

Considerações sobre psicrometria

Autor: J. Fernando B. Britto, engenheiro mecânico, sócio da Adriferc Engenharia, secretário da GEC-4 e membro do conselho editorial da revista SBCC
Contato: sbcc@sbcc.com.br

Por: J. Fernando B. Britto

Introdução

Antes de tratarmos a respeito da psicrometria é importante lembrarmos que o ar atmosférico ao nível da troposfera, é considerado uma mistura de gases contendo uma proporção fixa de: 78,1% nitrogênio, 20,9% oxigênio, 0,9% argônio, além de traços de outros gases.

Uma vez que a maior parte dos gases que constituem o ar se encontram muito acima de sua temperatura crítica e não estão sujeitos à condensação em temperaturas acima -100°C , praticamente não introduzimos quaisquer erros ao tratarmos esta parte da mistura como um único gás denominado “ar seco”.

Porém, o ar na troposfera sempre contém uma quantidade variável de vapor d’água (a fase gasosa da água), a qual varia dia-a-dia em função das estações ao longo do ano.

Embora a proporção de vapor d’água (tratada daqui em diante apenas como vapor ou umidade) em relação ao ar seco seja muito pequena, esta é muito significativa por que seu calor latente (oculto) de vaporização de cerca de 2450 kJ/kg é muito grande em comparação à capacidade calorífica específica do ar seco que é de apenas $1,0060 \text{ kJ/(kg} \cdot ^{\circ}\text{C)}$.

Segundo “Building Science for a Cold Climate, NRC Canadá, 1995”, a proporção de vapor na atmosfera pode chegar até 3,5% em massa (equivalente a uma temperatura de ponto de orvalho de 34°C), porém isto ocorre raríssimas vezes, por períodos extremamente curtos e apenas em áreas próximas a solos úmidos e sombreados. Conforme os Laboratórios Hyland & Wexler, a massa molar aparente do ar (M_{AS}) na troposfera é considerada $28,9645 \text{ g/mol}$ e a da água (M_v) é de $18,01528 \text{ g/mol}$.

Adicionalmente, entre as temperaturas de -40°C a $+65^{\circ}\text{C}$ e sob uma pressão total de até 300 kPa , tanto o ar seco como o vapor, bem como sua mistura, chamada de ar úmido, se comportam aproximadamente como um gás perfeito, o que nos permite aplicar-lhe a equação geral:

$$p_x \cdot v_x = R_x \cdot T_x$$

Como em toda metodologia de cálculo existem constantes físicas, convenções e hipóteses pré-assumidas, segundo os Laboratórios de Pesquisa Hyland & Wexler da ASHRAE, na psicrometria estas são:

- A massa molar aparente do ar na troposfera é considerada $28,9645 \text{ g/mol}$ e a da água é de $18,01528 \text{ g/mol}$.
- O valor da constante universal “R” dos gases baseada na escala do Carbono 12 é de $8,31441 \text{ kJ/(kmol.K)}$.
- O valor da constante “R” para o ar seco (R_{AS}) é de $0,287055 \text{ kJ/(kmol.K)}$ e a do vapor d’água (R_v) é de $0,46152 \text{ kJ/(kmol.K)}$.
- A composição de N_2 e O_2 no ar seco desde o nível do mar até 11000m é considerada constante.
- A relação $R_{AS}/R_v = M_{AS}/M_v = 0,62198$.
- Tanto o ar seco como o vapor se comportam exatamente como um gás perfeito.
- A pressão total (P) do ar úmido, que equivale à somatória das pressões parciais dos componentes ar seco (p_{AS}) e vapor (p_v), então $P = p_{AS} + p_v$, equivale à pressão barométrica (P_{BAR}) média anual para a localidade estudada.
- Durante os processos psicrométricos, a pressão total (P) permanece constante. Portanto, quando a pressão parcial de vapor se reduz durante um processo, a pressão parcial do ar seco deverá aumentar para manter a pressão total constante e vice-versa.
- Por conveniência, os cálculos psicrométricos são

efetuados com base na massa de ar seco, uma vez que esta não sofre alterações durante o processo térmico.

