

Capitolo 10

Applicazioni di psicrometria

Fisica Tecnica

Docente: Riccardo Zamolo (rzamolo@units.it)



A.A. 2025/2026

Aria umida

- **Aria umida:** miscela di aria secca e vapore acqueo in cui l'aria secca è trattata come se fosse una sostanza pura.
- **Aria umida come gas perfetto:** $T \gg T_{\text{critica}}$ e $p_{\text{vap,acqua}} \ll p_{\text{critica,acqua}}$
- **Miscela di gas perfetti:** sistema termodinamico costituito da una miscela omogenea di n (2) componenti non reagenti allo stato gassoso, **ciascuno dei quali** si comporta come **gas perfetto**.
- All'equilibrio lo stato del sistema è determinato dal valore di **due proprietà intensive/specifiche** e dalla **composizione** del sistema.
- Grandezze specifiche riferite alla **massa di aria secca**

Aria umida – Pressioni parziali

- **Pressione parziale** di un componente gassoso di una miscela: pressione alla quale sarebbe sottoposto il componente se occupasse **da solo l'intero volume V** occupato dalla miscela alla medesima temperatura T.
- **Legge di Dalton:** la somma delle pressioni parziali è pari alla pressione totale della miscela.

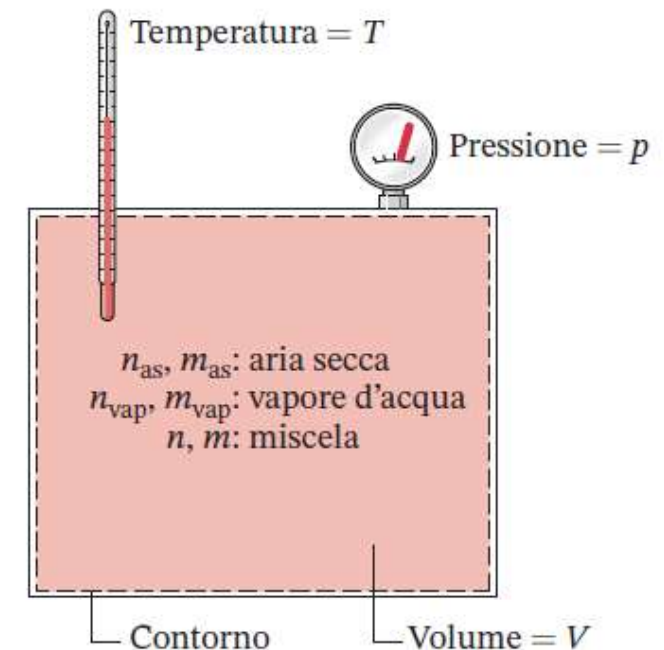
$$p = \sum_{i=1}^N p_i$$

aria umida

$$p = p_{as} + p_{vap}$$

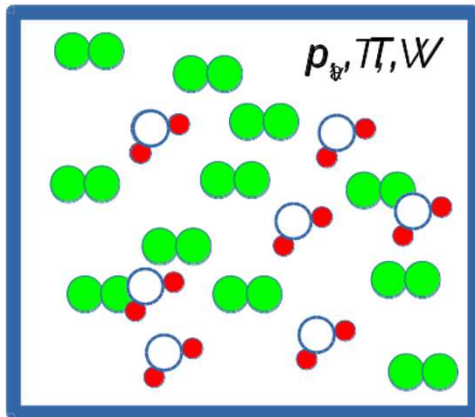
Pressione parziale
vapore (vap)

Pressione parziale
aria secca (as)



Aria Umida – Dalton e frazione molare

- **Legge di Dalton:** la somma delle pressioni parziali è pari alla pressione totale della miscela



$$p_{as} = \frac{n_{as} \cdot \bar{R} \cdot T}{V}$$

$$p_{vap} = \frac{n_{vap} \cdot \bar{R} \cdot T}{V}$$

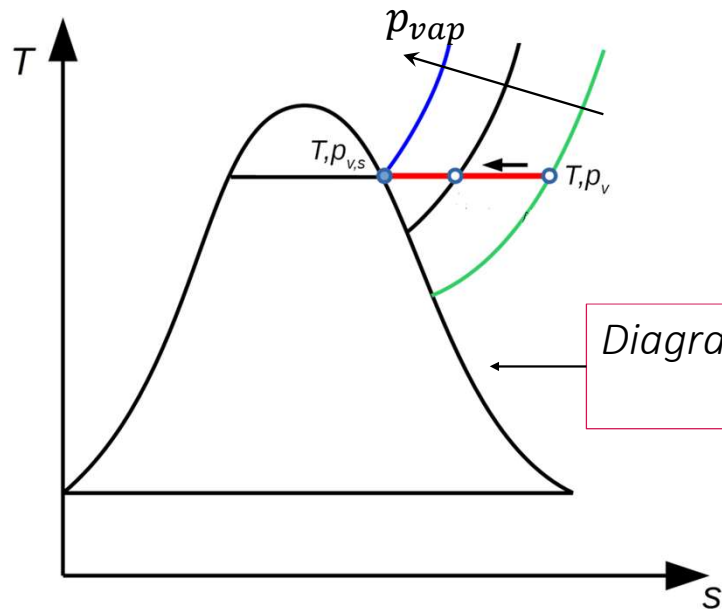
$$p_{as} + p_{vap} = \frac{(n_{as} + n_{vap}) \cdot \bar{R} \cdot T}{V} = \frac{n \cdot \bar{R} \cdot T}{V} = p$$

Frazione molare X : rapporto tra il numero di moli di un componente i e il numero di moli totali

$$X_i = \frac{n_i}{n} = \frac{n_i \cdot \bar{R} \cdot T / V}{n \cdot \bar{R} \cdot T / V} = \frac{p_i}{p} \quad \Rightarrow \quad \begin{aligned} X_{as} &= \frac{p_{as}}{p} \\ X_{vap} &= \frac{p_{vap}}{p} \end{aligned}$$

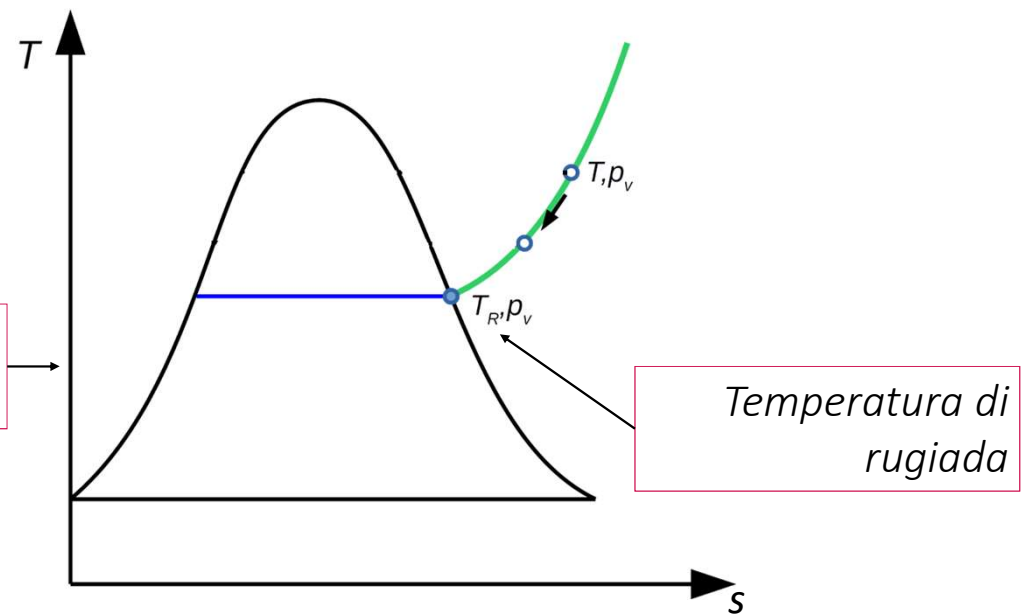
Condensazione del vapore

Aumento moli del vapore a temperatura costante => aumento p_{vap} :



Diagrammi di stato dell'acqua

Raffreddamento dell'aria a $p_{vap} = cost$, => $n_{vap} = cost$ (quantità vapore costante)



Temperatura di rugiada

Umidità assoluta (o specifica)

$$\omega = \frac{m_{vap}}{m_{as}} = \frac{M_{vap} \cdot p_{vap} \cdot \cancel{V/(\bar{R} \cdot T)}}{M_{as} \cdot p_{as} \cdot \cancel{V/(\bar{R} \cdot T)}} = \frac{M_{vap} \cdot p_{vap}}{M_{as} \cdot p_{as}} = 0.622 \frac{p_{vap}}{p - p_{vap}} \quad \left[\frac{\text{kg}_{vap}}{\text{kg}_{as}} = - \right]$$

$\nearrow 18$
 $\nwarrow \approx 29$

$\nearrow p - p_{vap}$

$$p_i = \frac{n_i \cdot \bar{R} \cdot T}{V} \quad \Rightarrow \quad n_i = \frac{p_i \cdot V}{\bar{R} \cdot T} \quad \Rightarrow \quad m_i = M_i \cdot n_i = M_i \frac{p_i \cdot V}{\bar{R} \cdot T}$$

Umidità relativa

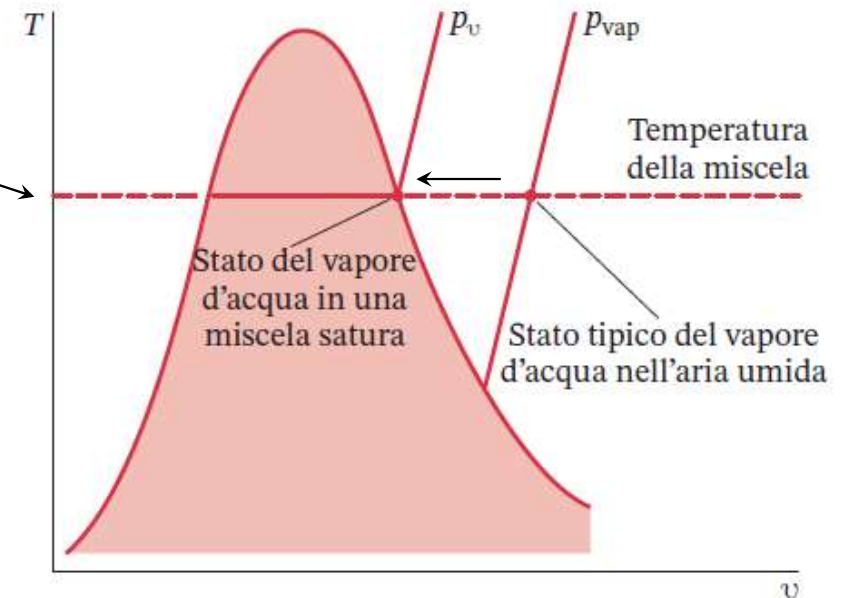
$$m_i = M_i \cdot n_i = M_i \frac{p_i \cdot V}{\bar{R} \cdot T}$$

$$\phi = \frac{m_{vap}}{m_v(T)} = \frac{\cancel{M_{vap}} \cdot p_{vap} \cdot \cancel{V}/(\cancel{\bar{R}} \cdot T)}{\cancel{M_{vap}} \cdot p_v(T) \cdot \cancel{V}/(\cancel{\bar{R}} \cdot T)} = \frac{p_{vap}}{p_v(T)}$$

$p_v(T)$ = pressione di saturazione

$$\Rightarrow p_{vap} = \phi \cdot p_v(T)$$

$$\Rightarrow \omega = 0.622 \frac{p_{vap}}{p - p_{vap}} = 0.622 \cdot \frac{\phi \cdot p_v(T)}{p - \phi \cdot p_v(T)}$$



Calcolo della pressione di saturazione

- La pressione di saturazione è funzione della sola temperatura
- Può essere approssimata con le seguenti relazioni

$$p_v(t) = 611 \cdot e^{\frac{17.3 \cdot t}{237+t}} \text{ per } t \geq 0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$p_v(t) = 611 \cdot e^{\frac{21.9 \cdot t}{266+t}} \text{ per } t < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

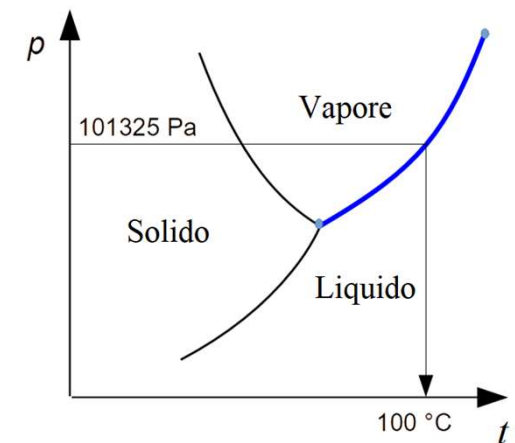
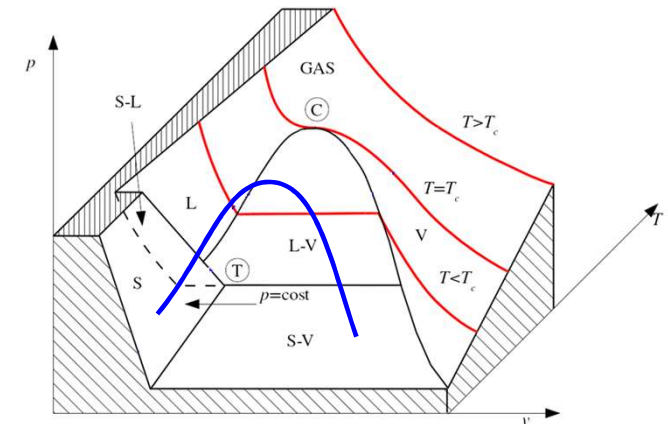
p_v [Pa],

t [°C]

