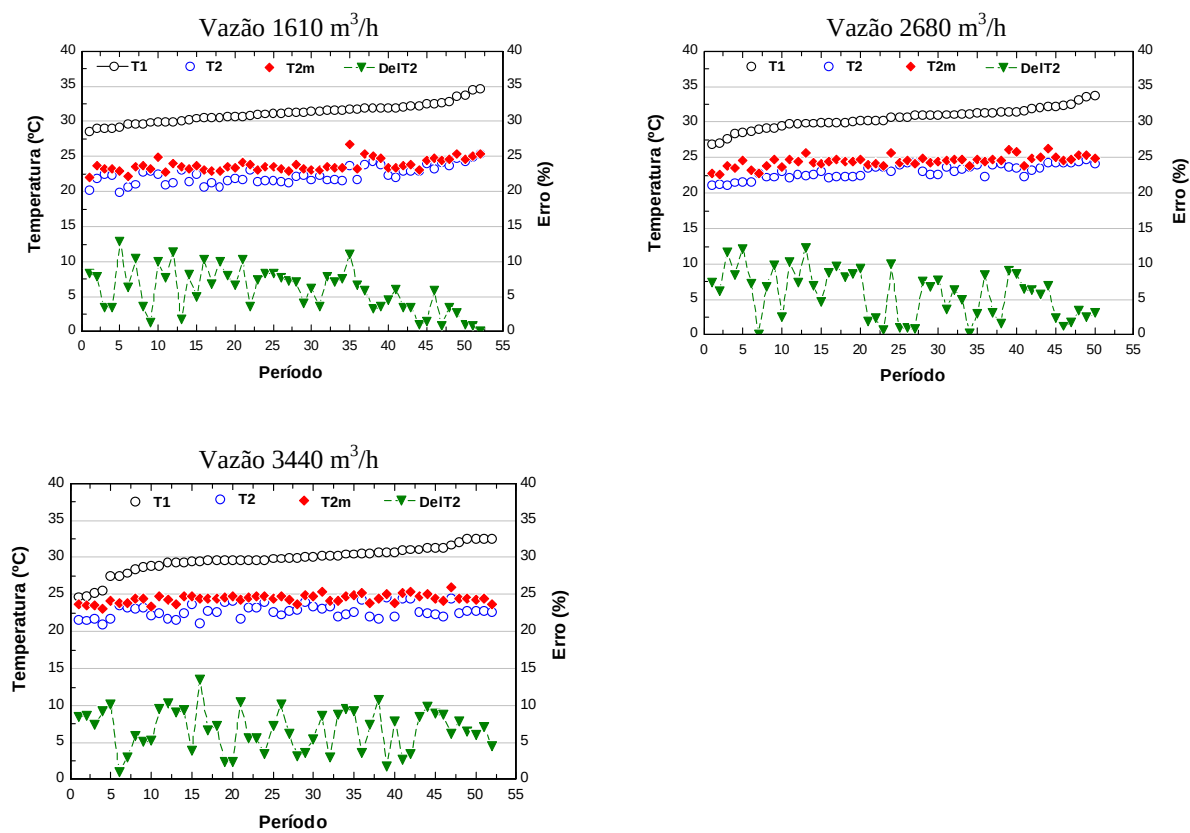
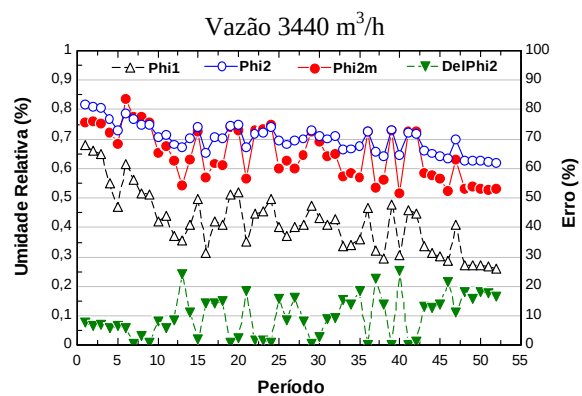
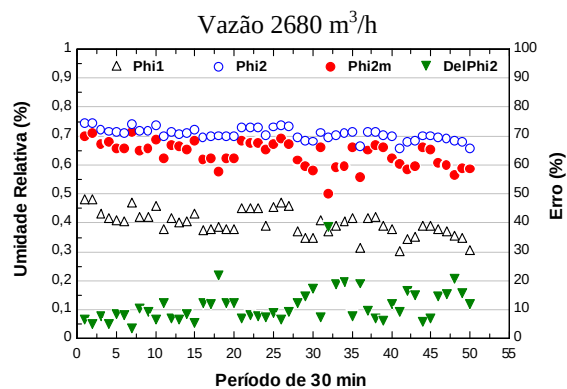
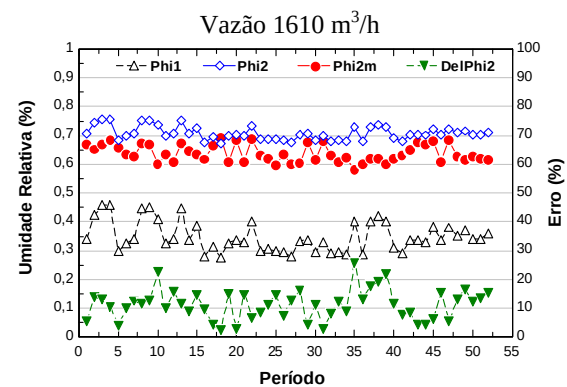