Definição do termo psicrometria

De acordo com o livro “Understanding Psychrometrics, 2nd Edition, 2005, ASHRAE” o termo psicrometria se originou do substantivo psicrômetro, criado em 1825 por Ernest Ferdinand August, para designar seu termômetro de bulbo úmido.

A palavra originou-se do termo latino “psychro” que significa “produzir frio” e “metro” que significa “medir”, indicando um dispositivo para “medir a refrigeração”. Versões mais recentes do dispositivo possuem termômetros de bulbo seco e bulbo úmido e passaram a ser designados como termoigrômetros.

Ao acrescentarmos o sufixo “ia” (oriundo de ciência) em “metro” transformamos o substantivo em “psicrometria”, designando a palavra originalmente como um ramo da ciência que estuda o uso do psicrômetro.

Em 1904, Willis H. Carrier denominou sua carta de propriedades do ar úmido como “carta higrométrica” e em 1911 o nome foi modificado para carta psicrométrica.

Atualmente aceita-se que a psicrometria é a ciência que estuda o envolvimento das propriedades do ar úmido (uma mistura de ar seco e vapor d’água) e do processo (secagem, umidificação, resfriamento, aquecimento) na mudança da temperatura ou do conteúdo de vapor d’água da mistura.

O vapor d’água

A água como substância pode existir em 3 estados físicos (ou fases): sólido (gelo), líquido (água) ou gasoso (vapor d’água).

Sendo uma substância muito incomum, a água pode ser observada a qualquer momento nos três estados simultaneamente. Por exemplo, no verão podemos tomar um copo de água com cubos de gelo imersos em seu interior e, após a temperatura do copo entrar em equilíbrio com a da água em seu interior, podemos observar a condensação de vapor em sua superfície

externa. (Como o vapor d’água é um gás invisível este não pode ser “observado” diretamente).

Isto ocorre porque, em condições atmosféricas normais, a água se encontra em temperatura / pressão muito abaixo de seu ponto crítico (374°C / 22,1 MPa).

A figura 1 representa o diagrama Pressão x Temperatura para a água:

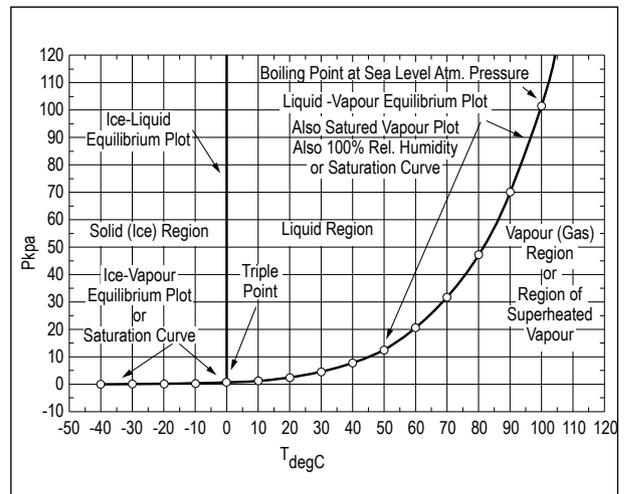


Figura 1 – Diagrama Pressão x Temperatura para água

Conforme se pode verificar na figura 1, dois diferentes estados da água podem coexistir em equilíbrio em qualquer ponto da curva e todos os três estados podem coexistir no ponto triplo.

Para levar a água à uma determinada temperatura do estado sólido para o líquido (derretimento ou fusão) e vice-versa (congelamento) são necessários 333,39 kJ/kg de energia e para levá-la do estado líquido para gasoso (evaporação ou vaporização) ou gasoso para líquido (condensação) são demandados entre 2500,81 kJ/kg (à 0°C) e 2256,28 kJ/kg (à 100°C).

