

TRASFORMAZIONI PSICROMETRICHE

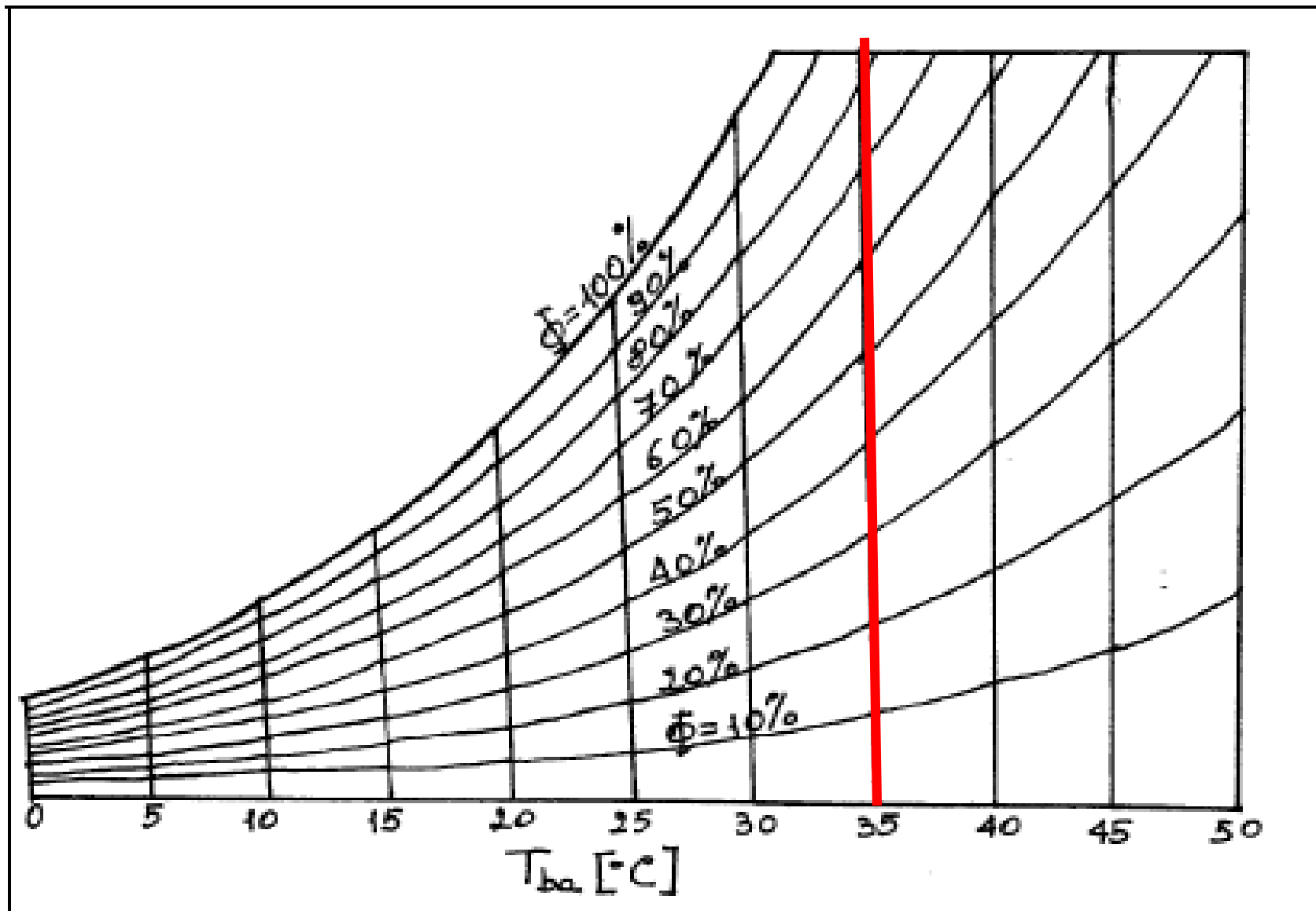
Proprietà dell'aria umida

Si definisce:

- Temperatura di bulbo asciutto T_{ba} la temperatura della miscela di aria umida misurata da un termometro dotato di un sistema di schermatura che riduca l'influenza degli scambi termici radiativi e favorisca lo scambio termico convettivo tra fluido e sensore.

Le curve a temperatura di bulbo asciutto costante hanno sul diagramma psicrometrico un andamento verticale.

Temperatura di bulbo asciutto T_{ba}



Umidità relativa U.R. o grado igrometrico ϕ

Rapporto tra la densità del vapore surriscaldato presente nella miscela e la densità del vapore saturo secco alla temperatura della miscela o in modo equivalente dal rapporto tra la massa di vapore surriscaldato presente nella miscela ed il massimo quantitativo di vapore che può essere presente nella miscela alla temperatura assegnata. Dall'equazione di stato dei gas ideali si deduce che:

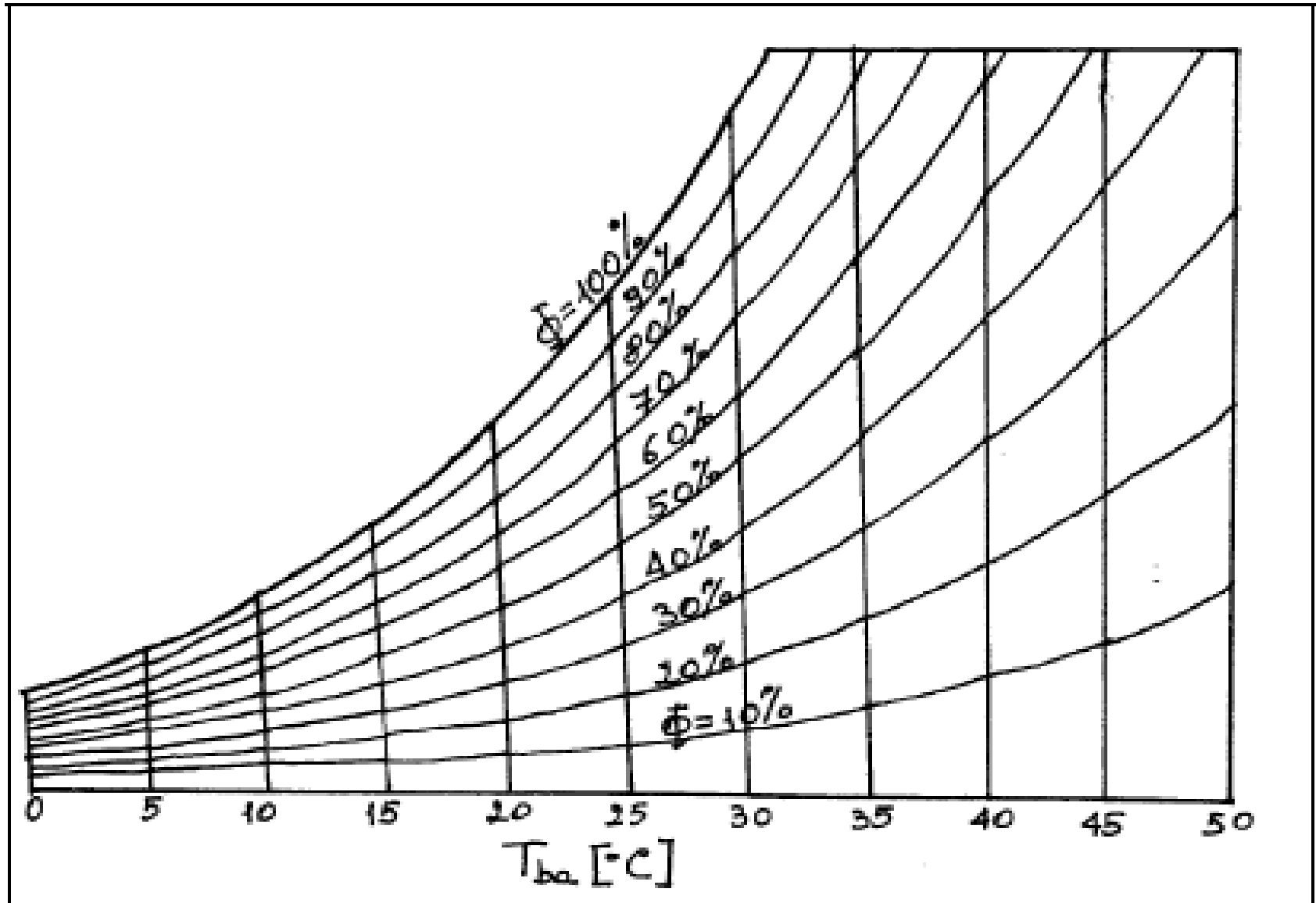
$$\phi = \frac{m_v}{m_{v,s}} = \frac{\delta_v}{\delta_{v,s}} = \frac{p_v}{p_{v,s}}$$

Umidità relativa U.R. o grado igrometrico ϕ

- $$\phi = \frac{m_v}{m_{v,s}} = \frac{\delta_v}{\delta_{v,s}} = \frac{p_v}{p_{v,s}}$$

Poiché, per una data temperatura, il valore massimo che può assumere la pressione parziale del vapore è quello di saturazione, p_{vs} , l'umidità relativa o può assumere valori compresi tra 0 (aria secca) ed 1 (aria satura), ovvero in percentuale tra 0% ed il 100%.

Umidità relativa U.R. o grado igrometrico ϕ



Umidità specifica o assoluta ω

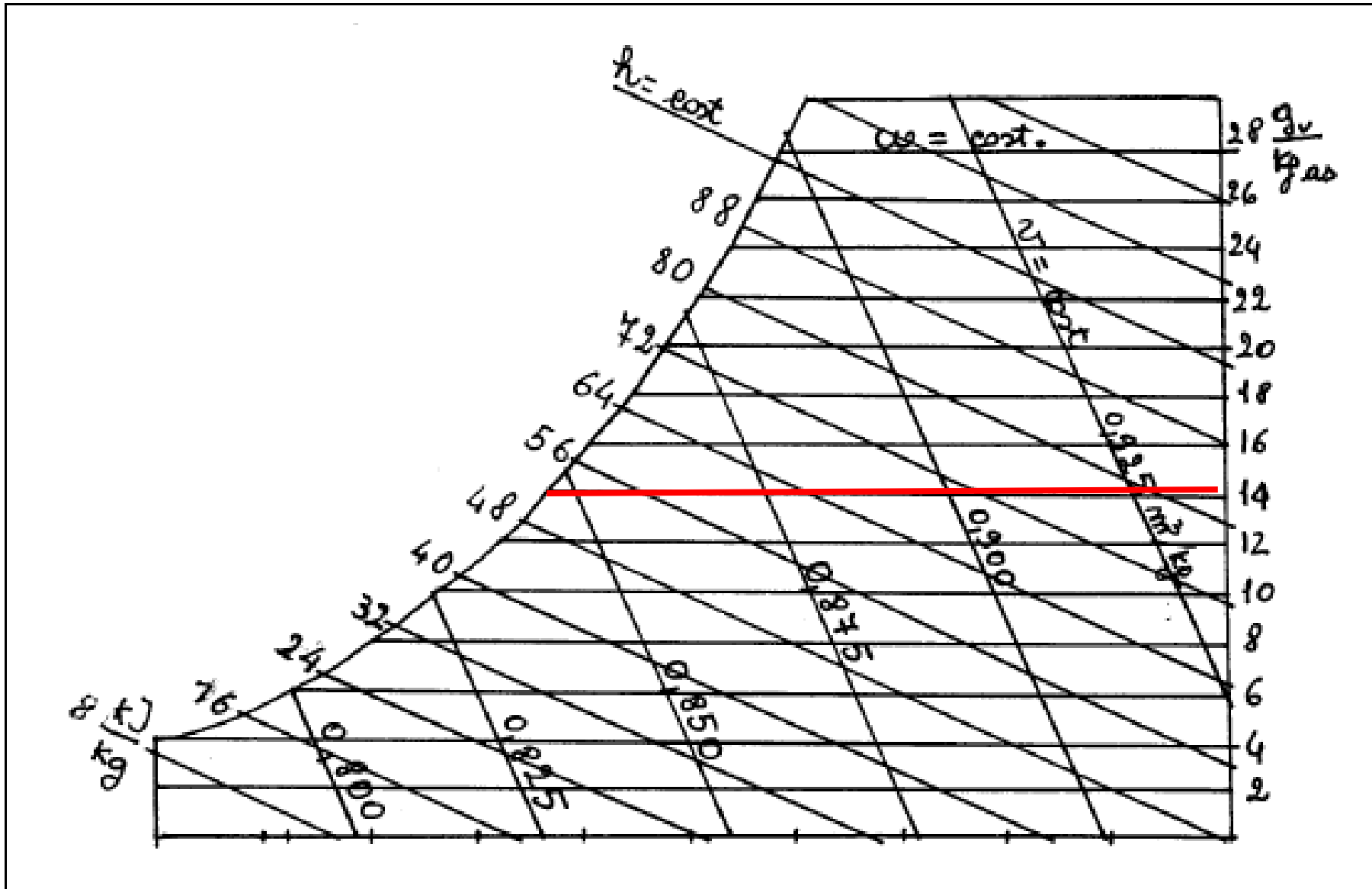
- E' definita come la massa di vapor d'acqua contenuta nell'unità di massa di aria secca:

$$\omega = \frac{m_v}{m_a}$$

Si esprime in **kg/kg_a**.

Sul diagramma psicrometrico le curve ad umidità specifica costante sono segmenti di retta orizzontali ed i valori sono riportati in g/kg

Umidità specifica o assoluta ω



$$\omega = \frac{m_v}{m_a}$$

Applicando l'equazione di stato dei gas ideali a ciascun componente la miscela e la legge di Dalton, si ha:

UMIDITA' SPECIFICA

$$\omega = \frac{m_v}{m_a}$$

$$p_v \cdot V = m_v \cdot R_v \cdot T$$

$$p_a \cdot V = m_a \cdot R_a \cdot T$$

$$\omega = \frac{R_a}{R_v} \frac{p_v}{p_a} = 0,622 \cdot \frac{p_v}{p_a} = 0,622 \cdot \frac{p_v}{p_{\text{tot}} - p_v}$$

Volume specifico v

Il volume specifico dell'aria umida è definito come il ***volume occupato dall'unità di massa dell'aria secca***, in quanto questa rimane costante durante le trasformazioni dell'aria umida, mentre la massa di vapore d'acqua può variare (umidificazione e deumidificazione).

Pertanto il volume specifico dell'aria umida coincide con quello dell'aria secca.

VOLUME SPECIFICO

Anche in questo caso, si fa riferimento esclusivamente alla massa di aria secca.

