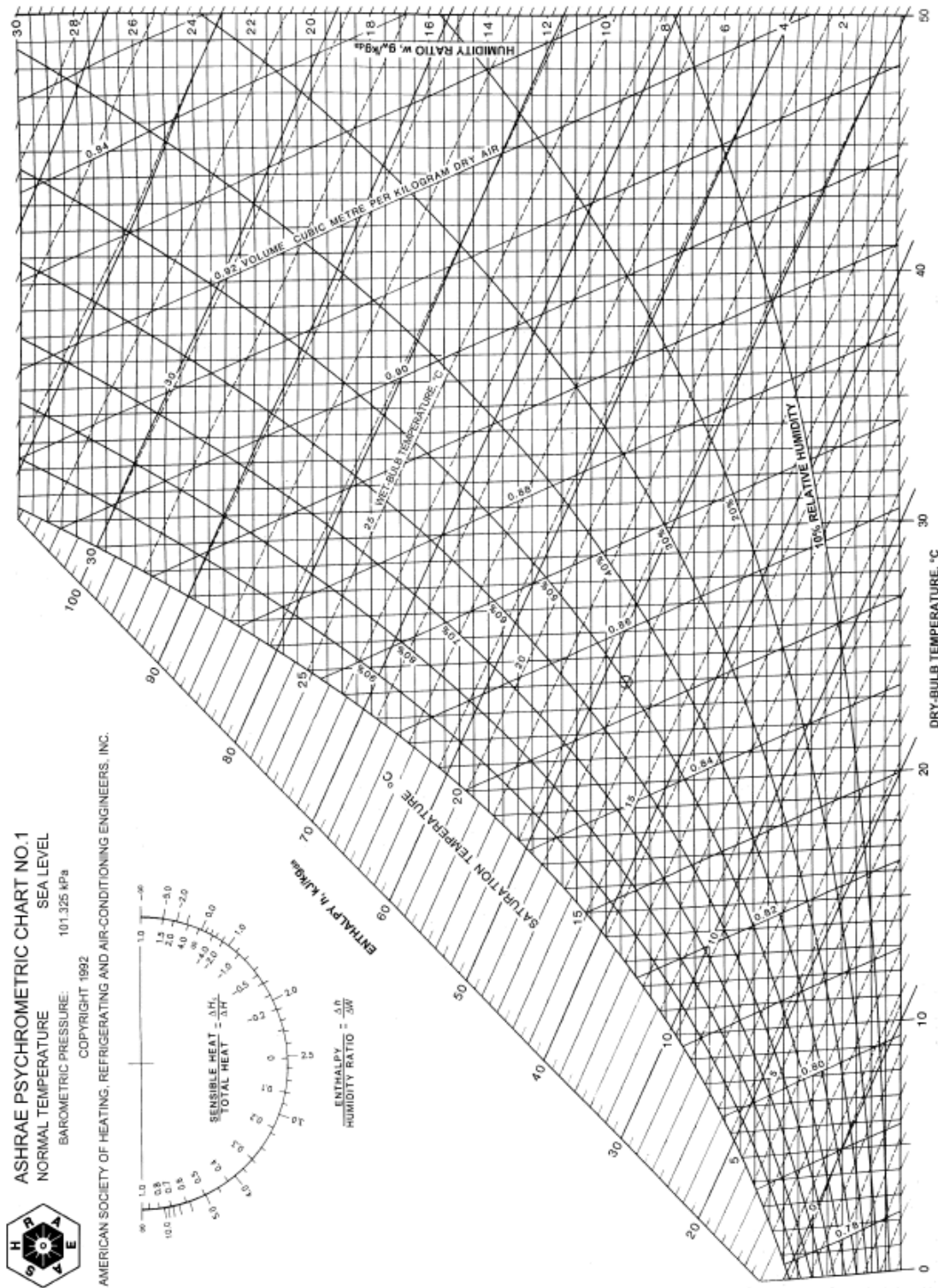


# **Esercizi sulle trasformazioni dell'aria umida**

# 1. Diagramma dell'aria umida



## 2. Esercizi svolti

### Esercizio n°1 (Miscelazione)

Una portata  $m = 2 \text{ kg}_{\text{AS}}/\text{s}$  di aria umida nelle condizioni di  $T_{\text{bs}} = 32 \text{ °C}$  e  $\phi = 60 \%$  (condizioni 1) si mescola adiabaticamente ed isobaricamente ( $p = 101325 \text{ Pa}$ ) con una portata volumetrica  $V = 2,5 \text{ m}^3/\text{s}$  di aria umida che si trova nelle condizioni di  $T_{\text{bs}} = 26 \text{ °C}$  e  $\phi = 50 \%$  (condizioni 2). Determinare le condizioni finali della miscela.