Estas quantidades de energia demandadas pelo processo são denominadas respectivamente de calor latente de solidificação e de evaporação.

À temperatura de 0°C, para levar a água diretamente de seu estado sólido para o gasoso, a energia necessária, denominada calor latente de sublimação, equivale à somatória das energias demandadas para fundir e evaporar a água, ou seja: 333,39 + 2500,81 = 2834,20 kJ/kg.

Deste modo, verificamos que para que ocorra uma mudança de estado físico ou fase da água, basta que seja fornecida a quantidade de energia necessária, não

sendo necessário atingir uma determinada temperatura para que isso aconteça.

Assim, quando encontramos água em fase líquida acima (ou à esquerda) da curva de saturação, dizemos que esta se encontra subresfriada. Da mesma forma, quando a encontramos em fase gasosa abaixo (ou à direita) da linha de saturação, dizemos que o vapor se encontra superaquecido.

Por exemplo, em um determinado dia de verão a temperatura de bulbo úmido da água (temperatura correspondente à da pressão parcial do vapor d'água contido no ar, ou seja, a temperatura mínima em que a água se evapora naquele momento) na praia onde um indivíduo se encontra é de 25 °C. Se retirarmos uma garrafa de água da geladeira à 8°C e a colocarmos em copo sobre a mesa, diremos que nesta condição a água está subresfriada.

Simultaneamente este indivíduo está sob a ação de um vento úmido vindo do mar, cuja temperatura é de 35°C. Dizemos então que o vapor d'água contido no ar (ou seja, a umidade do ar) está superaquecido.

A carta psicrométrica e os parâmetros de definição dos estados termo-higrométricos do ar

A CARTA PSICROMÉTRICA

Os diagramas onde estão registradas as propriedades da mistura entre o ar seco e o vapor d'água são chamados de Cartas Psicrométricas.

Estes diagramas são elaborados para uma determinada altitude, em função da qual se estabelece uma pressão atmosférica (ou barométrica) "P" de referência.

A Carta Psicrométrica padrão assume uma altitude de 0 m (nível do mar) e, por consequência, uma pressão atmosférica de 101,3250 kPa (760 mmHG).

Um determinado estado psicrométrico "E", pode ser definido informando-se um par qualquer de valores dentre as seguintes variáveis indicadas na figura 2 e especificadas a seguir:

Para os pontos situados à direita da curva de saturação, TBS e ω constituem variáveis independentes (geralmente igual a P_{atm}).

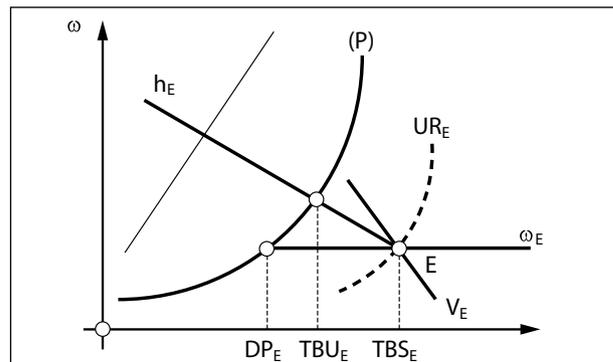


Figura 2 – Diagrama Psicrométrico

Todas as demais variáveis dependem de P e se interdependem.

Caracterização das variáveis:

