



Fisica Tecnica (Modulo 1)- LM4

Fisica Tecnica – L23

A.A. 2021-2022





Lezione n. 12

Termodinamica dell'aria umida



Aria **umida**: miscela di **aria secca** e **vapore acqueo** a comportamento **ideale**

Aria secca: **ossigeno** O₂, **azoto** N₂, Ar, CO₂

Elemento umido: **vapore acqueo** H₂O

Inoltre: polveri, particelle in sospensione e fumi proporzionalmente al grado di inquinamento.

Aria secca	\bar{M} (kg/kmole)	% volume	% massa
O ₂	32	21	23
N ₂	28	78	75,5
Ar	40	0,93	1,3
CO ₂	44	0,03	0,04

Aria secca: componente unico, **non varia** lungo le trasformazioni.

Vapore acqueo: **può variare** significativamente lungo le trasformazioni (es. **umidificazione** e **deumidificazione**).

Convenzione: **massa di riferimento** per le grandezze specifiche (psicrometriche) e per la portata: solo il **componente secco** (quantità di vapore sempre molto piccola rispetto alla massa d'aria secca).

LEGGE DI DALTON

La **pressione totale** di una miscela è data dalla **somma delle pressioni parziali** dei singoli componenti.

Pressione parziale di un componente di una miscela di gas: **pressione** che caratterizzerebbe **quel componente se, da solo, occupasse il volume occupato dall'intera miscela**.

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

Aria umida:

$$p = p_a + p_v$$

p_a : pressione parziale dell'aria secca [Pa]

p_v : pressione parziale del vapore [Pa]

In tutte le trasformazioni consideriamo l'aria a pressione atmosferica: a 101,325 kPa.

GRANDEZZE PSICROMETRICHE FONDAMENTALI

Umidità specifica x: rapporto tra la **massa di vapore** e quella di **aria secca** presenti in un certo volume d'aria umida.

$$x = \frac{M_v}{M_a} \quad \left[\frac{g_v}{kg_a} \right]$$

Aria secca e vapore gas ideali \Rightarrow **I legge di stato:**

$$p_v \cdot V = M_v \cdot R_v \cdot T \Rightarrow M_v = \frac{p_v \cdot V}{R_v \cdot T}$$

$$p_a \cdot V = M_a \cdot R_a \cdot T \Rightarrow M_a = \frac{p_a \cdot V}{R_a \cdot T}$$



$$x = \frac{M_v}{M_a} = \frac{\frac{p_v \cdot V}{R_v \cdot T}}{\frac{p_a \cdot V}{R_a \cdot T}} = \frac{p_v \cdot V}{R_v \cdot T} \cdot \frac{R_a \cdot T}{p_a \cdot V} = \frac{R_a}{R_v} \cdot \frac{p_v}{p_a} = 0,622 \cdot \frac{p_v}{p_a} = 0,622 \cdot \frac{p_v}{p_{atm} - p_v}$$

Umidità relativa φ : rapporto tra la **massa di vapore** e quella di **vapore** che renderebbe **satura** l'aria alla **stessa temperatura**.

$$\varphi = \frac{M_v}{M_{vs}} \Big|_T \qquad 0 < \varphi < 1$$

Quantità di vapore necessaria alla miscela perché **raggiunga le condizioni di saturazione** a quella **stessa temperatura**. Si misura in %.

Umidità **specific**a: **effettiva quantità di vapore** presente in una miscela

Umidità **relativa**: **distanza** di una miscela di aria umida **dallo stato di saturazione**

- **$\varphi = 1$** (100%): aria **satura**, contiene la **massima quantità di vapore** possibile alla sua temperatura;
- **$\varphi = 0,5$** (50%): **quantità di vapore** pari alla **metà** di quella che renderebbe **satura** la miscela alla **stessa temperatura**.

Saturazione: condizione termodinamica strettamente dipendente dalla **temperatura:**

Stessa quantità di vapore (medesima x) \rightarrow **diversi valori di umidità relativa** a diverse temperature.

- Maggiore capacità di contenere vapore a temperature più elevate:

grosse quantità di vapore ad elevate temperature \rightarrow bassi valori di umidità relativa

piccole quantità di vapore a basse temperature \rightarrow saturazione.

La legge di stato dei **gas ideali:**

$$p_v \cdot V = M_v \cdot R_v \cdot T \Rightarrow M_v = \frac{p_v \cdot V}{R_v \cdot T}$$

$$p_{vs} \cdot V = M_{vs} \cdot R_v \cdot T \Rightarrow M_{vs} = \frac{p_{vs} \cdot V}{R_v \cdot T}$$



$$\varphi = \frac{M_v}{M_{vs}} \Big|_T = \frac{\frac{p_v \cdot V}{R_v \cdot T}}{\frac{p_{vs} \cdot V}{R_v \cdot T}} \Big|_T = \frac{p_v}{p_{vs}} \Big|_T$$

Umidità assoluta o **Densità di vapore acqueo**: rapporto tra la **massa di vapore** presente nella miscela ed il suo **volume**.

$$d = \frac{M_v}{V} \quad \left[\frac{g_v}{m^3} \right]$$

Relazione tra **umidità relativa** e **umidità assoluta**:

$$\varphi = \frac{M_v}{M_{vs}} \Big|_T = \frac{d_v}{d_{vs}} \Big|_T$$

dove

d_{vs} : **umidità assoluta** in condizioni di **saturazione** alla stessa **temperatura**

Volume specifico: volume occupato dall'unità di massa di aria secca

$$v = \frac{V}{M_a} \quad \left[\frac{m^3}{kg} \right]$$

Entalpia dell'aria umida: somma dell'entalpia dell'aria secca e di quella del vapore:

$$H = H_a + H_v = M_a \cdot h_a + M_v \cdot h_v \quad [J]$$

La relativa **grandezza specifica** si ottiene dividendo per la massa di aria secca:

$$h = \frac{H}{M_a} = \frac{M_a \cdot h_a + M_v \cdot h_v}{M_a} = h_a + \frac{M_v}{M_a} \cdot h_v = h_a + x \cdot h_v$$

I Principio della Termodinamica (sistemi aperti): $dq = dh + dl'$

$$dl' = 0 \Rightarrow dq = dh \Rightarrow q_{12} = h_2 - h_1$$

Quantità di calore per unità di massa scambiata in un **riscaldamento** dallo **stato 1** allo **stato 2** → **variazione di entalpia** specifica tra i due stati

Calore fornito per far passare l'aria **da un ipotetico stato iniziale 0** (h_0, t_0) **allo stato attuale** (h, t) → **variazione di entalpia specifica** → **somma** delle componenti relative all'aria secca ed al vapore:

$$h - h_0 = c_{pa} \cdot (t - t_0) + x \cdot [r_0 + c_{pv} \cdot (t - t_0)]$$

Calore fornito all'aria secca solo sensibile

Calore fornito al vapore in parte **sensibile** e in parte **latente**.

