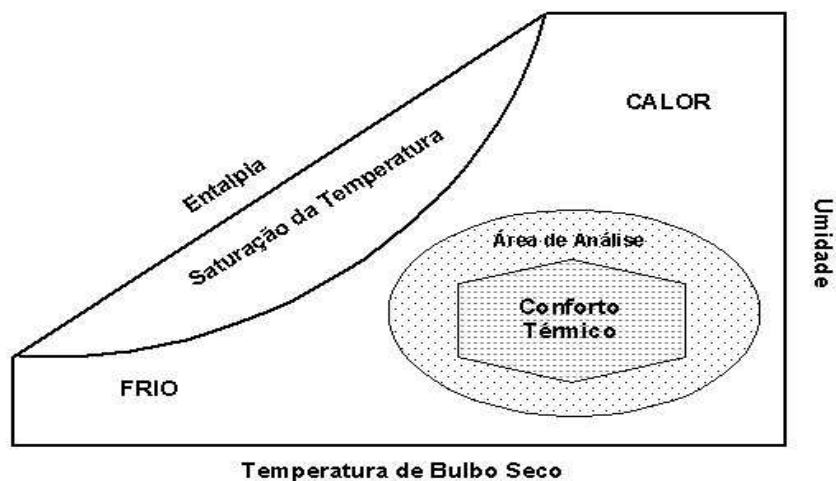


Fig 2. Carta psicrométrica

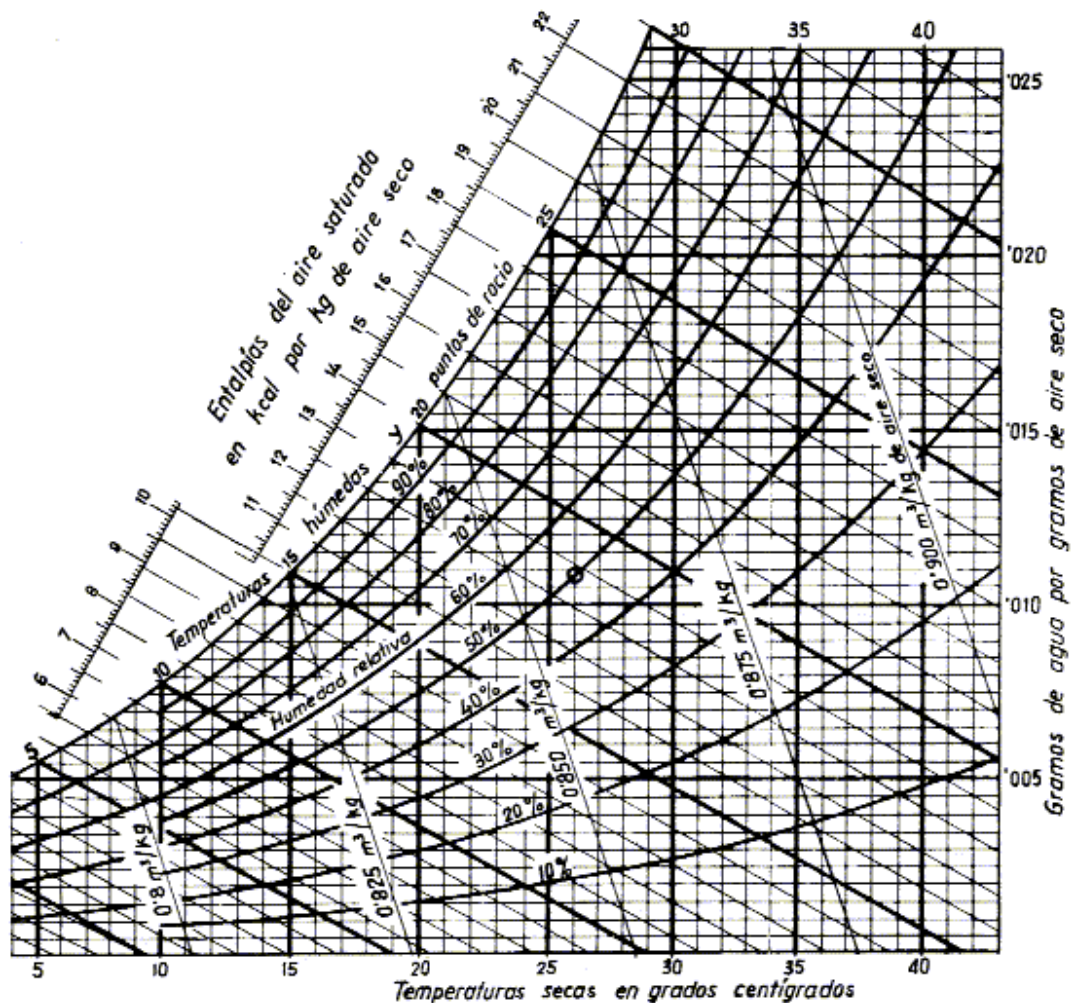


Fig. 3. Carta Psicrométrica completa. A temperatura variando de 4 a 43°C

NOVA FIGURA DE CARTA PSICROMÉTRICA

5 – Montagem do Psicrômetro

Os termômetros foram fixados num suporte de madeira toda furada. Isso foi interessante, pois dessa forma permitimos uma maior circulação de ar. Os bulbos dos dois termômetros ficam livres, para evitar a turbulência do ar e facilitar a evaporação da água em volta do bulbo do termômetro de bulbo molhado.

Um termômetro tem seu bulbo livre e mede, dessa forma, a temperatura real do ambiente. O segundo termômetro tem seu bulbo envolto por um tecido molhado e essa água esfriará o bulbo deste termômetro, pois no processo de evaporação há a retirada de calor do bulbo.

O suporte dos termômetros pode ser colocado sobre uma mesa onde se deseja medir a umidade relativa do ar.

Feito isso, deve-se esperar um tempo, em torno de 15 min., para que os termômetros alcancem o equilíbrio termodinâmico.

A partir disso, anota-se as temperaturas dos dois termômetros; monta-se uma tabela com estes valores e com base na equação (8) e com o uso da Carta Psicrométrica podemos calcular p_v e p_g . Feito isso, com o uso da equação (3) podemos medir a umidade relativa do ar.