- **Temperatura de bulbo seco (TBS):** indica a quantidade de energia na forma de calor contido no ar. Expresso em °C. Sua variação é designada como calor sensível (que pode ser medido diretamente).
- **Temperatura de bulbo úmido (TBU):** indica a quantidade de energia na forma de calor contido no ar úmido. Está associado à mínima temperatura em que a água em estado líquido se transforma em vapor (temperatura de evaporação) para uma determinada quantidade física de água contida no ar (ver umidade específica). Também permite definir a condição de ponto de orvalho e a pressão parcial de vapor d'água. Expresso em °C.
- **Ponto de orvalho (DP):** expressa a condição mínima de temperatura de bulbo seco em que uma mistura ar-vapor consegue manter água no estado gasoso (vapor), abaixo da qual ocorre a condensação da umidade (ou a formação de névoa). Expresso em °C.
- **Entalpia (h):** expressa o conteúdo energético do ar (calor total) por unidade de massa de ar úmido de um estado psicrométrico em relação a um estado de referência (normalmente para $TBS = 0$ e $\omega = 0$) e incorpora os conteúdos de calor sensível e latente. Expresso em kJ/kg.
- **Umidade Relativa (UR):** expressa a relação entre a máxima pressão parcial de vapor que se pode obter a uma determinada temperatura de bulbo seco (condição de saturação de umidade) e a pressão parcial de vapor em determinado instante. Indica a proporção do afastamento vertical entre o ponto e a curva de saturação. Expresso em %.

- **Umidade Específica (ω):** expressa a relação entre a massa de ar seco e a de vapor superaquecido contido na mistura de ar úmido ($m_{\text{VAPOR}}/m_{\text{AR SECO}}$). Adimensional, pode representado em $\text{kg}_{\text{VAPOR}}/\text{kg}_{\text{AR SECO}}$. Sua variação é designada como calor latente (associado à mudança de fase da água).
- **Volume específico (v):** expressa a relação entre o volume e a massa do conteúdo de ar seco da mistura. Expresso em m^3/kg .

A figura 3 ilustra as cargas sensíveis (Δh_{SENS}) e latentes (Δh_{LAT}) associadas à variação das condições do ponto A para o ponto B.

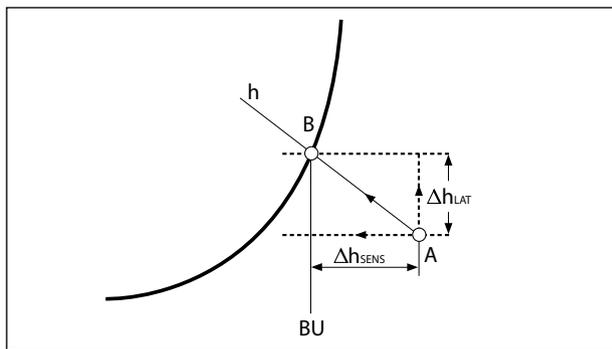


Figura 3 – Cargas sensível e latente

A figura 4 ilustra a variação da umidade relativa, a qual expressa o “afastamento” da curva de saturação, sendo esta uma função de TBS e ω .

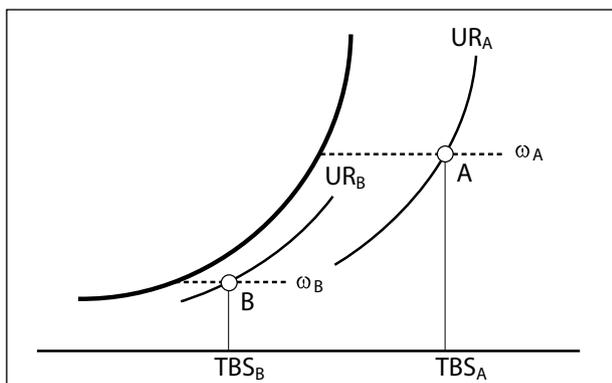


Figura 4 – Interpretação da umidade relativa

É importante verificar que, embora a umidade relativa do ponto B seja muito maior que a do ponto A (está mais próxima da curva de saturação), a umidade específica do ponto A é muito maior que a do ponto B (pois o ar úmido com maior temperatura admite maior quantidade física de umidade).

Os tratamentos termo-higrométricos evidenciados na carta psicrométrica.

Os principais processos de tratamento termoigrométricos do ar representados na carta psicrométrica acham-se evidenciados a seguir:

Resfriamento Simples

Este processo se caracteriza pela redução da temperatura de bulbo seco do ar do ponto A para o ponto B (retirada exclusivamente de calor sensível), mantendo-se a umidade específica do ar constante, conforme se verifica na figura 5. Conseqüentemente a umidade relativa da mistura ar-vapor irá aumentar, uma vez que a condição desta irá se aproximar da curva de saturação.