Soluzione:

Aria alle condizioni 1:

$$X_1 = 0,018 \text{ kg}_V/\text{kg}_{\text{AS}}$$

$$v_1 = 0,889 \text{ m}^3/\text{kg}_{\text{AS}}$$

$$h_1 = 78,2 \text{ kJ}/\text{kg}_{\text{AS}}$$

Aria alle condizioni 2:

$$X_2 = 0,0105 \text{ kg}_V/\text{kg}_{\text{AS}}$$

$$v_2 = 0,861 \text{ m}^3/\text{kg}_{\text{AS}}$$

$$h_2 = 53 \text{ kJ}/\text{kg}_{\text{AS}}$$

$$m_2 = V/v = 2,5 \text{ [m}^3/\text{s]} / 0,861 \text{ [m}^3/\text{kg}_{\text{AS}}\text{]} = 2,9 \text{ [kg}_{\text{AS}}/\text{s}]$$

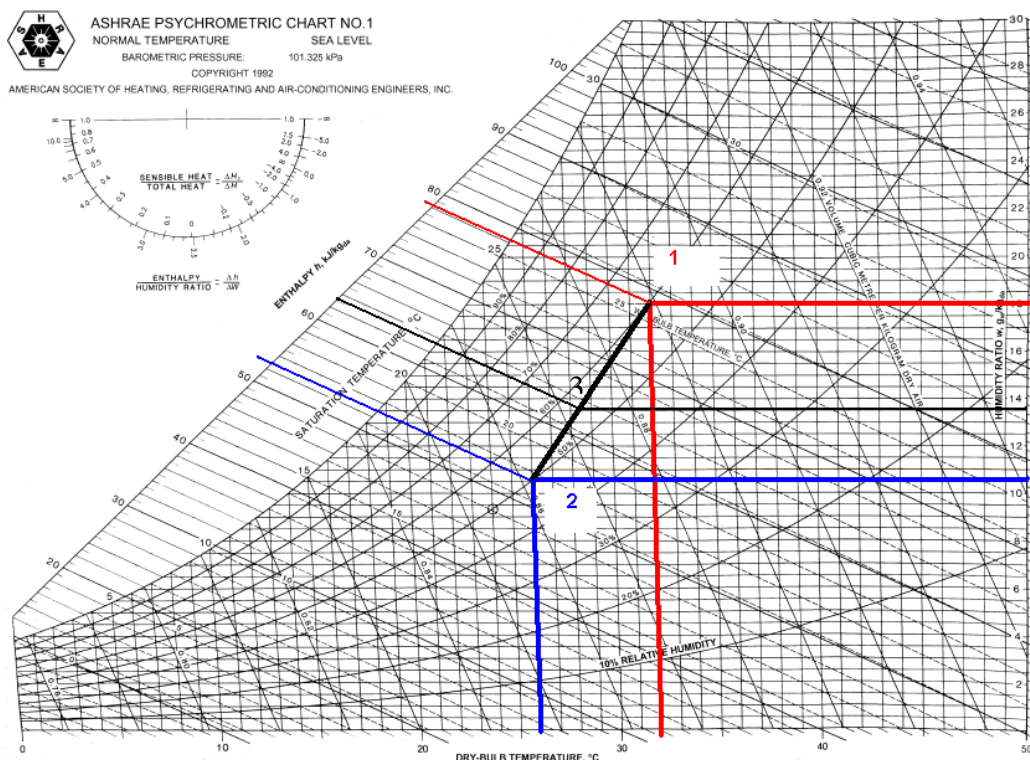
Le condizioni del punto 3 sono:

$$m_3 \text{ [kg}_{\text{AS}}/\text{s}] = m_1 \text{ [kg}_{\text{AS}}/\text{s}] + m_2 \text{ [kg}_{\text{AS}}/\text{s}] = 2 \text{ [kg}_{\text{AS}}/\text{s}] + 2,9 \text{ [kg}_{\text{AS}}/\text{s}] = 4,9 \text{ [kg}_{\text{AS}}/\text{s}]$$

$$\begin{aligned} X_3 \text{ [kg}_V/\text{kg}_{\text{AS}}] &= (m_1 \text{ [kg}_{\text{AS}}/\text{s}] X_1 \text{ [kg}_V/\text{kg}_{\text{AS}}] + m_2 \text{ [kg}_{\text{AS}}/\text{s}] X_2 \text{ [kg}_V/\text{kg}_{\text{AS}}]) / m_3 \text{ [kg}_{\text{AS}}/\text{s}] = \\ &= (2 \text{ [kg}_{\text{AS}}/\text{s}] \times 0,018 \text{ [kg}_V/\text{kg}_{\text{AS}}] + 2,9 \text{ [kg}_{\text{AS}}/\text{s}] \times 0,0105 \text{ [kg}_V/\text{kg}_{\text{AS}}]) / 4,9 \text{ [kg}_{\text{AS}}/\text{s}] \\ &= 0,0136 \text{ [kg}_V/\text{kg}_{\text{AS}}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_3 \text{ [kJ}/\text{kg}] &= (m_1 \text{ [kg}_{\text{AS}}/\text{s}] h_1 \text{ [kJ}/\text{kg}_{\text{AS}}] + m_2 \text{ [kg}_{\text{AS}}/\text{s}] h_2 \text{ [kJ}/\text{kg}_{\text{AS}}]) / m_3 \text{ [kg}_{\text{AS}}/\text{s}] = \\ &= (2 \text{ [kg}_{\text{AS}}/\text{s}] \times 78,2 \text{ [kJ}/\text{kg}_{\text{AS}}] + 2,9 \text{ [kg}_{\text{AS}}/\text{s}] \times 53 \text{ [kJ}/\text{kg}_{\text{AS}}]) / 4,9 \text{ [kg}_{\text{AS}}/\text{s}] \\ &= 63,27 \text{ [kJ}/\text{kg}_{\text{AS}}] \end{aligned}$$