r_0 : calore **latente di vaporizzazione** dell'acqua alla **temperatura t_0**

Stato di riferimento: $t_0 = 0^\circ\text{C}$; $h_0 = 0 \text{ J/kg}$

$$h = c_{pa} \cdot t + x \cdot (r_0 + c_{pv} \cdot t)$$

L'**equazione scritta**, risolta in forma parametrica, consente di disegnare il **diagramma psicrometrico**: diagramma **di stato** relativo all'**aria umida a pressione costante** (p_{atm}) con **tre assi fondamentali**:

asse orizzontale delle **temperature** t ($^\circ\text{C}$);

asse verticale delle **umidità specifiche** x (g_v/kg_a)

asse obliquo delle **entalpie specifiche** h (kJ/kg_a)

DIAGRAMMA PSICROMETRICO
(P = 101,325 kPa)

Coordinate termodinamiche
del punto P:

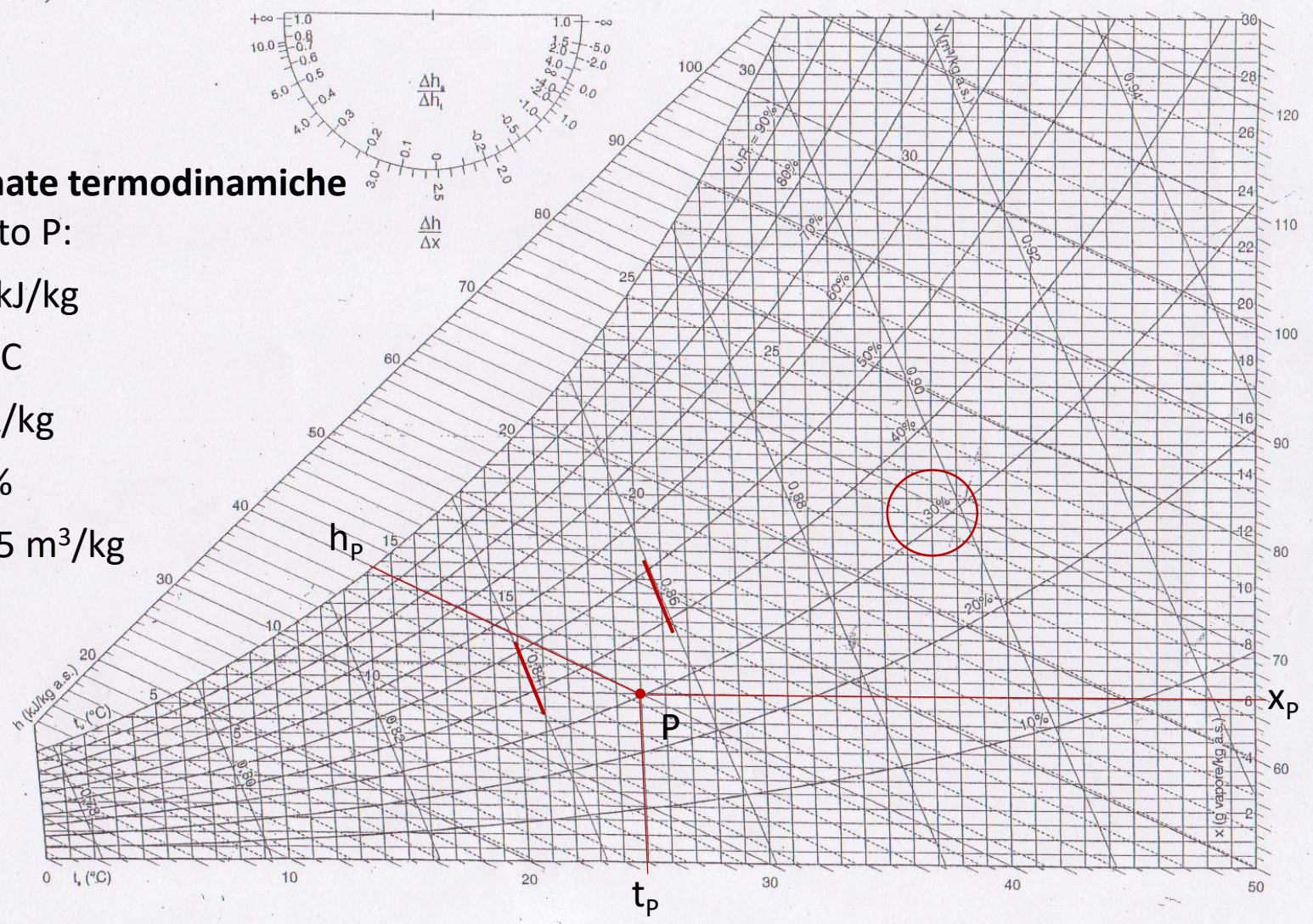
$h_p = 40 \text{ kJ/kg}$

$t_p = 25 \text{ }^\circ\text{C}$

$x_p = 6 \text{ g}_v/\text{kg}$

$\phi = 30 \%$

$v_p = 0,85 \text{ m}^3/\text{kg}$



TRASFORMAZIONI DELL'ARIA UMIDA A PRESSIONE TOTALE COSTANTE

Trattamenti dell'aria umida per **usi civili ed industriali**.

Combinazioni di **processi semplici**:

- **riscaldamento e raffreddamento sensibile**
- **umidificazione e deumidificazione**
- **miscelazione** tra masse/portate diverse di aria umida

Mirano a realizzare condizioni **di benessere termo-igrometrico** negli ambienti interni.

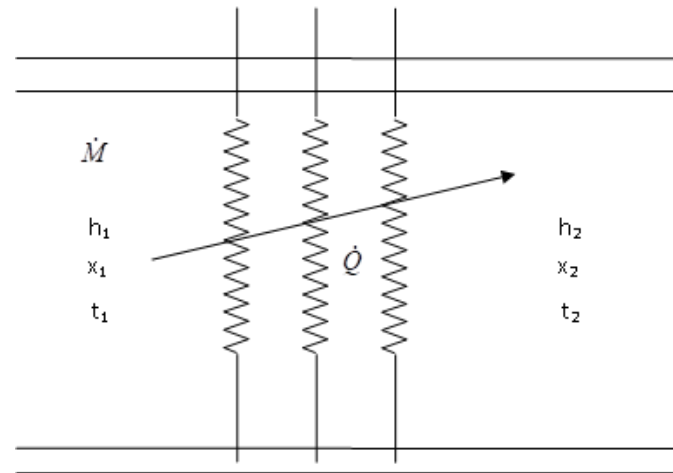
Estate: $t_a = 26 \text{ }^\circ\text{C}$

$\phi = 50 \%$

Inverno: $t_a = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

$\phi = 50 \%$

Riscaldamento sensibile



L'aria riceve energia termica da uno **scambiatore di calore** mantenendo **inalterato il contenuto di vapore d'acqua ($x = \text{costante}$)**

Aumento di temperatura e diminuzione di umidità relativa (aria più calda e asciutta).