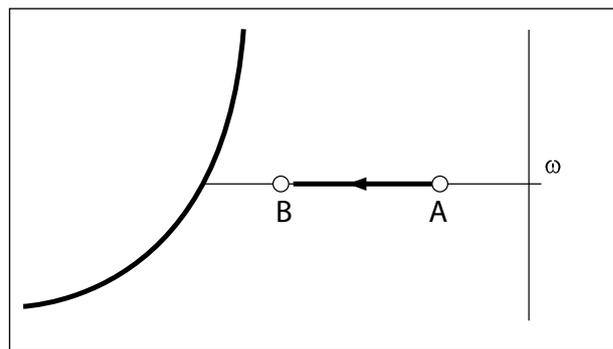


Figura 5 – Processo de Resfriamento Simples

Este processo é promovido principalmente por serpentinas de resfriamento (alimentadas por água gelada ou pela expansão direta de gás refrigerante).

Resfriamento Adiabático

Este processo, evidenciado na figura 6, se caracteriza pela redução da temperatura de bulbo seco (ponto A) do ar através da evaporação de água (geralmente atomizada no fluxo de ar), elevando o conteúdo de umidade do ar (ponto B). Quando a água se evapora ela “rouba” calor do ar, reduzindo sua temperatura.

Ocorre uma troca do calor latente oriundo da evaporação da água pelo calor sensível (associada à temperatura da mistura) do ar. O resultado da somatória do acréscimo da carga latente com a redução da carga sensível resulta zero, evidenciando um processo sem variação do conteúdo energético (adiabático).

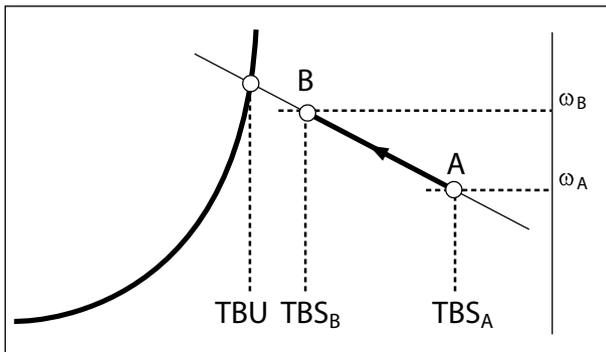


Figura 6 – Resfriamento Adiabático

O processo pode ser promovido por lavador de água recirculada ou pela aspersão direta da água no ambiente.

Resfriamento e Desumidificação

Como evidenciado na figura 7, este processo se caracteriza pela redução simultânea da temperatura de bulbo seco (carga sensível) e da umidade específica (carga latente) do ar.

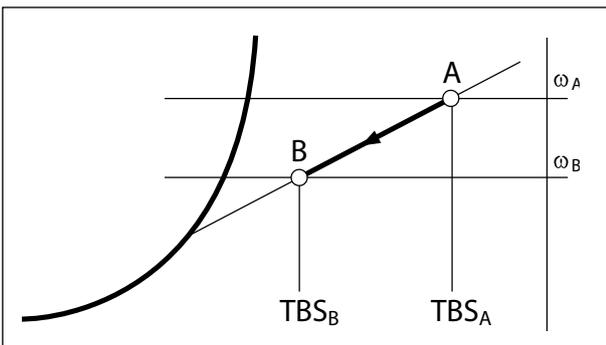


Figura 7 – Resfriamento e Desumidificação

Este processo pode ser promovido por serpentina de água gelada ou de expansão direta ou ainda por lavador de água gelada.

Aquecimento Simples

Este processo se caracteriza pela elevação da temperatura de bulbo seco, com acréscimo exclusivamente de calor sensível ao ar, sem alteração da umidade específica do ar, conforme evidenciado na figura 8, onde o ar passa do ponto A para o ponto B.