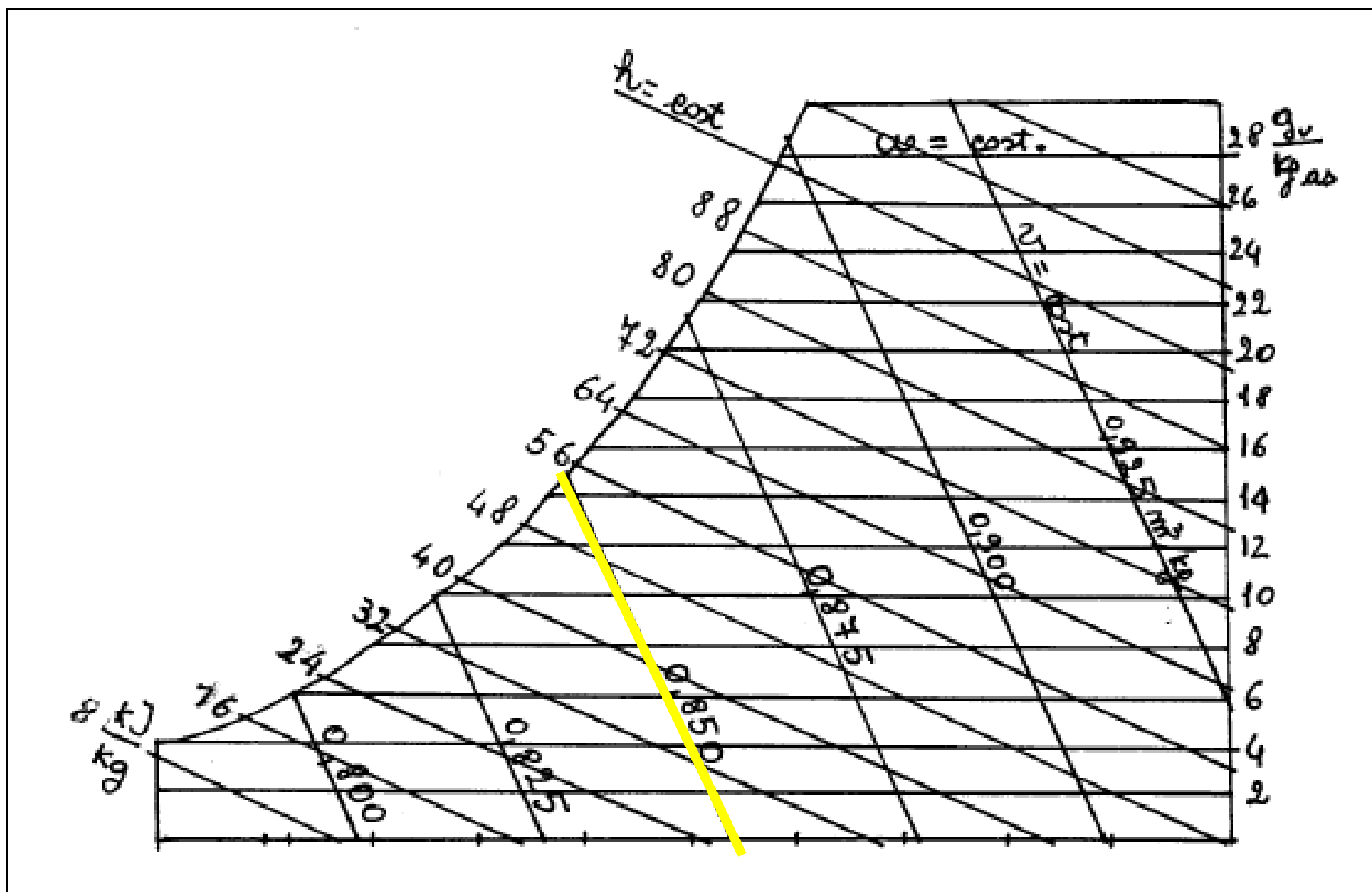
Il volume specifico è quindi il volume occupato da una massa di aria umida pari ad 1 kg.

$$p_a \cdot V = m_a \cdot R_a \cdot T \quad \Rightarrow \quad p_a \cdot v = R_a \cdot T$$

$$v = \frac{V}{m_a} \quad \Rightarrow \quad v = \frac{R_a \cdot T}{p_a} \quad \Rightarrow \quad v = \frac{R_a \cdot T}{p_t - \phi \cdot p_{vs}}$$

La costante caratteristica R_a è pari a 287,13 J/kgK

Umidità specifica o assoluta ω



Entalpia specifica dell'aria umida

Entalpia specifica aria secca

$$h_a = c_{pa} \Delta T$$

Entalpia specifica vapore

$$h_v = \Delta h_{v,s} + c_{pv} T$$

Entalpia specifica aria umida

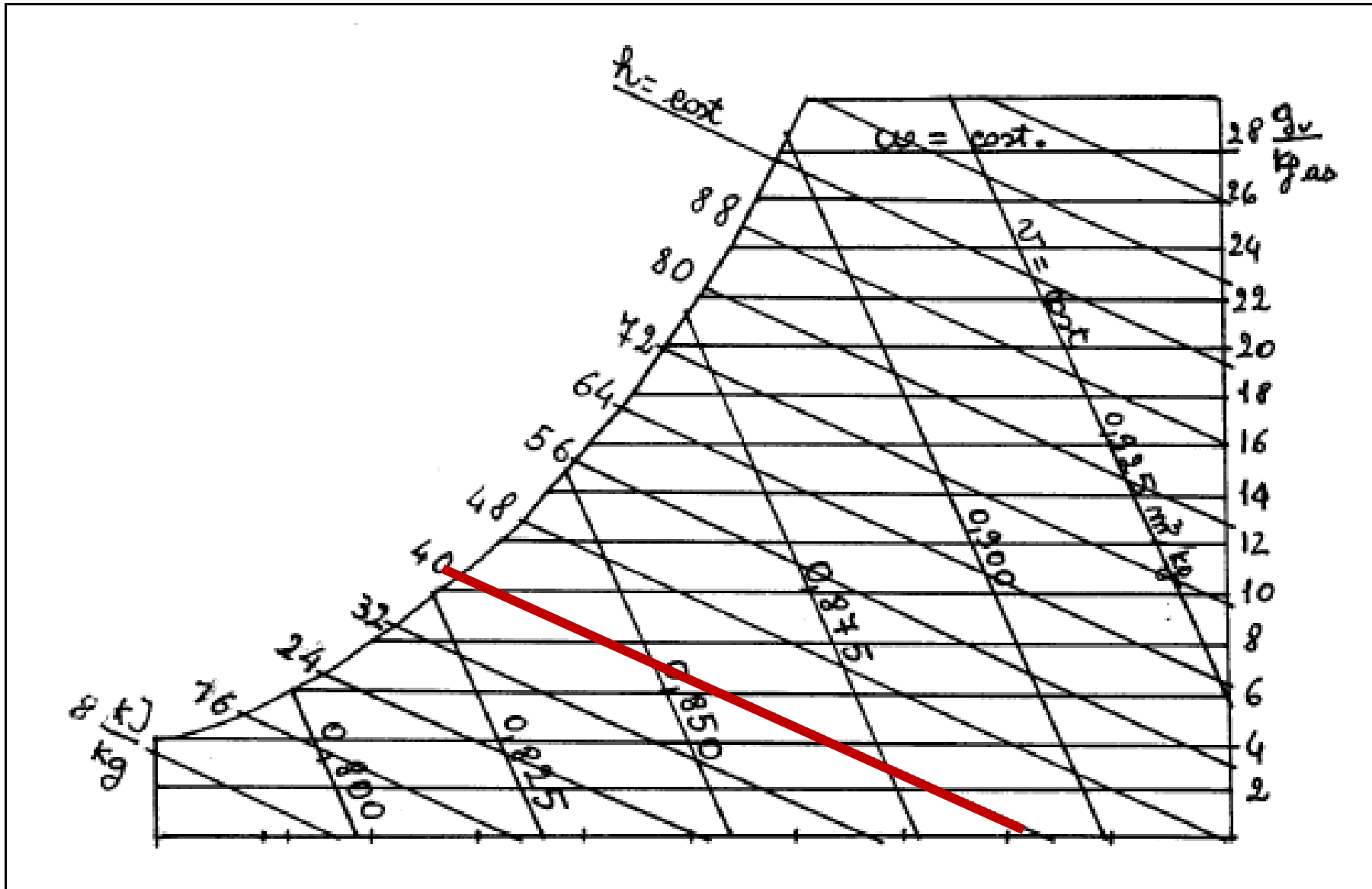
$$h = h_a + \omega h_v$$

$$h = c_{pa} \Delta T + \omega (\Delta h_{v,s} + c_{pv} T)$$

Essendo $c_{pa} = 1,01 \text{ kJ/kgK}$, $\Delta h_{v,s} = 2500 \text{ kJ/kg}$, $c_{pv} = 1,8 \text{ kJ/kgK}$:

$$h = 1,01 \Delta T + \omega (2500 + 1,8 T)$$

Entalpia specifica h



Temperatura di rugiada T_r

Temperatura di una miscela di aria umida che ha raggiunto le condizioni di saturazione in seguito ad un raffreddamento a pressione e ad umidità specifica costanti.

Le condizioni per il vapor d'acqua contenuto nell'aria umida sono quindi di incipiente condensazione. La determinazione della temperatura di rugiada si può effettuare con l'ausilio di tabelle, ricordando che:

$$p_v(T) = p_s(T_r)$$

DIAGRAMMA PSICROMETRICO DELL'ARIA UMIDA
(Pressione 1.0131 bar = 10131 Pa)

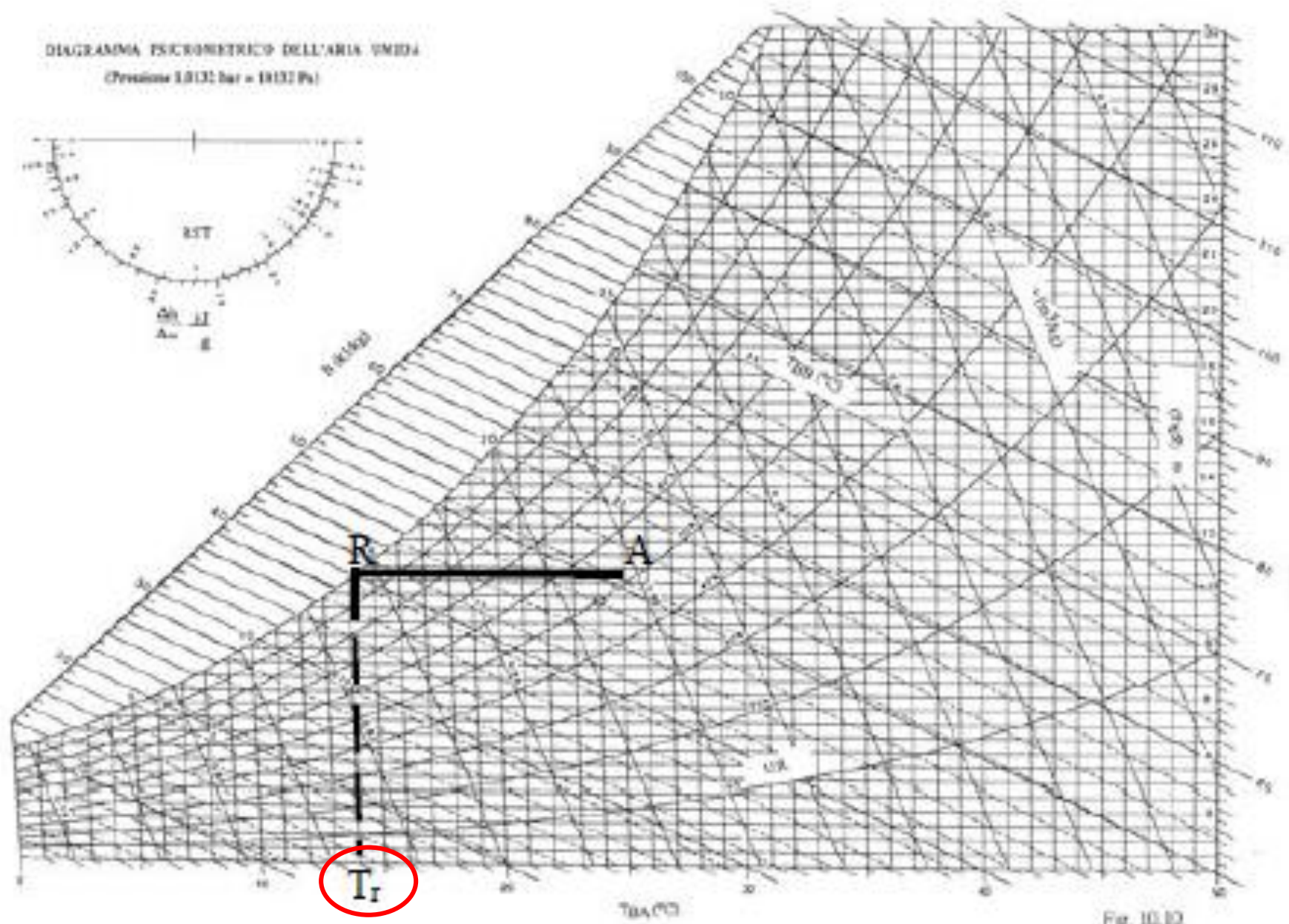
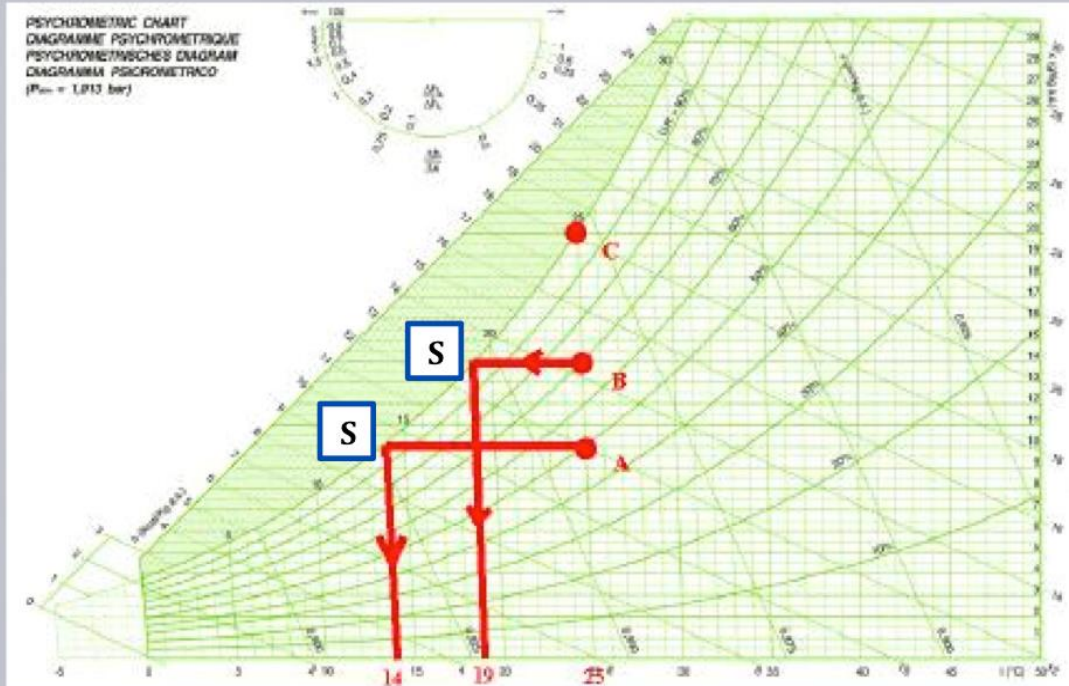