Formule inverse:

$$t = \frac{237}{\frac{17.3}{\ln\left(\frac{p_v}{611}\right)} - 1} \text{ } [^\circ\text{C}]$$

$$t = \frac{266}{\frac{21.9}{\ln\left(\frac{p_v}{611}\right)} - 1} \text{ } [^\circ\text{C}]$$



Entalpia aria umida

Entalpia di miscela (H) quantità estensiva => si somma

$$H = H_{as} + H_{vap} = m_{as} \cdot h_{as} + m_{vap} \cdot h_{vap}$$

Entalpia specifica di miscela (J):

$$J = \frac{H}{m_{as}} = h_{as} + \frac{m_{vap}}{m_{as}} \cdot h_{vap} = h_{as} + \omega \cdot h_{vap} \quad \left(\frac{\text{J}}{\text{kg}_{as}} \right)$$

$$h_{as} = c_{p,as}(T - 0^\circ \text{C}) = c_{p,as} \cdot t$$

$$h_{vap} \approx h_v(T)$$

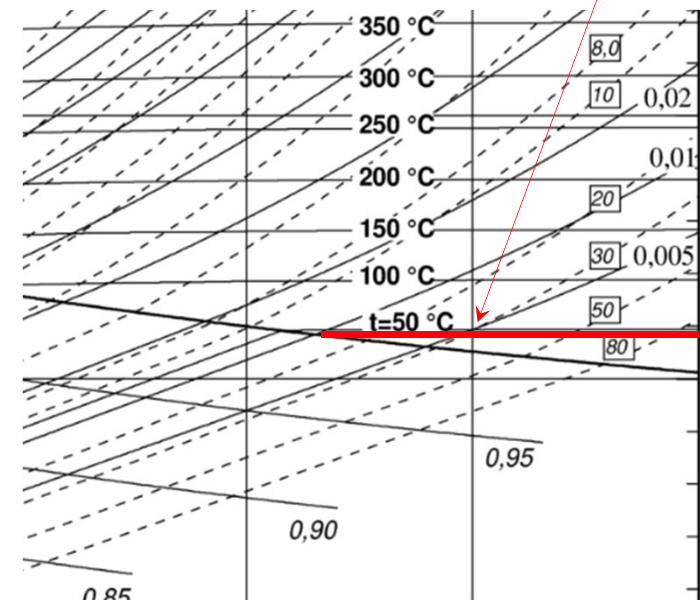
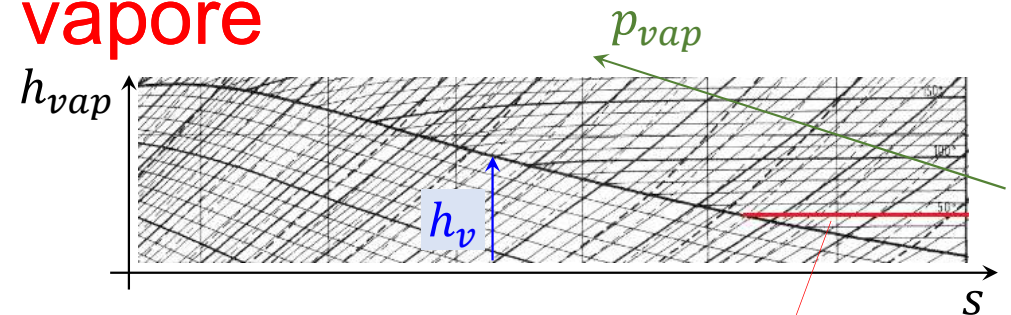
Entalpia del vapore
saturo (secco)

Condizioni:

- vapore surriscaldato
- basse pressioni vapore (<10kPa)
- Le quantità specifiche sono riferite alla **massa dell' aria secca**

Determinazione entalpia del vapore

- La pressione parziale del vapore p_{vap} è **bassa**
- Il comportamento è di **gas ideale**
- L'**entalpia** è funzione della **sola temperatura** $h_{vap}(p_{vap}, T) \approx h_v(T)$
- $h_v(T)$ entalpia del **vapore saturo** (secco) alla **stessa temperatura**



Determinazione entalpia del vapore

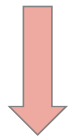
- Il comportamento è di gas ideale
- L'entalpia è funzione (di stato) della sola temperatura
- Costruisco trasformazione da stato di riferimento (0°C) ad uno stato alla stessa temperatura
- Contributo di h_{lv} per tenere conto di eventuali cambi di fase (vaporizzazione/condensazione)

$h_l(0^\circ\text{C}) = 0$ (entalpia sulla curva limita inferiore)

$h_{lv}(0^\circ\text{C}) = 2501 \text{ kJ/kg}$ (calore latente vaporizzazione)

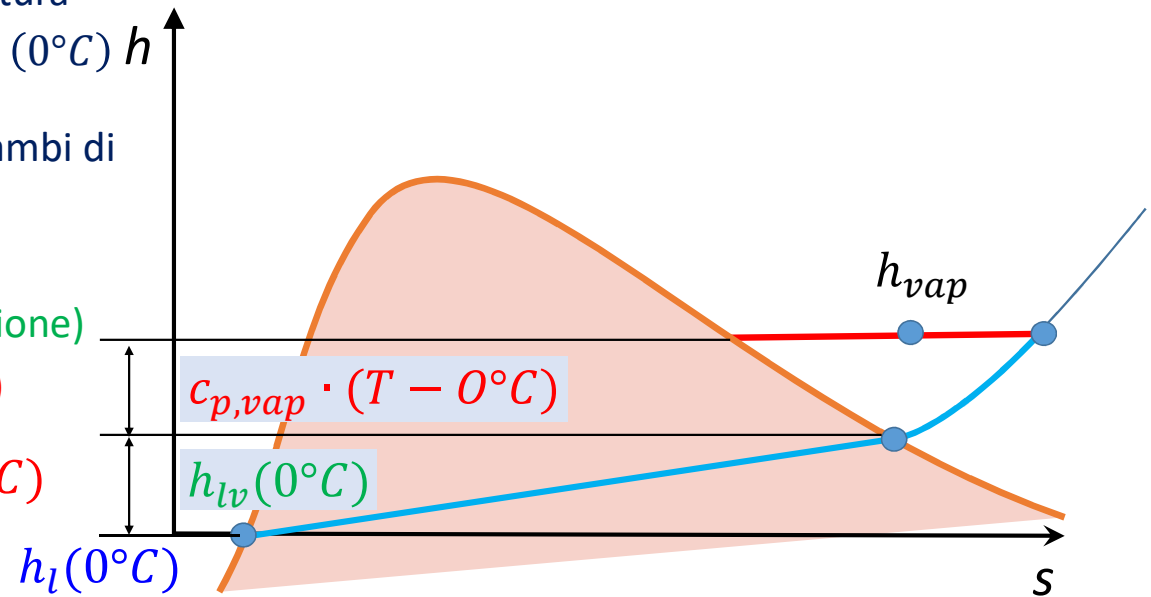
$c_{p,vap} = 1.875 \text{ kJ/(kg K)}$ (calore specifico vapore)

$$h_{vap} = h_l(0^\circ\text{C}) + h_{lv}(0^\circ\text{C}) + c_{p,vap} \cdot (T - 0^\circ\text{C})$$



Temperatura in $^\circ\text{C}$

$$h_{vap} = h_{lv}(0^\circ\text{C}) + c_{p,vap} \cdot t$$



Entalpia specifica dell'aria umida

$$J = \frac{H}{m_{as}} = h_{as} + \omega \cdot h_{vap} \quad \left[\frac{\text{J}}{\text{kg}_{as}} \right]$$

$$J = c_{p,as} \cdot t + \omega \cdot (h_{lv} + c_{p,vap} \cdot t)$$

$$J = 1.005 \cdot t + \omega \cdot (2501 + 1.875 \cdot t) \quad \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{as}} \right]$$

Condizioni:

- vapore surriscaldato
- basse pressioni vapore (<10kPa)
- Le quantità specifiche sono riferite alla massa dell' **aria secca**

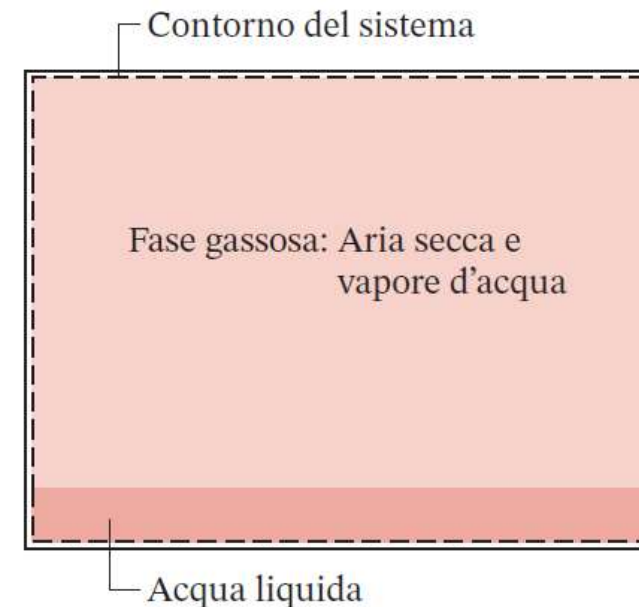
$$c_{p,as} = 1.005 \text{ kJ}/(\text{kg K}) \quad (\text{calore specifico a } p = \text{cost aria secca})$$

$$h_{lv} = 2501 \text{ kJ}/\text{kg} \quad (\text{calore latente vaporizzazione acqua})$$

$$c_{p,vap} = 1.875 \text{ kJ}/(\text{kg K}) \quad (\text{calore specifico a } p = \text{cost vapore})$$

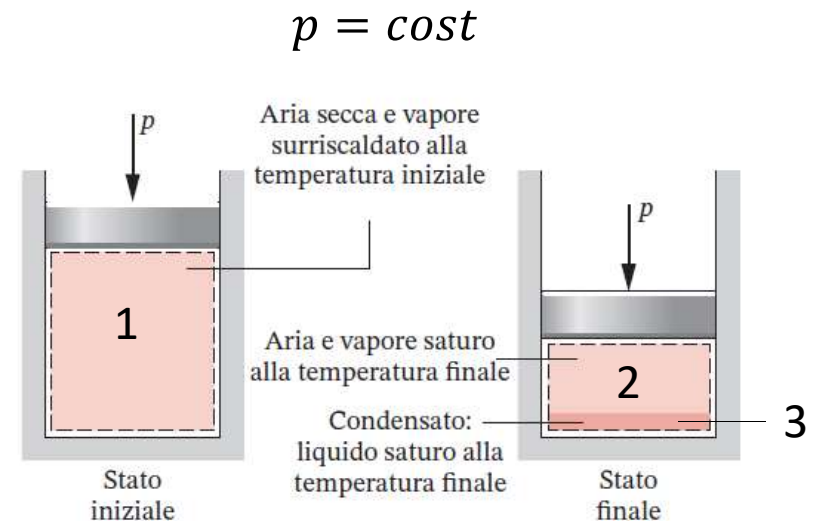
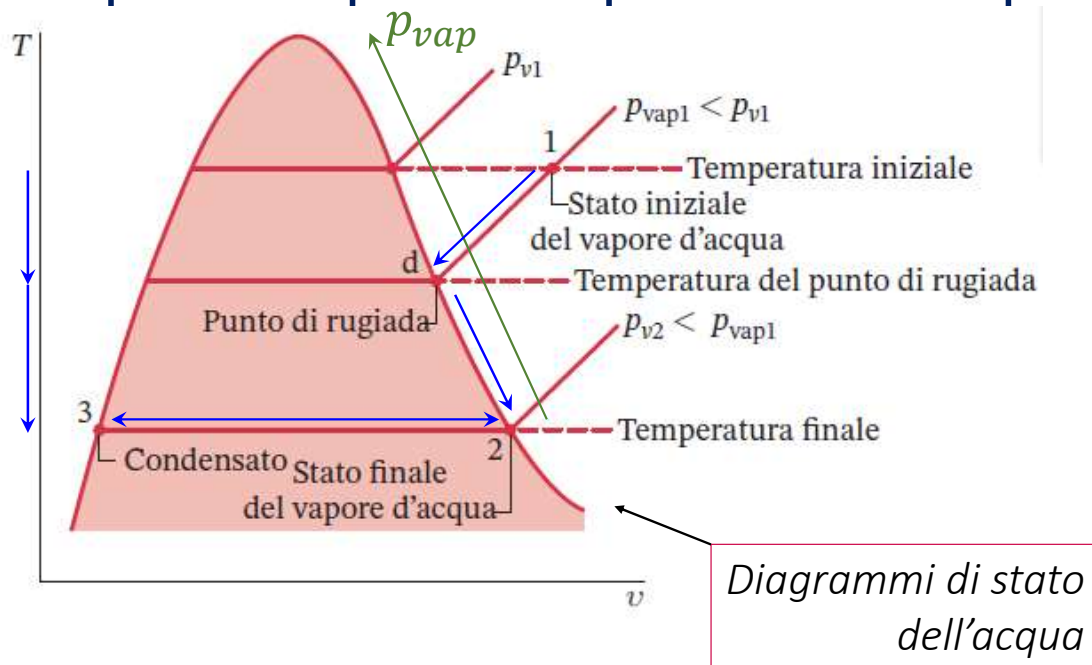
Modellizzazione aria umida in equilibrio con acqua liquida