Como a umidade específica permanece constante, a umidade relativa da mistura irá se reduzir, uma vez que a nova condição irá se afastar da curva de saturação.

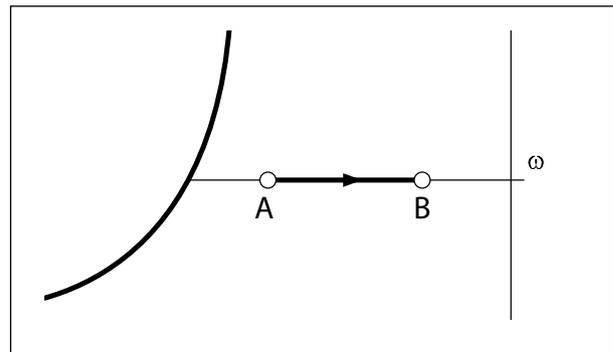


Figura 8 – Aquecimento Simples

Este processo pode ser promovido por serpentinas de aquecimento (alimentadas por água quente, vapor ou pela condensação de gases refrigerantes) ou resistências elétricas.

Umidificação Simples

De acordo com a figura 9, este processo se caracteriza pela elevação da umidade específica do ar, com a manutenção da temperatura de bulbo seco constante.

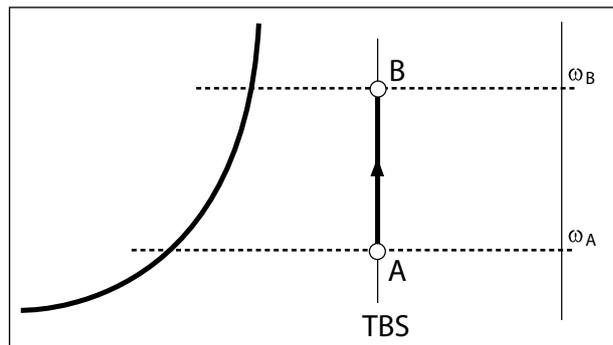


Figura 9 – Umidificação simples

Isto é feito mediante o acréscimo exclusivamente de calor latente ao ar (evaporação de água), o qual é promovido por injeção de vapor (alimentado por linhas de vapor saturado ou pela evaporação de água aquecida por resistências elétricas de imersão).

Conseqüentemente a umidade relativa do ar irá se elevar, uma vez que a condição desta irá se aproximar da curva de saturação.

Desumidificação e Aquecimento

Este processo se caracteriza pela redução da umidade específica do ar (conteúdo de calor latente), acompanhado pela elevação da temperatura de bulbo

seco do ar (conteúdo de calor sensível), conforme se verifica na figura 10:

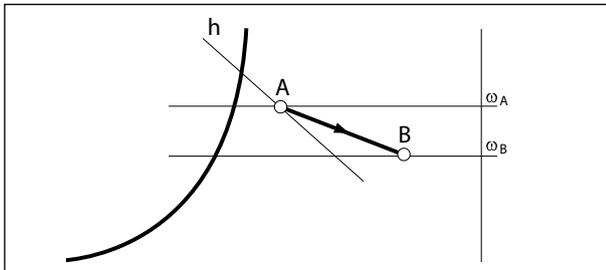


Figura 10 – Desumidificação e aquecimento

Este processo geralmente é promovido por desumidificador químico.

Umidificação e Resfriamento Não Adiabático

Este processo se caracteriza pela redução do conteúdo de calor sensível (TBS), acompanhada pela elevação do conteúdo de calor latente (ω) do ar, sendo o resultado da somatória do fluxo energético (entrada + saída de energia) maior que zero.

Como evidenciado na figura 11, a mistura passa da condição A para a condição B, reduzindo TBS e elevando simultaneamente ω e h .