## ANEXO VI

### Gráficos Gerais das Temperaturas e das Umidades Relativas

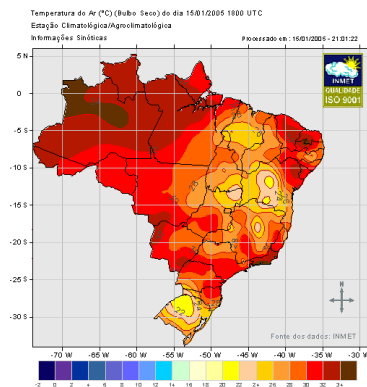




## ANEXO VII

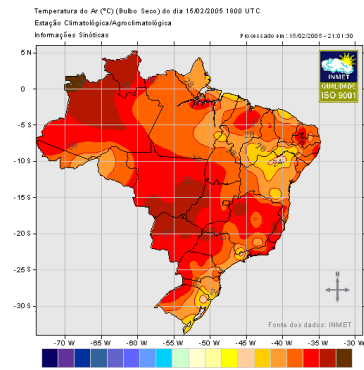
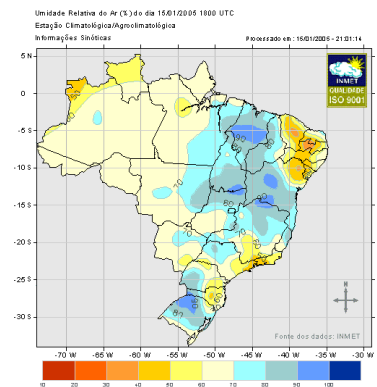
### Mapas Climáticos do Brasil : Temperatura e Umidade Relativa

#### Temperatura

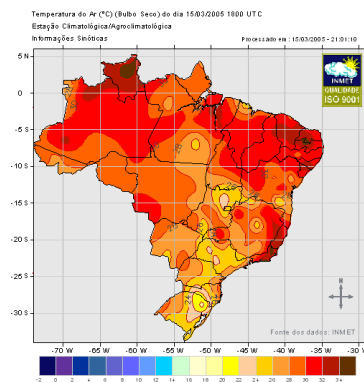
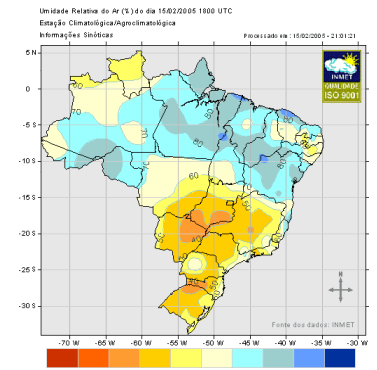


Janeiro

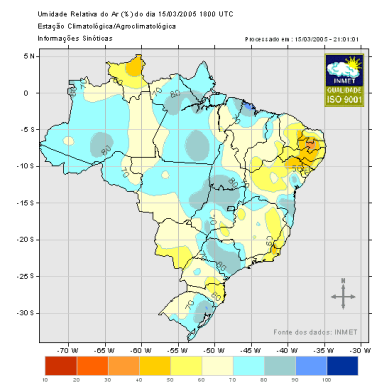
#### Umidade Relativa



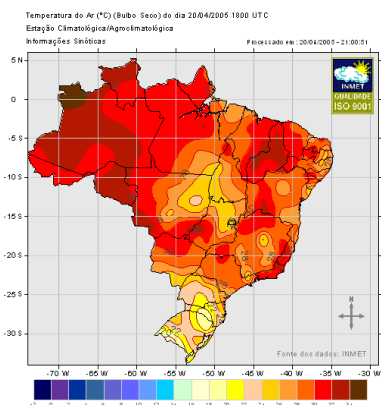
Fevereiro



Março :

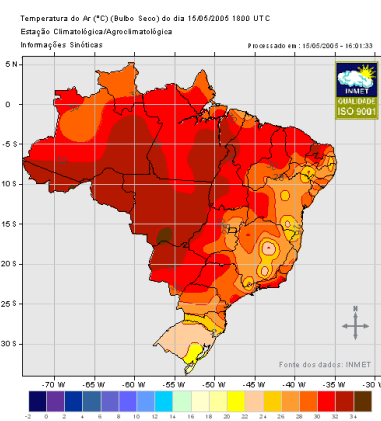
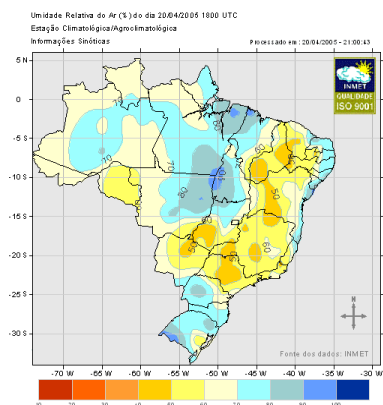