Il punto 3 nel diagramma si trova sul segmento 1-2. Vale la regola della leva, ossia, chiamando x-y il segmento che congiunge i punti x e y, risulta:  $(2-3)/(1-2) = m_1/(m_1+m_2)$



**Esercizio n°2 (Raffreddamento e riscaldamento isobaro)**

Una portata  $m = 5 \text{ kg}_{AS}/\text{s}$  di aria umida si trova nelle condizioni di  $T_{BS} = 18 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $T_R = 13 \text{ }^\circ\text{C}$ . Sapendo che la pressione ambiente è  $p_A = 101325 \text{ Pa}$ , determinare:

1. la potenza termica da sottrarre per portarla a  $T_{BS} = 16 \text{ }^\circ\text{C}$  (ed il relativo stato);
2. lo stato dell'aria umida, la potenza termica da fornire alla corrente per portarla a  $T_{BS} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$  (ed il relativo stato).

Soluzione:

Dal diagramma risulta che l'aria alle condizioni iniziale è nel seguente stato:

$X = 0,0105 \text{ kg}_v/\text{kg}_{AS}$ ,  $\phi = 73 \text{ } \%$  e  $h = 42 \text{ kJ}/\text{kg}_{AS}$

Punto 1

La condizione dell'aria nel punto 1 risulta:

$T_{bs} = 16 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $X = 0,0105 \text{ kg}_v/\text{kg}_{AS}$ ,  $\phi = 83 \text{ } \%$  e  $h=40 \text{ kJ}/\text{kg}_{AS}$

Il calore sottratto all'aria risulta:

$$Q \text{ [kW]} = m \text{ [kg}_{AS}/\text{s}] (h_1 \text{ [kJ}/\text{kg}_{AS}] - h_{in} \text{ [kJ}/\text{kg}_{AS}])$$

$$= 5 \text{ [kg/s]} ( 40 \text{ [kJ}/\text{kg}_{AS}] - 42 \text{ [kJ}/\text{kg}_{AS}]) = - 10 \text{ [kW]}$$

Punto 2

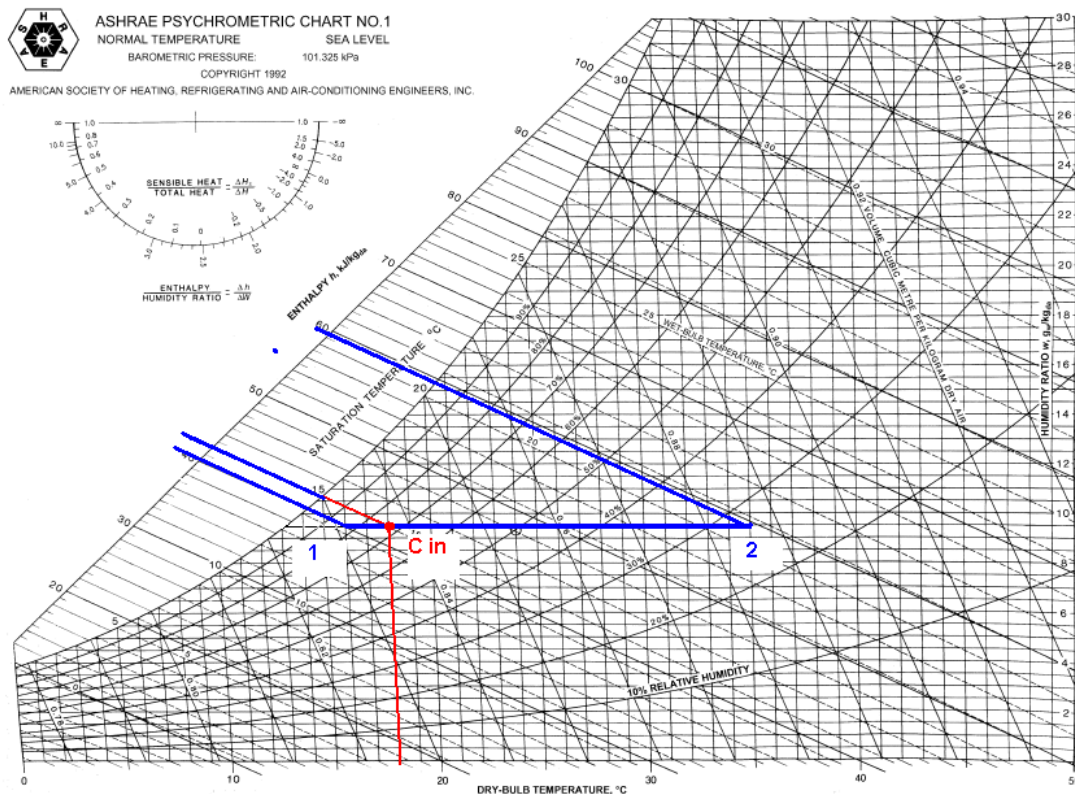
La condizione dell'aria nel punto 2 risulta:

$T_{bs} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $X = 0,0105 \text{ [kg}_v/\text{kg}_{AS}]$ ,  $\phi = 28 \text{ } \%$ ,  $h = 59 \text{ [kJ}/\text{kg}_{AS}]$

Il calore sottratto all'aria risulta:

$$Q \text{ [kW]} = m \text{ [kg}_{AS}/\text{s}] (h_2 \text{ [kJ}/\text{kg}_{AS}] - h_{in} \text{ [kJ}/\text{kg}_{AS}])$$

$$= 5 \text{ [kg}_{AS}/\text{s}] ( 59 \text{ [kJ}/\text{kg}_{AS}] - 42 \text{ [kJ}/\text{kg}_{AS}]) = 85 \text{ [kW]}$$



### Esercizio n°3 (Umidificazione a liquido e a vapore)

Una portata  $m = 3 \text{ kg}_{\text{AS}}/\text{s}$  di aria umida nelle condizioni  $p = 101325 \text{ Pa}$ ,  $T_{\text{BS1}} = 20 \text{ °C}$  e  $\varphi_1 = 10 \%$  (punto 1) deve essere portata nelle condizioni di  $T_{\text{BS2}} = 21 \text{ °C}$  e  $\varphi_2 = 50 \%$  (punto 2). Si analizzino i casi in cui il trattamento è effettuato immettendo nella corrente di aria umida acqua liquida oppure vapore (assunto a  $T=21\text{°C}$ ).

Soluzione:

Condizioni aria umida nel punto 1:

$$T_{\text{bs}} = 20 \text{ °C};$$

$$X = 0,0015 \text{ kg}_v/\text{kg}_{\text{AS}}$$

$$h = 24 \text{ kJ/kg}_{\text{AS}};$$

Condizioni aria umida nel punto 2:

$$T_{\text{bs}} = 21 \text{ °C};$$

$$X = 0,0077 \text{ kg}_v/\text{kg}_{\text{AS}}$$

$$h = 41 \text{ kJ/kg}_{\text{AS}};$$

$$X_{\text{bu}} = 0,0104 \text{ kg}_v/\text{kg}_{\text{AS}}$$

*Umidificazione a vapore (1-A-2)*

Condizioni aria umida nel punto A:

$$T_{\text{bs}} = 21 \text{ °C};$$

$$X = 0,0015 \text{ kg}_v/\text{kg}_{\text{AS}}$$

$$h = 25 \text{ kJ/kg}_{\text{AS}};$$

Calore scambiato sensibile in 1-A:

$$\begin{aligned} Q_s \text{ [kW]} &= m \text{ [kg}_{\text{AS}}/\text{s}] \times (h_a \text{ [kJ/kg}_{\text{AS}}] - h_1 \text{ [kJ/kg}_{\text{AS}}]) = \\ &= 3 \text{ [kg}_{\text{AS}}/\text{s}] \times (25 \text{ [kJ/kg}_{\text{AS}}] - 24 \text{ [kJ/kg}_{\text{AS}}]) = 3 \text{ [kW]} \end{aligned}$$

Calore latente scambiato in A-2

$$\begin{aligned} Q_l \text{ [kW]} &= m \text{ [kg}_{\text{AS}}/\text{s}] \times (h_2 \text{ [kJ/kg}_{\text{AS}}] - h_a \text{ [kJ/kg}_{\text{AS}}]) \\ &= 3 \text{ [kg}_{\text{AS}}/\text{s}] \times (41 \text{ [kJ/kg}_{\text{AS}}] - 25 \text{ [kJ/kg}_{\text{AS}}]) = 48 \text{ [kW]} \end{aligned}$$

Portata di vapore da fornire:

$$\begin{aligned} m_v \text{ [kg}_v/\text{s]} &= (X_2 \text{ [kg}_v/\text{kg}_{\text{AS}}] - X_1 \text{ [kg}_v/\text{kg}_{\text{AS}}]) \times m \text{ [kg}_{\text{AS}}/\text{s}] \\ &= (0,0077 \text{ [kg}_v/\text{kg}_{\text{AS}}] - 0,0015 \text{ [kg}_v/\text{kg}_{\text{AS}}]) \times 3 \text{ [kg}_{\text{AS}}/\text{s}] = 0,018 \text{ [kg}_v/\text{s]} \end{aligned}$$

Nota: il vapore è normalmente immesso ad una temperatura maggiore di quella dell'aria e pertanto si ha anche un riscaldamento della stessa durante l'umidificazione.