Fig. 10.13

La temperatura di rugiada

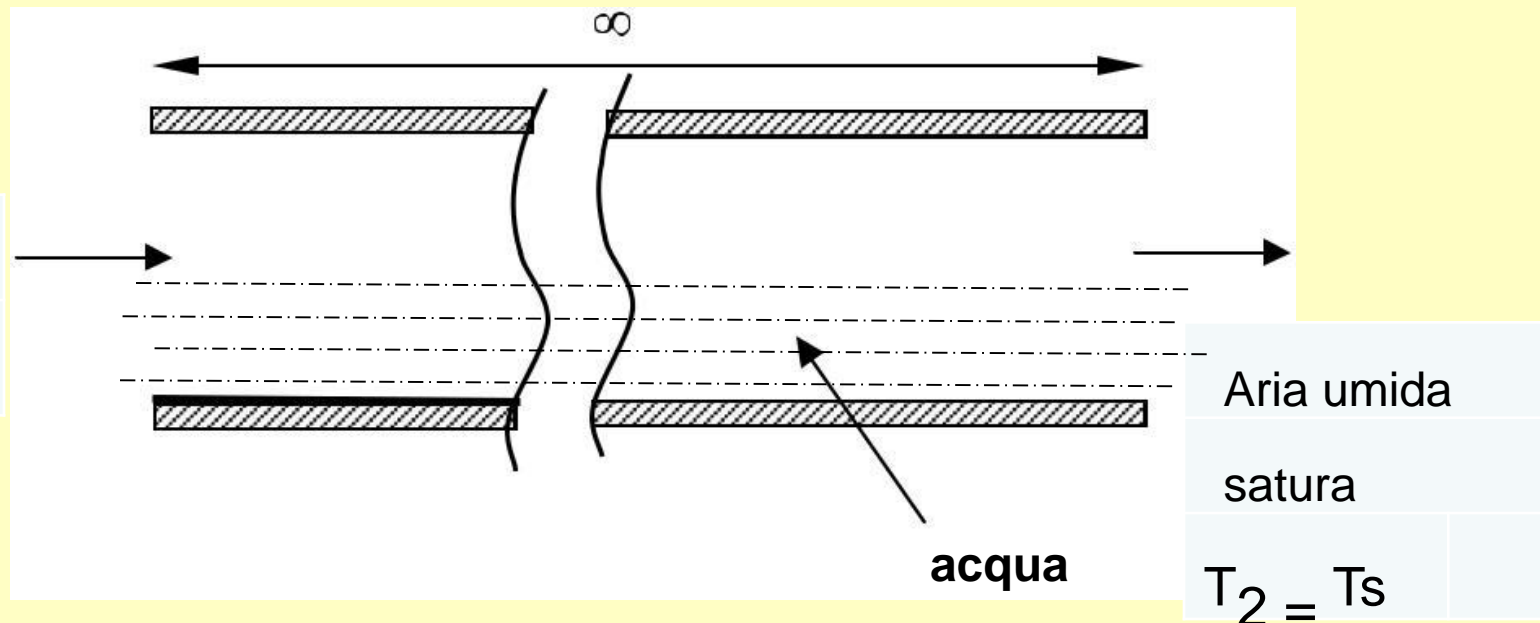
Temperatura alla quale l'aria raggiunge le condizioni di saturazione (U.R.=100%): su ogni elemento che si trova ad una temperatura appena inferiore alla temperatura di rugiada si forma condensa.

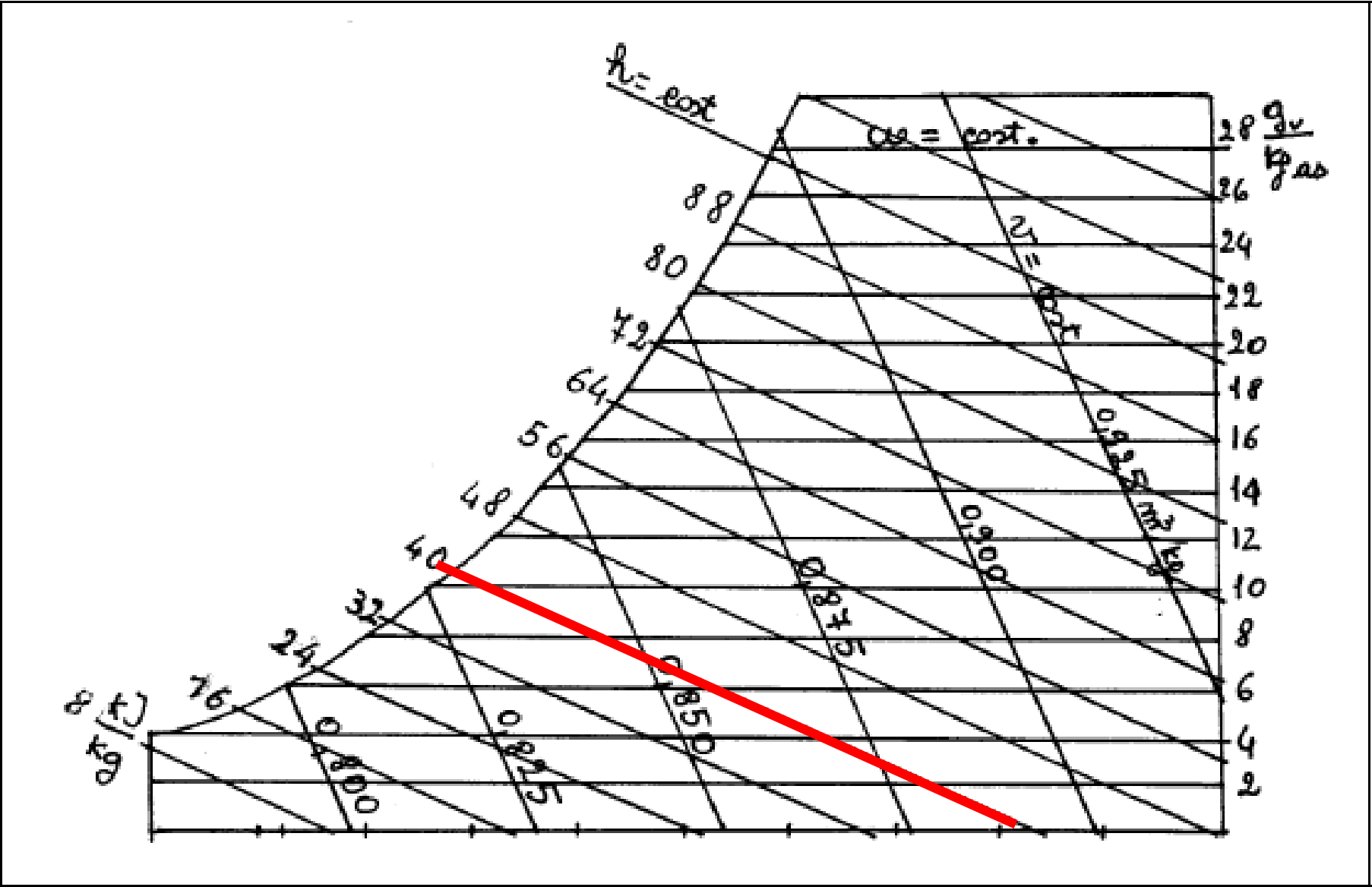


La temperatura di rugiada è maggiore, a parità di temperatura a bulbo secco, al crescere dell'umidità relativa iniziale: l'aria a maggiore umidità relativa necessita di un minore raffreddamento per giungere a saturazione (Tratto BS più corto di BS).

Temperatura di saturazione adiabatica

Temperatura alla quale si porta una corrente d'aria umida in uscita da un condotto adiabatico, di lunghezza infinita, nel quale essa venga saturata lambendo il pelo libero di una massa d'acqua costante presente sul fondo del condotto stesso ed alla temperatura T_s .





Temperatura di saturazione adiabatica

La temperatura di saturazione adiabatica è una proprietà di stato in quanto dipende dallo stato termodinamico della corrente d'aria umida in ingresso e nella pratica coincide con la temperatura di bulbo umido o di bulbo bagnato, sebbene quest'ultima, concettualmente, non sia una proprietà di stato.

Le curve a temperatura di bulbo umido costante sul diagramma psicrometrico hanno un andamento molto prossimo a quello delle isoentalpiche.

Diagramma psicrometrico

ϕ (1%,100%)

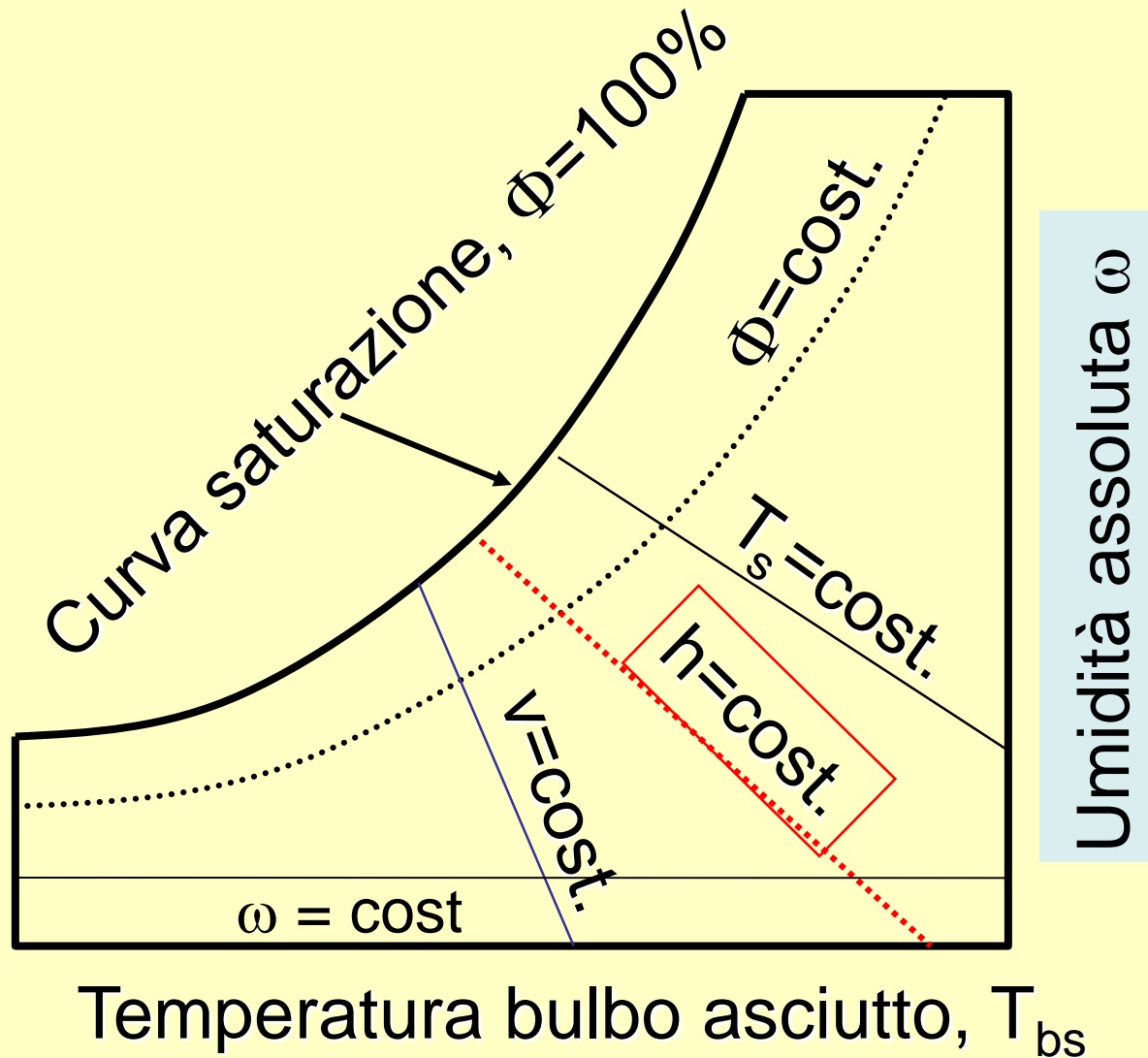
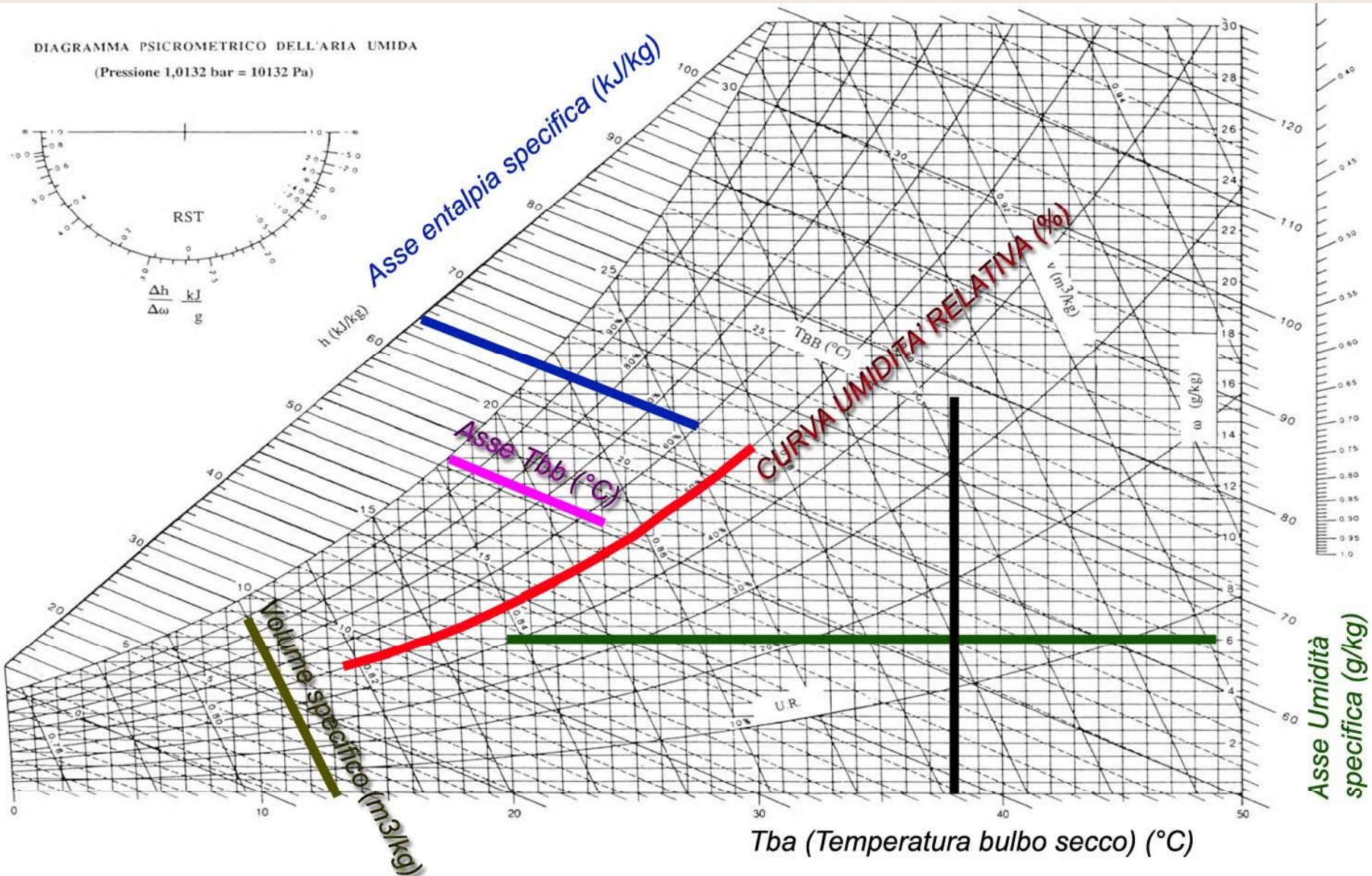