- Se non sono consentite interazioni con l'ambiente circostante, il liquido evapora finché la fase gassosa si **satura** e il sistema raggiunge uno **stato di equilibrio**.
- L'aria non altera l'equilibrio del vapore
- **Idealizzazioni:**
 - Aria secca e vapore **gas ideali**
 - $p_{vap} = p_v(T)$ (condizioni di **saturazione**)
 - Se non ci fosse l'aria, ritorneremmo alla situazione di equilibrio di sola acqua liquido+vapore ($p = p_{vap} = p_v(T)$)



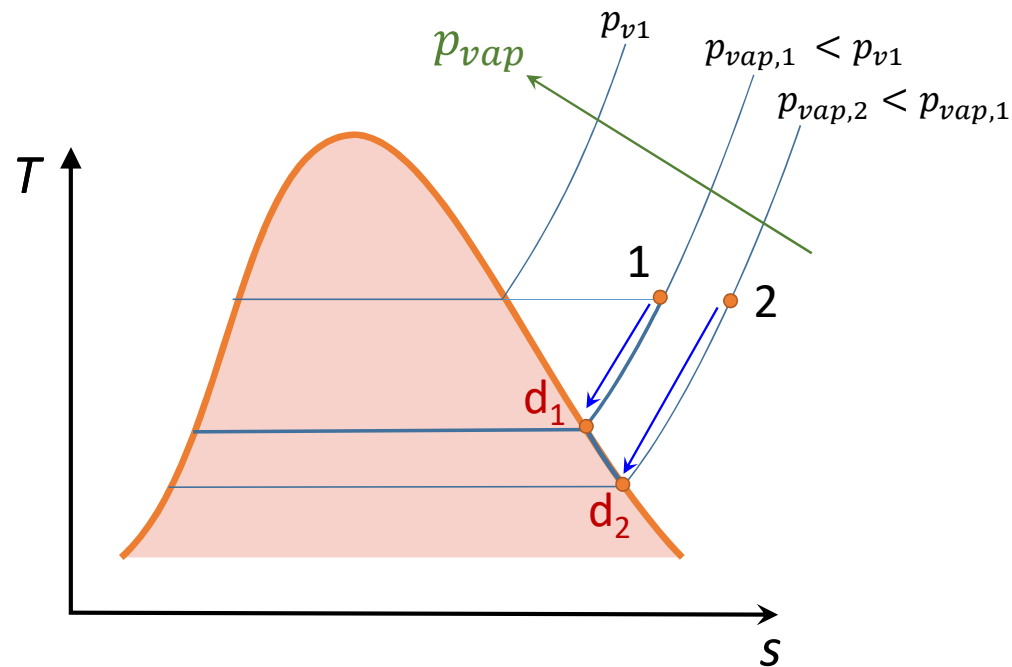
Temperatura di rugiada

- La **temperatura di rugiada** è la temperatura di saturazione del vapor d'acqua corrispondente alla pressione parziale del vapore



Temperatura di rugiada

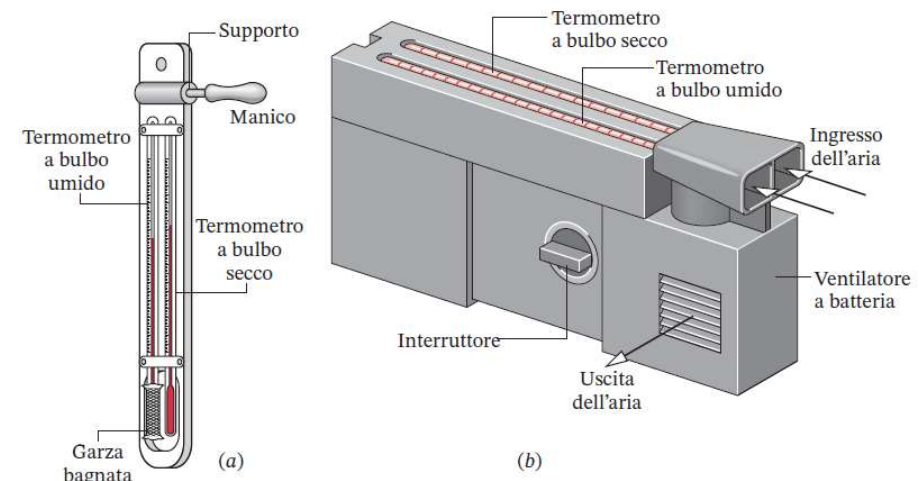
- La **temperatura di rugiada (dew point)** è la temperatura di saturazione del vapor d'acqua corrispondente alla pressione parziale del vapore nella miscela.



Temperatura di bulbo umido e di bulbo secco

E' possibile determinare l'**umidità** (relativa o assoluta) di una corrente d'aria umida attraverso la **misura di due temperature**: quella di **bulbo secco** e quella di **bulbo umido**.

- **Temperatura di bulbo secco** ($t_{bs} = t$): è quella misurata da un termometro immerso nell'aria umida. Coincide con la «vecchia» temperatura t .
- **Temperatura di bulbo umido** ($t_{bu} \leq t$): è quella misurata da un termometro il cui sensore è avvolto in una **garza bagnata d'acqua e ventilato** dalla corrente d'aria umida. L'acqua della garza, **evaporando, asporta calore di vaporizzazione** che raffredda il termometro. Il termometro misura quindi una **temperatura minore** (o uguale) a quella di bulbo secco. Le due temperature coincidono quando l'umidità relativa è 100%: l'acqua della garza non può evaporare e quindi $t_{bu} = t$.

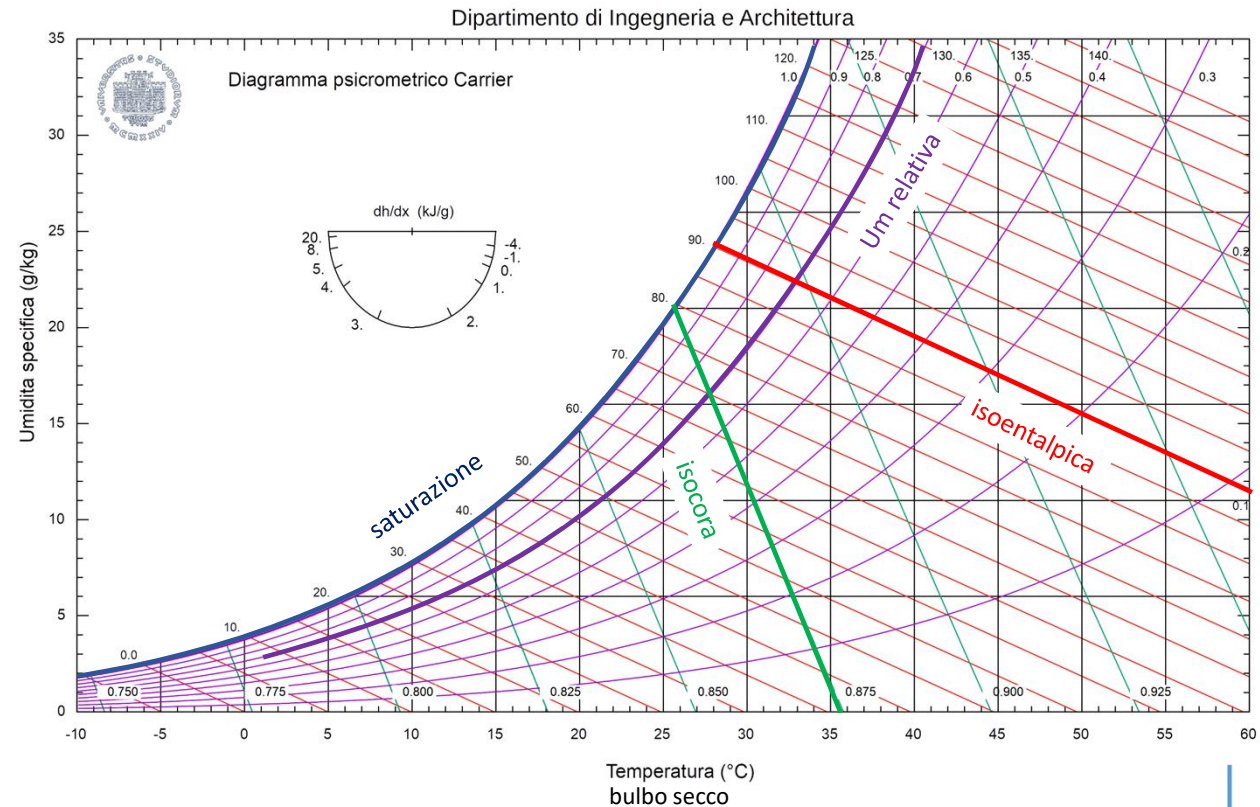


Sapendo che la «trasformazione» che porta dallo stato dell'aria umida di cui vogliamo misurare l'umidità (**bulbo secco**) a quella in condizioni di saturazione (al **bulbo umido**) è **isoentalpica** ($j = \text{cost}$), è possibile calcolare l'umidità tramite le formule appena viste. Risulta però molto più comodo usare i **diagrammi psicrometrici**.

Diagramma psicrometrico Carrier

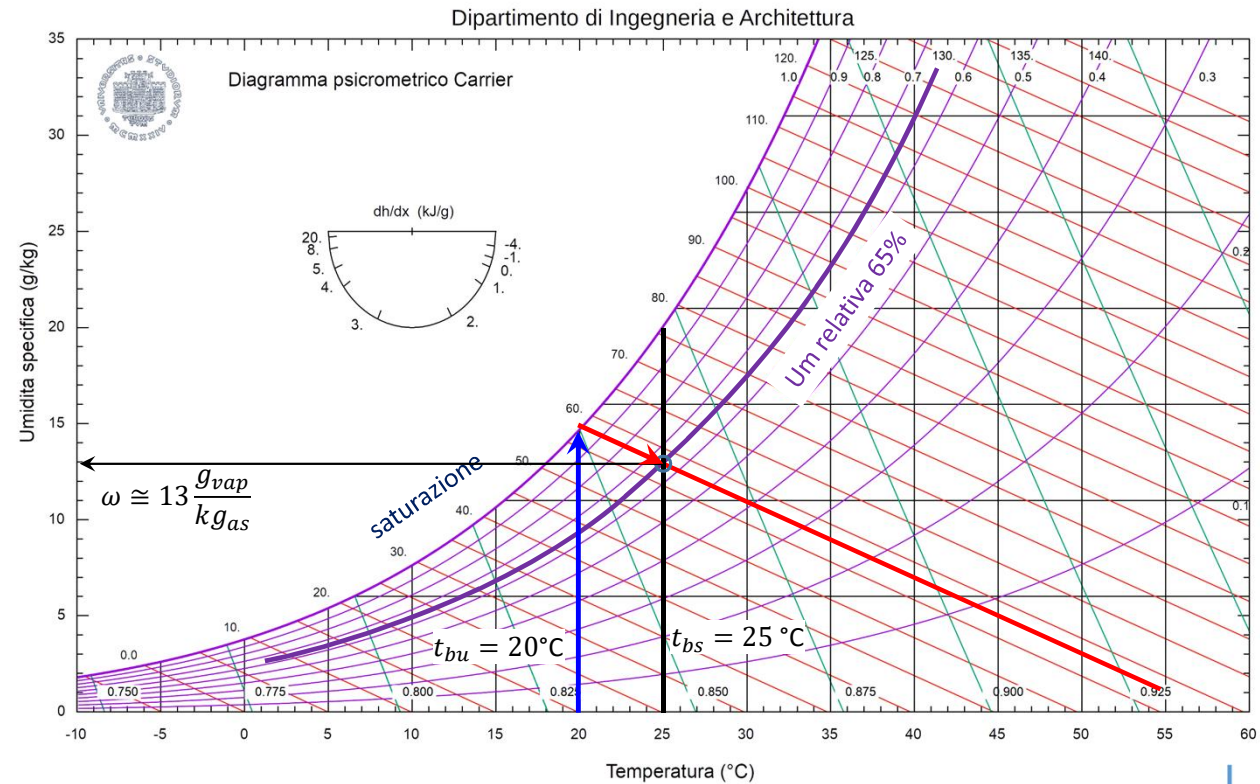
Curve:

- umidità relativa costante
- isoentalpiche (entalpia di miscela J) coincidenti con temperatura bulbo umido costante
- isocore
- curva di saturazione $\phi = 1$



Stato aria con diagramma Carrier

- Misuro la temperatura di bulbo secco t_{bs} (es $t_{bs} = 25\text{ °C}$)
- Misuro temperatura di bulbo umido t_{bu} (es $t_{bu} = 20\text{ °C}$)
- Intersezione bulbo secco e umido (=isoentalpica J) identifica lo stato