## Temperatura

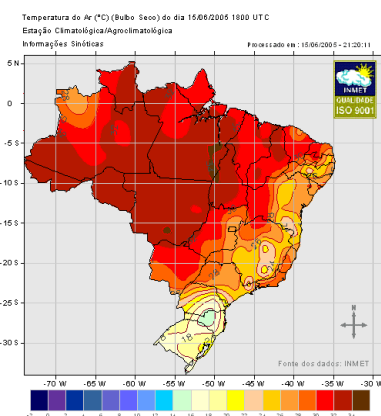
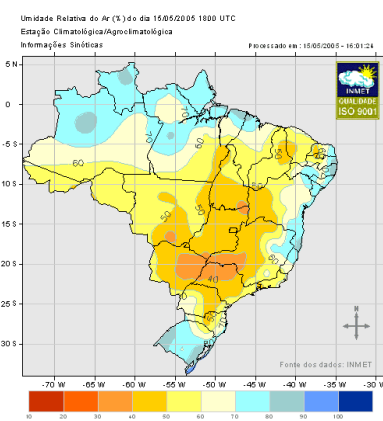


**Abril**

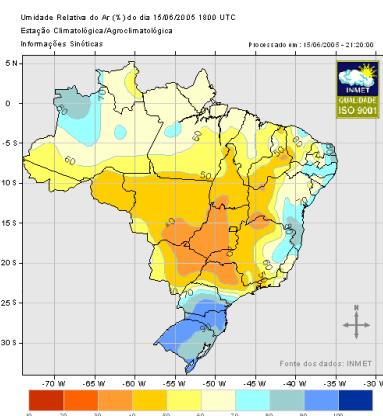
## Umidade Relativa



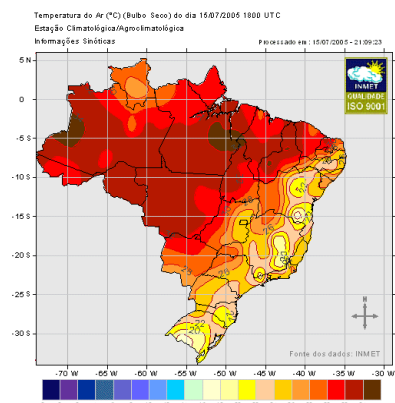
**Maio :**



**Junho :**

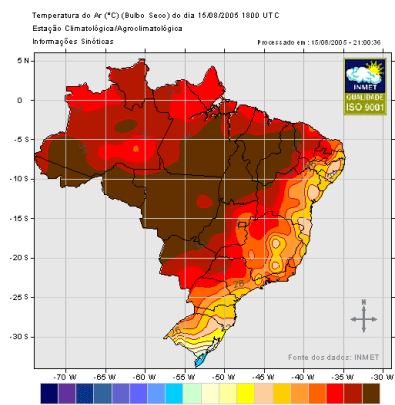
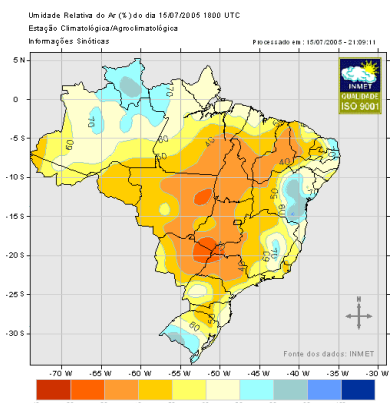


## Temperatura

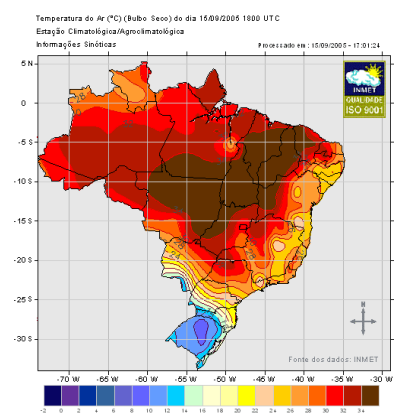
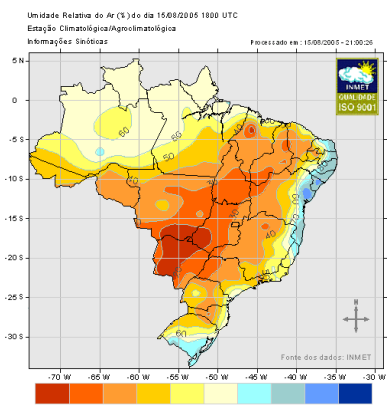