DIAGRAMMA PSICROMETRICO DELL'ARIA UMIDA
(Pressione 1,0132 bar = 10132 Pa)



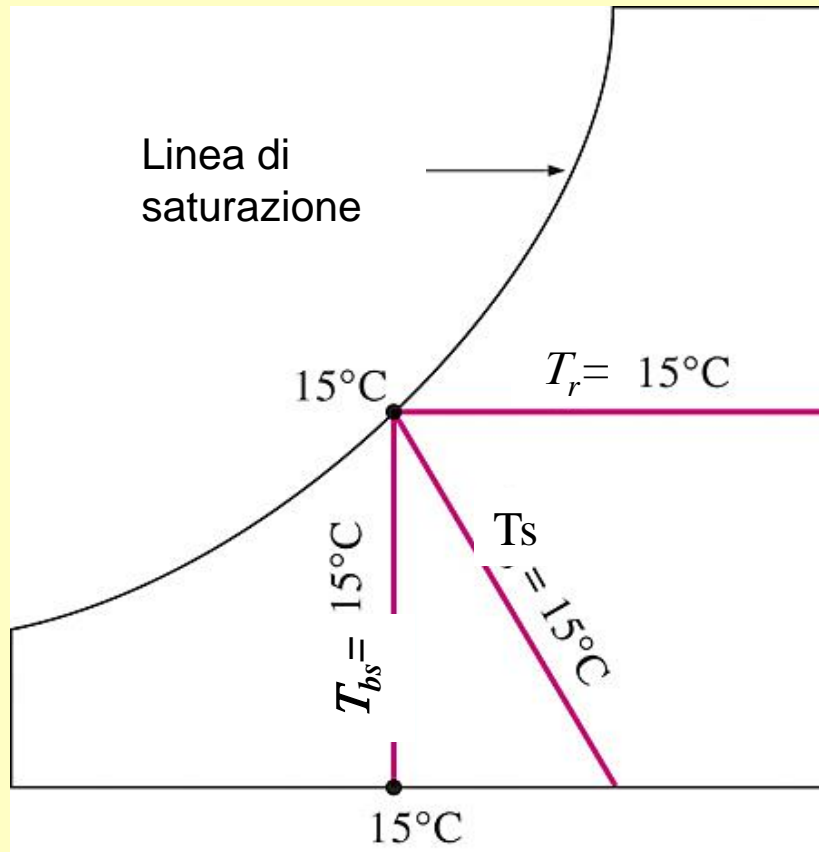
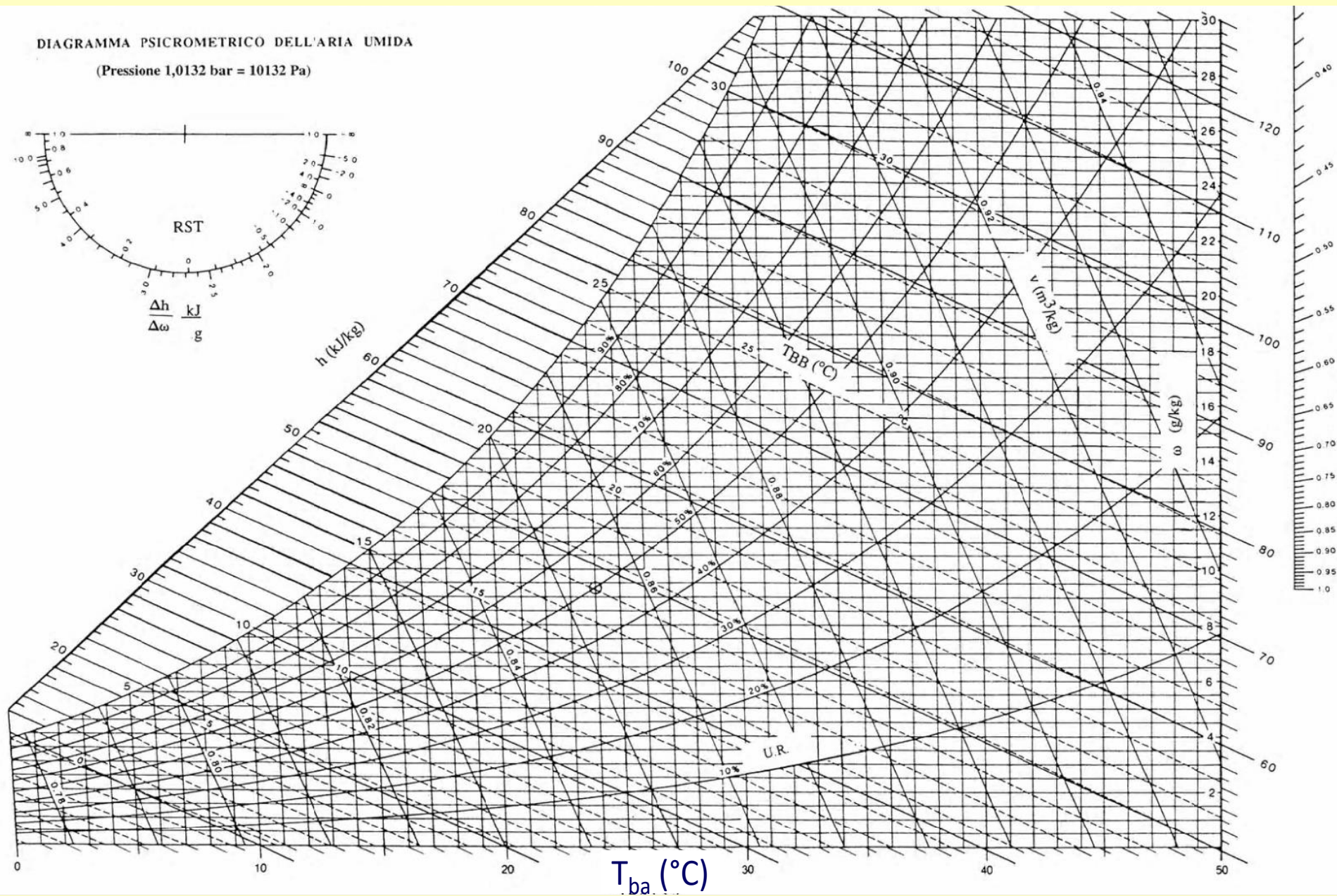
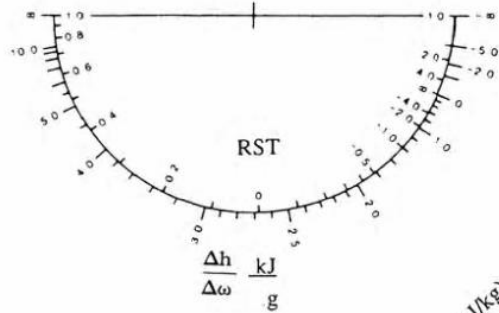
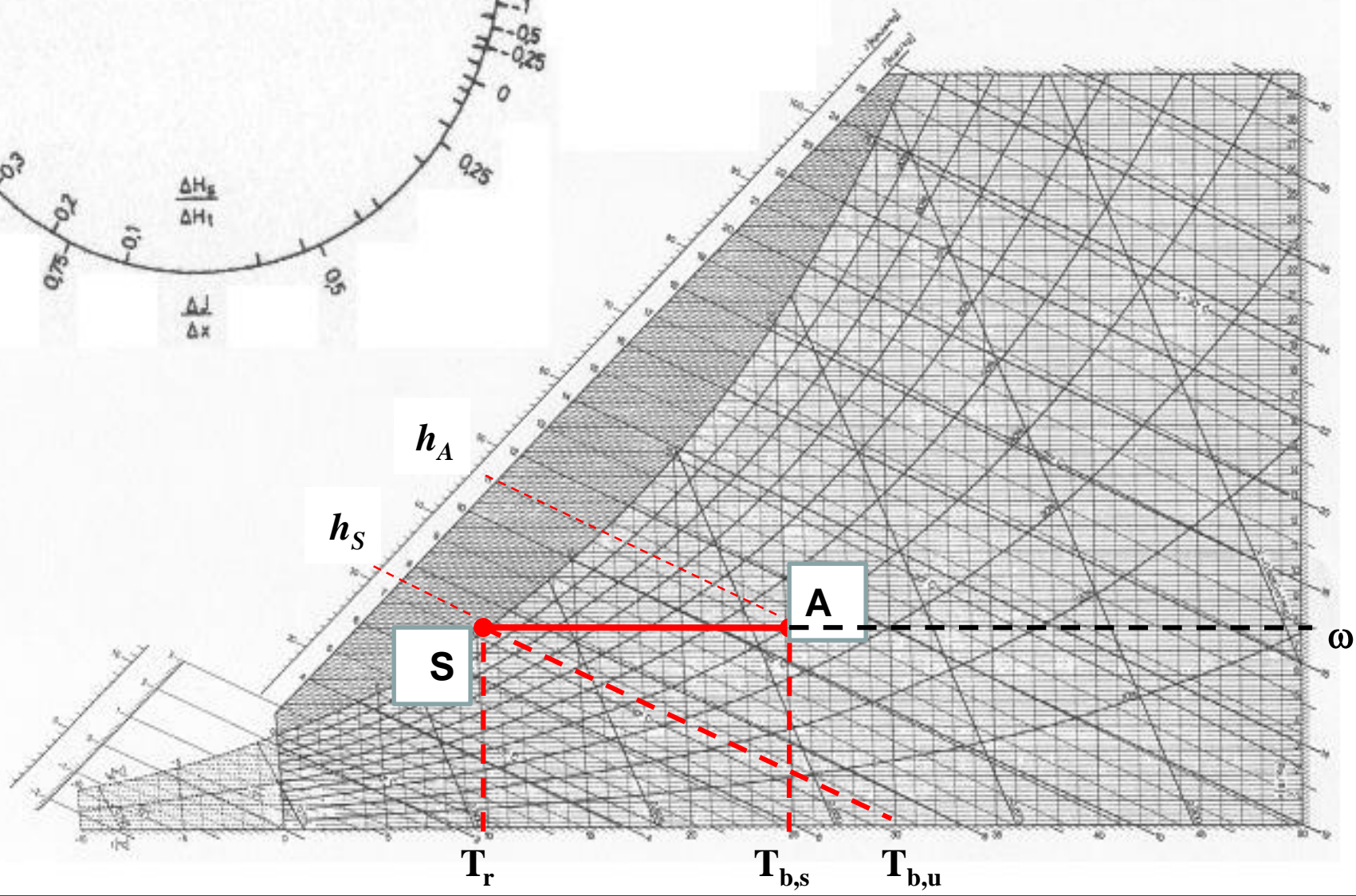
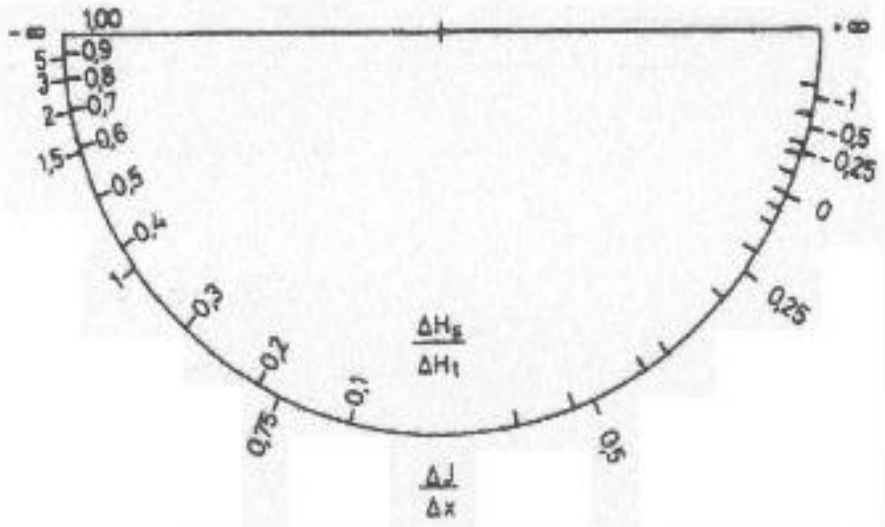


DIAGRAMMA PSICROMETRICO DELL'ARIA UMIDA

(Pressione 1,0132 bar = 10132 Pa)