*Umidificazione ad acqua (1-B-2)*

Condizioni aria umida nel punto B:

$$T_{\text{bs}} = 37 \text{ [°C]};$$

$$X = 0,0015 \text{ [kg}_v/\text{kg}_{\text{AS}}];$$

$$h = 41 \text{ [kJ/kg}_{\text{AS}}];$$

Calore scambiato sensibile in 1-B:

$$Q_s \text{ [kW]} = m \text{ [kg}_{AS}/s] \times (h_b \text{ [kJ/kg}_{AS}] - h_1 \text{ [kJ/kg}_{AS}])$$

$$= 3 \text{ [kg}_{AS}/s] \times (41 \text{ [kJ/kg}_{AS}] - 24 \text{ [kJ/kg}_{AS}]) = 51 \text{ [kW]}$$

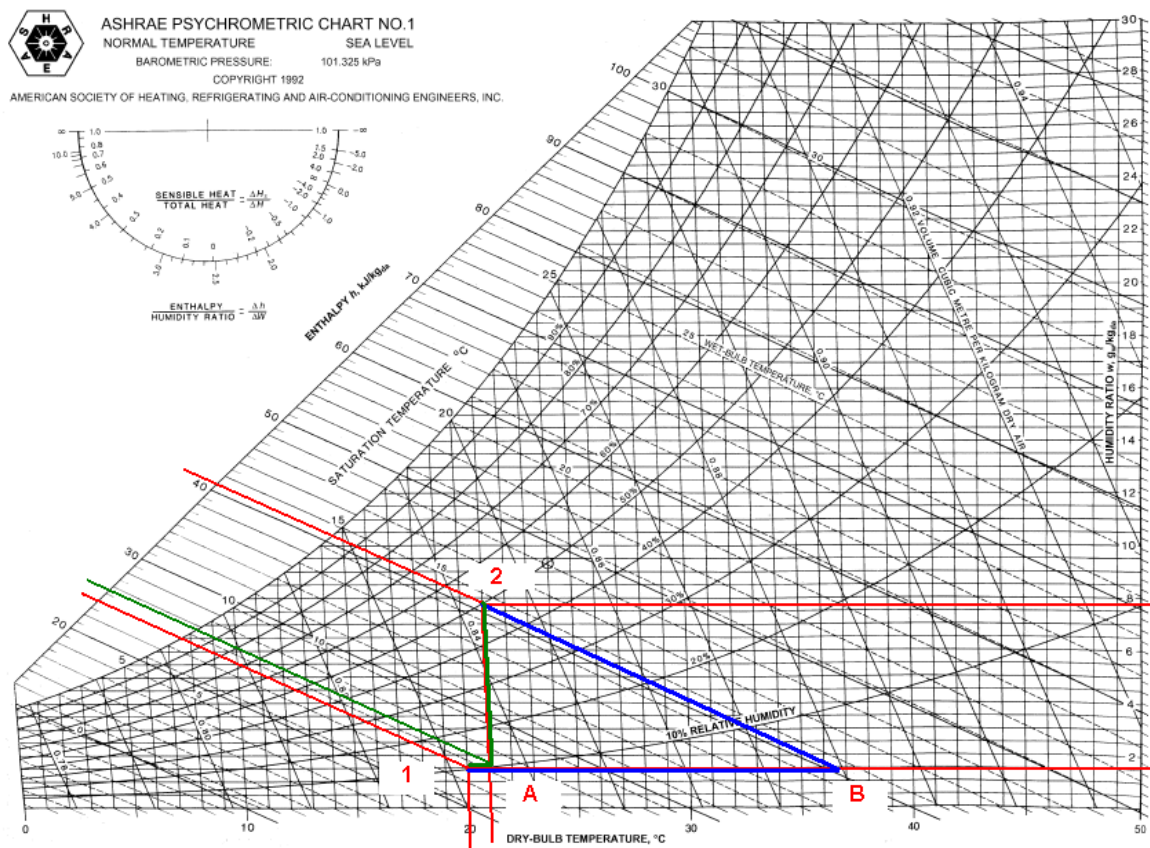
Portata di acqua da fornire:

$$m_1 \text{ [kg}_v/s] = (X_2 \text{ [kg}_v/\text{kg}_{AS}] - X_1 \text{ [kg}_v/\text{kg}_{AS}]) \times m \text{ [kg}_{AS}/s]$$

$$= (0.0077 \text{ [kg}_v/\text{kg}_{AS}] - 0.0015 \text{ [kg}_v/\text{kg}_{AS}]) \times 3 \text{ [kg}_{AS}/s] = 0,018 \text{ [kg}_v/s]$$

L'efficienza di umidificazione è:

$$\varepsilon = \frac{X_2 \text{ [kg}_v/\text{kg}_{AS}] - X_B \text{ [kg}_v/\text{kg}_{AS}]}{X_{bu} \text{ [kg}_v/\text{kg}_{AS}] - X_B \text{ [kg}_v/\text{kg}_{AS}}} = \frac{0,0077 \text{ [kg}_v/\text{kg}_{AS}] - 0,0015 \text{ [kg}_v/\text{kg}_{AS}]}{0,0104 \text{ [kg}_v/\text{kg}_{AS}] - 0,0015 \text{ [kg}_v/\text{kg}_{AS}}} = 69,6 \text{ [%]}$$



### Esercizio n°4 (Raffreddamento e deumidificazione)

Una portata  $m = 2,8 \text{ kg}_{AS}/s$  di aria umida nelle condizioni  $p = 101325 \text{ Pa}$ ,  $T_{bs1} = 28 \text{ °C}$  e  $\phi_1 = 50 \%$  (punto 1) attraversa una batteria di raffreddamento avente ADP pari a  $9 \text{ °C}$  e BPF pari a  $0,1$ . Si calcolino le condizioni dell'aria all'uscita, la potenza frigorifera e la portata di condensa.