Conservazione della massa $\dot{M}_1 = \dot{M}_2 = \dot{M}$

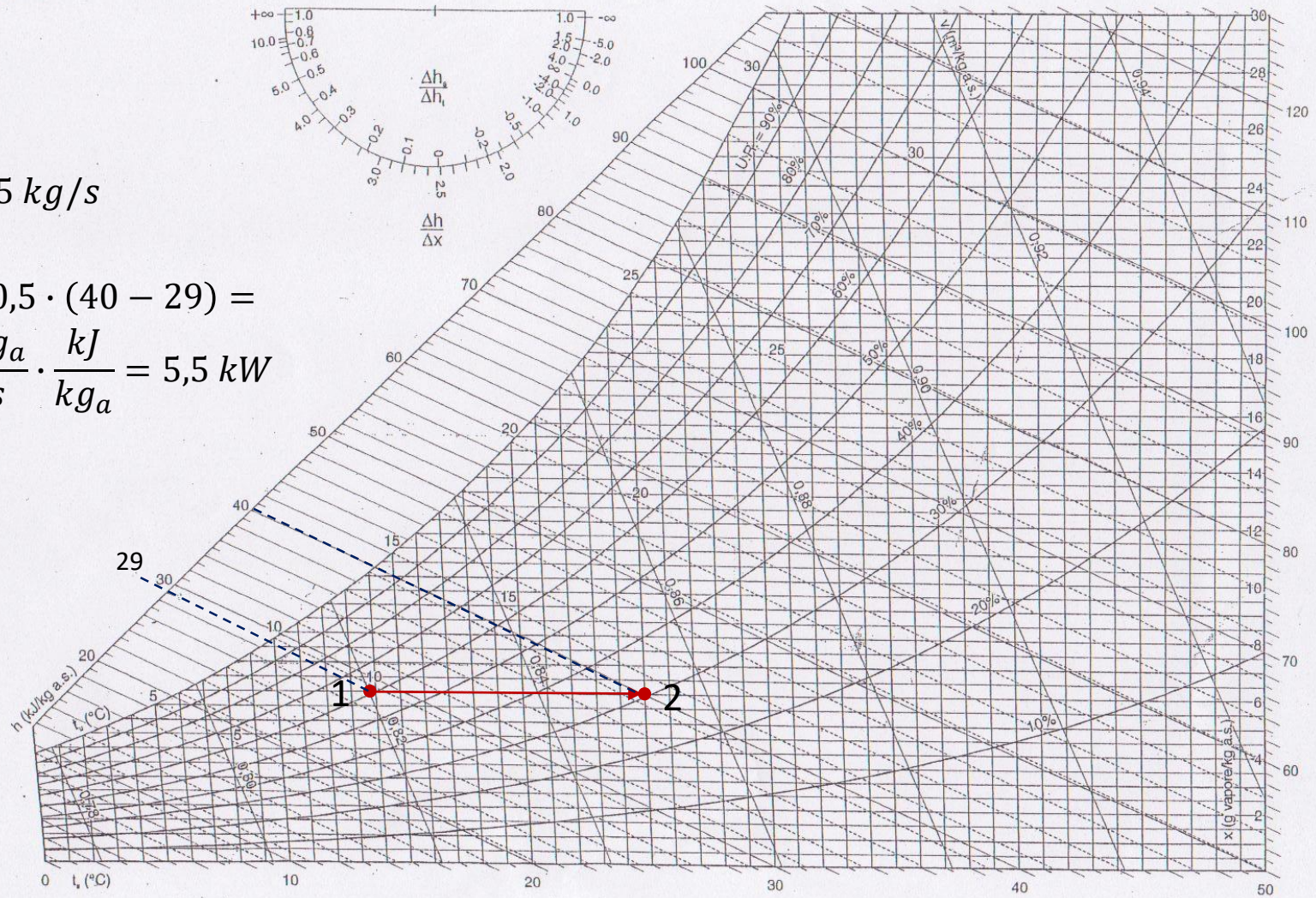
« $\dot{M} \cdot x_1 = \dot{M} \cdot x_2 \Rightarrow x_1 = x_2$

Conservazione dell'energia $\dot{q}_{12} = h_2 - h_1 \Rightarrow \dot{Q}_{12} = \dot{M} \cdot (h_2 - h_1)$

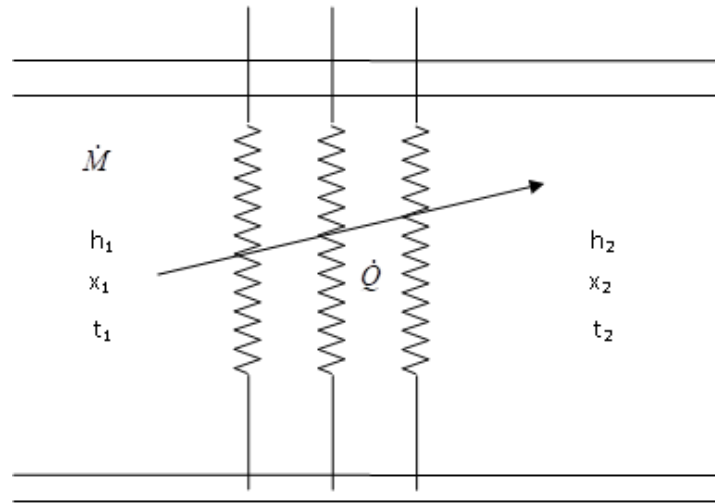
DIAGRAMMA PSICROMETRICO
(P = 101,325 kPa)

$$M = 0,5 \text{ kg/s}$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{12} &= 0,5 \cdot (40 - 29) = \\ &= 5,5 \frac{\text{kg}_a}{\text{s}} \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_a} = 5,5 \text{ kW} \end{aligned}$$



Raffreddamento sensibile



L'aria cede energia termica ad uno **scambiatore di calore** mantenendo **inalterato** il **contenuto di vapore d'acqua** ($x = \text{costante}$)

Diminuzione di temperatura ed **aumento di umidità relativa** (aria più fredda e umida).