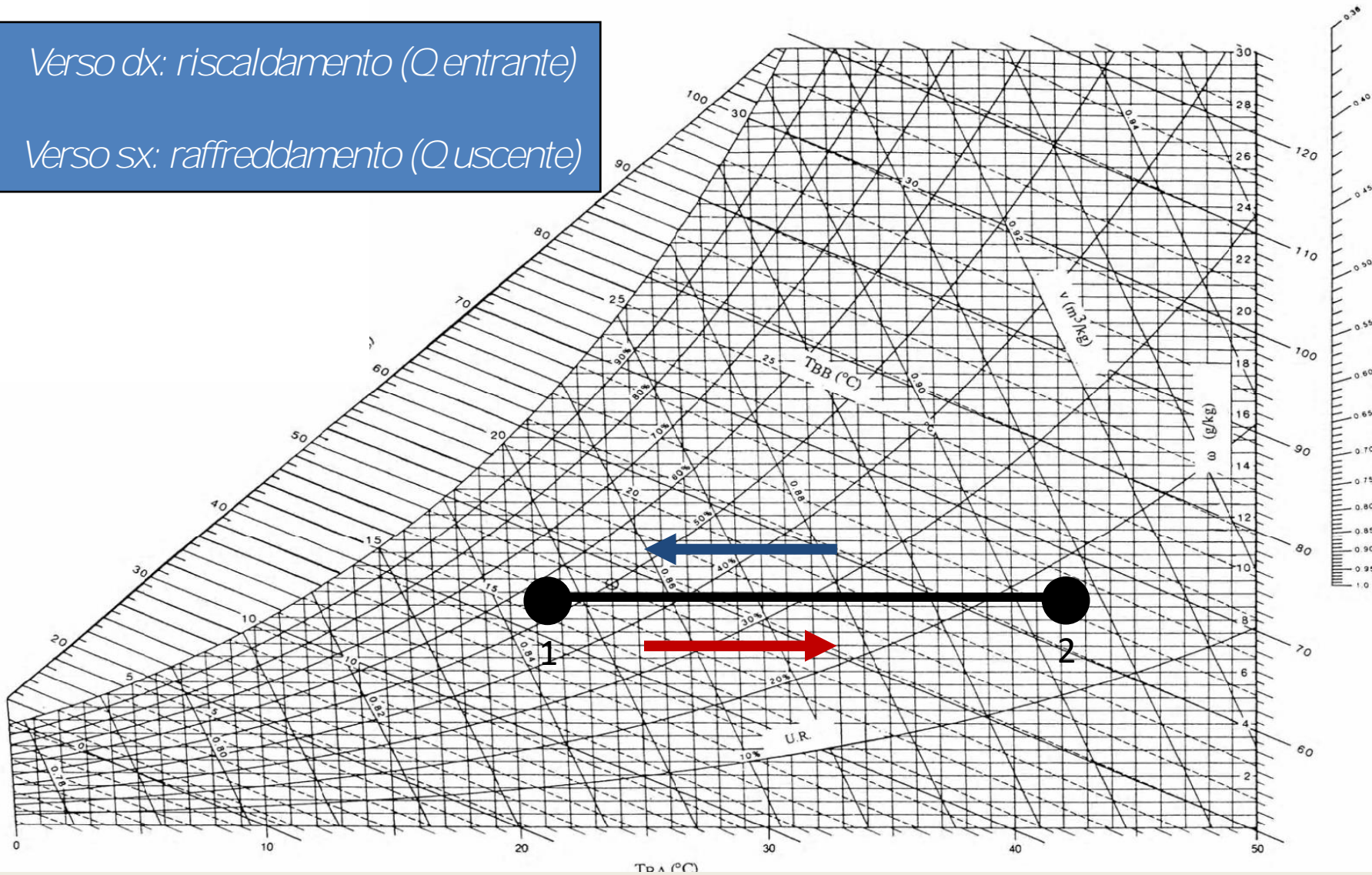


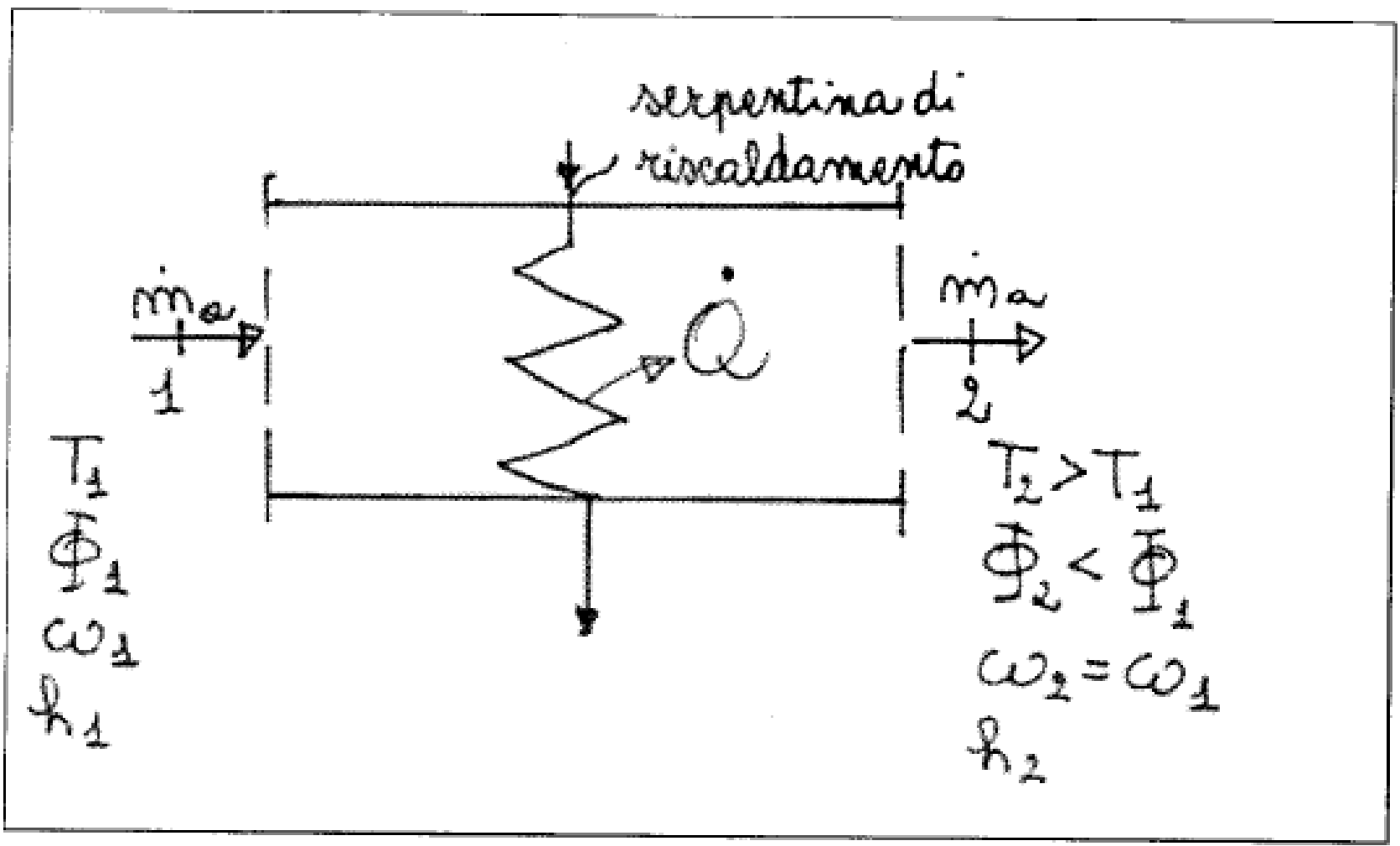


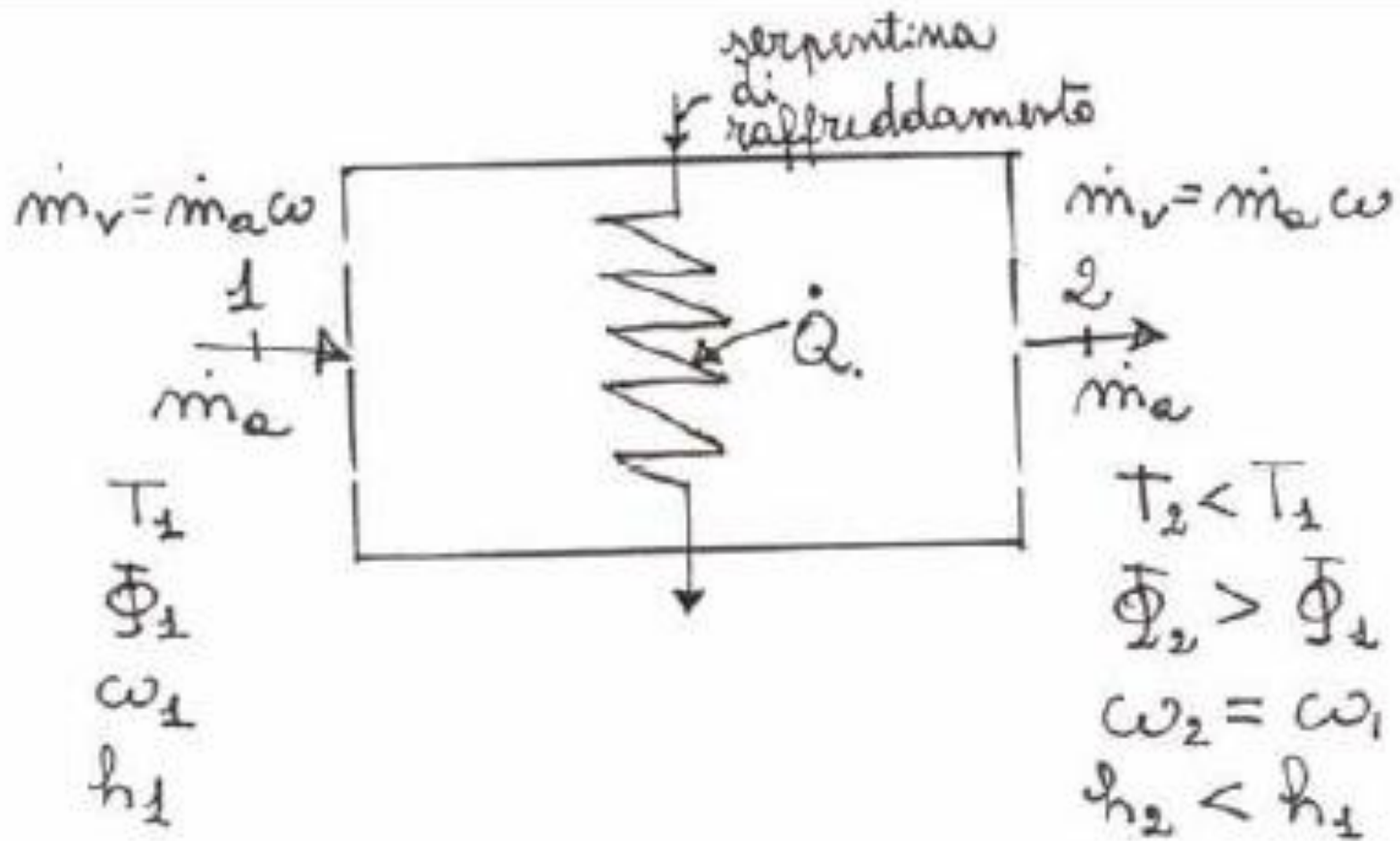
RISCALDAMENTO E RAFFREDDAMENTO SENSIBILE

Verso dx: riscaldamento (Q entrante)

Verso sx: raffreddamento (Q uscente)



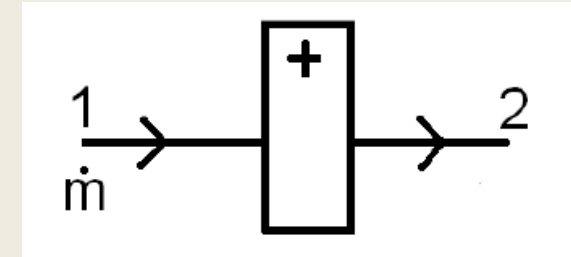




SEMPLICE RISCALDAMENTO E SEMPLICE RAFFREDDAMENTO.

Si definiscono “sensibili”, cioè non hanno effetti sull’umidità specifica dell’aria umida.

Pertanto, ω resta costante. Affinché avvenga ciò, in caso di raffreddamento, la temperatura superficiale della batteria di scambio termico deve essere non inferiore alla T di rugiada dell’aria umida.



RISCALDAMENTO

$$\dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2} = \dot{m}_a \quad \text{BILANCIO MASSA ARIA}$$

$$\dot{m}_a \cdot h_1 + \dot{Q}_{BC} = \dot{m}_a \cdot h_2 \quad \text{BILANCIO ENERGIA}$$

$$\dot{m}_a \cdot \omega_1 = \dot{m}_a \cdot \omega_2 \quad \text{BILANCIO MASSA ACQUA}$$

Dal bilancio di energia si ricava la potenza fornita all’aria umida, da parte di una batteria calda (Q_{BC})

$$\dot{Q}_{BC} \equiv \dot{m}_a \cdot (h_2 - h_1) :$$

RAFFREDDAMENTO SEMPLICE (senza deumidificazione)

$$\dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2} = \dot{m}_a$$

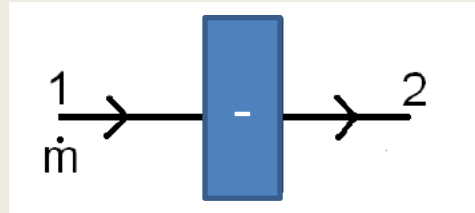
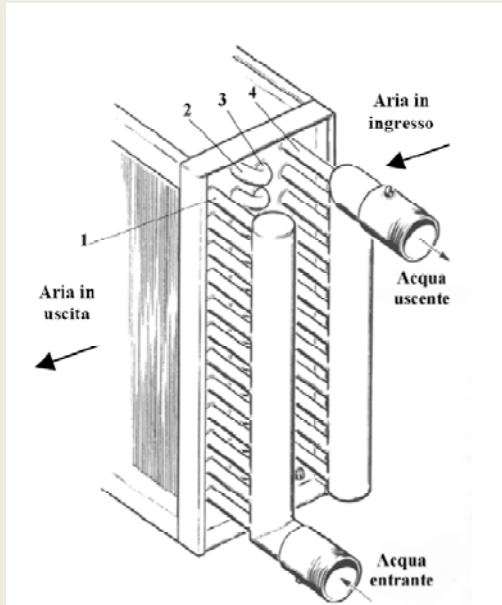
BILANCIO MASSA ARIA