Soluzione:

Essendo il By pass Factor definito come:

$$BPF = \frac{X_2 [kg_V / kg_{AS}] - X_{ADP} [kg_V / kg_{AS}]}{X_1 [kg_V / kg_{AS}] - X_{ADP} [kg_V / kg_{AS}]} = \frac{h_2 [kJ / kg_{AS}] - h_{ADP} [kJ / kg_{AS}]}{h_1 [kJ / kg_{AS}] - h_{ADP} [kJ / kg_{AS}]},$$

risulta:

$$\begin{aligned} h_2 [kJ/kg_{AS}] &= BPF (h_1 [kJ/kg_{AS}] - h_{ADP} [kJ/kg_{AS}]) + h_{ADP} [kJ/kg_{AS}] \\ &= 0,1 (58,5 [kJ/kg_{AS}] - 27,1 [kJ/kg_{AS}]) + 27,1 [kJ/kg_{AS}] \\ &= 30,2 [kJ/kg_{AS}] \end{aligned}$$

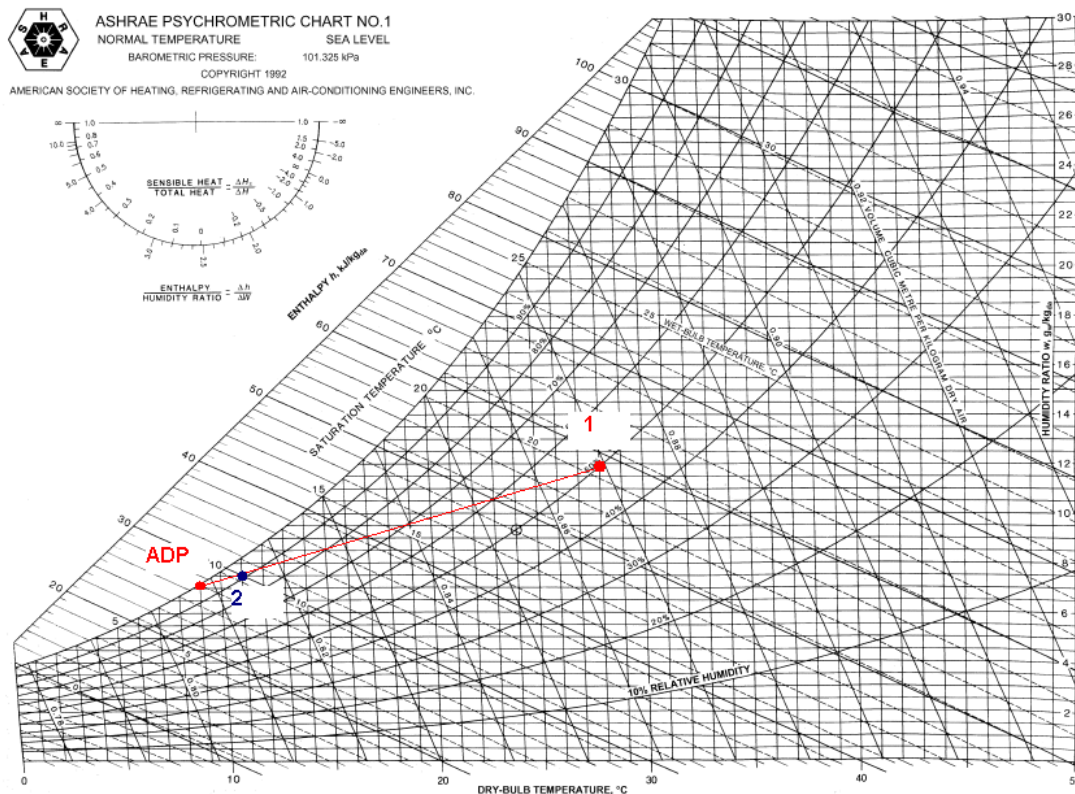
$$\begin{aligned} X_2 [kg_V/kg_{AS}] &= BPF (X_1 [kg_V/kg_{AS}] - X_{ADP} [kg_V/kg_{AS}]) + X_{ADP} [kg_V/kg_{AS}] \\ &= 0,1 (0,0119 [kg_V/kg_{AS}] - 0,0072 [kg_V/kg_{AS}]) + 0,0072 [kg_V/kg_{AS}] \\ &= 0,0076 [kg_V/kg_{AS}] \end{aligned}$$