Conservazione della massa $\dot{M}_1 = \dot{M}_2 = \dot{M}$

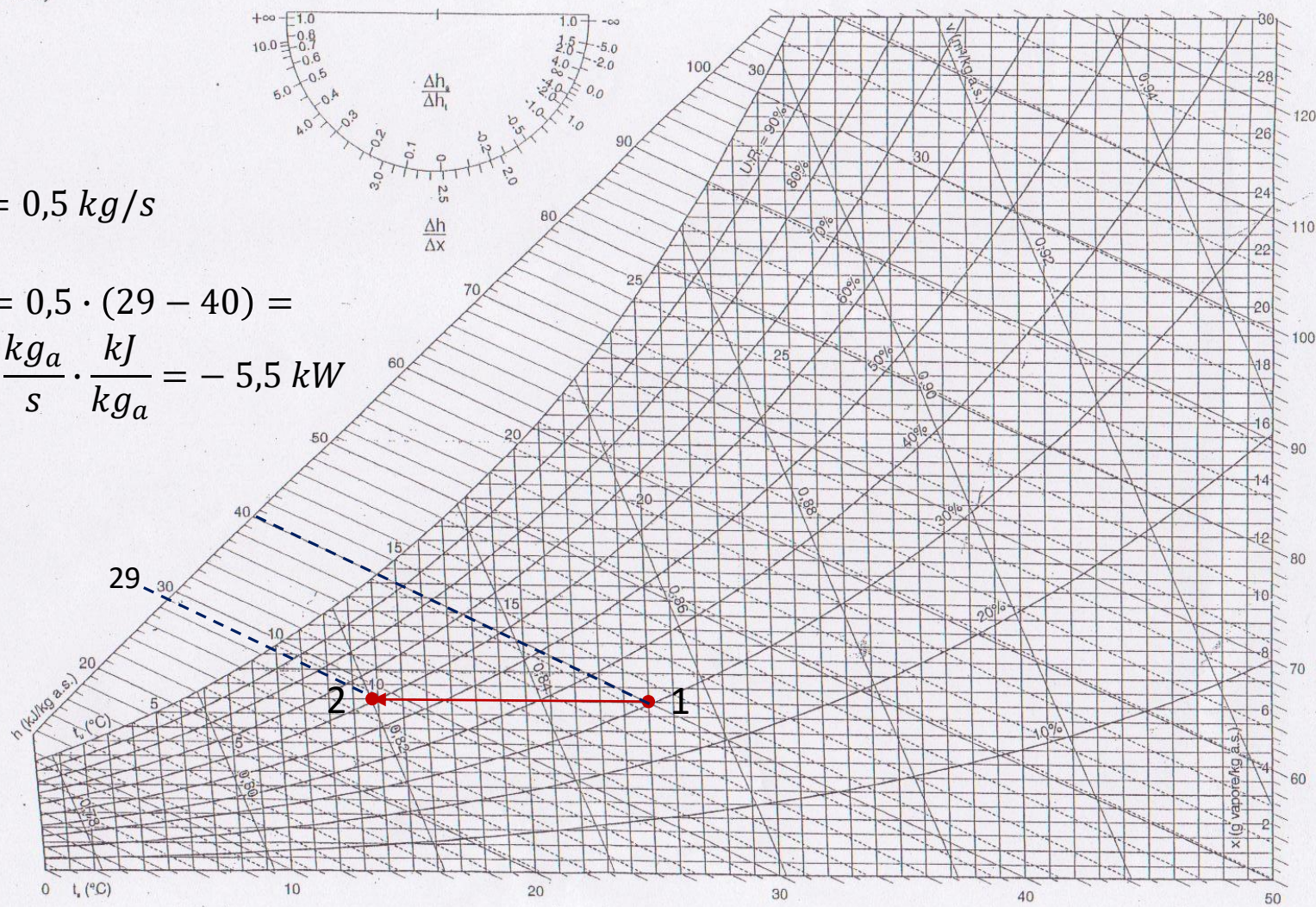
« $\dot{M} \cdot x_1 = \dot{M} \cdot x_2 \Rightarrow x_1 = x_2$

Conservazione dell'energia $\dot{q}_{12} = h_2 - h_1 \Rightarrow \dot{Q}_{12} = \dot{M} \cdot (h_2 - h_1)$

DIAGRAMMA PSICROMETRICO
(P = 101,325 kPa)

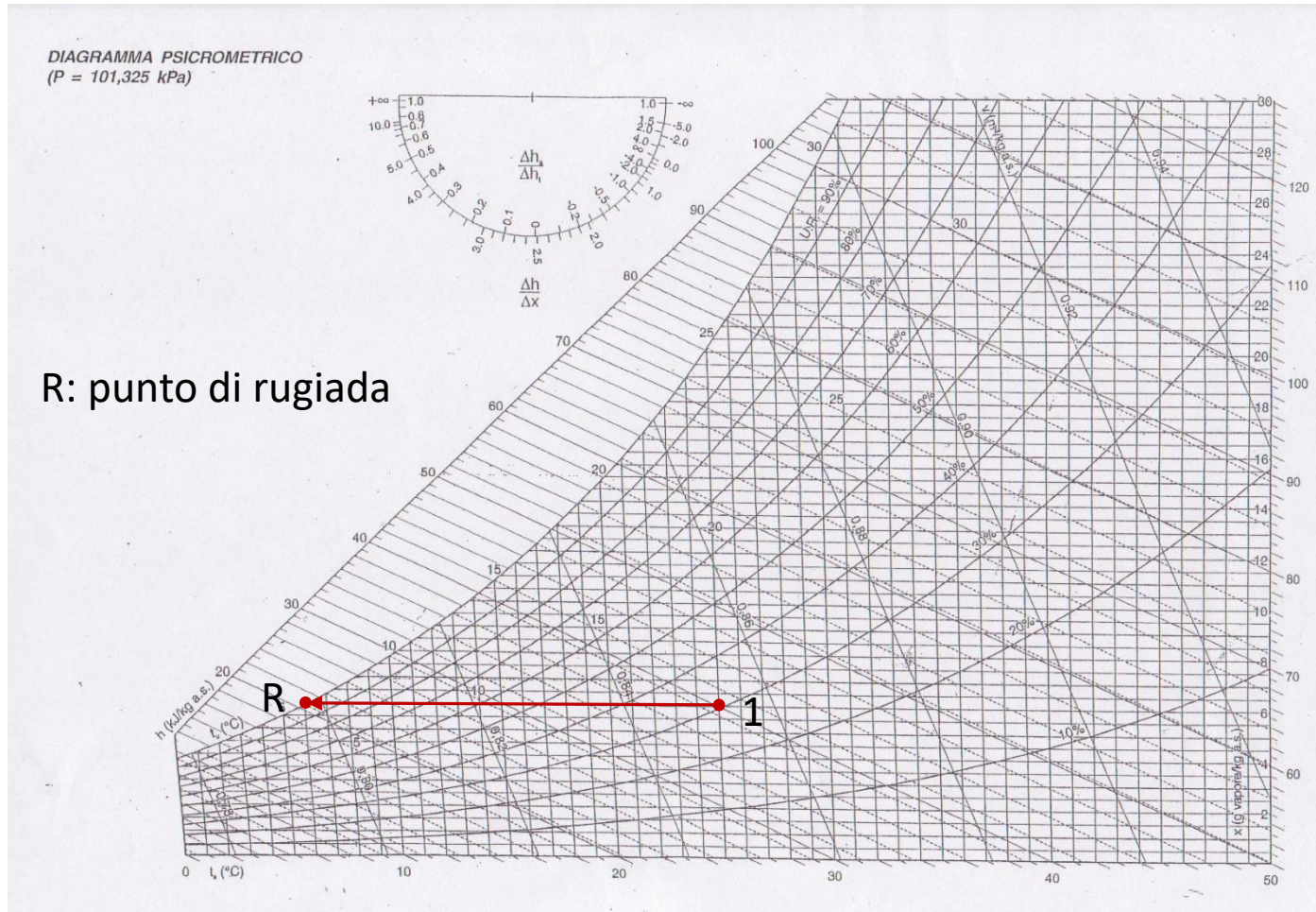
$$\dot{M} = 0,5 \text{ kg/s}$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{12} &= 0,5 \cdot (29 - 40) = \\ &= -5,5 \frac{\text{kg}_a}{\text{s}} \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_a} = -5,5 \text{ kW} \end{aligned}$$