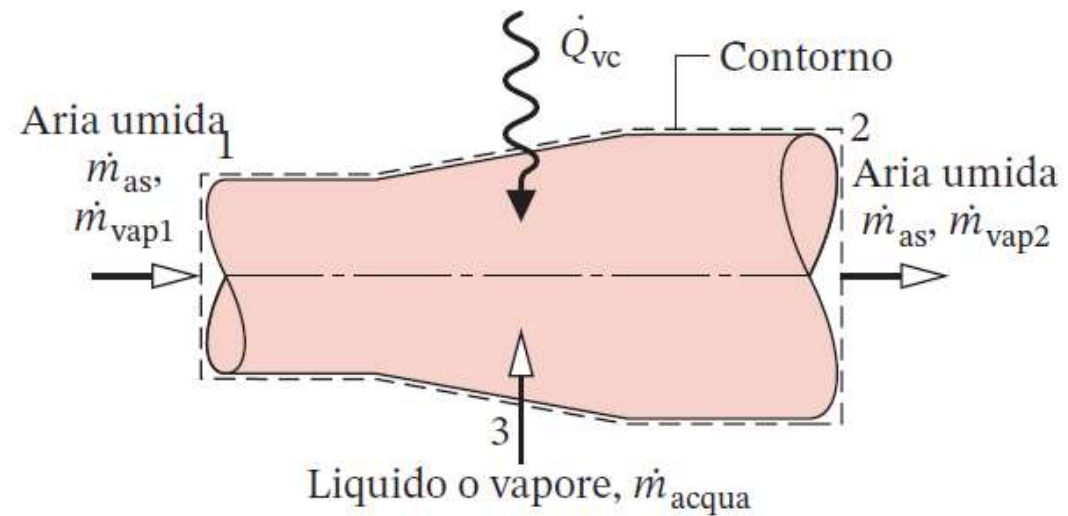


Analisi dei processi di condizionamento dell'aria - 1

Sistema generico di trattamento aria umida

Assunzioni:

- volume di controllo in funzionamento stazionario
- variazioni di energia cinetica e potenziale trascurabili
- consentito lo scambio termico
- consentita l'immissione di acqua allo stato liquido o vapore
- flusso monodimensionale



Analisi dei processi di condizionamento dell'aria - 2

Sistema generico di trattamento aria umida

Bilancio di massa aria secca

$$\dot{m}_{as} = \dot{m}_{as1} = \dot{m}_{as2}$$

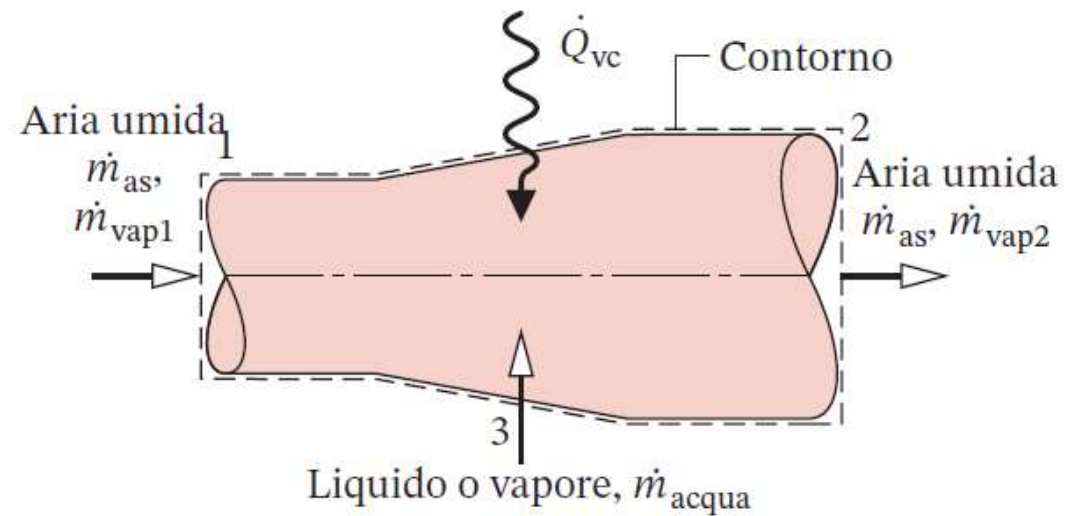
Bilancio di massa vapore d'acqua

$$\dot{m}_{vap2} = \dot{m}_{acqua} + \dot{m}_{vap1}$$

$$\dot{m}_{vap1} = \omega_1 \cdot \dot{m}_{as}$$

$$\dot{m}_{vap2} = \omega_2 \cdot \dot{m}_{as}$$

$$\dot{m}_{acqua} = (\omega_2 - \omega_1) \cdot \dot{m}_{as}$$



Analisi dei processi di condizionamento dell'aria - 3

Sistema generico di trattamento aria umida

Bilancio energetico = bilancio calore + entalpia (assumendo $L=0$):

$$\dot{Q}_{vc} + \dot{m}_{as} \cdot J_1 + \dot{m}_{acqua} \cdot h_{acqua} - \dot{m}_{as} \cdot J_2 = 0$$

$$\dot{Q}_{vc} + \dot{m}_{as} \cdot J_1 + \dot{m}_{as} \cdot (\omega_2 - \omega_1) \cdot h_{acqua} - \dot{m}_{as} \cdot J_2 = 0$$

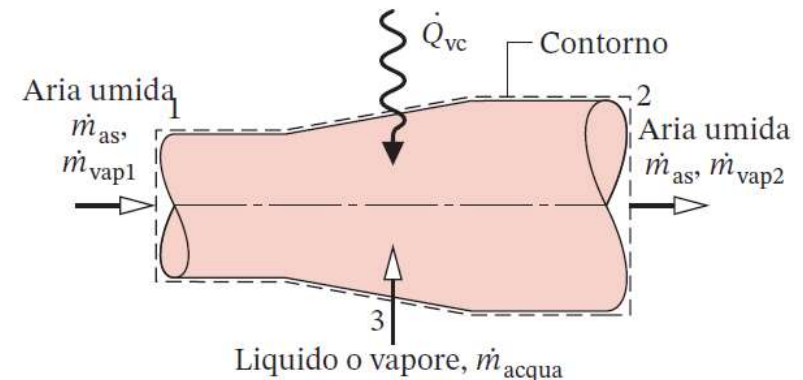
$$\dot{Q}_{vc} + \dot{m}_{as} \cdot [(h_{as1} - h_{as2}) + \omega_1 \cdot h_{vap1} + (\omega_2 - \omega_1) \cdot h_{acqua} - \omega_2 \cdot h_{vap2}] = 0$$

Dove:

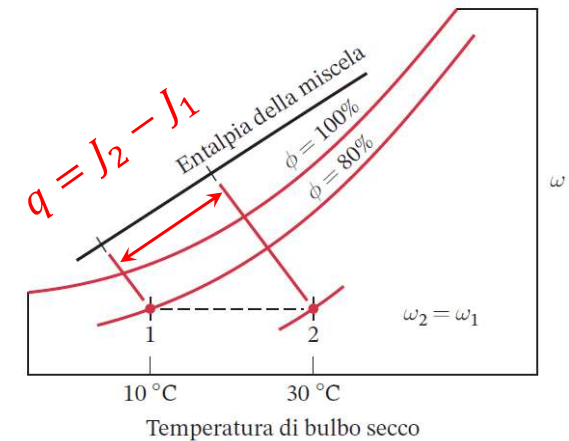
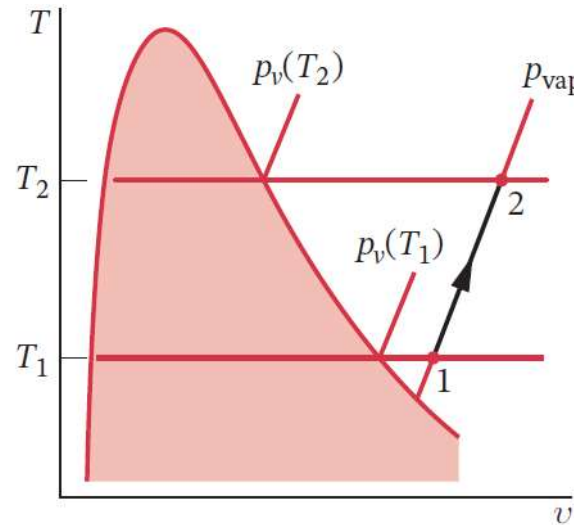
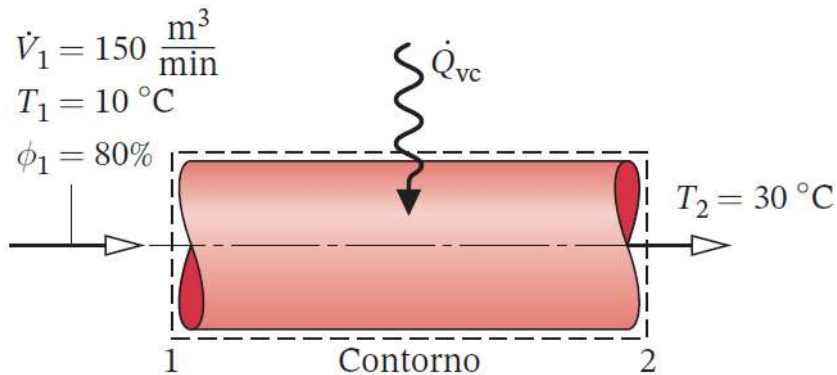
$$h_{as1} - h_{as2} = c_{p,as}(t_1 - t_2)$$

$$h_{vap1} = h_{lv} + c_{p,vap}t_1$$

$$h_{vap2} = h_{lv} + c_{p,vap}t_2$$



Riscaldamento semplice



$$\dot{m}_{acqua} = 0 \Rightarrow \omega_2 = \omega_1 = \omega$$

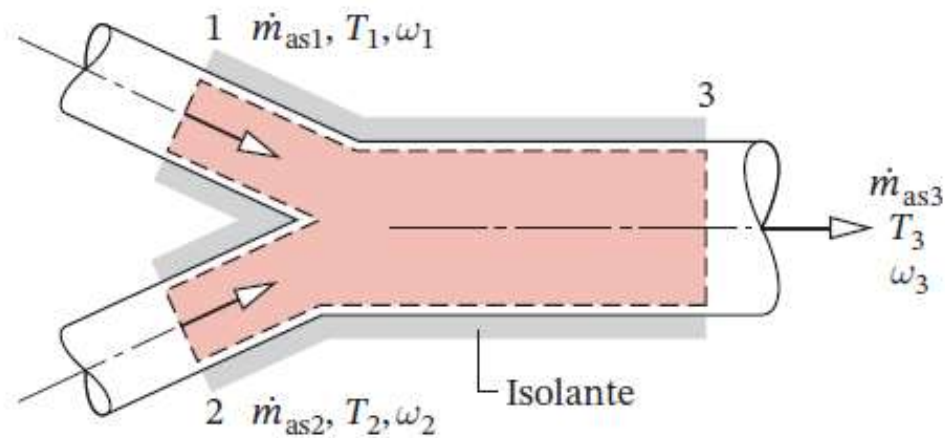
$$\dot{Q}_{vc} + \dot{m}_{as} \cdot J_1 + \cancel{\dot{m}_{acqua} \cdot h_{acqua}} - \dot{m}_{as} \cdot J_2 = 0$$

$$\dot{Q}_{vc} = \dot{m}_{as} \cdot (J_2 - J_1) = \dot{m}_{as} \cdot [c_{p,as} \cdot t_2 + \omega \cdot (c_{p,vap} \cdot t_2 + \cancel{h_{lv}}) - c_{p,as} \cdot t_1 - \omega \cdot (c_{p,va} \cdot t_1 + \cancel{h_{lv}})]$$

$$\dot{Q}_{vc} = \dot{m}_{as} \cdot (c_{p,as} + \omega \cdot c_{p,va}) \cdot (t_2 - t_1) = \dot{m}_{as} \cdot c_{p,au} \cdot (t_2 - t_1)$$