A outra maneira, mais fácil é: com os valores de T e T_{bm} na Carta Psicrométrica, seguir as linhas dessas duas medidas. No ponto de intersecção, temos diretamente o valor da umidade relativa. A primeira maneira de calcular ϕ , apresentada nos parágrafos acima, é mais geral e serve quando não temos uma Carta Psicrométrica que fornece a umidade relativa como parâmetro.

Veja abaixo a foto do experimento:

Fig. 4. Aparato experimental.

FOTO DO EXPERIMENTO ENTRA AQUI

6 – Dados Experimentais

Todas as medidas foram colocadas em tabelas, com suas respectivas datas e horários nas quais foram efetuadas.

Tab 1. Dia 05/11/2005 – Medidas Efetuadas ao ar livre.

Horário	Temp. Bulbo seco (°C)	Temp. Bulbo molhado (°C)
15:00	26,0	25,9
15:15	27,3	24,0
15:30	27,9	23,0
15:45	28,0	23,0
16:00	28,0	22,0
16:15	28,0	22,0
16:30	28,0	22,0

Tab 2. Dia 23/11/2005 – Medidas Efetuadas na Sala de Referência da Biblioteca do IEL – Unicamp. Ambiente com ar condicionado.

Horário	Temp. Bulbo seco (°C)	Temp. Bulbo molhado (°C)
12:00	22,0	21,0
12:15	21,0	16,0
12:30	21,0	16,0
12:45	20,5	15,5
13:00	21,0	16,0
13:15	21,0	16,0
13:30	21,0	16,0

Tab 3. Dia 22/11/2005 – Medidas Efetuadas ao ar livre

Horário	Temp. Bulbo seco (°C)	Temp. Bulbo molhado (°C)
16:10	28,0	26,3
16:20	28,9	22,3
16:30	28,8	22,0
16:40	27,6	22,0
17:00	27,5	22,0
17:10	27,5	21,8
17:20	27,4	22,0