Temperatura di rugiada

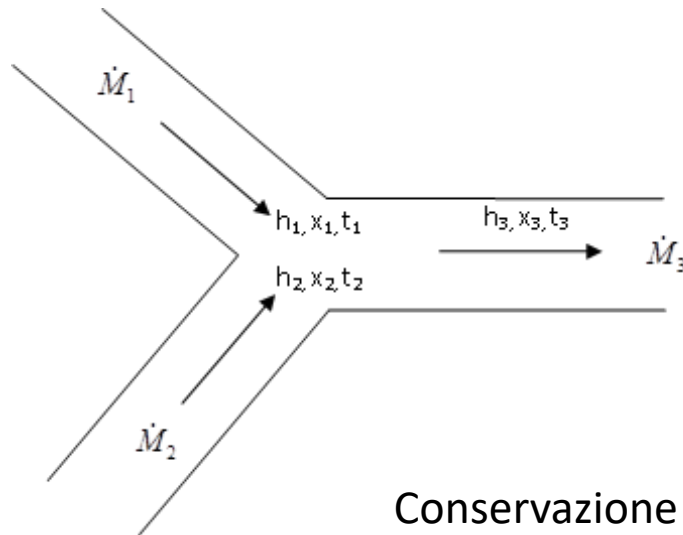
Temperatura dell'aria raggiunta mediante un **processo di raffreddamento** sensibile spinto fino alle condizioni di **saturazione**.



Miscelazione di due portate d'aria umida

Processo fondamentale di **risparmio energetico** negli **impianti di condizionamento con ricircolo d'aria**.

Miscelando **aria primaria** (prelevata **dall'esterno**) con **aria di ricircolo**, si effettua un **preriscaldamento** in regime invernale ed un **preraffreddamento** in regime estivo in modo gratuito.



Miscelazione di due portate d'aria nella **UTA (Unità di Trattamento Aria)** di un impianto di climatizzazione.

Conservazione della massa $\dot{M}_1 + \dot{M}_2 = \dot{M}_3$

«

$$\dot{M}_1 \cdot x_1 + \dot{M}_2 \cdot x_2 = \dot{M}_3 \cdot x_3$$

Conservazione dell'energia $\dot{M}_1 \cdot h_1 + \dot{M}_2 \cdot h_2 \pm \dot{Q} = \dot{M}_3 \cdot h_3$

Condizione di adiabaticità: $\dot{Q} = 0$

Conservazione dell'energia $\dot{M}_1 \cdot h_1 + \dot{M}_2 \cdot h_2 = \dot{M}_3 \cdot h_3$

Soluzione del sistema di **tre equazioni in tre incognite**

$$x_3 = \frac{\dot{M}_1 \cdot x_1 + \dot{M}_2 \cdot x_2}{\dot{M}_3} \qquad h_3 = \frac{\dot{M}_1 \cdot h_1 + \dot{M}_2 \cdot h_2}{\dot{M}_3}$$

Le coordinate del punto 3 sono espresse dalla **media ponderata** (con le portate) delle **coordinate dei punti 1 e 2**.

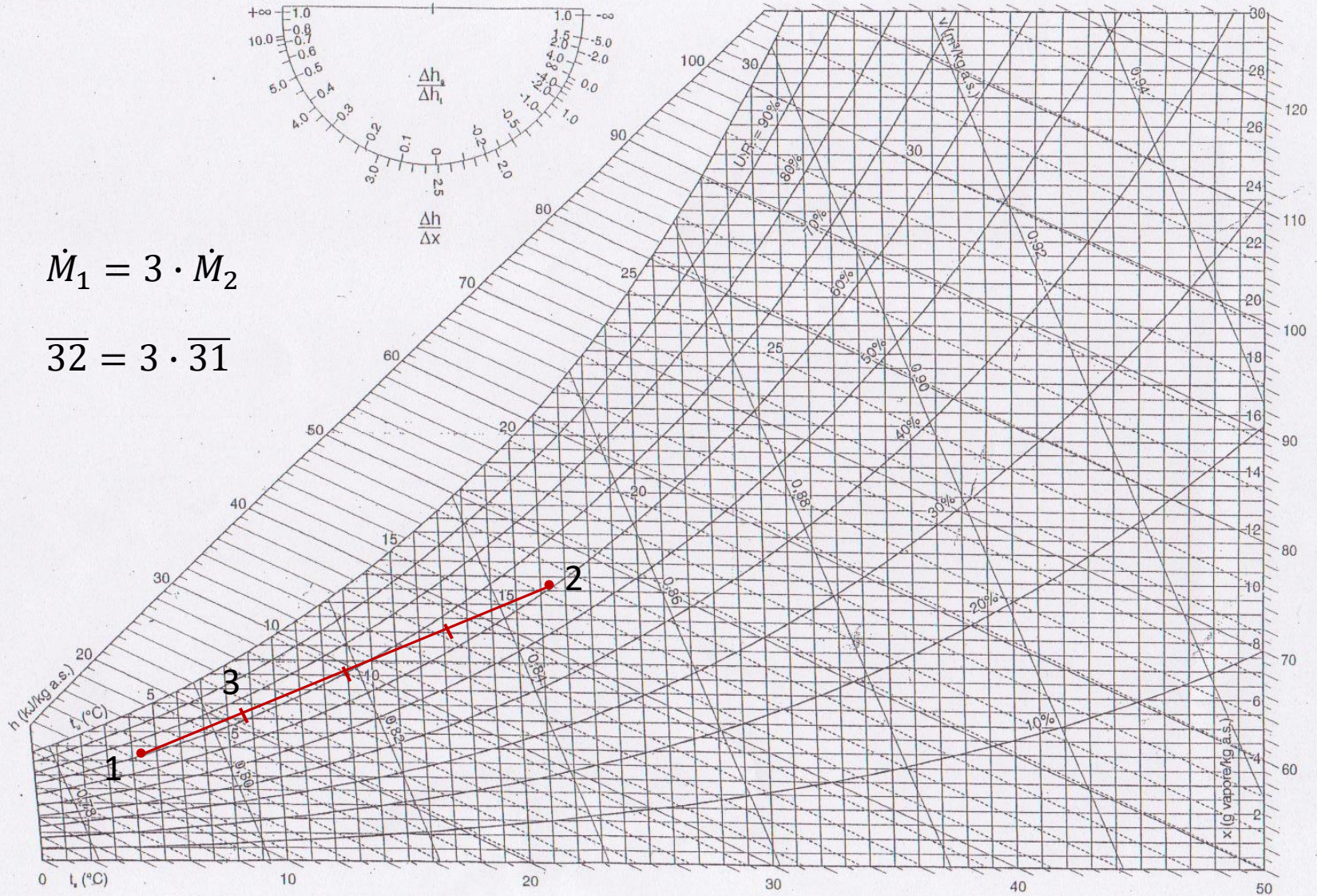
Soluzione **analoga** a quella ottenuta nel problema della **determinazione** delle coordinate in un sistema di assi cartesiani del **baricentro di un sistema di due masse concentrate** nei punti 1 e 2