Julho

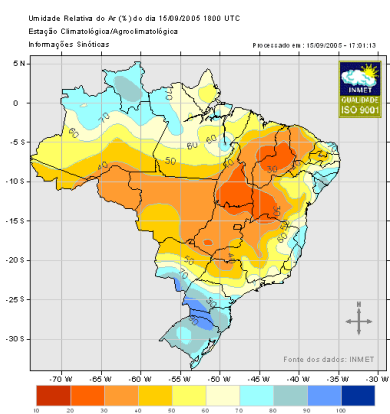
## Umidade Relativa



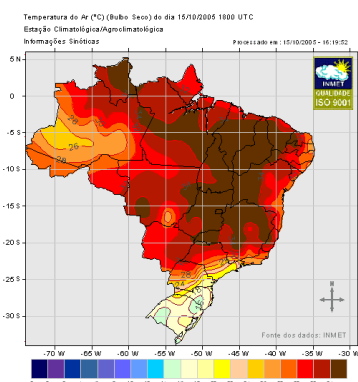
Agosto



Setembro

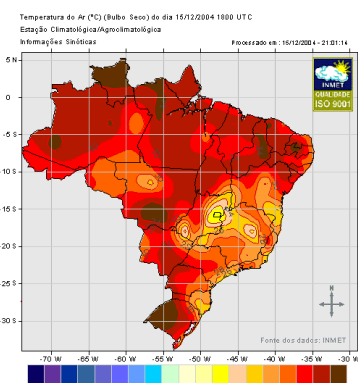
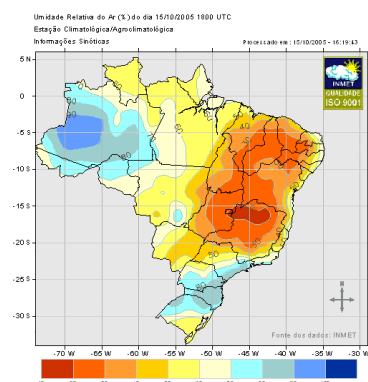


## Temperatura

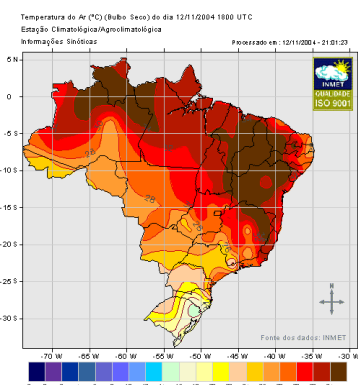
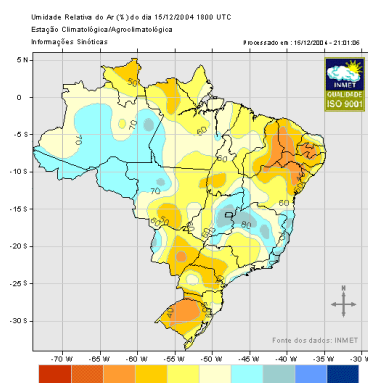


**Outubro**

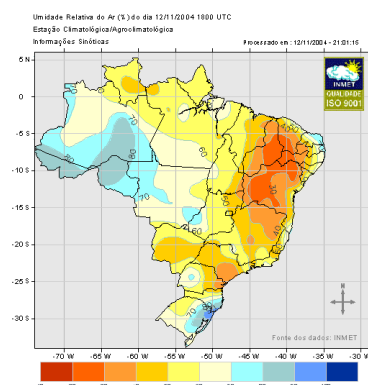
## Umidade Relativa



**Novembro**



**Dezembro**



## ANEXO VIII

### Conceitos Fundamentais

#### AVIII.1 Psicrometria

A Psicrometria é o estudo das propriedades do ar, tais como temperatura, umidade, entalpia e ponto de orvalho.

Nas aplicações de ar condicionado o ar ambiente não é seco, mas uma mistura de ar seco e vapor de água. O ar seco é uma mistura de gases, que são considerados substâncias homogêneas a pressões e temperaturas usuais, diferentes do vapor de água, que se encontra saturado ou superaquecido nessas condições.

Os princípios da psicrometria são aplicados em assuntos relacionados, como o cálculo de carga térmica, sistemas de ar condicionado, serpentinas de desumidificação e resfriamento, torres de resfriamento e resfriadores evaporativos.

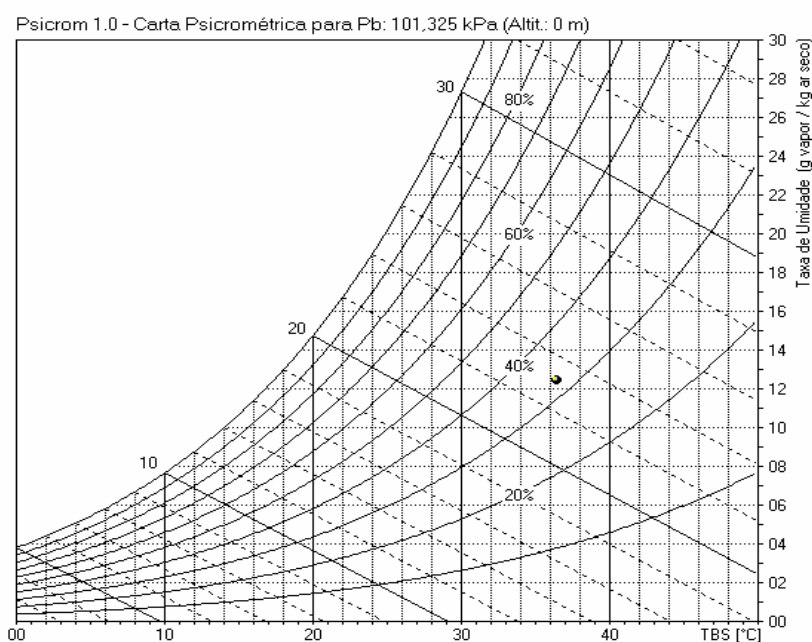


Figura AVIII.1 – Carta psicrométrica

As propriedades do ar ficam determinadas, claramente, em um diagrama chamado de “Carta Psicrométrica”, Fig. AVIII.1. Nesse diagrama, sinteticamente, definimos:

- Temperatura de Bulbo Seco (TBS) : é a temperatura do ar medida com um termômetro comum, identificada na Carta Psicrométrica conforme a Fig.AVIII.1.1;

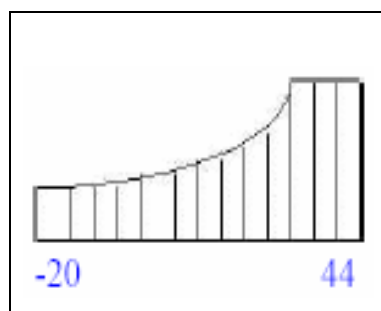


Figura AVIII.1.1 – Temperatura de bulbo seco

- Temperatura de Bulbo Úmido (TBU) : é a temperatura do ar medida com um termômetro comum, cujo bulbo de vidro foi coberto com uma gaze úmida, identificada na Carta Psicrométrica conforme a Fig.AVIII.1.2. A redução da TBU é inversamente proporcional à umidade do ar. A diferença entre a TBS e a TBU fornece a umidade relativa, através da Carta Psicrométrica;

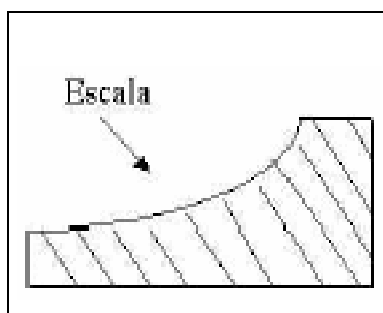


Figura AVIII.1.2 – Temperatura de bulbo úmido

- Entalpia: é a quantidade de energia interna em relação a um ponto de referência. A entalpia de uma mistura de ar seco e vapor de água é a soma das entalpias dos componentes;

- Calor Latente: aplicado ao ar, refere-se às modificações do conteúdo de umidade do ar, sem alteração de sua temperatura;
- Calor Sensível (CS): é o calor que aumenta a temperatura do ar sem alterar o conteúdo de umidade do ar. Na Carta Psicrométrica, uma alteração do CS é representada por uma linha de umidade constante (horizontal), porém com variação da entalpia e da TBU.
- Evaporação: na Carta Psicrométrica, consiste em percorrer uma linha de TBS igual ao acréscimo da umidade do ar;
- Condensação: na Carta Psicrométrica, consiste em percorrer uma linha de TBS igual ao decréscimo da umidade do ar;
- Umidade Relativa: é a razão entre a quantidade de umidade do ar e a quantidade máxima que ele pode conter na mesma temperatura, identificada na Carta Psicrométrica conforme a Fig.AVIII.1.3;

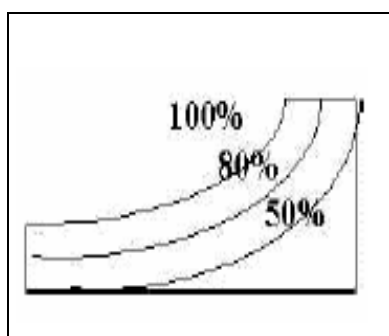


Figura AVIII.1.3 – Umidade relativa

- Umidade : é a massa de vapor de água contida em 1 kg de ar, identificada na Carta Psicrométrica conforme a Fig.AVIII.1.4;

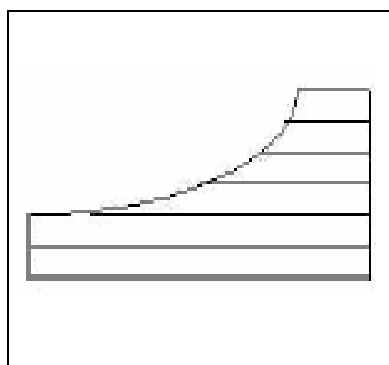


Figura AVIII.1.4 – Umidade

- Temperatura de Ponto de Orvalho (TPO): é a menor temperatura a que o ar pode ser resfriado, sem que ocorra alguma condensação de vapor de água ou umidade;
- Volume Específico : é o volume de vapor de água contido em 1 kg de ar.

Para conhecermos, na Carta Psicrométrica, o valor de uma determinada propriedade, temos que saber o valor de pelo menos duas outras propriedades, ou seja :

- Dado TBS e TBU, pode-se achar o valor de UR;
- Dado TBS e UR, pode-se achar o valor de TBU;
- Dado UR e TBU, pode-se achar o valor de TBS;
- Dado TBS e TBU, pode-se achar o valor de TPO;
- Dado TBS e UR, pode-se achar o valor de TPO;
- Dado UR e TBU, pode-se achar o valor de TPO;
- Dado TBS e TBU, pode-se achar o valor de U.

## **AVIII.2 Mistura ar-vapor de água**

Devido às suas dimensões e pelos processos físico-químicos e biológicos que se desenvolveram ao longo do tempo, o planeta Terra é envolvido por uma camada gasosa (ar atmosférico). Essa massa gasosa constitui a atmosfera da Terra e é essencial às formas de vida que nela se encontram.

O ar atmosférico é constituído de uma mistura de gases, de vapor d'água e uma mistura de contaminantes (fumaça, poeira e outros poluentes gasosos) presentes normalmente em locais distantes das fontes poluidoras.