$$\dot{m}_a \cdot h_1 = \dot{m}_a \cdot h_2 + Q_{BF}$$

BILANCIO ENERGIA

$$\dot{m}_a \cdot \omega_1 = \dot{m}_a \cdot \omega_2$$

BILANCIO MASSA ACQUA

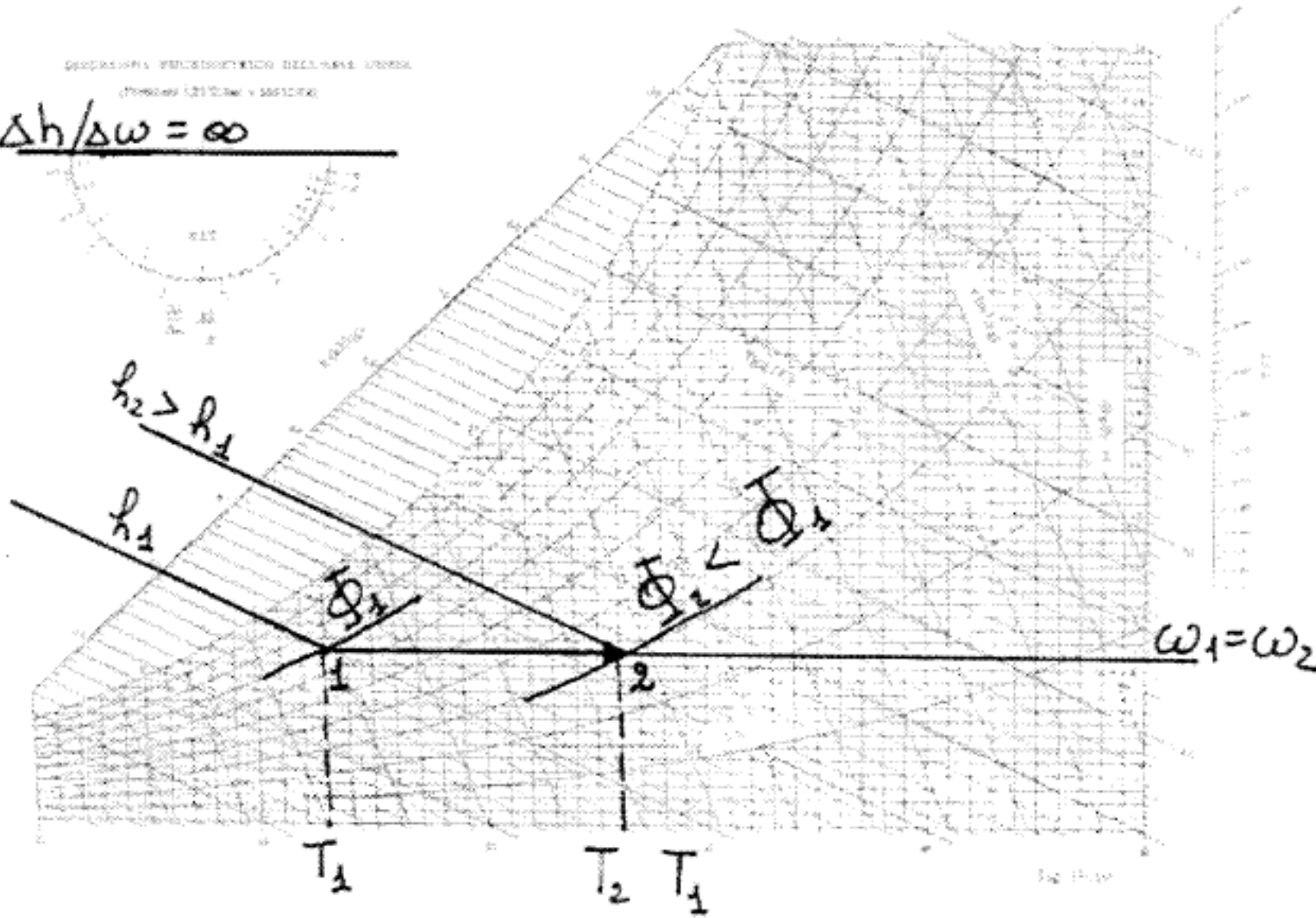


Dal bilancio di energia si ricava la *potenza sottratta all'aria umida*, da parte di una batteria fredda (Q_{BF})

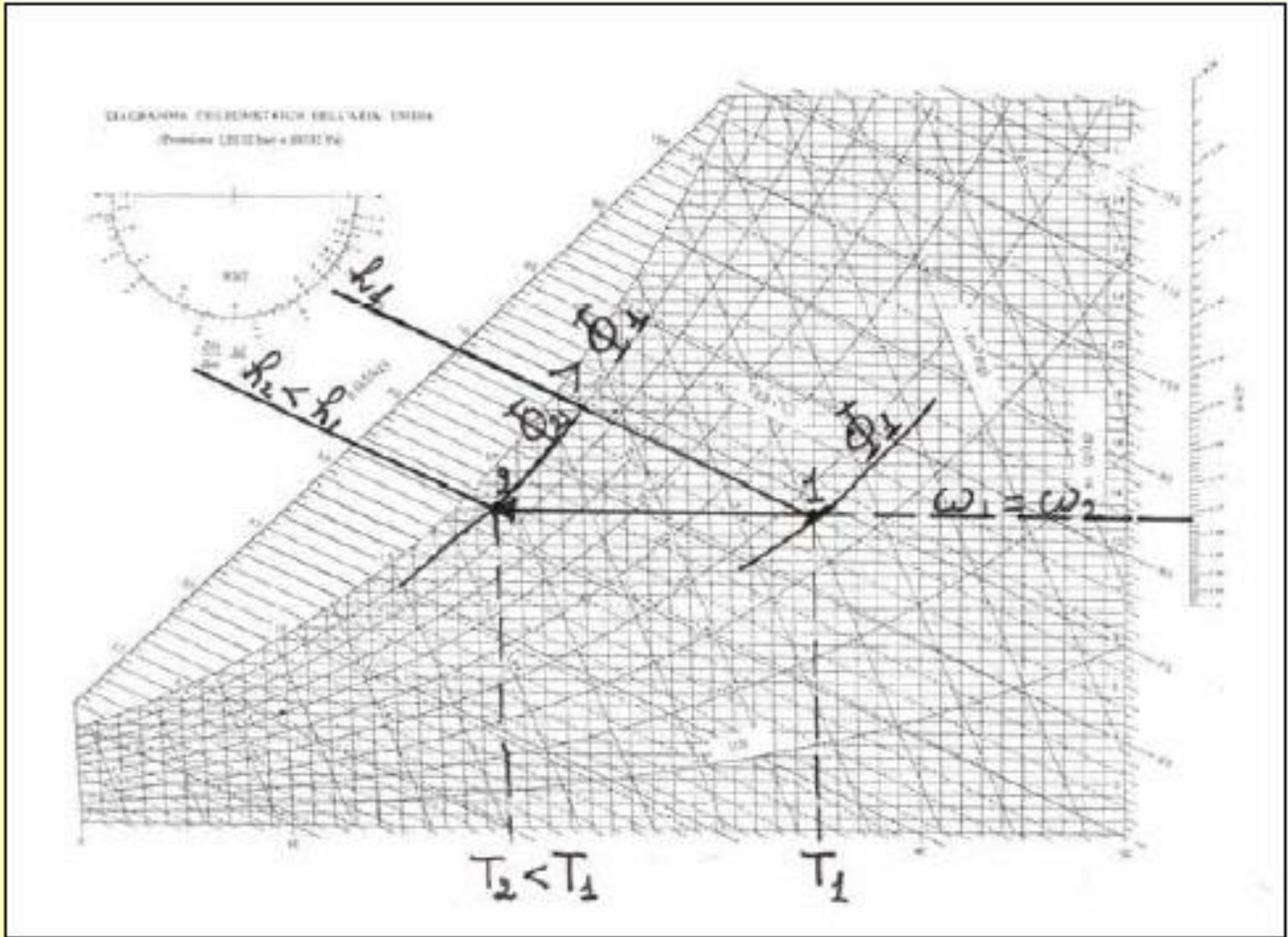
$$Q_{BF} = \dot{m}_a \cdot (h_1 - h_2)$$

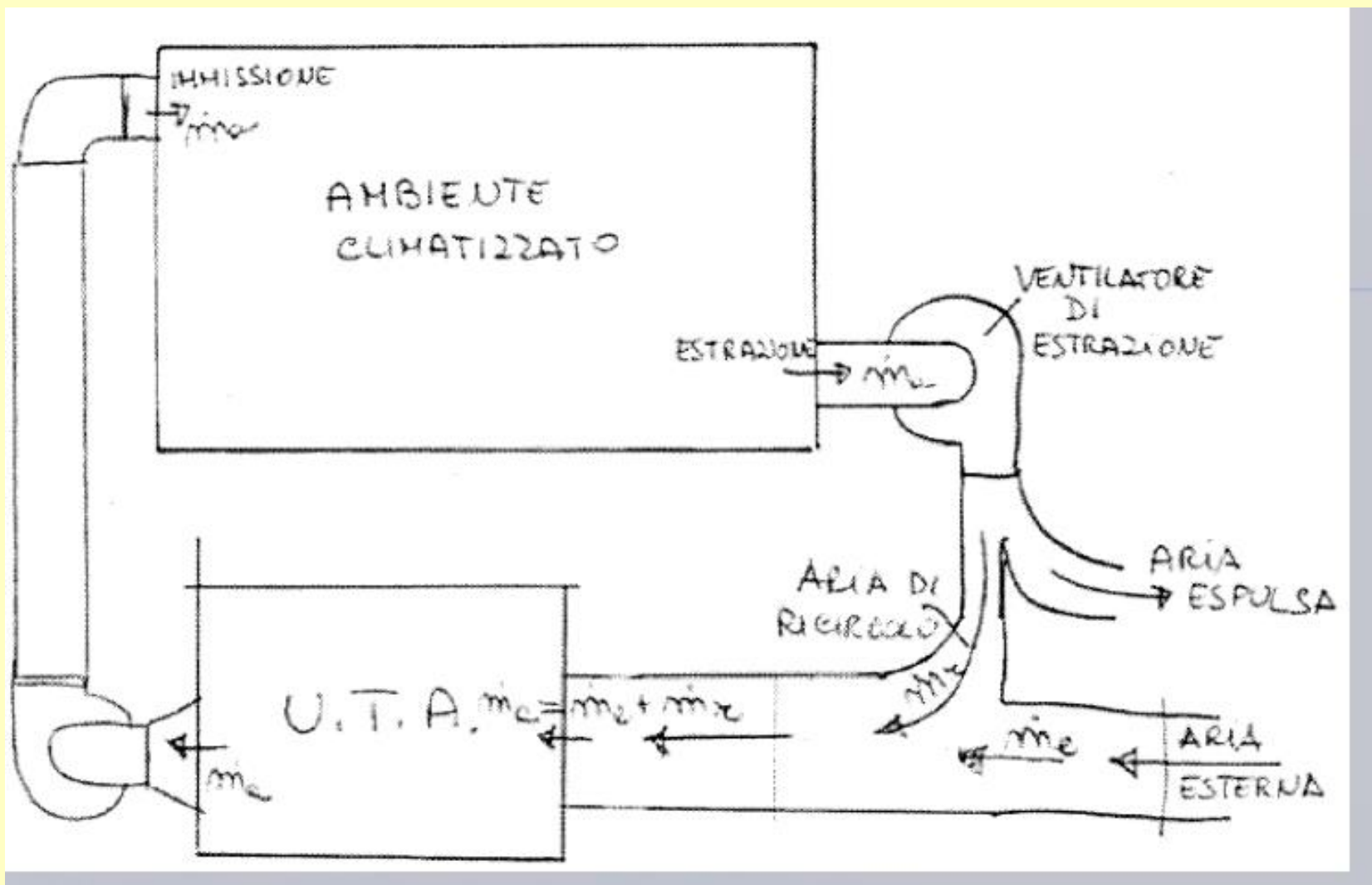
Riscaldamento a umidità specifica costante ($\omega=0$)

$\Delta h / \Delta \omega = \infty$



Raffreddamento a umidità specifica costante ($\omega=0$)

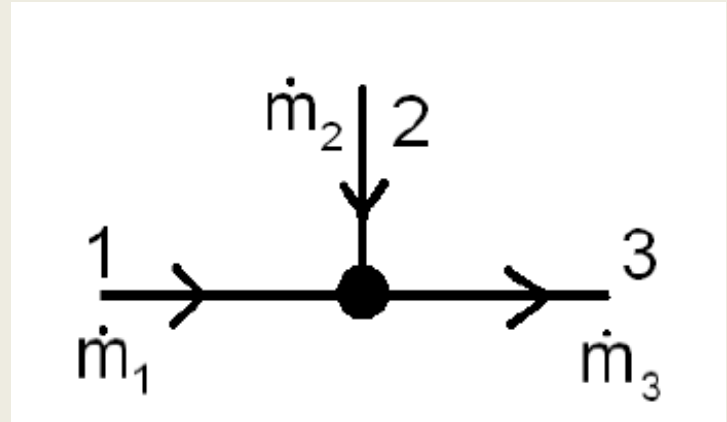




MESCOLAMENTO ADIABATICO

Due portate di aria umida, in condizioni termodinamiche diverse, si mescolano.

La portata in uscita è uguale alla somma delle portate massiche in entrata.



$$\dot{m}_{a1} + \dot{m}_{a2} = \dot{m}_{a3}$$

BILANCIO MASSA ARIA

$$\dot{m}_{a1} \cdot h_1 + \dot{m}_{a2} \cdot h_2 = \dot{m}_{a3} \cdot h_3$$

BILANCIO ENERGIA

$$\dot{m}_{a1} \cdot \omega_1 + \dot{m}_{a2} \cdot \omega_2 = \dot{m}_{a3} \cdot \omega_3$$

BILANCIO MASSA ACQUA

MESCOLAMENTO ADIABATICO

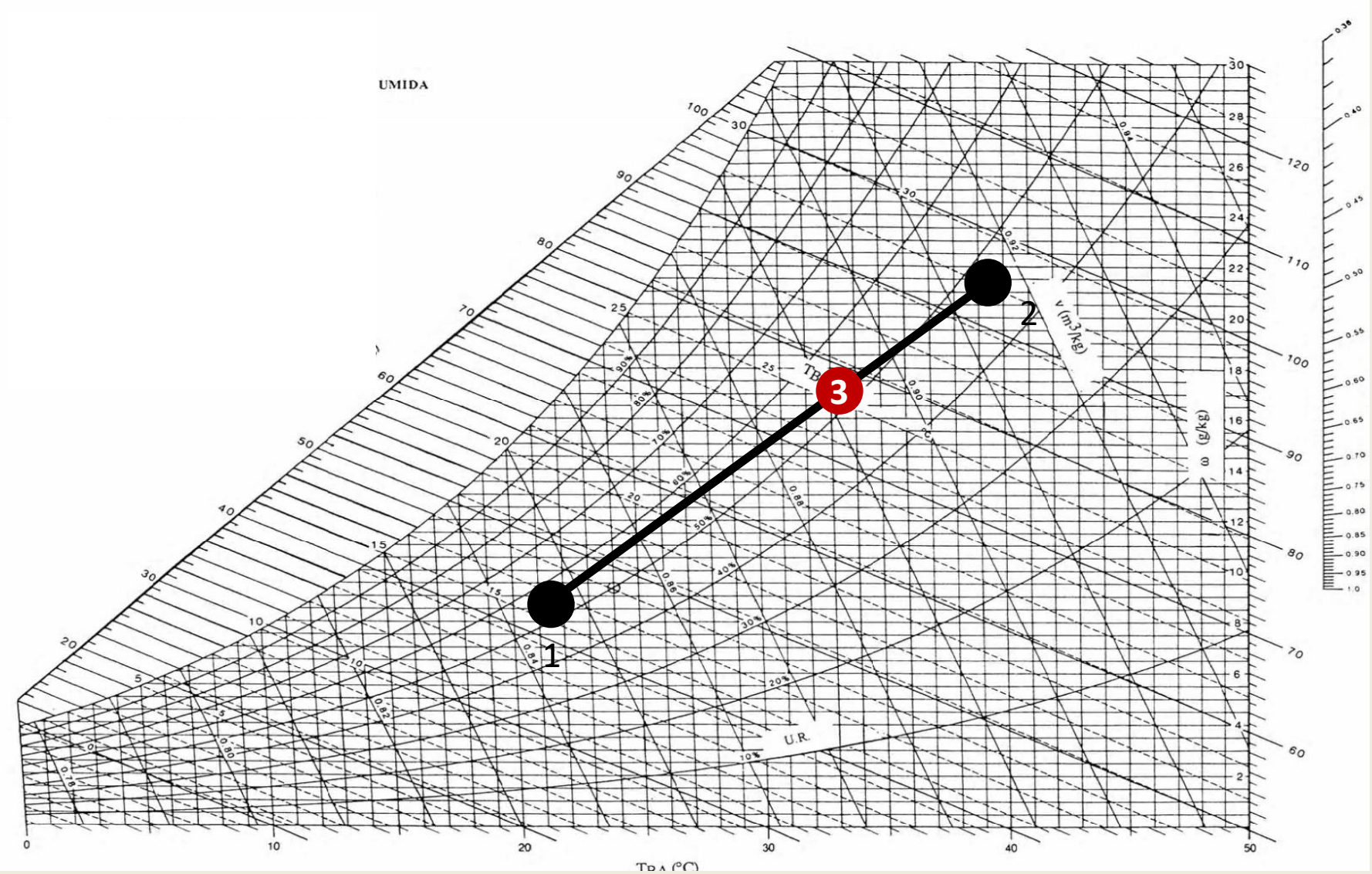
$$h_3 = h_1 \cdot \left(\dot{m}_{a1} / \dot{m}_{a3} \right) + h_2 \cdot \left(\dot{m}_{a2} / \dot{m}_{a3} \right)$$

$$\omega_3 = \omega_1 \cdot \left(\dot{m}_{a1} / \dot{m}_{a3} \right) + \omega_2 \cdot \left(\dot{m}_{a2} / \dot{m}_{a3} \right)$$

Graficamente, sul diagramma psicrometrico, posso unire con un segmento i 2 punti. Lo stato termodinamico del punto in uscita si troverà su tale segmento.