Tab 4. Dia 23/11/2005 – Medidas Efetuadas ao ar livre – Neste dia choveu

Horário	Temp. Bulbo seco (°C)	Temp. Bulbo molhado (°C)
8:20	23,2	22,0
8:30	23,3	19,8
8:40	23,4	19,8
8:50	23,4	19,7
9:00	23,5	19,7
9:10	23,5	19,6
9:20	23,5	19,6

Foram desconsideradas em todas as tabelas as duas primeiras medidas, pois nelas os termômetros não estavam ainda em equilíbrio. Então foi feita a média aritmética das cinco últimas medidas de cada tabela, que resultaram:

Tabela 1:

Temp. bulbo seco: 28,0°C
Temp. bulbo molhado: 22,4°C

Diretamente da carta psicrométrica obtém-se **62% de umidade relativa**.

Fazendo os cálculos mediante a equação (8):

Pela carta psicrométrica verifica-se que a pressão de saturação à temperatura de bulbo molhado de 22,4 °C (=82,4 °F) é 0,381 lbf/in². Sendo p = 1 atm (= 14,7 lbf/in²) temos:

$$p_v = 0,381 \text{ lbf/in}^2 - \frac{(14,7 - 0,381) \text{ lbf/in}^2 (82,4 - 72,32)^0 F}{2800 - 1,3 \times 72,32^0 F} = 0,327 \text{ lbf/in}^2$$

A pressão de saturação à temperatura de bulbo seco, 28 °C (=82,4 °F), que é a temperatura da mistura, é 0,524 lbf/in². Então da definição de umidade vem:

$$\phi = \frac{p_v}{p_g} = \frac{0,327}{0,524} = 0,62$$

Que concorda exatamente com o valor tirado diretamente do cruzamento de linhas da Figura 1.

Tabela 2:

Temp. bulbo seco: 20,9°C
Temp. bulbo molhado: 15,9°C

Diretamente da carta psicrométrica obtém-se **60% de umidade relativa**

Fazendo os cálculos mediante a equação (8):

Pela carta psicrométrica verifica-se que a pressão de saturação à temperatura de bulbo molhado de 15,9 °C (=60,6 °F) é 0,260 lbf/in². Sendo p = 1 atm (= 14,7 lbf/in²) temos:

$$p_v = 0,260 \text{ lbf/in}^2 - \frac{(14,7 - 0,260) \text{ lbf/in}^2 (69,9 - 60,6)^0 F}{2800 - 1,3 \times 60,6^0 F} = 0,211 \text{ lbf/in}^2$$

A pressão de saturação à temperatura de bulbo seco, 20,9 °C (=69,6 °F), que é a temperatura da mistura, é 0,345 lbf/in². Então da definição de umidade vem:

$$\phi = \frac{p_v}{p_g} = \frac{0,211}{0,345} = 0,61$$

Talvez concorda novamente com os 61% esperado.

Tabela 3:

Temp. bulbo seco: 27,8 °C
 Temp. bulbo molhado: 22,0 °C

Diretamente da carta psicrométrica obtém-se **61% de umidade relativa**

Repetindo os cálculos anteriores, da carta psicrométrica verificamos que a pressão de saturação à temperatura de bulbo molhado de 22,0 °C (=71,6 °F) é 0,380 lbf/in². Sendo p = 1 atm (= 14,7 lbf/in²) temos:

$$p_v = 0,380 \text{ lbf/in}^2 - \frac{(14,7 - 0,380) \text{ lbf/in}^2 (82,0 - 71,6)^{\circ}F}{2800 - 1,3 \times 71,6^{\circ}F} = 0,325 \text{ lbf/in}^2$$

A pressão de saturação à temperatura de bulbo seco, 27,8 °C (=82,0 °F), que é a temperatura da mistura, é 0,525 lbf/in². Então da definição de umidade vem:

$$\phi = \frac{p_v}{p_g} = \frac{0,325}{0,525} = 0,62$$

Que mais uma vez se concorda bastante com da primeira maneira de obter a umidade relativa.