Il **punto 3** si trova sul **segmento congiungente i punti 1 e 2** a **distanze inversamente proporzionali** al rapporto tra le portate

DIAGRAMMA PSICROMETRICO
 (P = 101,325 kPa)

$$\dot{M}_1 = 3 \cdot \dot{M}_2$$

$$\overline{32} = 3 \cdot \overline{31}$$



Secondo procedimento di soluzione del sistema di equazioni:

$$\dot{M}_1 + \dot{M}_2 = \dot{M}_3$$

$$\dot{M}_1 \cdot x_1 + \dot{M}_2 \cdot x_2 = \dot{M}_3 \cdot x_3$$

$$\dot{M}_1 \cdot h_1 + \dot{M}_2 \cdot h_2 = \dot{M}_3 \cdot h_3$$

$$\dot{M}_1 \cdot x_1 + \dot{M}_2 \cdot x_2 = \dot{M}_3 \cdot x_3 \Rightarrow \dot{M}_1 \cdot x_1 + \dot{M}_2 \cdot x_2 = (\dot{M}_1 + \dot{M}_2) \cdot x_3 \Rightarrow \dot{M}_1 \cdot (x_3 - x_1) = \dot{M}_2 \cdot (x_2 - x_3)$$

$$\dot{M}_1 \cdot h_1 + \dot{M}_2 \cdot h_2 = \dot{M}_3 \cdot h_3 \Rightarrow \dot{M}_1 \cdot h_1 + \dot{M}_2 \cdot h_2 = (\dot{M}_1 + \dot{M}_2) \cdot h_3 \Rightarrow \dot{M}_1 \cdot (h_3 - h_1) = \dot{M}_2 \cdot (h_2 - h_3)$$

$$\frac{h_3 - h_1}{h_2 - h_3} = \frac{\dot{M}_2}{\dot{M}_1}$$

$$\frac{x_3 - x_1}{x_2 - x_3} = \frac{\dot{M}_2}{\dot{M}_1}$$

Sui due assi h ed x le distanze di 3 da 1 e da 2 inversamente proporzionali al rapporto delle portate

$$\frac{h_3 - h_1}{h_2 - h_3} = \frac{x_3 - x_1}{x_2 - x_3}$$

Condizione di allineamento del punto 3 con i punti 1 e 2

Il punto 3 giace sul **segmento congiungente i punti 1 e 2** a distanze inversamente proporzionali al rapporto delle portate

Miscelazione non adiabatica: $\dot{Q} \neq 0$

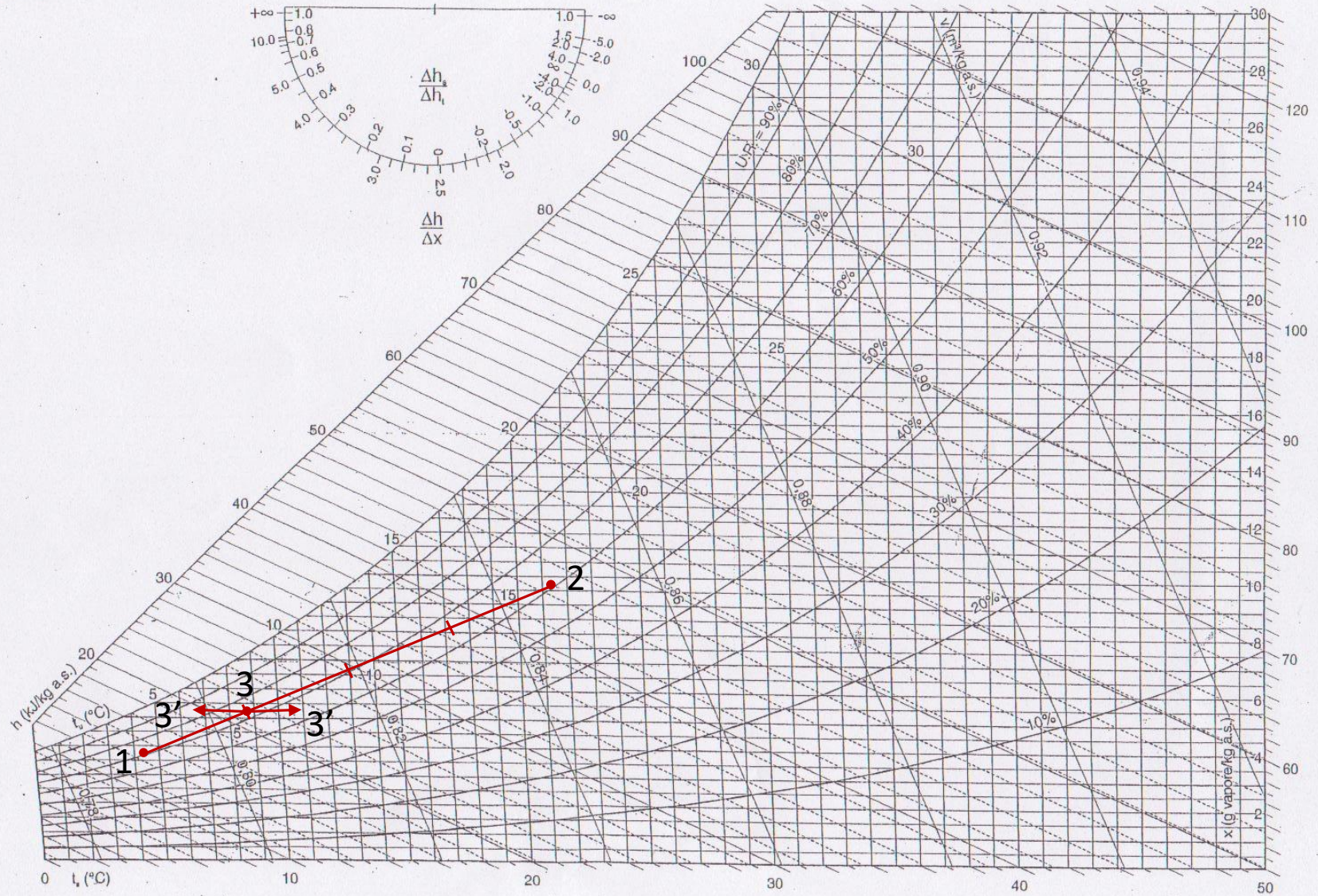
Conservazione dell'energia $\dot{M}_1 \cdot h_1 + \dot{M}_2 \cdot h_2 \pm \dot{Q} = \dot{M}_3 \cdot h_3$

Soluzione del sistema di tre equazioni in tre incognite:

$$x_3 = \frac{\dot{M}_1 \cdot x_1 + \dot{M}_2 \cdot x_2}{\dot{M}_3} \qquad h_3 = \frac{\dot{M}_1 \cdot h_1 + \dot{M}_2 \cdot h_2}{\dot{M}_3} \pm \frac{\dot{Q}}{\dot{M}_3}$$

Punto 3' (miscelazione non adiabatica delle due portate) determinato a **partire dal punto 3** (miscelazione adiabatica) **variando la sua entalpia specifica**, ad **umidità specifica costante**, in aumento se la potenza termica è entrante, in diminuzione, se è uscente.