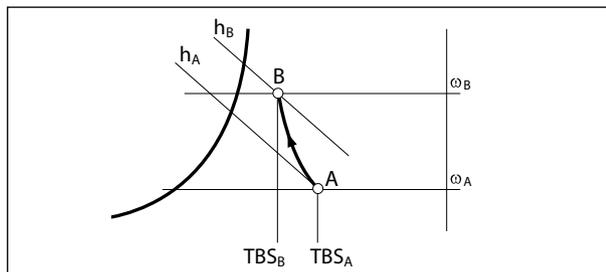


Figura 11

Este processo pode ser promovido por lavador de água quente. No caso, a temperatura da água utilizada estaria acima da temperatura de bulbo úmido do ar no ambiente, produzindo, além da troca de calor sensível do ar ambiente pelo calor latente da água, um acréscimo na energia total do sistema (entalpia).

Se utilizássemos água resfriada ao invés de quente, com uma temperatura inferior à do ponto de orvalho do ambiente, ocorreria a remoção de umidade do ar, tornando o processo semelhante ao de resfriamento e desumidificação (figura 7).

Por outro lado, do ponto de vista teórico, se a água

não estivesse suficientemente fria (acima do ponto de orvalho do ambiente), ocorreria um processo de umidificação e resfriamento não adiabático, porém em ponto com entalpia menor que a do ambiente. Porém, do ponto de vista prático nota-se pouca viabilidade econômica neste processo.

Equações fundamentais da psicrometria (SI)

As equações a seguir, originárias do Programa de Educação Continuada da SMCNA, constituem as relações básicas entre as variáveis psicrométricas, a partir das quais podem ser desenvolvidos métodos de análise psicrométrica inclusive para elaboração de programas de computador.

Pressão atmosférica em função da altitude local.

$$P = 101.3250 * (1 - 2.2560E-05 * z)^{5.2560} \quad (1)$$

com "P" em kPa e "z" em metros

Pressão de vapor d'água saturado.

- Equação (2a) [- 100 °C a 0 °C]

$$\ln(p_v) = \frac{C_1}{T} + C_2 + C_3 * T + C_4 * T^2 + C_5 * T^3 + C_6 * T^4 + C_7 * \ln(T) \quad (2a)$$

onde $C_1 = -5674,5359$

$C_2 = 6,3925247$

$C_3 = -0,9677843 E-02$

$C_4 = 0,62215701 E-06$

$C_5 = 0,20747825 E-08$

$C_6 = -0,9484024 E-12$

$C_7 = 4,1635019$

p_v em Pa

T em °K (temperatura absoluta)

- Equação (2b) [0 °C a 200 °C]

$$\ln(p_v) = \frac{C_8}{T} + C_9 + C_{10} * T + C_{11} * T^2 + C_{12} * T^3 + C_{13} * T^4 + C_{13} * \ln(T) \quad (2b)$$

onde $C_8 = -5800,2206$

$C_9 = 1,3914993$

$C_{10} = -0,04860239$

$C_{11} = 0,41764768 E-04$

$C_{12} = -0,14452093 E-07$

$C_{13} = 6,5459673$

p_v em Pa

T em °K (temperatura absoluta)

Umidade específica em função da temperatura de bulbo seco e umidade relativa.

$$\omega(\text{UR}, \text{TBS}) = \frac{0.622 * (\text{UR}/100) * p_v(\text{TBS})}{P - (\text{UR}/100) * p_v(\text{TBS})} \quad (3)$$

Umidade específica em função da temperatura de bulbo úmido e da temperatura bulbo seco (levando em consideração o “desvio da entalpia”).

$$\omega(\text{TBS}, \text{TBU}) = \frac{(2501 - 2.3810 * \text{TBU}) * \omega(\text{TBS}) - (\text{TBS} - \text{TBU}) * 1.0048}{2501 + 1.8050 * \text{TBS} - 4.1868 * \text{TBU}} \quad (4)$$

Entalpia em função da temperatura de bulbo seco e da umidade absoluta.

$$h(\text{TBS}, \omega) = (1.0048 + 1.8050 * \omega) * \text{TBS} + 2501 * \omega \quad (5)$$

com “ ω ” em kg/kg (kg de vapor d’água/ kg de ar seco)

OBS.: Em algumas literaturas recomendam o valor de 2450 kJ/kg para o calor latente de vaporização (ou condensação) da água nas condições usuais de temperatura dos sistemas de ar condicionado (entre 10 e 30°C), ao invés do valor de 2501 kJ/kg indicado nas equações (4) e (5).