Tabela 4:

Temp. bulbo seco: 23,5 °C
 Temp. bulbo molhado: 19,7 °C

Diretamente da carta psicrométrica obtém-se **65% de umidade relativa.**

E, enfim, temos que para 19,7 °C (=67,5 °F), a pressão de saturação é: 0,322 lbf/in². Então:

$$p_v = 0,322 \text{ lbf/in}^2 - \frac{(14,7 - 0,322) \text{ lbf/in}^2 (74,3 - 67,5)^{\circ}F}{2800 - 1,3 \times 67,5^{\circ}F} = 0,286 \text{ lbf/in}^2$$

E para 23,5 °C (=74,3 °F), p_g = 0,419, que dá uma umidade relativa de 0,68. Esta umidade do ar, relativamente alta, concorda com o que ocorreu no dia: chuva na cidade de Campinas.

7 – Outra Forma da Medida da Umidade Relativa do Ar

Digamos que um observador tenha encontrado T e T_{BM}. Com estes valores podemos encontrar a p_v, pressão de vapor. A partir de um balanço de energia pode-se escrever a equação da seguinte forma:

$$p_v = p_{v_{SBM}} - a P(T - T_{BM}), \quad (10)$$

na qual, **p_{v_{SBM}}** é a pressão de vapor de saturação da temperatura do bulbo molhado, obtida a partir da Tabela 6; **a** é o fator psicrométrico (tirado da Tabela 5) e P é a pressão ambiente.

P_{v_s} é a pressão de saturação, dada em hPa, para T em (1 pascal (Pa) = 1 N/m² = 1 J/m³ = 1 kg·m⁻¹·s⁻² e 1 hectopascal (hPa) = 100 Pa = 1 mbar)

Tabela 5 – Fator Psicrométrico

Velocidade do ar (m/s)	a em °C ⁻¹ (para temperaturas acima de zero)	a em °C ⁻¹ (para temperaturas abaixo de zero)
0 a 0,5	0,00120	0,00106
1 a 1,5	0,00080	0,00071
3,5 a 4	0,00066	0,00058
4 a 10	0,00064	0,00043

Para Psicrômetros com ventilação natural, a velocidade do ar é aproximadamente igual a 3,0m/s e **a = 0,0066 °C⁻¹**.

Tabela 6 – PVS da água a Pressão Normal em hPa

T °C	Décimos de graus									
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	6,1	6,2	6,2	6,2	6,3	6,3	6,4	6,4	6,5	6,5
1	6,6	6,6	6,7	6,7	6,8	6,8	6,9	6,9	7,0	7,0
2	7,1	7,1	7,2	7,2	7,3	7,3	7,4	7,4	7,5	7,5
3	7,6	7,6	7,7	7,7	7,8	7,9	7,9	8,0	8,0	8,1
4	8,1	8,2	8,2	8,3	8,4	8,4	8,5	8,5	8,6	8,7
5	8,7	8,8	8,8	8,9	9,0	9,0	9,1	9,2	9,2	9,3
6	9,4	9,4	9,5	9,5	9,6	9,7	9,7	9,8	9,9	9,9
7	10,1	10,1	10,2	10,2	10,3	10,4	10,4	10,5	10,6	10,7
8	10,7	10,8	10,9	10,9	11,0	11,1	11,2	11,2	11,3	11,4
9	11,5	11,6	11,6	11,7	11,8	11,9	12,0	12,0	12,1	12,2
10	12,3	12,4	12,4	12,5	12,6	12,7	12,8	12,9	13,0	13,0