Calore specifico dell'aria umida

Miscelazione adiabatica di due correnti di aria umida



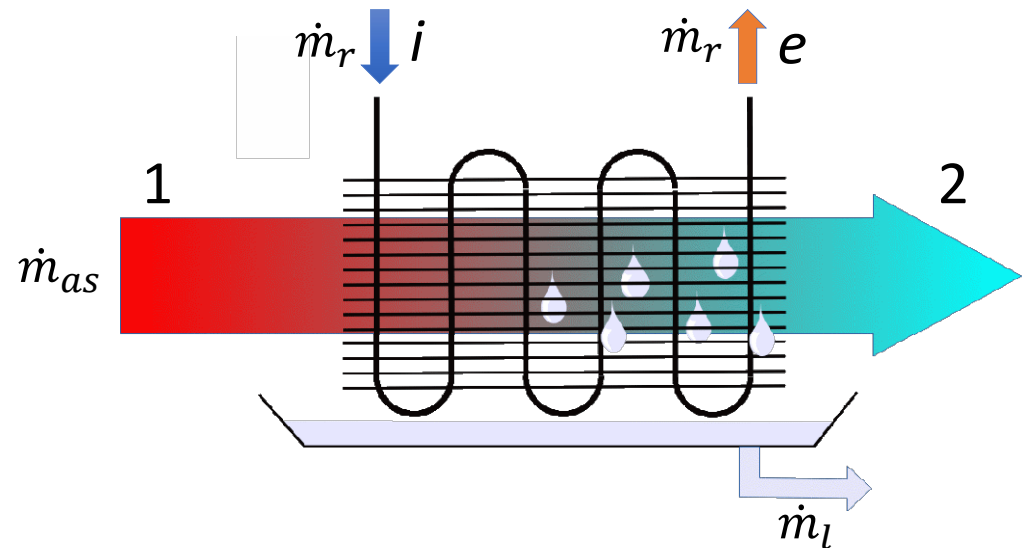
$$\dot{m}_{as1} \cdot (h_{as1} + \omega_1 h_{vap,1}) + \dot{m}_{as2} \cdot (h_{as2} + \omega_2 h_{vap,2}) = \dot{m}_{as3} \cdot (h_{as3} + \omega_3 h_{v3})$$

$$\omega_1 \dot{m}_{as1} + \omega_2 \dot{m}_{as2} = \omega_3 \dot{m}_{as3}$$

$$\dot{m}_{as1} + \dot{m}_{as2} = \dot{m}_{as3}$$

Raffreddamento con deumidificazione

- La portata di aria umida, nelle condizioni 1, attraversa una superficie fredda (batteria)
- La batteria è ad una temperatura media t_s inferiore alla temperatura di rugiada dell'aria
- La portata d'aria si raffredda e si deumidifica
- L'umidità condensata $\dot{m}_l$ deve essere raccolta e drenata
- La batteria fredda è raffreddata da una portata di fluido freddo che entra nelle condizioni i ed esce nelle condizioni e
- Il flusso termico da asportare è $|\dot{Q}_{12}|$



Raffreddamento con deumidificazione

- La condizione di uscita può essere rappresentata come un punto che congiunge l'ingresso dell'aria 1 ed il punto S. Questo è posto sulla curva a saturazione alla temperatura media superficiale della batteria fredda t_s
- Si determina il flusso da asportare alla batteria $|\dot{Q}_{12}^-|$

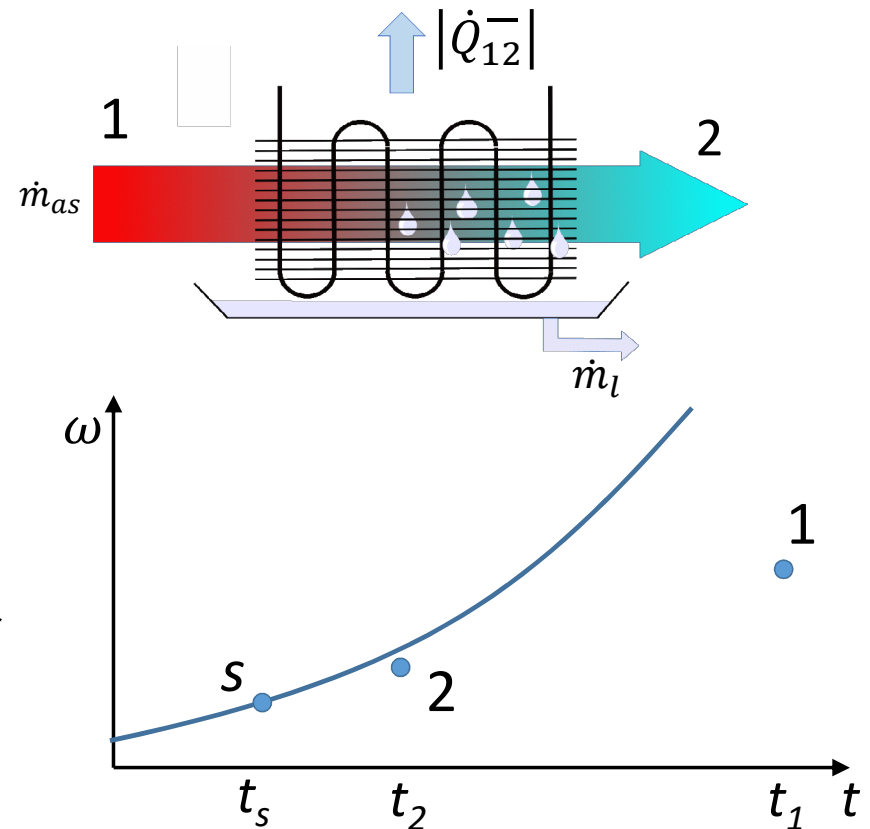
$$|\dot{Q}_{12}^-| = \dot{m}_{as} \cdot (J_1 - J_2) - \dot{m}_l \cdot h_s$$

$$\dot{m}_l = \dot{m}_{as} \cdot (\omega_1 - \omega_2)$$

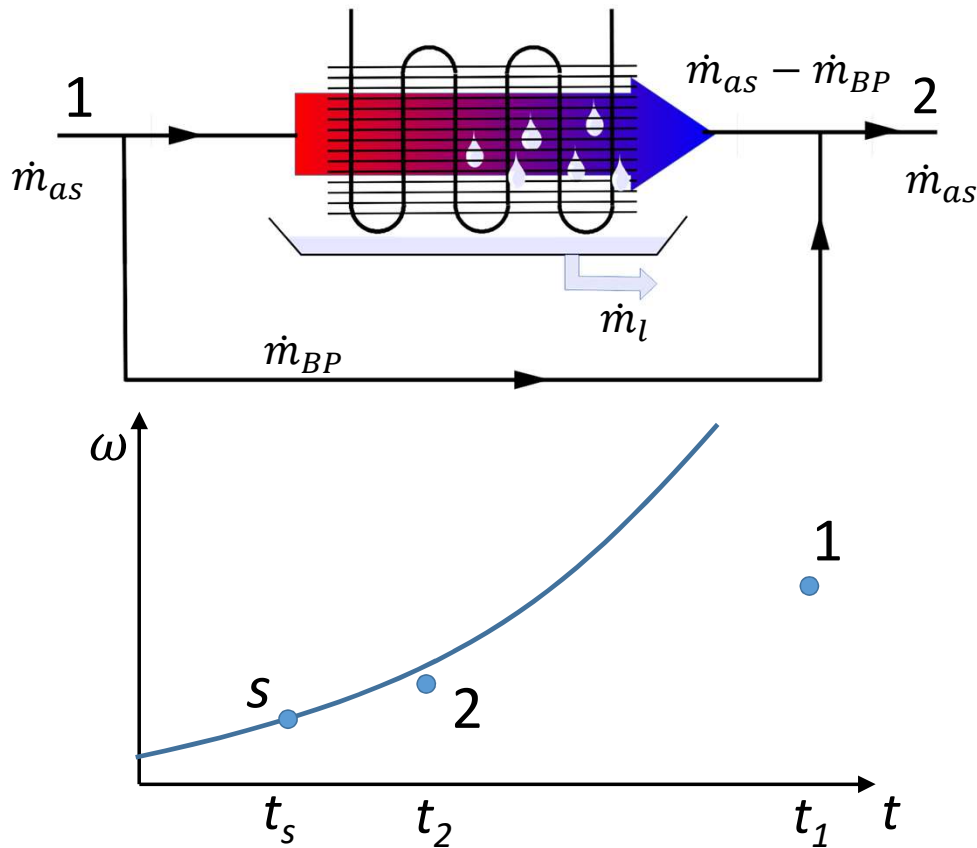
$$|\dot{Q}_{12}^-| = \dot{m}_{as} \cdot (J_1 - J_2) - \dot{m}_{as} \cdot (\omega_1 - \omega_2) \cdot h_s$$

$$h_s = c_l \cdot t_s, h_1, h_2 \text{ stesso ordine di grandezza}$$

$$|\dot{Q}_{12}^-| \cong \dot{m}_{as} \cdot (J_1 - J_2)$$

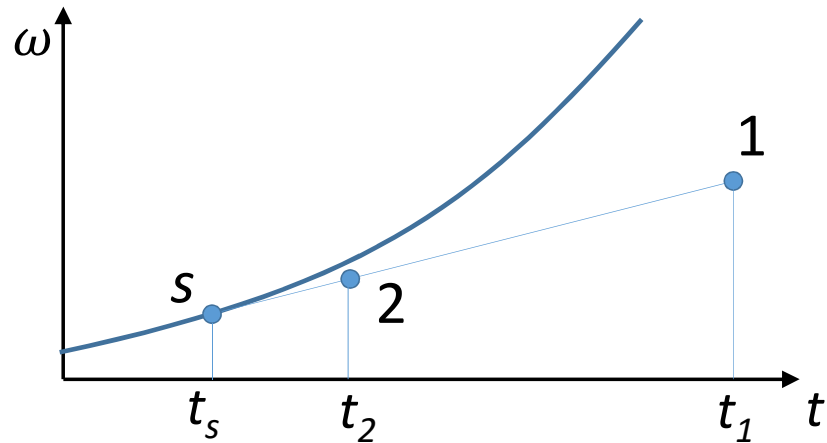
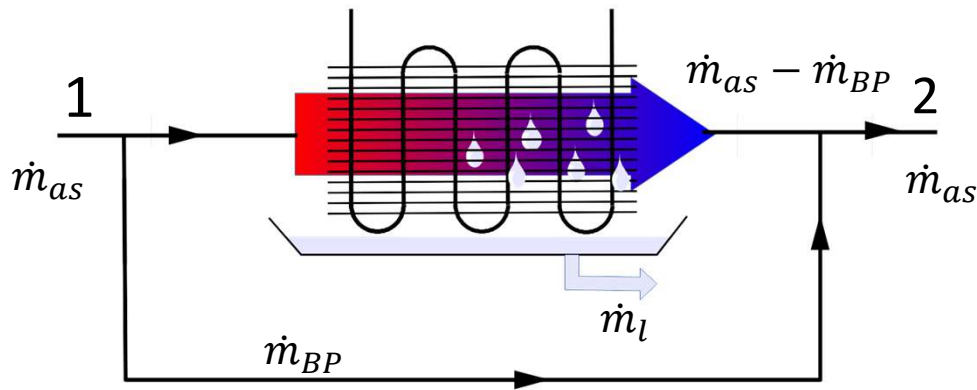


Bypass Factor



- Le condizioni del punto 2 dipendono dalle caratteristiche della batteria
- Si può pensare al processo di raffreddamento e deumidificazione come la miscelazione di due portate:
 - una portata $\dot{m}_{BP}$ che rimane inalterata
 - una portata $\dot{m}_{as} - \dot{m}_{BP}$ che esce in condizioni di saturazione S alla temperatura t_s
- Fattore di Bypass $BPF = \frac{\dot{m}_{BP}}{\dot{m}_{as}}$

Bypass Factor



$$(\dot{m}_{as} - \dot{m}_{BP}) \cdot J_S + \dot{m}_{BP} \cdot J_1 = J_2 \cdot \dot{m}_{as}$$

$$\Rightarrow J_2 = (1 - BPF) \cdot J_S + BPF \cdot J_1$$

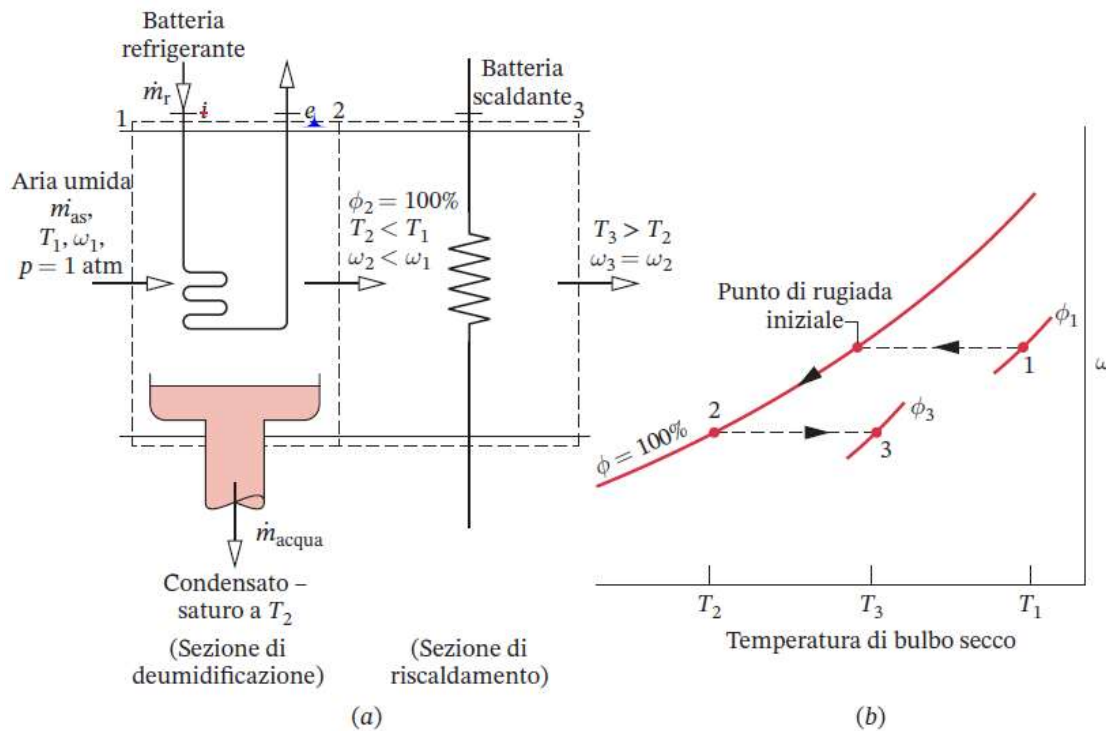
$$BPF = \frac{J_2 - J_S}{J_1 - J_S}$$

Stessi passaggi con l'umidità specifica:

$$BPF = \frac{\omega_2 - \omega_S}{\omega_1 - \omega_S}$$

Analisi dei processi di condizionamento dell'aria - 5

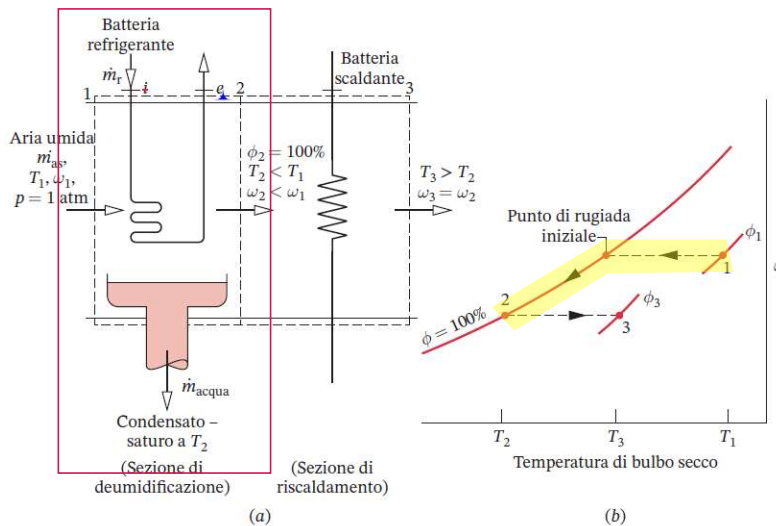
Deumidificazione con post-riscaldamento



1-2 raffreddamento con condensazione
2-3 post-riscaldamento

Deumidificazione con post-riscaldamento

Fase di deumidificazione



Bilancio di massa acqua

$$\dot{m}_{acqua} = \dot{m}_{as}(\omega_1 - \omega_2)$$

Bilancio di energia

$$\dot{m}_r \cdot (h_e - h_i) + \dot{m}_{as} \cdot (\omega_1 - \omega_2) h_{l2} = \dot{m}_{as} \cdot [(h_{as1} - h_{as2}) + (\omega_1 h_{v1} - \omega_2 h_{v2})]$$

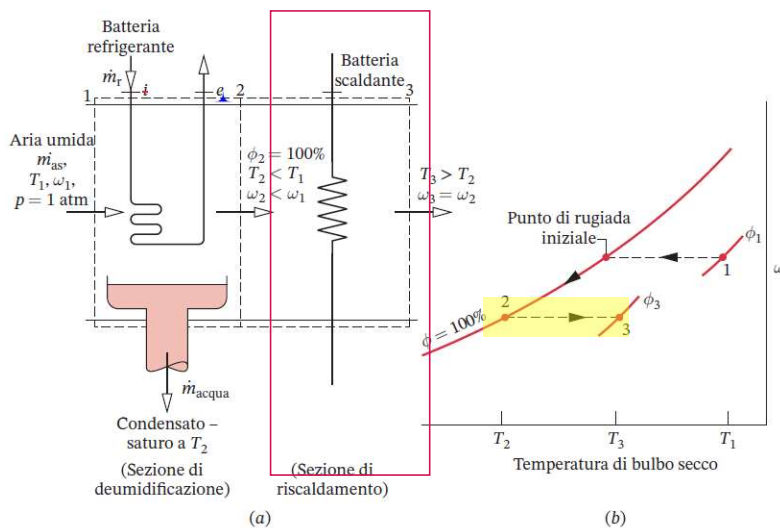
Portata massica refrigerante
che scorre nella serpentina

Entalpia condensato come
liquido saturo @ T_2

Analisi dei processi di condizionamento dell'aria - 6

Deumidificazione con post-riscaldamento

Fase di post-riscaldamento



Bilancio di massa vapor d'acqua

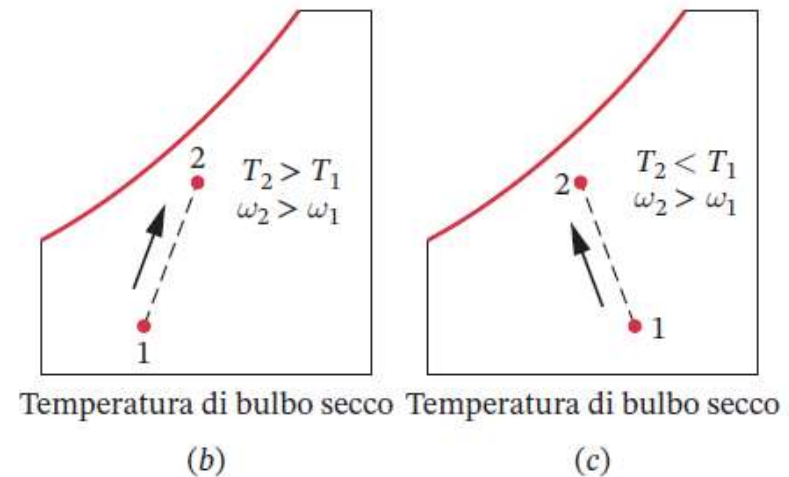
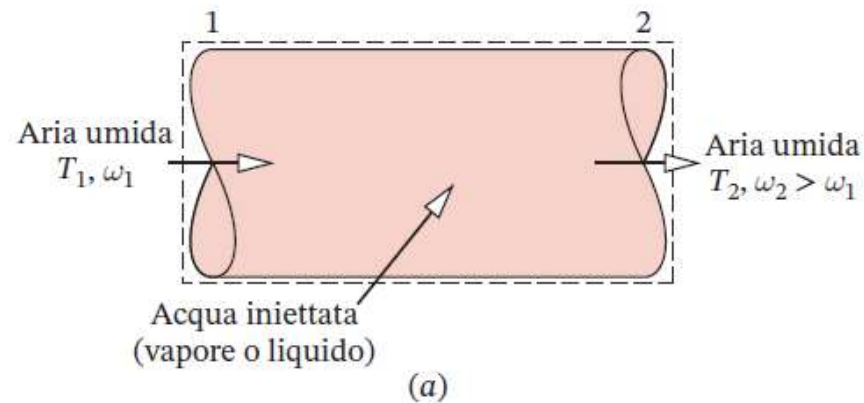
$$\omega_2 = \omega_3$$

Bilancio di energia

$$\dot{Q}_{vc,23} = \dot{m}_{as} \cdot (J_3 - J_2) = \dot{m}_{as} \cdot c_{p,au}(T_3 - T_2)$$

$$c_{p,au} = c_{p,as} + \omega_2 \cdot c_{p,v}$$

Trattamento di umidificazione



- (b) iniezione di vapore saturo o surriscaldato
- (c) iniezione di acqua liquida

Umidificazione a iniezione di vapore

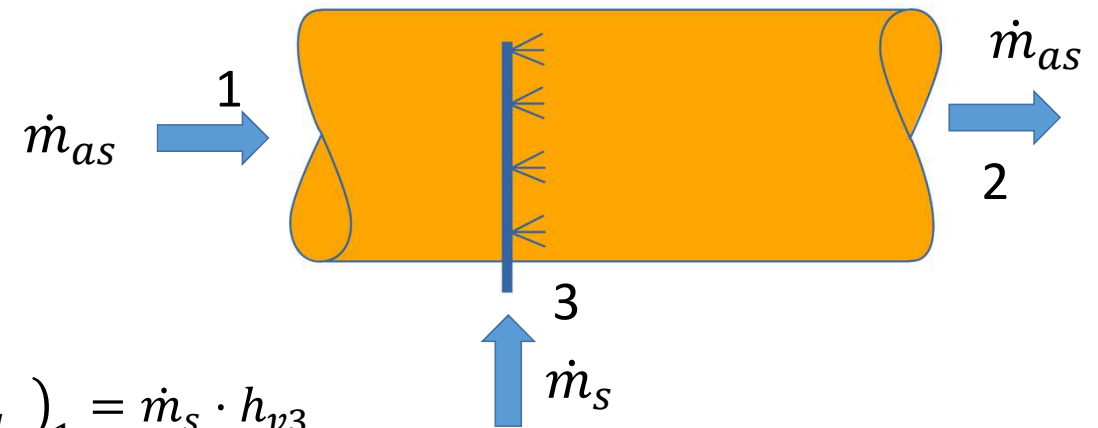
$$\dot{m}_{as} \cdot (\omega_2 - \omega_1) = \dot{m}_s$$

$$\omega_2 = \omega_1 + \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_{as}}$$

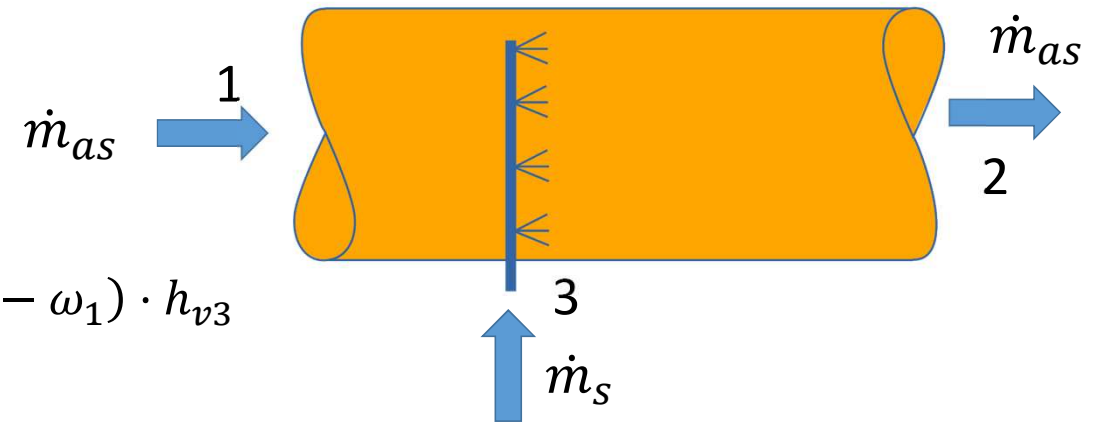
$$\dot{m}_{as} \cdot (h_{as} + \omega h_{va})_2 - \dot{m}_{as} \cdot (h_{as} + \omega h_{va})_1 = \dot{m}_s \cdot h_{v3}$$

$$(h_{as} + \omega h_{va})_2 - (h_{as} + \omega h_{va})_1 = (\omega_2 - \omega_1) h_{v3}$$

$$h_{as,2} + \omega_2 h_{vap,2} - h_{as,1} - \omega_1 h_{vap,1} = (\omega_2 - \omega_1) h_{v3}$$



Umidificazione a iniezione di vapore



$$h_{as,2} + \omega_2 \overline{h_{vap,2}} - h_{as,1} - \omega_1 \overline{h_{vap,1}} = (\omega_2 - \omega_1) \cdot h_{v3}$$

$$h_{as,2} - h_{as,1} + \overline{h_{vap,12}} \cdot (\omega_2 - \omega_1) = (\omega_2 - \omega_1) h_{v3}$$

$$h_{as,2} - h_{as,1} = (h_{v3} - \overline{h_{vap,12}}) \cdot (\omega_2 - \omega_1)$$

$$c_{p,as} \cdot (t_2 - t_1) = (h_{v3} - \overline{h_{vap,12}}) \cdot (\omega_2 - \omega_1) = c_{p,v} \cdot (t_3 - \overline{t_{12}}) \cdot (\omega_2 - \omega_1)$$

$$(t_2 - t_1) = c_{p,v}/c_{p,as} \cdot (t_3 - \overline{t_{12}}) \cdot (\omega_2 - \omega_1) \cong 0$$

Umidificazione con saturatore

$$\dot{m}_{as} \cdot (\omega_2 - \omega_1) = \dot{m}_s$$

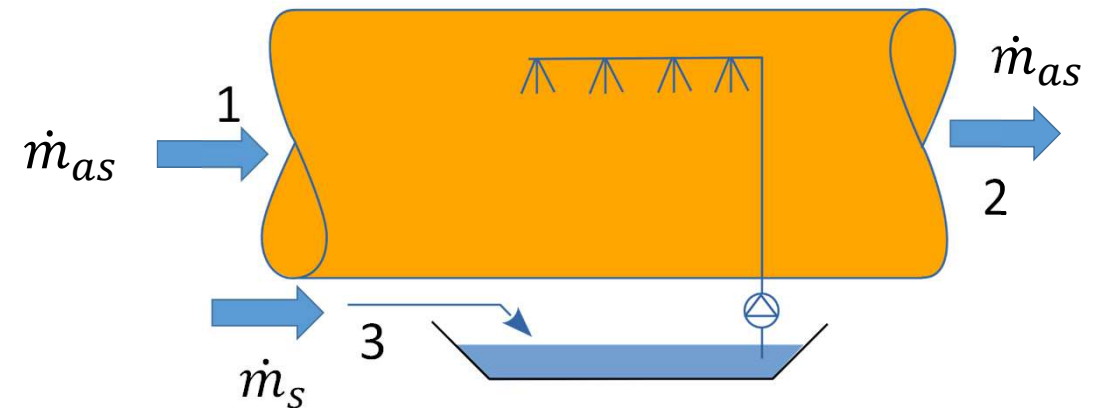
$$\omega_2 = \omega_1 + \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_{as}}$$

$$\dot{m}_{as}(h_{as} + \omega h_{vap})_2 - \dot{m}_{as}(h_{as} + \omega h_{vap})_1 = \dot{m}_s \cdot h_{l3}$$