Per trovarlo, sarà sufficiente capire che questo sarà più vicino al punto caratterizzante la portata massica maggiore. Calcolo la percentuale della portata massica maggiore rispetto alla totale, poniamo il 60%. Il punto in uscita sarà ad una distanza pari al complemento a 1 di tale percentuale, partendo dal punto con portata massica maggiore (quindi, 40%).

MESCOLAMENTO ADIABATICO

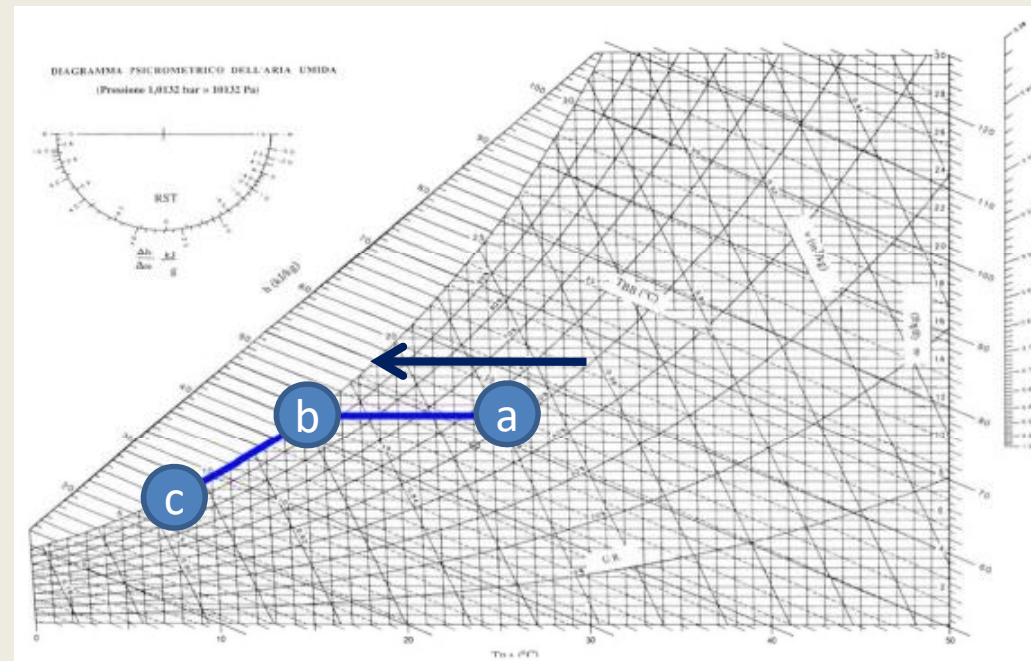


RAFFREDDAMENTO CON DEUMIDIFICAZIONE.

*Partendo da un punto sul diagramma psicrometrico, si raggiunge, muovendosi ad **umidità** specifica costante verso temperature inferiori, la curva di umidità relativa al 100% e quindi la T di rugiada.*

*Continuando il processo (muovendosi in basso lungo la curva U.R. 100%), parte **dell'acqua** contenuta **nell'aria** umida passa in fase liquida e quindi **CONDENSA***

In una prima fase (a,b), prima di andare al di sotto della T_r il raffreddamento era stato sensibile (effetti solo sulla temperatura), ora diviene sensibile più latente (b,c), avendo effetti sia sulla T che sulla ω .



RAFFREDDAMENTO CON DEUMIDIFICAZIONE

$$\dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2} = \dot{m}_{a3} \quad \text{BILANCIO MASSA ARIA}$$

$$\dot{m}_a \cdot h_1 = Q_{BF} + \dot{m}_a \cdot h_2 + \dot{m}_l \cdot h_l \quad \text{BILANCIO DI ENERGIA}$$

$$\dot{m}_a \cdot \omega_1 = \dot{m}_a \cdot \omega_2 + \dot{m}_l \quad \text{BILANCIO MASSA ACQUA}$$

UMIDIFICAZIONE

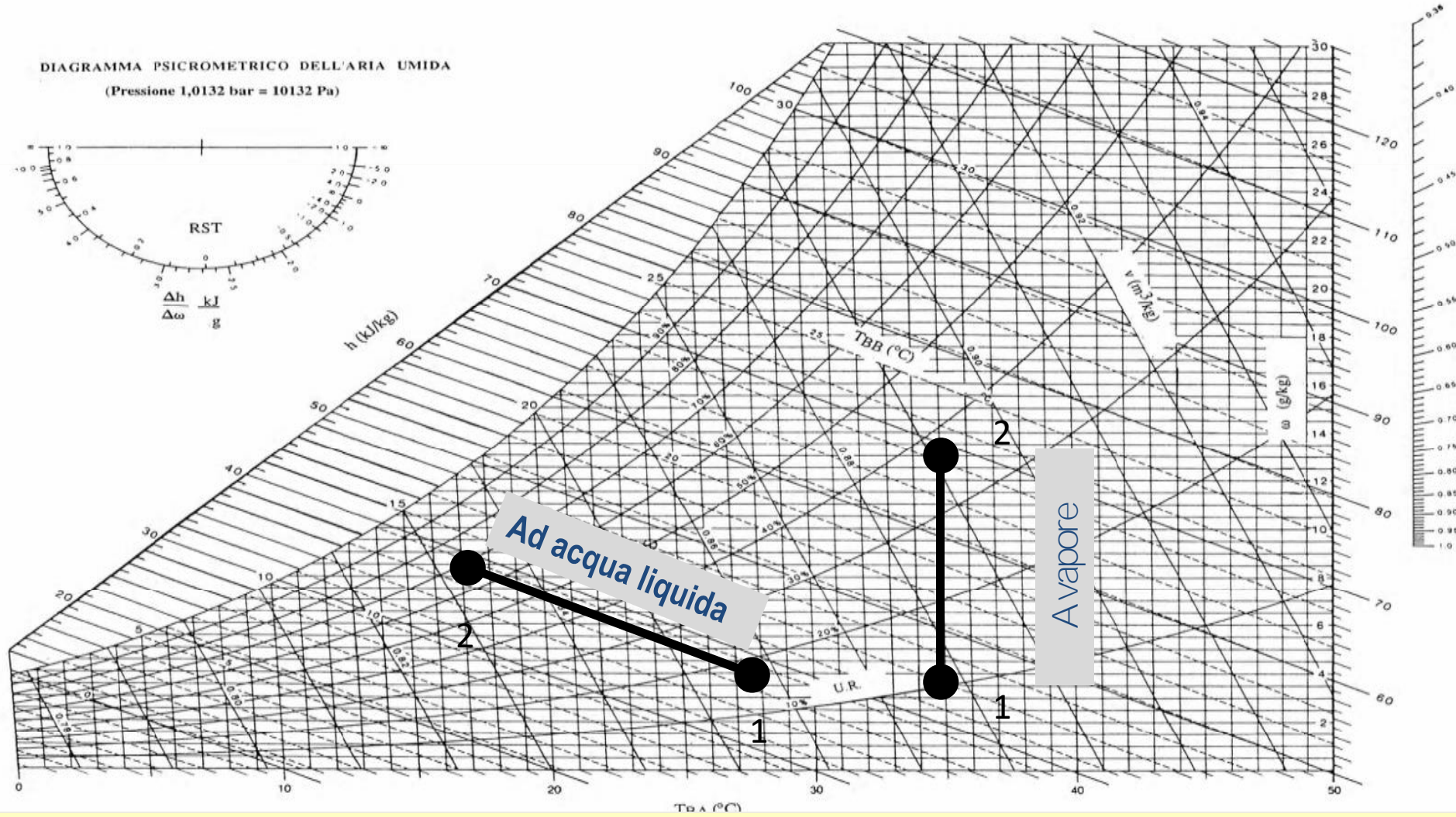
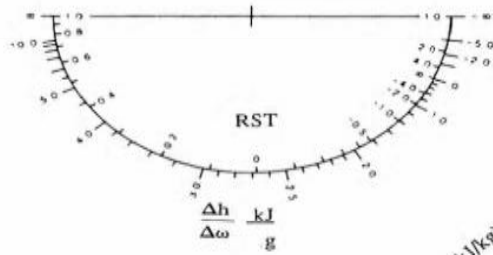
Può essere di due tipi:

- 1. Ad acqua liquida, spruzzata all'interno della corrente d'aria.*
- 2. A vapore, iniettato all'interno della corrente d'aria.*

Nel primo caso, è una trasformazione quasi ISOENTALPICA

Nel secondo caso, induce un incremento di ENTALPIA.

DIAGRAMMA PSICROMETRICO DELL'ARIA UMIDA
 (Pressione 1,0132 bar = 10132 Pa)



UMIDIFICAZIONE

La portata di umidificazione è ovviamente la stessa nei due casi, a parità di $\Delta\omega$.

$$\dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2} = \dot{m}_{a3} \quad \text{BILANCIO MASSA ARIA}$$

$$\dot{m}_a \cdot h_1 + \dot{m}_w \cdot h_w = \dot{m}_a \cdot h_2 \quad \text{BILANCIO DI ENERGIA}$$

$$\dot{m}_{a1} \cdot \omega_1 + \dot{m}_w = \dot{m}_{a2} \cdot \omega_2 \quad \text{BILANCIO MASSA ACQUA}$$

UMIDIFICAZIONE

Il Diagramma psicrometrico ha come coordinate “h” ed “ ω ”.

Pertanto, la pendenza di un segmento di retta in tale diagramma è rappresentata proprio da rapporto $\Delta h / \Delta \omega$

Operando sui bilanci di massa di acqua ed energia, si dimostra che tale rapporto è uguale a h_w (entalpia dell'acqua, in fase liquida o aeriforme)

$$\Delta h / \Delta \omega = h_w$$

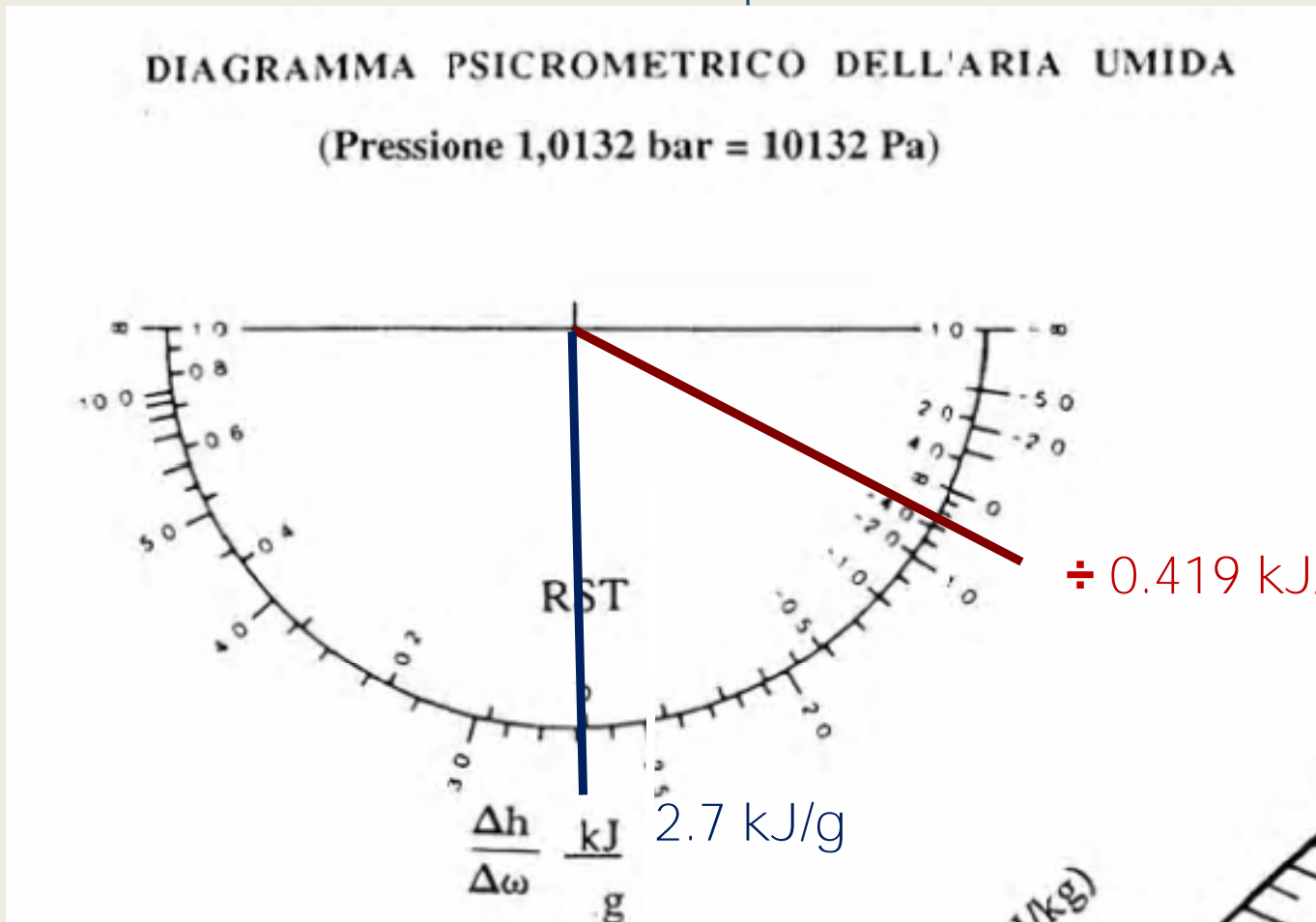
Il valore h_w fornisce, sul diagramma psicrometrico di Mollier, la pendenza della trasformazione di umidificazione:

- Circa isoentalpica se umidifico con acqua liquida
- Circa isoterma se umidifico con vapore

UMIDIFICAZIONE

Il valore $h_w (= \Delta h / \Delta \omega)$ fornisce, sul diagramma psicrometrico:

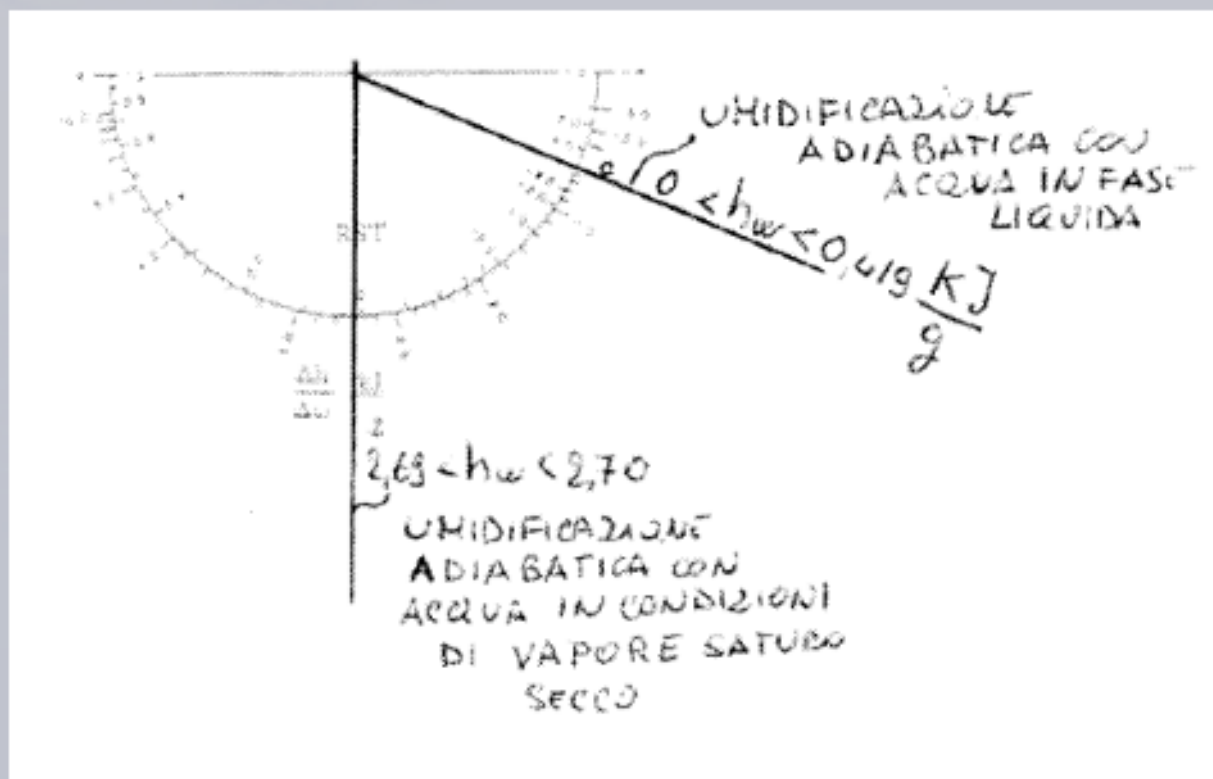
1. Acqua liquida (tra 0 e 100 °C): $h_w = h_{liq} = c_p \times T = 0 \div 0.419$ kJ/g
2. Vapore (poco sopra i 100 °C): $h_w = h_{vap} = 2.7$ kJ/g



Pendenza della trasformazione

Nel secondo caso, poiché in pratica negli impianti di condizionamento si utilizza un vapore saturo secco, con temperature intorno ai $110 + 120^{\circ}\text{C}$, i valori che h_w può assumere variano nell'intervallo $2690 - 2704 \text{ kJ/kg} = 2,69 - 2,70 \text{ kJ/g}$.

Sul goniometro del diagramma psicrometrico si individua una zona molto ristretta sulla scala esterna con direzione molto prossima alla verticale e cioè all'andamento delle isoterme $T_{b,a}$.



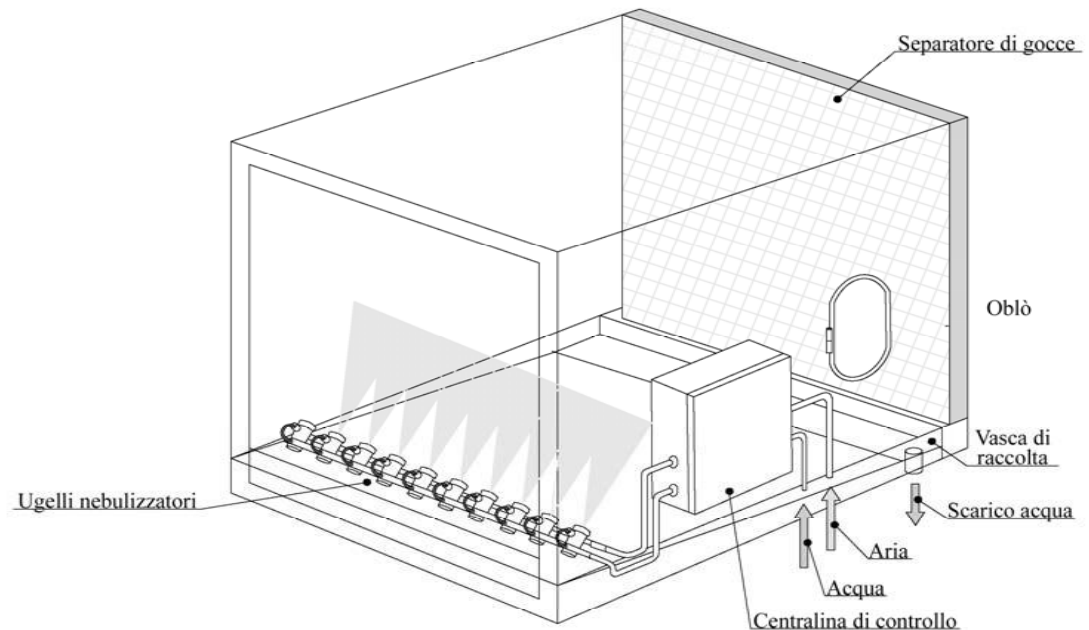
UMIDIFICAZIONE

| T | p | Volume spec. | | Entalpia specifica | | | Energia interna specifica | | |
|-----|----------|--|--------------------------------|--------------------|-------------------|-----------------------|---------------------------|-------------------|-----------------------|
| | | $V_1 \cdot 10^3$ m ³ /kg | v_{vs} m ³ /kg | h_1 kJ/kg | h_{vs} KJ/kg | $h_{vs}-h_1$ kJ/kg | u_1 kJ/kg | u_{vs} kJ/kg | $u_{vs}-u_1$ kJ/kg |
| 0 | 0,006107 | 1,0002 | 206,3 | 0,00 | 2500,5 | 2500,5 | 0 | 2374,5 | 2374,5 |
| 5 | 0,008722 | 1,0000 | 147,1 | 21,05 | 2509,7 | 2488,6 | 21,05 | 2360,4 | 2339,3 |
| 10 | 0,012275 | 1,0002 | 106,4 | 42,03 | 2518,9 | 2476,9 | 42,03 | 2388,3 | 2346,3 |
| 15 | 0,017045 | 1,0008 | 77,96 | 62,96 | 2528,1 | 2465,1 | 62,96 | 2895,2 | 2332,2 |
| 20 | 0,02337 | 1,0017 | 57,84 | 88,86 | 2587,3 | 2458,4 | 88,86 | 2402,1 | 2318,2 |
| 25 | 0,03166 | 1,0029 | 43,41 | 104,74 | 2546,4 | 2441,7 | 104,74 | 2409,0 | 2304,3 |
| 30 | 0,04241 | 1,0048 | 32,94 | 125,61 | 2555,5 | 2429,9 | 125,61 | 2415,7 | 2290,1 |
| 35 | 0,05621 | 1,0059 | 25,26 | 146,47 | 2564,5 | 2418,0 | 146,46 | 2422,5 | 2276,0 |
| 40 | 0,07374 | 1,0078 | 19,56 | 167,34 | 2573,5 | 2406,2 | 167,83 | 2429,8 | 2262,0 |
| 45 | 0,09581 | 1,0099 | 15,28 | 188,22 | 2582,4 | 2394,2 | 188,21 | 2436,0 | 2247,8 |
| 50 | 0,12384 | 1,0121 | 12,05 | 209,11 | 2591,3 | 2382,2 | 209,10 | 2442,7 | 2233,6 |
| 55 | 0,15740 | 1,0146 | 9,583 | 280,00 | 2600,1 | 2370,1 | 229,98 | 2449,3 | 2219,3 |
| 60 | 0,1992 | 1,0172 | 7,682 | 250,91 | 2608,8 | 2857,9 | 250,89 | 2455,8 | 2204,9 |
| 65 | 0,2501 | 1,0200 | 6,205 | 271,84 | 2617,4 | 2345,5 | 271,81 | 2462,2 | 2190,4 |
| 70 | 0,3116 | 1,0229 | 5,048 | 292,78 | 2625,9 | 2383,1 | 292,75 | 2468,6 | 2175,8 |
| 75 | 0,3855 | 1,0260 | 4,135 | 313,74 | 2634,2 | 2320,5 | 313,70 | 2474,8 | 2161,1 |
| 80 | 0,4736 | 1,0293 | 3,410 | 384,72 | 2642,5 | 2307,8 | 334,67 | 2481,8 | 2146,3 |
| 85 | 0,5780 | 1,0327 | 2,829 | 355,72 | 2650,7 | 2295,0 | 355,66 | 2487,2 | 2131,5 |
| 90 | 0,7011 | 1,0863 | 2,361 | 376,75 | 2658,7 | 2281,9 | 376,68 | 2498,2 | 2116,5 |
| 95 | 0,8453 | 1,0400 | 1,982 | 397,80 | 2666,6 | 2268,8 | 397,71 | 2499,1 | 2101,4 |
| 100 | 1.0132 | 1,0438 | 1.673 | 418.88 | 2674,4 | 2255.5 | 418,77 | 2504,9 | 2086.1 |

UMIDIFICAZIONE ad acqua liquida

La sezione umidificante degli impianti è usata in regime invernale per umidificare l'aria in uscita dal pre-riscaldamento. L'obiettivo è aumentare l'umidità specifica della portata di aria trattata.

Nel caso di umidificazione ad acqua liquida, l'aria si raffredda perché cede all'acqua aggiunta l'energia necessaria per farla passare in fase aeriforme.



Fonte: il manuale della climatizzazione

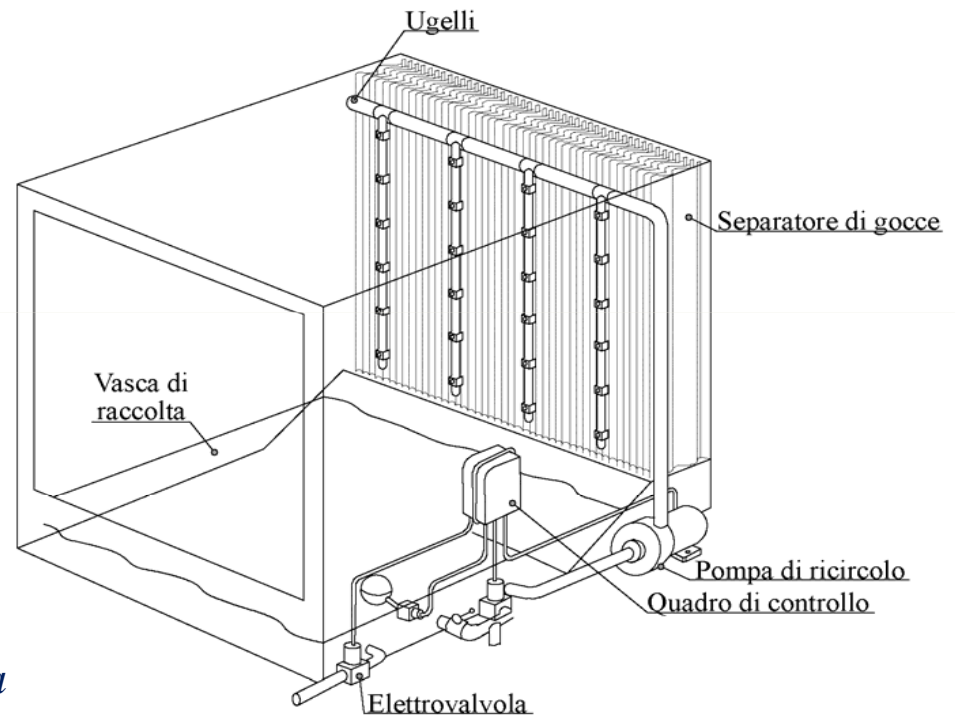
UMIDIFICAZIONE a vapore

Tale soluzione, pur incrementando la umidità specifica dell'aria, realizza una trasformazione isoterma, la qual cosa vale a dire che non vi è riduzione della temperatura da parte dell'aria umidificata. Questo perché l'acqua è già in fase vapore.

L'umidificazione a vapore, pertanto, non richiederà post-riscaldamento.



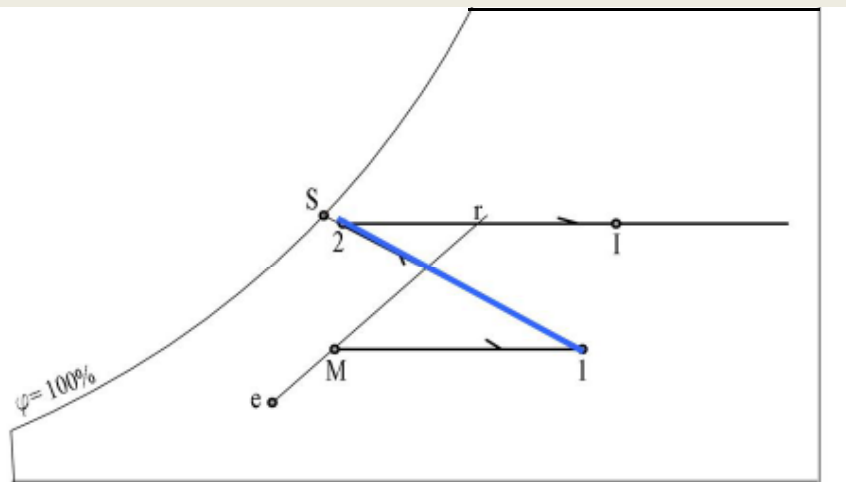
Diffusione di vapore multiplo a disposizione verticale



Fonte: il manuale della climatizzazione

Ad acqua liquida

- *a pacco evaporante bagnato*
- *ad aria compressa*
- *ad acqua nebulizzata*
- *ad ultrasuoni*



Isotermini

- *ad iniezione di vapore*
- *diffusori di vapore*