11	13,1	13,2	13,3	13,4	13,5	13,6	13,7	13,7	13,8	13,9
12	14,0	14,1	14,2	14,3	14,4	14,5	14,6	14,7	14,8	14,9
13	15,0	15,1	15,2	15,3	15,4	15,5	15,6	15,7	15,8	15,9
14	16,0	16,1	16,2	16,3	16,4	16,5	16,6	16,7	16,8	16,9
15	17,0	17,2	17,3	17,4	17,5	17,6	17,7	17,8	17,9	18,1
16	18,2	18,3	18,4	18,5	18,6	18,9	18,9	19,0	19,1	19,3
17	19,4	19,5	19,6	19,7	19,9	20,0	20,1	20,2	20,4	20,5
18	20,6	20,8	20,9	21,0	21,2	21,3	21,4	21,6	21,7	21,8
19	22,0	22,1	22,2	22,4	22,6	22,7	22,8	22,9	23,1	23,2
20	23,4	23,5	23,7	23,8	24,0	24,1	24,3	24,4	24,6	24,7
21	24,9	25,0	25,2	25,3	25,5	25,6	25,8	26,0	26,1	26,3
22	26,4	26,6	26,8	26,9	27,1	27,3	27,4	27,6	27,8	27,9
23	28,1	28,3	28,4	28,6	28,8	29,0	29,1	29,3	29,5	29,7
24	29,8	30,0	30,2	30,4	30,6	30,7	30,9	31,1	31,3	31,5
25	31,7	31,9	32,1	32,2	32,4	32,6	32,8	33,0	33,2	33,4
26	33,6	33,8	34,0	34,2	34,4	34,6	34,8	35,0	35,2	35,4
27	35,7	35,9	36,1	36,3	36,5	36,7	36,9	37,1	37,4	37,6
28	37,8	38,0	38,2	38,5	38,7	38,9	39,1	39,4	39,6	39,8
29	40,1	40,3	40,5	40,8	41,0	41,2	41,5	41,7	42,0	42,2
30	42,2	42,7	42,9	43,2	43,4	43,7	43,9	44,2	44,4	44,7
31	44,9	45,2	45,4	45,7	46,0	46,2	46,5	46,8	47,0	47,3
32	47,6	47,8	48,1	48,4	48,6	48,9	49,2	49,5	49,8	50,0
33	50,3	50,6	50,9	51,2	51,5	51,7	52,0	52,3	52,6	52,9
34	53,2	53,5	53,8	54,1	54,4	54,7	55,0	55,3	55,6	55,9
35	56,2	56,6	56,9	57,2	57,5	57,8	58,1	58,5	58,8	59,1
36	59,4	59,8	60,1	60,4	60,7	61,1	61,4	61,7	62,1	62,4
37	62,8	63,1	63,5	63,8	64,1	64,5	64,8	65,2	65,6	65,9
38	66,3	66,6	67,0	67,4	67,7	68,1	68,5	68,8	69,2	69,5
39	69,9	70,3	70,7	71,1	71,5	71,8	72,2	72,6	73,0	73,4

Tabela 7 – Pressão em função da altitude

Altitude (m)	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
0	1013	1001	990	978	967	955	944	933	921	901
1000	899	888	877	867	856	845	835	825	816	805
2000	795	785	776	766	757	747	738	729	719	710
3000	701	693	684	676	667	658	650	641	633	624
4000	616	608	600	593	585	577	570	562	555	547
5000	540	533	526	519	512	505	498	492	485	479

A umidade relativa continua sendo dada pela equação (3):

$$\phi = \frac{p_v}{p_g}$$

Obtém-se P_vs para cada valor de temperatura usando a Tabela 6. Os resultados já são tabelados e podem ser encontradas facilmente na Internet.

Como exemplo, vamos calcular a umidade relativa referente à Tabela 1:

As medidas foram feitas em Campinas, que fica a aproximadamente, 856 m de altitude. Da Tabela 7, a pressão será de 921 hPa.

Da Tabela 5, verificamos que para uma temperatura de 22,4 °C, a pressão é 27,1 hPa

Então:

$$p_v = 27,1 - 0,00066 \times 921 \times (28,0 - 22,4) = 23,7 \text{ Hpa}$$

Para a temperatura de 28,0 °C, a pressão é, pela Tabela 1: 37,8 hPa. E com a equação (3):

$$\phi = \frac{p_v}{p_g} = \frac{23,7}{37,8} = 0,63$$

Que bate perfeitamente com o primeiro resultado!

8 – Dificuldades Encontradas

Minha primeira dificuldade foi encontrar bibliografia a respeito do assunto. Na minha busca nas bases da Unicamp encontrei apenas dois livros cujo assunto principal era a Psicrometria: um deles está na bibliografia, *Psicrometria*⁷; o outro é da Biblioteca da Faculdade de Alimentos, se encontra desaparecido⁸.