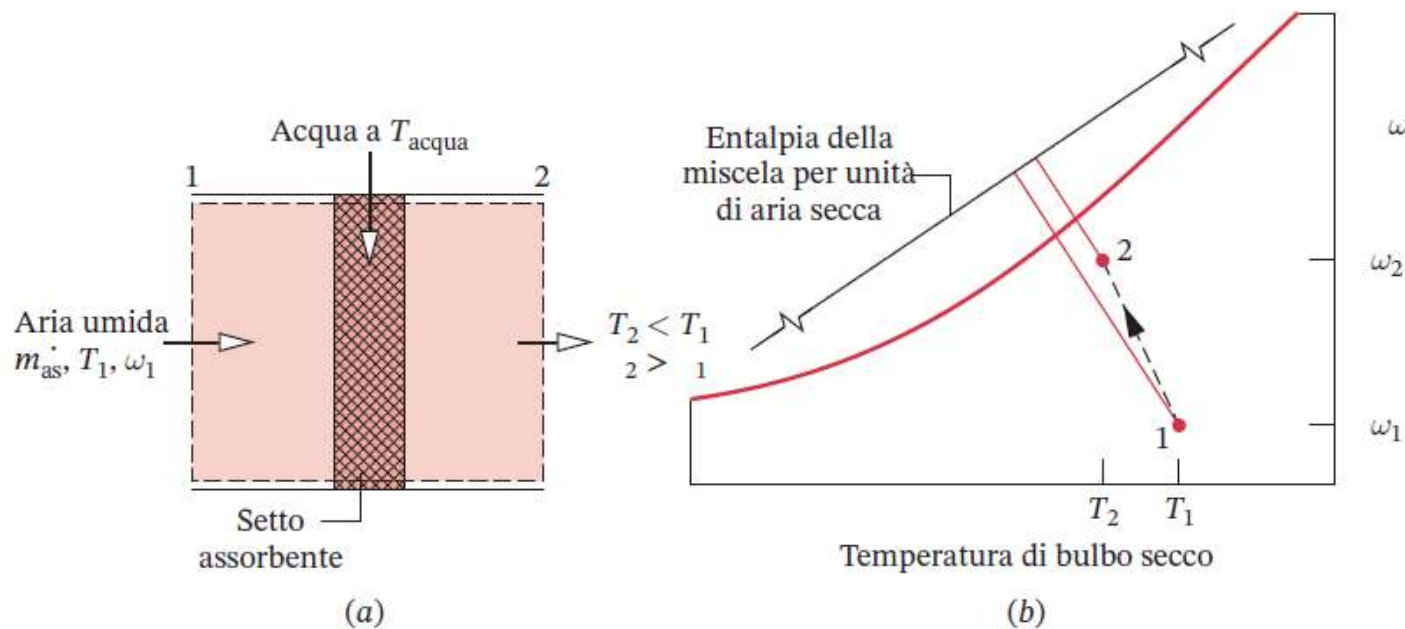
$$(h_{as} + \omega h_{vap})_2 - (h_{as} + \omega h_{vap})_1 = (\omega_2 - \omega_1)h_{l3} \cong 0$$

$$(h_{as} + \omega h_{vap})_2 - (h_{as} + \omega h_{vap})_1 = (\omega_2 - \omega_1)h_{l3} \cong 0$$

$$J_2 - J_1 = (\omega_2 - \omega_1)h_l \cong 0$$



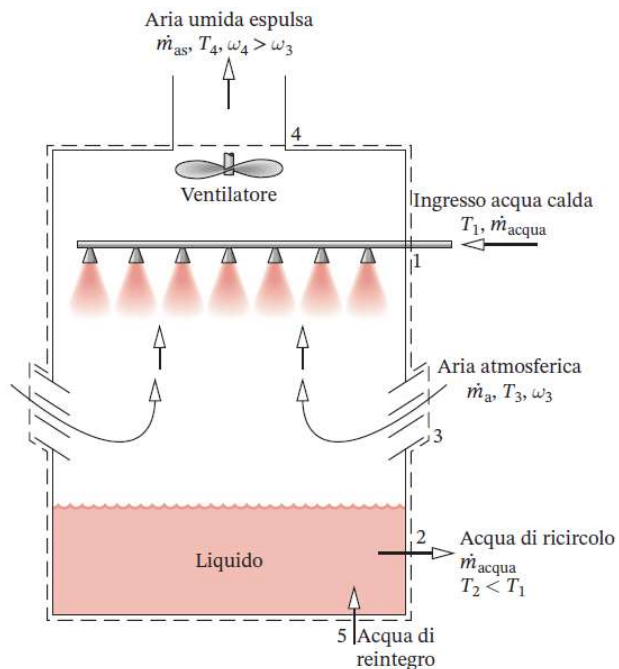
Raffrescamento evaporativo



$$J_2 = (\omega_2 - \omega_1)h_l + J_1$$

Entalpia specifica del liquido in ingresso al V.C.

Torri evaporative



Bilancio aria secca

$$\dot{m}_{as3} = \dot{m}_{as4}$$

Bilancio acqua

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_5 + \dot{m}_{vap3} = \dot{m}_2 + \dot{m}_{vap4}$$

Bilancio energia

$$0 = \dot{m}_1 h_{acqua1} + (\dot{m}_{as} h_{as3} + \dot{m}_{vap3} h_{vap3}) + \dot{m}_5 h_{acqua5} - \dot{m}_2 h_{acqua2} - (\dot{m}_{as} h_{as4} + \dot{m}_{vap4} h_{vap4})$$

con $h_{acqua} \approx h_l \leftrightarrow \leftrightarrow$ e $h_{vap} \approx h_v$

Esercizio iniezione di vapore

Umidificatore a iniezione di vapore

ESEMPIO 10.4

Aria umida con una temperatura di $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ e una temperatura di bulbo umido di $9\text{ }^{\circ}\text{C}$ entra in un umidificatore a iniezione di vapore. La portata massica di aria secca è 90 kg/min . Nella miscela aria-vapor d'acqua viene iniettato vapor d'acqua saturo secco a $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ con una portata di 52 kg/h . Non c'è scambio di calore con l'ambiente esterno e la pressione rimane costante e pari a 1 bar attraverso tutto il sistema. Usando il diagramma psicrometrico, determinare all'uscita: **(a)** l'umidità assoluta; **(b)** la temperatura, in $^{\circ}\text{C}$.

Tabella T2

Tabella T-2 Proprietà dell'acqua saturata (liquido-vapore): tabella della temperatura

Temp. °C	Press. bar	Volume specifico m³/kg		Energia interna kJ/kg		Entalpia kJ/kg			Entropia kJ/kg · K		Temp. °C
		Liquido saturato v_f $\times 10^3$	Vapore saturato v_g	Liquido saturato u_f	Vapore saturato u_g	Liquido saturato h_f	Evap. h_{fg}	Vapore saturato h_g	Liquido saturato s_f	Vapore saturato s_g	
.01	0.00611	1.0002	206.136	0.00	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.0000	9.1562	.01
4	0.00813	1.0001	157.232	16.77	2380.9	16.78	2491.9	2508.7	0.0610	9.0514	4
5	0.00872	1.0001	147.120	20.97	2382.3	20.98	2489.6	2510.6	0.0761	9.0257	5
6	0.00935	1.0001	137.734	25.19	2383.6	25.20	2487.2	2512.4	0.0912	9.0003	6
8	0.01072	1.0002	120.917	33.59	2386.4	33.60	2482.5	2516.1	0.1212	8.9501	8
10	0.01228	1.0004	106.379	42.00	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	0.1510	8.9008	10
11	0.01312	1.0004	99.857	46.20	2390.5	46.20	2475.4	2521.6	0.1658	8.8765	11
12	0.01402	1.0005	93.784	50.41	2391.9	50.41	2473.0	2523.4	0.1806	8.8524	12
13	0.01497	1.0007	88.124	54.60	2393.3	54.60	2470.7	2525.3	0.1953	8.8285	13
14	0.01598	1.0008	82.848	58.79	2394.7	58.80	2468.3	2527.1	0.2099	8.8048	14
15	0.01705	1.0009	77.926	62.99	2396.1	62.99	2465.9	2528.9	0.2245	8.7814	15
16	0.01818	1.0011	73.333	67.18	2397.4	67.19	2463.6	2530.8	0.2390	8.7582	16
17	0.01938	1.0012	69.044	71.38	2398.8	71.38	2461.2	2532.6	0.2535	8.7351	17
18	0.02064	1.0014	65.038	75.57	2400.2	75.58	2458.8	2534.4	0.2679	8.7123	18
19	0.02198	1.0016	61.293	79.76	2401.6	79.77	2456.5	2536.2	0.2823	8.6897	19
20	0.02339	1.0018	57.791	83.95	2402.9	83.96	2454.1	2538.1	0.2966	8.6672	20
21	0.02487	1.0020	54.514	88.14	2404.3	88.14	2451.8	2539.9	0.3109	8.6450	21
22	0.02645	1.0022	51.447	92.32	2405.7	92.33	2449.4	2541.7	0.3251	8.6229	22
23	0.02810	1.0024	48.574	96.51	2407.0	96.52	2447.0	2543.5	0.3393	8.6011	23
24	0.02985	1.0027	45.883	100.70	2408.4	100.70	2444.7	2545.4	0.3534	8.5794	24
25	0.03169	1.0029	43.360	104.88	2409.8	104.89	2442.3	2547.2	0.3674	8.5580	25
26	0.03363	1.0032	40.994	109.06	2411.1	109.07	2439.9	2549.0	0.3814	8.5367	26
27	0.03567	1.0035	38.774	113.25	2412.5	113.25	2437.6	2550.8	0.3954	8.5156	27
28	0.03782	1.0037	36.690	117.42	2413.9	117.43	2435.2	2552.6	0.4093	8.4946	28
29	0.04008	1.0040	34.733	121.60	2415.2	121.61	2432.8	2554.5	0.4231	8.4739	29
30	0.04246	1.0043	32.894	125.78	2416.6	125.79	2430.5	2556.3	0.4369	8.4533	30
31	0.04496	1.0046	31.165	129.96	2418.0	129.97	2428.1	2558.1	0.4507	8.4329	31
32	0.04759	1.0050	29.540	134.14	2419.3	134.15	2425.7	2559.9	0.4644	8.4127	32
33	0.05034	1.0053	28.011	138.32	2420.7	138.33	2423.4	2561.7	0.4781	8.3927	33

Tabella T2

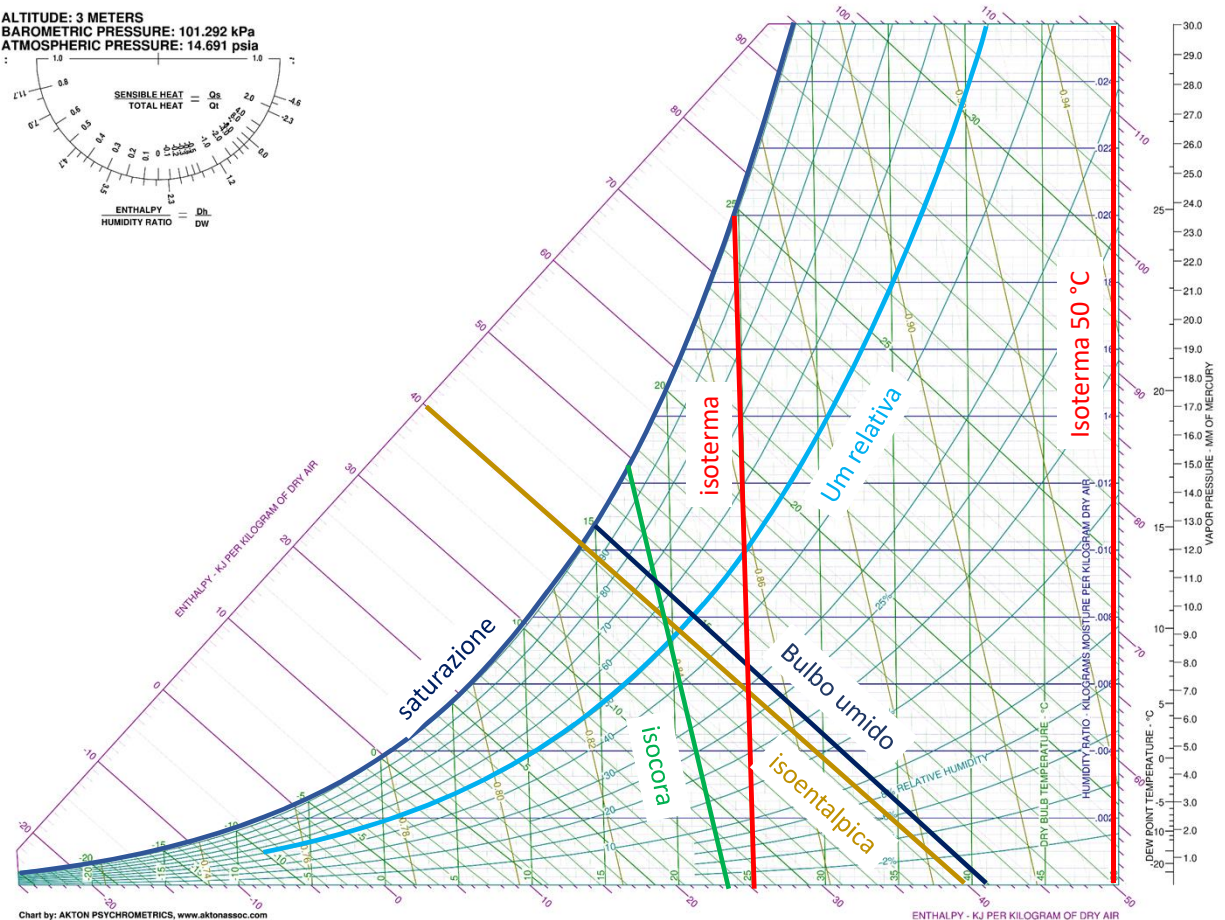
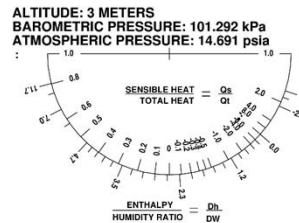
Tabella T-2 Proprietà dell'acqua saturo (liquido-vapore): tabella della temperatura (continua)