Nas aplicações de engenharia térmica, a mistura de gases que constituem o ar atmosférico, excluindo o vapor d'água e os contaminantes, é definida como ar seco. Extensivos estudos têm mostrado que a composição do ar seco é relativamente constante, tendo pequenas variações na quantidade de seus componentes, devido às condições climáticas e a altitude. A composição do ar seco é mostrada na Tab. AVIII.1.

Tabela AVIII.1 – Composição do ar seco

| Componente         | Fórmula Química | Porcentagem em volume (%) | Massa molecular (kg/kg-mol) |
|--------------------|-----------------|---------------------------|-----------------------------|
| Nitrogênio         | N <sub>2</sub>  | 78,084                    | 28,016                      |
| Oxigênio           | O <sub>2</sub>  | 20,9476                   | 32,000                      |
| Argônio            | Ar              | 0,934                     | 39,948                      |
| Dióxido de carbono | CO <sub>2</sub> | 0,0314                    | 44,010                      |
| Neônio             | Ne              | 0,001818                  | 20,183                      |
| Hélio              | He              | 0,000524                  | 4,0026                      |
| Metano             | CH <sub>4</sub> | 0,00015                   | 16,03188                    |
| Dióxido de enxofre | SO <sub>2</sub> | 0 a 0,0001                | 64,064                      |
| Hidrogênio         | H <sub>2</sub>  | 0,00005                   | 2,01594                     |
| Criptônio          | Kr              | 0,0002                    | 93,80                       |
| Ozônio             | O <sub>3</sub>  | 0,0002                    | 48,000                      |
| Xenônio            | Xe              | 0,0002                    | 131,3                       |

Fonte: ASHRAE Fundamentals, 1997, pág. 6.1

A massa molecular do ar seco é 28,9645 kg/kgmol e a do vapor d'água é de 18,01528 kg/kgmol, ambas na escala do carbono 12 (ASHRAE, 1997). A constante dos gases para o ar seco, também baseada na escala do carbono 12 é 287,055 J/kg.K.

Nas aplicações de engenharia térmica a mistura de ar seco-vapor d'água é definida como ar úmido. A quantidade de vapor d'água presente na mistura pode variar de zero até um valor correspondente à condição de saturação. Essa condição corresponde à quantidade máxima de vapor d'água que o ar pode conter em determinada condição de temperatura e pressão.

Assim, define-se ar saturado como a mistura de ar seco e vapor d'água saturado, enquanto que ar não saturado é a mistura de ar com vapor d'água superaquecido.

Diversas propriedades termodinâmicas estão associadas com as propriedades do ar úmido, de diferentes maneiras. Com a temperatura são três propriedades associadas: temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido e temperatura do ponto de orvalho.

Outras propriedades termodinâmicas são caracterizadas pela quantidade de vapor d'água presente no ar úmido, que são: a umidade e a umidade relativa.

Quanto a propriedade relacionada à energia do ar, a chamamos de entalpia.

### AVIII.2.1 Temperatura de bulbo seco

É a temperatura indicada por um termômetro comum, não exposto à radiação. Trata-se da verdadeira temperatura do ar úmido. Frequentemente é denominada apenas de temperatura do ar.

### AVIII.2.2 Temperatura de bulbo úmido

É a temperatura indicada por um termômetro cujo bulbo foi coberto por uma mecha úmida, tão logo seja atingido o equilíbrio térmico. Nesse tipo de termômetro, a mistura ar seco – vapor d'água sofre um processo de resfriamento adiabático, pela evaporação da água da mecha no ar, mantendo-se a pressão constante.

O instrumento onde se faz a leitura dessa temperatura é chamado psicrômetro, que é formado por dois termômetros, um deles envolto por um tecido constantemente umedecido (termômetro de bulbo úmido) e outro, ao lado, simplesmente em equilíbrio térmico com o ar úmido (termômetro de bulbo seco). O termômetro de bulbo úmido recebe sobre si um fluxo de ar constante com uma velocidade de aproximadamente 3,0 m/s, por meio de um sistema de ventilação. Assim, a umidade é evaporada, retirando energia do bulbo úmido e, conseqüentemente, baixando a temperatura até um estado de equilíbrio.

Entende-se por estado de equilíbrio a situação em que o fluxo de energia do ar para o bulbo do termômetro é igual à energia necessária para a evaporação da umidade.

### AVIII.2.3 Temperatura de ponto de orvalho

Temperatura do ponto de orvalho é a temperatura abaixo da qual inicia-se a condensação do vapor d'água contido no ar úmido, à pressão constante. A Fig AVIII.2 ilustra essa definição.

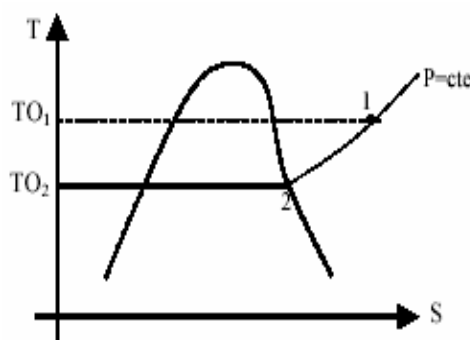


Figura AVIII.2 – Temperatura x Entropia

Inicialmente o ar úmido encontra-se, na mistura, sob certas condições de temperatura e pressão parcial do vapor, sendo que o vapor d'água encontra-se superaquecido no estado "1". Se a mistura for resfriada com pressão e umidade constantes, a pressão parcial do vapor se manterá constante e o ponto "2" será alcançado, iniciando-se a condensação. Esse ponto "2" é definido como ponto de orvalho.