Volume específico em função da temperatura de bulbo seco, da umidade absoluta e da pressão.

$$v(\text{TBS}, \omega, P) = \frac{0.287055 * (\text{TBS} + 273)}{P} * \left(1 + \frac{\omega}{0.622} \right) \quad (6)$$

Equações da mistura. (7)

$$m = m_1 + m_2 \quad (7.1)$$

$$h_M = \frac{m_1 * h_1 + m_2 * h_2}{m} \quad (7.2)$$

$$\omega_M = \frac{m_1 * \omega_1 + m_2 * \omega_2}{m} \quad (7.3)$$

$$t_M = \frac{h_M - 2501 * \omega_M}{1.008 + 1.8050 * \omega_M} \quad (7.4)$$

Conforme observamos na figura 12, para uma mistura com mesmo conteúdo de umidade, poderíamos desprezar a umidade e obteríamos a temperatura e

entalpia diretamente pelo cálculo das médias (reta horizontal):

Por exemplo, supondo as seguintes misturas:

$m_1 = 600$ [kg/h]; TBS = 12 [°C]; $w = 8$ [g/kg]; $h = 32,2$ [kJ/kg]

$m_2 = 400$ [kg/h]; TBS = 32 [°C]; $w = 8$ [g/kg]; $h = 52,6$ [kJ/kg]

Então:

$m = 1000$ [kg/h]; TBS = 24 [°C]; $w = 8$ [g/kg]; $h = 44,5$ [kJ/kg]

Por outro lado, sendo:

$m_1 = 600$ [kg/h]; TBS = 12 [°C]; $w = 8$ [g/kg]; $h = 32,2$ [kJ/kg]

$m_2 = 400$ [kg/h]; TBS = 32 [°C]; $w = 20$ [g/kg]; $h = 83,3$ [kJ/kg]

Então:

$m = 1000$ [kg/h]; TBS = 24,1 [°C]; $w = 15,2$ [g/kg]; $h = 62,9$ [kJ/kg]

Isso se deve ao calor introduzido pela parcela adicional de umidade oriunda de m^2 .

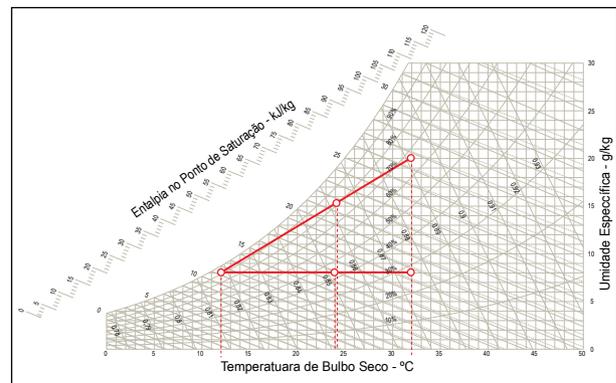


Figura 12

Porém, quando as condições de umidade divergem (reta inclinada), estas passam a influir também na temperatura final da mistura, uma vez que a entalpia da mistura também irá incorporar o calor latente das massas de vapor contidas em cada parcela da mistura.

Cabe lembrar que as equações para a mistura apresentadas anteriormente são válidas apenas para quantidades expressas em massa e não se aplicam para cálculos expressos em volume.

BIBLIOGRAFIA

Programa de Educação Continuada – SMACNA
 Understanding Psychrometrics – 2nd Edition, 2005
 – ASHRAE
 ASHRAE 2005 – Fundamentals Handbook

Em memória de Raul Boliger Jr., saudoso amigo e mentor.