Il calore scambiato dalla batteria è:

$$\begin{aligned} Q [kW] &= m [kg_{AS}/s] (h_2 [kJ/kg_{AS}] - h_1 [kJ/kg_{AS}]) \\ &= 2,8 [kg_{AS}/s] (30,2 [kJ/kg_{AS}] - 58,5 [kJ/kg_{AS}]) = -79,2 [kW] \end{aligned}$$

e la portata di condensa è:

$$\begin{aligned} m_{cond} [kg_V/s] &= m [kg_{AS}/s] (X_1 [kg_V/kg_{AS}] - X_2 [kg_V/kg_{AS}]) \\ &= 2,8 [kg_{AS}/s] (0,0119 [kg_V/kg_{AS}] - 0,0076 [kg_V/kg_{AS}]) = 0,012 \text{ kg/s} [kg_V/s] \end{aligned}$$



### 3. Esercizi non svolti

#### Esercizio n°5 (riscaldamento sensibile)

Una portata di aria umida pari  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  si trova alle seguenti condizioni:

$$X = 0,015 \text{ kg}_v/\text{kg}_{AS};$$

$$T_{bu} = 24,5 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$p = 101325 \text{ Pa}.$$

Alla corrente è fornita una potenza termica pari a  $15000 \text{ kCal/h}$ .

Determinare le condizioni a valle della batteria ( $T_{bs}$ ,  $X$ ).

#### Esercizio n°6 (riscaldamento sensibile)

Una portata di aria umida pari  $10 \text{ [kg}_{AS}/\text{s}]$  si riscalda attraverso una resistenza elettrica. L'aria si trova a monte della resistenza nelle seguenti condizioni:

$$\varphi = 42 \text{ } \%;$$

$$T_{bu} = 24,5 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$p = 101325 \text{ Pa};$$

mentre a valle:

$$T_{bs} = 70 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$p = 101325 \text{ Pa};$$

Determinare:

1. la potenza termica scambiata dalla resistenza;
2. l'energia termica scambiata dalla resistenza nell'arco di 15 minuti.

#### Esercizio n°7 (raffreddamento sensibile)

Una portata di aria umida pari  $3000 \text{ m}^3/\text{h}$  si trova alle seguenti condizioni:

$$\varphi = 20 \text{ } \%;$$

$$T_{bs} = 40 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$p = 101325 \text{ Pa}.$$

Alla corrente è sottratta una potenza termica pari a  $20 \text{ kJ/s}$ .

Determinare le condizioni a valle della batteria ( $T_{bs}$  e  $X$ ).



### Esercizio n°8 (raffreddamento sensibile)

Si vuole raffreddare senza deumidificare una corrente di aria umida che si trova alle condizioni sotto elencate:

$$X = 0,015 \text{ kg}_v/\text{kg}_{AS};$$

$$\varphi = 50 \%;$$

$$p = 101325 \text{ Pa.}$$

La temperatura media superficiale della batteria di raffreddamento può essere impostata ai seguenti valori:

$$T_{ADP1} = 35 \text{ [}^\circ\text{C]};$$

$$T_{ADP2} = 25 \text{ [}^\circ\text{C]};$$

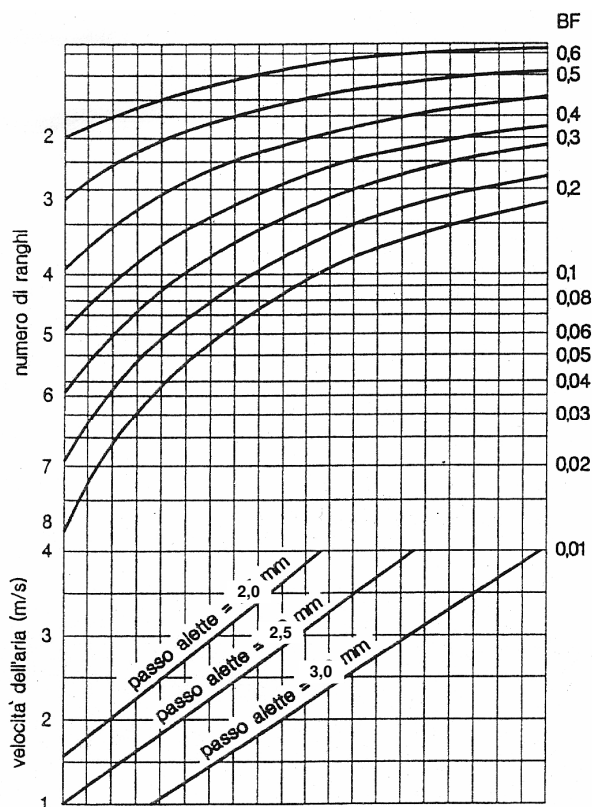
$$T_{ADP3} = 15 \text{ [}^\circ\text{C]};$$

Indicare qual è la temperatura corretta e perché.