Temp. °C	Press. bar	Volume specifico m ³ /kg		Energia interna kJ/kg		Entalpia kJ/kg			Entropia kJ/kg · K		Temp. °C
		Liquido saturo v_f $\times 10^3$	Vapore saturo v_g	Liquido saturo u_f	Vapore saturo u_g	Liquido saturo h_f	Evap. h_{fg}	Vapore saturo h_g	Liquido saturo s_f	Vapore saturo s_g	
34	0.05324	1.0056	26.571	142.50	2422.0	142.50	2421.0	2563.5	0.4917	8.3728	34
35	0.05628	1.0060	25.216	146.67	2423.4	146.68	2418.6	2565.3	0.5053	8.3531	35
36	0.05947	1.0063	23.940	150.85	2424.7	150.86	2416.2	2567.1	0.5188	8.3336	36
38	0.06632	1.0071	21.602	159.20	2427.4	159.21	2411.5	2570.7	0.5458	8.2950	38
40	0.07384	1.0078	19.523	167.56	2430.1	167.57	2406.7	2574.3	0.5725	8.2570	40
45	0.09593	1.0099	15.258	188.44	2436.8	188.45	2394.8	2583.2	0.6387	8.1648	45
50	0.1235	1.0121	12.032	209.32	2443.5	209.33	2382.7	2592.1	.7038	8.0763	50
55	0.1576	1.0146	9.568	230.21	2450.1	230.23	2370.7	2600.9	.7679	7.9913	55
60	0.1994	1.0172	7.671	251.11	2456.6	251.13	2358.5	2609.6	.8312	7.9096	60
65	0.2503	1.0199	6.197	272.02	2463.1	272.06	2346.2	2618.3	.8935	7.8310	65
70	0.3119	1.0228	5.042	292.95	2469.6	292.98	2333.8	2626.8	.9549	7.7553	70
75	0.3858	1.0259	4.131	313.90	2475.9	313.93	2321.4	2635.3	1.0155	7.6824	75
80	0.4739	1.0291	3.407	334.86	2482.2	334.91	2308.8	2643.7	1.0753	7.6122	80
85	0.5783	1.0325	2.828	355.84	2488.4	355.90	2296.0	2651.9	1.1343	7.5445	85
90	0.7014	1.0360	2.361	376.85	2494.5	376.92	2283.2	2660.1	1.1925	7.4791	90
95	0.8455	1.0397	1.982	397.88	2500.6	397.96	2270.2	2668.1	1.2500	7.4159	95
100	1.014	1.0435	1.673	418.94	2506.5	419.04	2257.0	2676.1	1.3069	7.3549	100
110	1.433	1.0516	1.210	461.14	2518.1	461.30	2230.2	2691.5	1.4185	7.2387	110
120	1.985	1.0603	0.8919	503.50	2529.3	503.71	2202.6	2706.3	1.5276	7.1296	120
130	2.701	1.0697	0.6685	546.02	2539.9	546.31	2174.2	2720.5	1.6344	7.0269	130
140	3.613	1.0797	0.5089	588.74	2550.0	589.13	2144.7	2733.9	1.7391	6.9299	140
150	4.758	1.0905	0.3928	631.68	2559.5	632.20	2114.3	2746.5	1.8418	6.8379	150
160	6.178	1.1020	0.3071	674.86	2568.4	675.55	2082.6	2758.1	1.9427	6.7502	160
170	7.917	1.1143	0.2428	718.33	2576.5	719.21	2049.5	2768.7	2.0419	6.6663	170
180	10.02	1.1274	0.1941	762.09	2583.7	763.22	2015.0	2778.2	2.1396	6.5857	180
190	12.54	1.1414	0.1565	806.19	2590.0	807.62	1978.8	2786.4	2.2359	6.5079	190
200	15.54	1.1565	0.1274	850.65	2595.3	852.45	1940.7	2793.2	2.3309	6.4323	200
210	19.06	1.1726	0.1044	895.53	2599.5	897.76	1900.7	2798.5	2.4248	6.3585	210
220	23.18	1.1900	0.08619	940.87	2602.4	943.62	1858.5	2802.1	2.5178	6.2861	220

(segue)

Diagramma Ashrae

- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
- Isoterma
 - Non verticale, solamente 50 °C verticale
- Umidità relativa costante
- Curva di saturazione $\phi = 1$
- Isoentalpica
- Bulbo bagnato
- Isocora



Stato dell'aria con igrometro Assman

- esempio
 - $t_{bs} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$
 - $t_{bu} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Misuro la temperatura a bulbo secco t_{bs}
- Misuro temperatura a bulbo umido t_{bu}
- Intersezione identifica lo stato
- Umidità relativa
- Umidità specifica
- entalpia
- Volume specifico
- Entalpia e curve a temperatura bulbo umido sono diverse

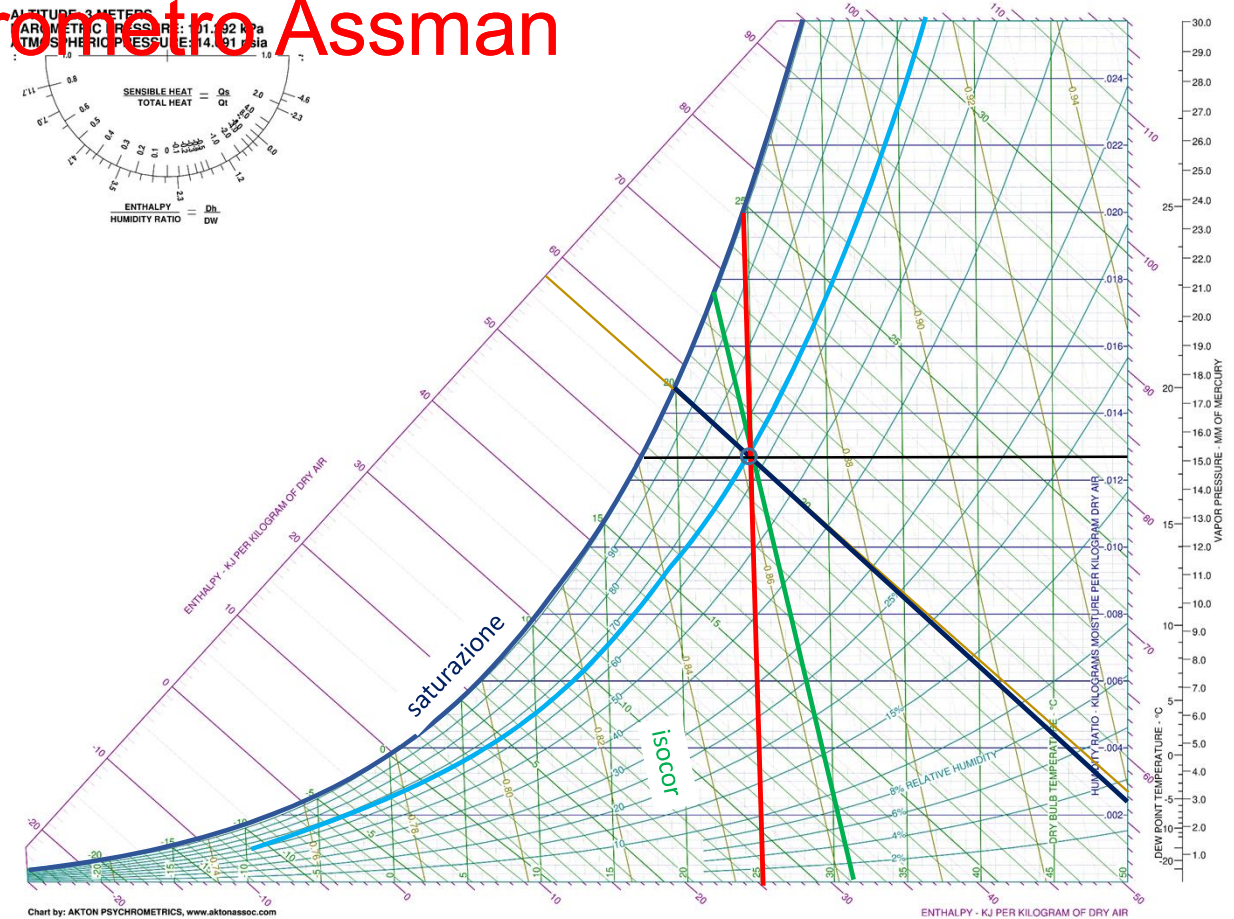
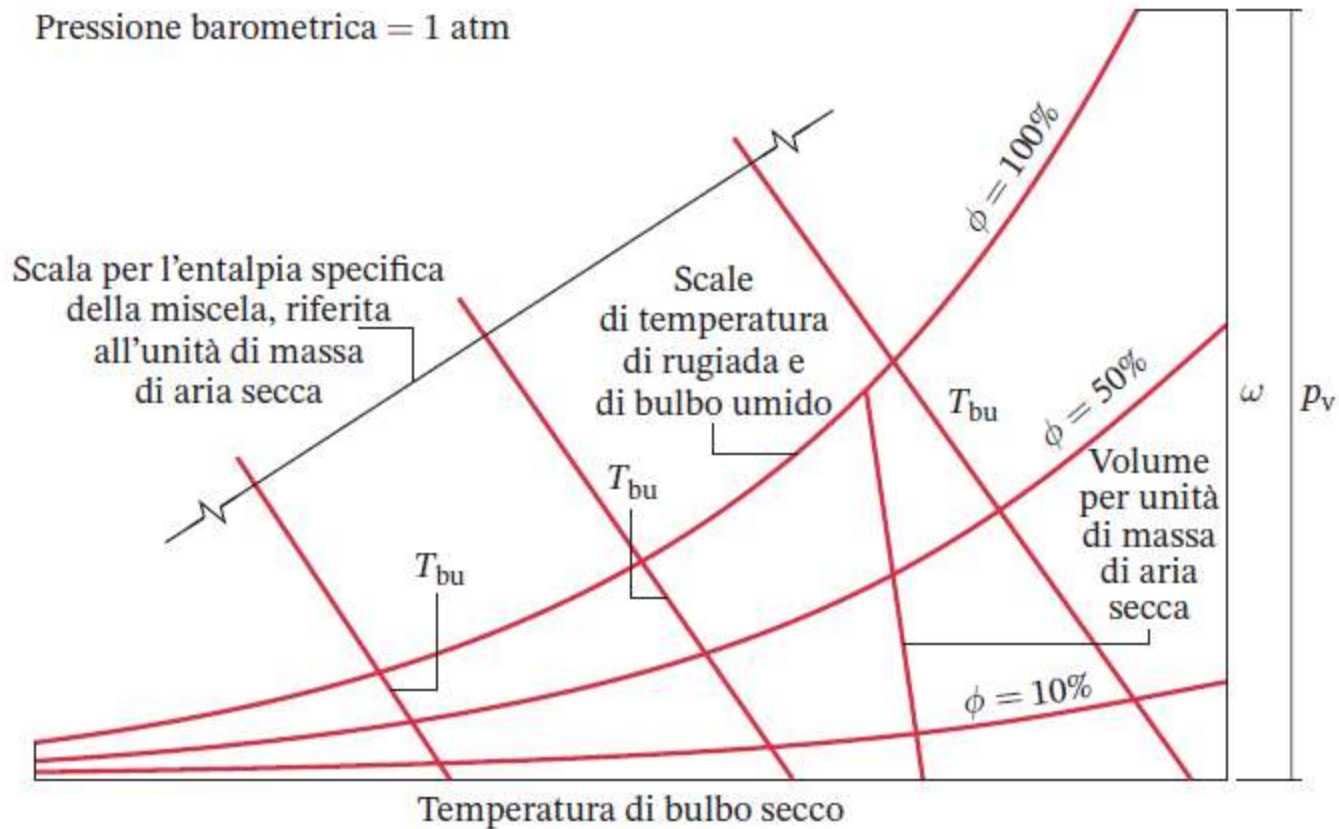


Diagramma psicrometrico



Igrometro di hasman

- Metodo semplice per ricavare lo stato del sistema
- Misuro la temperatura di bulbo secco e di bulbo umido
- La differenza di temperatura consente la determinazione dello stato dell'aria umida