#### AVIII.2.4 Umidade relativa

A umidade relativa é definida como sendo a razão entre a pressão parcial do vapor d'água na mistura ( $P_v$ ) e a pressão de saturação correspondente à temperatura de bulbo seco da mistura ( $P_{vs}$ ), definida conforme a Eq.(AVIII.1).

$$\phi = \left( \frac{P_v}{P_{vs}} \right) \cdot 100 \quad (\text{AVIII.1})$$

#### 2.2.5 Umidade

É definida como a razão entre a massa de vapor d'água ( $m_v$ ) e a massa de ar seco ( $m_a$ ) contidos em um determinado volume da mistura. Tanto o vapor d'água como o ar seco podem ser admitidos como gases perfeitos para aplicações usuais de ar condicionado. O ar seco pode ser admitido como gás perfeito porque sua temperatura é elevada em relação à temperatura de saturação, ao passo que o vapor d'água é admitido como gás perfeito porque sua pressão é baixa em relação à pressão de saturação. A umidade é definida conforme a Eq.(AVIII.2).

$$w = \frac{m_v}{m_a} \quad (\text{AVIII.2})$$

Mas para os gases perfeitos,  $P = m \cdot R \cdot T$ , isolando "m" e substituindo-a na Eq.(AVIII.2), tem-se:

$$w = \frac{(P_v \cdot V)/(R_v \cdot T)}{(P_a \cdot V)/(R_a \cdot T)} \quad (\text{AVIII.3})$$

Por outro lado, a pressão barométrica é a soma das pressões parciais do vapor d'água e do ar seco, ou seja:

$$P = p_v + p_a \quad (\text{AVIII.4})$$

“ $p_v$ ” é a pressão parcial do vapor de água, e “ $p_a$ ” é a pressão parcial do ar seco.

Isola-se “ $p_a$ ” na Eq.(AVIII.4) e a substitui na Eq.(AVIII.3), atribui-se os valores das constantes dos gases para o vapor d'água ( $R_v = 461,5\text{J/kgK}$ ) e para o ar seco ( $R_a = 287\text{J/kgK}$ ) e também os substituem na Eq.(AVIII.3), tem-se

$$w = 0,622 \cdot \frac{p_v}{P - p_v} \quad (\text{AVIII.5})$$

#### AVIII.2.6 Entalpia

A entalpia da mistura ar seco-vapor d'água é a energia do ar úmido por unidade de massa do ar seco, acima de uma temperatura de referência (visto que somente diferenças de entalpia são de interesse para a engenharia térmica). Quantitativamente, a entalpia é a soma das entalpias dos componentes da mistura, sendo definida conforme a Eq.(AVIII.6)

$$h = C_p \cdot T + w \cdot h_{lv} \quad (\text{AVIII.6})$$

“ $C_p$ ” é o calor específico do ar , “ $T$ ” é a temperatura do ar, “ $h_{lv}$ ” é a entalpia específica de vaporização da água.

### AVIII.3 Transferência de Calor e Massa no Resfriamento Evaporativo

Quando o ar escoar ao longo de uma parede úmida, como se mostra na Fig.AVIII.3, ocorre uma transferência simultânea de calor sensível e latente.

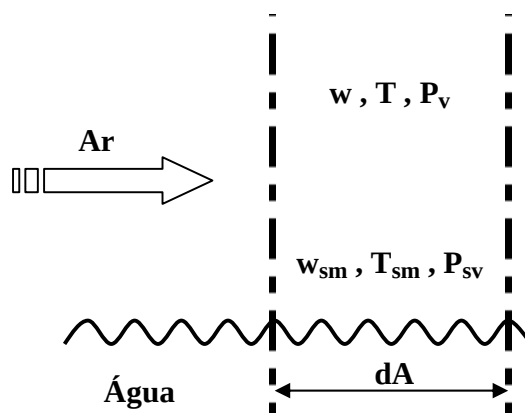


Figura AVIII.3 - Transferência de calor e massa entre o ar e uma superfície molhada

Se a temperatura da superfície molhada,  $T_{sm}$ , for menor que a temperatura do ar,  $T$ , haverá transferência de calor do ar para a parede úmida, resfriando-o.

Por outro lado, se a pressão parcial do vapor na corrente de ar,  $p_v$ , for menor que a pressão parcial do vapor saturado junto à superfície,  $p_{vs}$ , haverá uma transferência de massa (vapor de água) para o ar, aumentando sua umidade. Essa transferência de massa determina uma transferência de energia, em virtude do calor latente necessário para a mudança de fase da água (evaporação). Esse fenômeno físico é conhecido como *Resfriamento Evaporativo*.