DIAGRAMMA PSICROMETRICO
($P = 101,325 \text{ kPa}$)



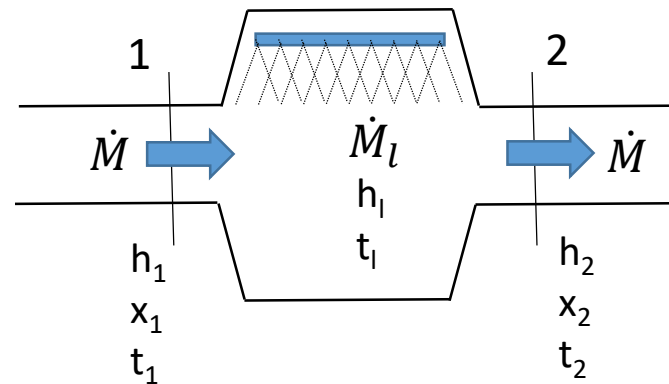
TRATTAMENTO INVERNALE

PROCESSO COMBINATO DI RISCALDAMENTO ED UMIDIFICAZIONE

In **regime invernale** l'aria (primaria + eventualmente secondaria) deve essere **riscaldata** → **diminuzione dell'umidità relativa**.

Diminuzione eccessiva dell'umidità relativa → **necessaria umidificazione** per il **benessere**.

Negli impianti di climatizzazione **umidificazione tramite saturazione adiabatica**



Principio di **conservazione della massa**:

$$\dot{M}_1 = \dot{M}_2 = \dot{M}$$

$$\dot{M} \cdot x_1 + \dot{M}_l = \dot{M} \cdot x_2 \Rightarrow \dot{M}_l = \dot{M} \cdot (x_2 - x_1) \quad (\text{portata d'acqua da nebulizzare})$$

I Principio della Termodinamica per sistemi aperti con lavoro tecnico nullo:

$$dQ = dH$$

Trasformazione **adiabatica** $dQ = 0 \Rightarrow dH = 0 \Rightarrow H_{in} = H_{fin}$

Entalpia in ingresso (**iniziale**): entalpia dell'aria nella **sezione 1** + entalpia dell'acqua liquida che si trasformerà in vapore

Entalpia in uscita (**finale**): entalpia dell'aria in uscita nella **sezione 2**

$$\dot{M} \cdot h_1 + \dot{M}_l h_l = \dot{M} \cdot h_2$$

Entalpia e portata dell'acqua trascurabili:

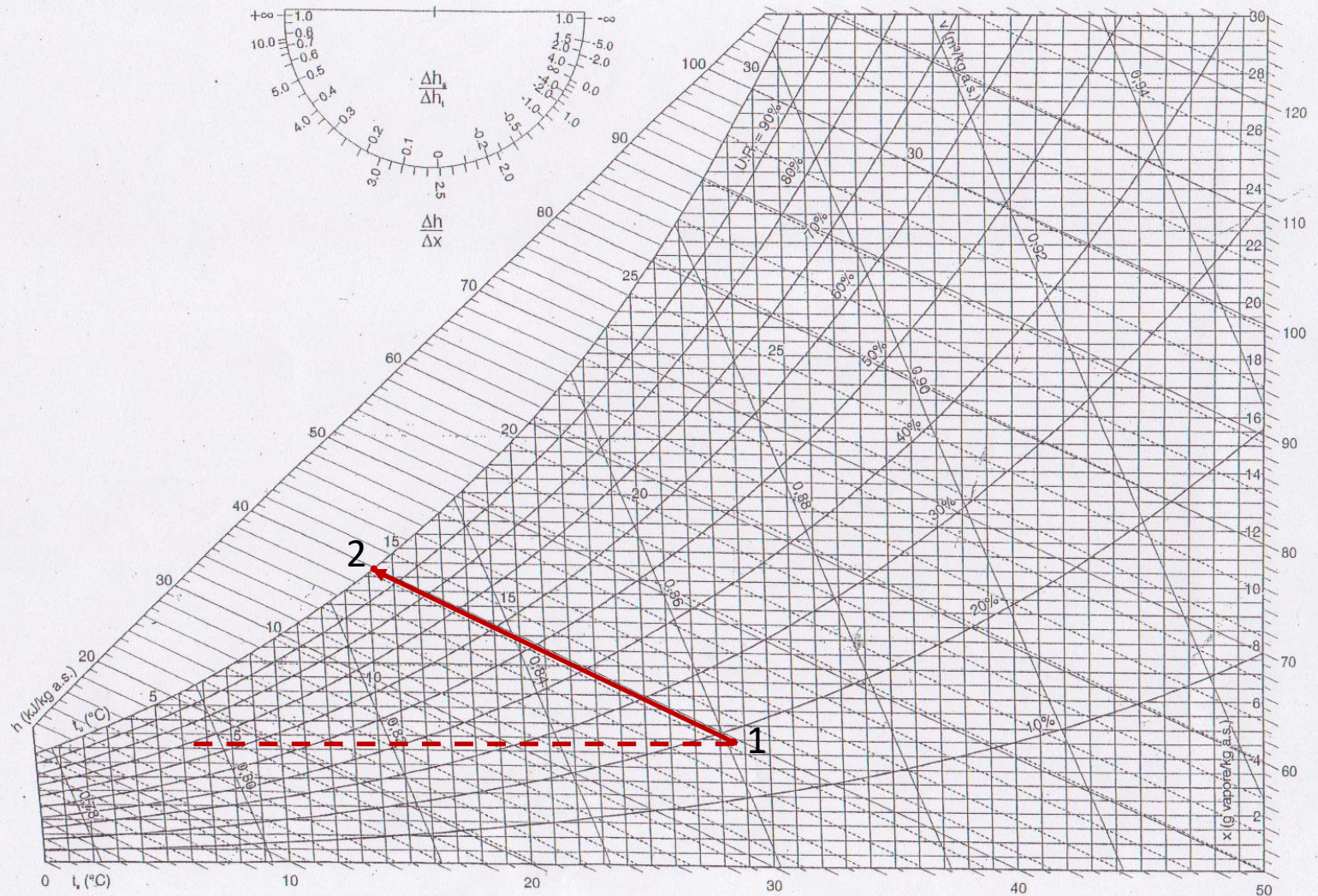
$$\dot{M} \cdot h_1 = \dot{M} \cdot h_2 \Rightarrow h_1 = h_2$$

Trasformazione con buona approssimazione **isoentalpica**

Durante il processo **raffreddamento dell'aria**: cede calore all'acqua per la **vaporizzazione**.