### Esercizio n°9 (raffreddamento e deumidificazione)

Con riferimento alla figura, si richiede di calcolare il fattore di By pass di una batteria avente le seguenti caratteristiche:

1.  $n^\circ$  ranghi = 2, passo<sub>alette</sub> = 2,5 mm e  $v_{aria}$  = 1,0 m/s;
2.  $n^\circ$  ranghi = 5, passo<sub>alette</sub> = 3,0 mm e  $v_{aria}$  = 2,5 m/s;
3.  $n^\circ$  ranghi = 6, passo<sub>alette</sub> = 2,0 mm e  $v_{aria}$  = 4,0 m/s;



By pass factor di batterie di raffreddamento e deumidificazione

[N. Rossi, Manuale del Termotecnico, ed. Hoepli]

### Esercizio n°10 (raffreddamento e deumidificazione)

Si vuole raffreddare e deumidificare una corrente di aria umida pari a  $5 \text{ kg}_{AS}/\text{s}$  che si trova alle seguenti condizioni:

$$X = 0,015 \text{ kg}_V/\text{kg}_{AS};$$

$$T_{bs} = 30 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$p = 101325 \text{ Pa}.$$

La batteria di raffreddamento è caratterizzata da  $T_{ADP} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $BPF = 0,1$ .

Si richiede di calcolare:

1.  $T_{bs}$  ed  $X$  dell'aria all'uscita della batteria;
2. La potenza sensibile scambiata  $Q_s$ ;
3. La potenza latente scambiata  $Q_l$ ;
4. Il rapporto fra la potenza sensibile e totale scambiata  $SHF = Q_s/(Q_s + Q_l)$ .

### Esercizio n°11 (raffreddamento e deumidificazione)

Si calcoli il valore di SHF con i dati di  $X$ ,  $T_{bs}$  e  $p$  dell'esercizio precedente considerando i seguenti valori:

1.  $T_{ADP} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $BPF = 0,05$ ;
2.  $T_{ADP} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $BPF = 0,2$ ;
3.  $T_{ADP} = 5 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $BPF = 0,1$ ;
4.  $T_{ADP} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $BPF = 0,1$ ;

Come varia SHF fra il caso 1 e 2?

Come varia SHF fra il caso 3 e 4?

### Esercizio n°12 (Miscelazione)

Si determini in modo analitico e mediante l'uso del diagramma psicrometrico la condizione di uscita dell'aria ( $m$ ,  $h$ ,  $X$  e  $T_{bs}$ ) da una cassetta di miscelazione sapendo che le due correnti in ingresso sono nel seguente stato:

$$X_1 = 0,015 \text{ kg}_V/\text{kg}_{AS};$$

$$T_{bs1} = 35 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$p_1 = 101325 \text{ Pa};$$

$$m_1 = 1,5 \text{ kg}_{AS}/\text{s};$$

$$\phi = 30 \text{ } \%;$$

$$T_{bs2} = 30 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$p_2 = 101325 \text{ Pa};$$

$$m_2 = 1550 \text{ m}^3/\text{h};$$

**Esercizio n°13 (Umidificazione a liquido)**

Una portata  $m = 3 \text{ kg}_{AS}/\text{s}$  di aria umida nelle condizioni  $p = 101325 \text{ Pa}$ ,  $T_{bs1} = 20 \text{ °C}$  e  $\varphi_1 = 10 \%$  deve essere portata nelle condizioni di  $T_{bs2} = 20 \text{ °C}$  e  $\varphi_2 = 50 \%$ . Si analizzi il caso in cui il trattamento è effettuato;

1. riscaldando l'aria con una batteria di riscaldamento;
2. immettendo nella corrente di aria umida acqua liquida.

Si calcoli la portata di acqua fornita, l'efficienza dell'umidificatore, la potenza sensibile e latente scambiata durante il processo di umidificazione e quella sensibile scambiata durante la fase di riscaldamento.

**Esercizio n°14 (Umidificazione a vapore)**

Ripetere l'esercizio precedente considerando un'umidificazione con vapore avente entalpia  $h=2700 \text{ kJ/kg}$ . Si calcoli la portata di acqua fornita, la potenza sensibile e latente scambiata durante il processo di umidificazione e quella sensibile scambiata durante la successiva trasformazione di raffreddamento.

## Soluzioni

- Esercizio 5: [50,5 °C; 0,015 kg<sub>v</sub>/kg<sub>AS</sub>]
- Esercizio 6: [350 kW; 315 MJ]
- Esercizio 7: [18,5 °C; 0,0092 kg<sub>v</sub>/kg<sub>AS</sub>]
- Esercizio 8: [25 °C]
- Esercizio 9: [0,3; 0,25; 0,18]
- Esercizio 10: [12,1 °C; 0,0084 kg<sub>v</sub>/kg<sub>AS</sub>; - 94 kW; - 82,5 kW; 0,53]
- Esercizio 11: [costante; cresce]
- Esercizio 12: [2 kg<sub>AS</sub>/s; 67 kJ/kg<sub>AS</sub>; 0,013 kg<sub>v</sub>/kg<sub>AS</sub>; 33,5 °C]
- Esercizio 13: [0,018 kg/s; 69 %; - 45 kW; 45 kW; 45 kW]
- Esercizio 14: [0,018 kg/s; 9 kW; 45 kW; -9 kW]