Pela lei do resfriamento de Newton, a taxa diferencial de calor sensível ( $d\dot{q}_{ss}$ ) trocado entre o ar e a superfície molhada da Fig.AVIII.3, é definida pela Eq.(AVIII.7)

$$d\dot{q}_{ss} = h_c \cdot dA \cdot (T_{sm} - T) \quad (\text{AVIII.7})$$

“ $h_c$ ” é o coeficiente de transferência de calor por convecção, sendo determinado a partir do número de Nusselt (Eq.3.8) expresso em função dos números de Reynolds (Eq.3.9) e de Prandtl (Eq.3.11), “ $dA$ ” é a área diferencial da superfície de troca, “ $T_{sm}$ ” é a temperatura da superfície molhada.

A transferência de massa da superfície da água para o ar é proporcional à diferença de pressões parciais ( $p_{vs} - p_v$ ). Contudo, a Eq.(AVIII.5) mostra que a umidade é aproximadamente proporcional à pressão parcial do vapor, de modo que a taxa diferencial de evaporação de água para o ar é definida pela Eq.(AVIII.8)

$$d\dot{m} = h_m \cdot \rho_w \cdot dA \cdot (w_{sm} - w) \quad (\text{AVIII.8})$$

“ $h_m$ ” é o coeficiente de transferência de massa, “ $\rho_w$ ” é a densidade da água, “ $w_{sm}$ ” é a umidade da superfície molhada.

Junto com a transferência de massa há uma transferência de calor latente, em razão da evaporação de parte da água. A Eq.(AVIII.9) define essa taxa diferencial de calor latente

$$d\dot{q}_l = h_m \cdot \rho_w \cdot dA \cdot (w_{sm} - w) \cdot h_{lv} \quad (\text{AVIII.9})$$

O calor total trocado entre o ar e água é a soma do calor sensível e o calor latente trocado entre ambos. Somando as Eqs.(AVIII.7) e (AVIII.9), a taxa diferencial de calor total é definida pela Eq.(AVIII.10)

$$d\dot{q}_t = h_c \cdot dA \cdot (T_{sm} - T) + h_m \cdot \rho_w \cdot dA \cdot (w_{sm} - w) \cdot h_{lv} \quad (\text{AVIII.10})$$

Na Equação (AVIII.10) verifica-se que o calor total transferido, é o resultado de uma fração originária da diferença entre as temperaturas  $(T_s - T)$  e outra fração originária da diferença entre as umidades  $(w_{sm} - w)$ .

Os mecanismos de transferência de calor e massa são semelhantes, de modo que se pode relacionar os coeficientes “ $h_c$ ” e “ $h_m$ ” conforme definido na Eq.(AVIII.11), (Stoecker, 1985)

$$h_m = \frac{h_c}{C_{pu} \cdot \rho_w} \quad (\text{AVIII.11})$$

“ $C_{pu}$ ” é o calor específico do ar úmido, definido conforme a Eq.(AVIII.12)

$$C_{pu} = C_p + w \cdot C_{pv} \quad (\text{AVIII.12})$$

“ $C_{pv}$ ” é o calor específico do vapor de água

Combinando e substituindo as Eqs.(AVIII.11) e (AVIII.12) na Eq.(AVIII.10), a taxa diferencial de calor total a ser definida pela Eq.(AVIII.13)

$$d\dot{q}_t = \frac{h_c \cdot dA}{C_{pu}} \left[ (C_p \cdot T_{sm} + w_{sm} \cdot h_{lv}) - (C_p \cdot T + w \cdot C_{ps} \cdot T - w \cdot C_{ps} \cdot T_{sm} + w \cdot h_{lv}) \right] \quad (\text{AVIII.13})$$

O valor da subtração ( $w_s \cdot h_{lv} - w \cdot h_{lv}$ ) é muito pequena quando comparado aos outros valores da Eq.(AVI.13), de modo que sua adição nessa equação não afeta significativamente seus resultados. A Eq.(AVIII.13) é redefinida de acordo com a Eq.(AVIII.14)

$$d\dot{q}_t = \frac{h_c \cdot dA}{C_{pu}} \left\{ [C_p \cdot T_{sm} + w_{sm} \cdot (h_{lv} + h_l)] - [C_p \cdot T + w(C_{ps} \cdot T - C_{ps} \cdot T_{sm} + h_{lv} + h_l)] \right\} \quad (\text{AVIII.14})$$

Observando a Eq.(AVIII.14), nota-se que a expressão no interior do primeiro colchete é a entalpia do ar saturado à temperatura da superfície molhada, enquanto o segundo colchete contém a expressão da entalpia da corrente de ar. Assim, a taxa diferencial de transferência do calor total reduz-se na Eq.(AVIII.15)

$$d\dot{q}_t = \frac{h_c \cdot dA}{C_{pu}} \cdot (h_s - h) \quad (\text{AVIII.15})$$

A Equação (AVIII.15) mostra que o calor total trocado entre o ar e a água é determinado pelo potencial de entalpia entre os fluidos, ou seja, pela diferença entre a entalpia do ar saturado à temperatura da superfície molhada, “ $h_s$ ”, e a entalpia da corrente de ar, “ $h$ ”.

O taxa diferencial do calor total trocado entre o ar e a água é definido também em função de suas temperaturas, ou seja, redefinindo a Eq.(AVIII.15) conforme a Eq.(AVIII.16)

$$d\dot{q}_t = \frac{C_{ps} \cdot h_c \cdot dA}{C_{pu}} \cdot (T_s - T) \quad (\text{AVIII.16})$$