Este assunto é tratado em alguns livros de Termodinâmica, porém sem muito aprofundamento. Daí a grande dificuldade em analisar as equações matemáticas. Porém, isso talvez não seja um grande problema visto que as bibliografias que escolhi são sérias, conhecidas e consagradas, como é o caso do autor Sears⁹.

Este assunto é facilmente encontrado na Internet. Quando se digita “psicrometria”, “psicrômetro” ou algo do gênero em algum site de busca, aparecem centenas de *sites* relacionados. Contudo filtrar estes *sites* não é uma tarefa nada fácil.

Um outro grande problema foi com relação às unidades. Por falta de bibliografia escrita por autores brasileiros, as unidades são geralmente dadas nos padrões norte americano, como é o caso da unidade para temperatura (Graus Fahrenheit). Isso me gerou dificuldades na interpretação das cartas psicrométricas.

A montagem experimental foi relativamente simples. Porém não ficou como eu desejava inicialmente. Bolei uma base para os termômetros que pudesse girá-los num ângulo de 360° . Precisaria para isto de um serralheiro, mas ficou, financeiramente falando, inviável (R\$90,00). Talvez este trabalho pudesse ser feito na oficina mecânica do Instituto de Física, mas não sabia se eu teria acesso a este tipo de serviço e também não tinha mais tempo hábil.

Analisando os dados fiquei com dúvidas se o vento interfere ou não nas medidas. Em conversa com minha orientadora, ela me indagou: “Se pensarmos, por exemplo, em roupas no varal, quando as colocamos para secar, o vento tem papel fundamental. Então, não é meio óbvio que o vento também interfere na evaporação da água do tecido que envolve o termômetro de bulbo molhado?” No livro *Termodinâmica*, Sears, e *Termodinâmica Térmica*, Marques, os autores em nenhum momento falam da interferência do vento. Então resolvi pesquisar e acabei por encontrar na Internet um site, <http://www.tutitempo.net>, que trabalha com equações que levam a velocidade do vento em consideração. Disso escrevi o item 7 deste relatório. Porém, não sei até que ponto, e aqui se destaca outra dificuldade, as páginas na Web são confiáveis.

9 – Considerações finais

Do ponto de vista didático este estudo poderá motivar bastante estudantes de Ensino Médio e/ou de Ensino Superior visto que é um assunto que está muito relacionado com o seu próprio conforto.

A parte matemática é relativamente simples, o que de certa forma, pode ser outra motivação.

As medidas das umidades relativas concordaram entre si das várias maneiras de calculá-las. Isso mostra que as medidas foram bem efetuadas e que a parte matemática está bem desenvolvida. No tópico 7, entretanto (*Outra maneira de medir a umidade relativa*) apresentei uma forma de calcular a umidade relativa levando-se em conta a altitude, a pressão local e a velocidade do vento, parâmetros que acredito influenciar nas medidas. Porém isso foi uma descoberta recente, não me dando tempo suficiente para conhecê-la melhor. Dessa forma, fica aqui aberto um estímulo para outros estudantes.

Este projeto servirá, ainda, para estudos e aprimoramento futuros, por outros alunos do Instituto de Física da Unicamp, nesta disciplina ou em outras, bem como de outras instituições.

10 – Referências

- [1] MARQUES, Iomar A. *Termodinâmica Técnica*, 4ª Ed. Págs. 261 – 283, Editora Científica – Rio de Janeiro - 1965.
- [2] www.impac.com.br
- [3] www.inmet.gov.br
- [4] <http://webs.demasiado.com>
- [5] www.monografias.com
- [6] <http://www.tutitempo.net>
- [7] LUIS, Antonio C. S. *Psicrometria* – 1977.
- [8] ROSSI, Silvio J. *Psicrometria*, Funape – João Pessoa – 1987.
- [9] SEARS, Francis W. & LEE, John F. *Termodinâmica*, 2ª Ed. Págs. 383 – 421, Ao livro Técnico – Rio de Janeiro - 1969.