Temperatura di saturazione raggiunta: **temperatura di saturazione adiabatica** t_{sa} .

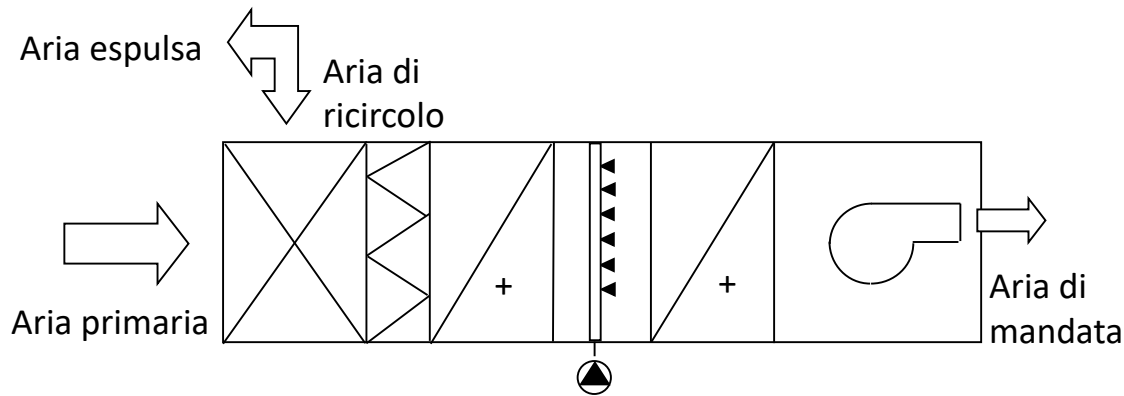
DIAGRAMMA PSICROMETRICO
(P = 101,325 kPa)



All'uscita del saturatore adiabatico: **umidità** relativa troppo elevata (**100%**).

Nel trattamento invernale è necessario inserire un **post-riscaldatore**.

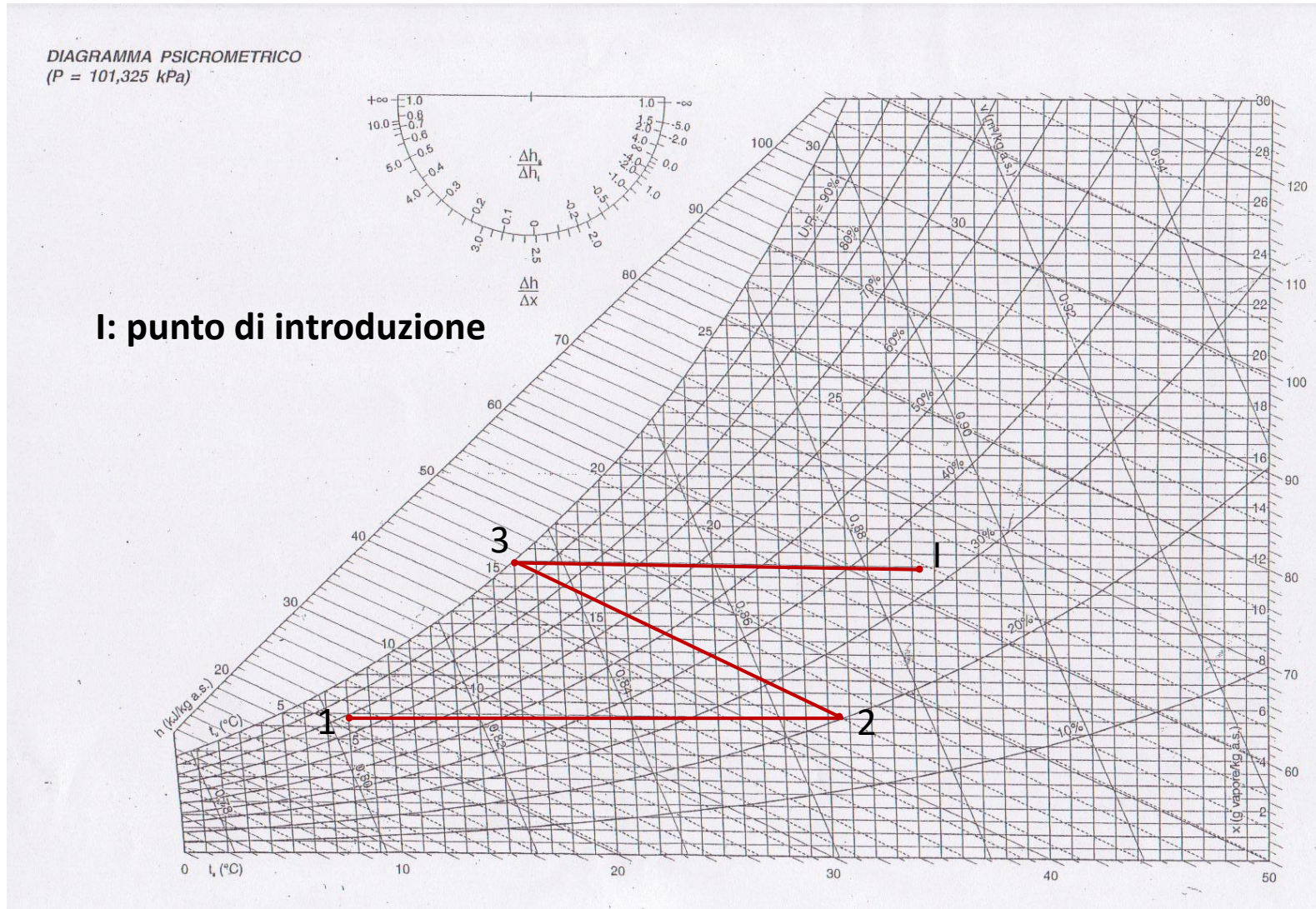
Trattamento invernale completo → tre fasi successive all'eventuale miscelazione adiabatica: **pre-riscaldamento, umidificazione adiabatica, post-riscaldamento**.



Trattamenti effettuati nella **Unità di trattamento aria (UTA.)**.

La UTA prevede anche le sezioni per il **trattamento estivo** che in regime invernale **non vengono fatte funzionare**.

Trattamento invernale completo: pre-riscaldamento 1→2, umidificazione adiabatica 2→3, post-riscaldamento 3→1.



TEMPERATURE A BULBO ASCIUTTO ED A BULBO BAGNATO

Temperatura a bulbo asciutto t_{ba} : temperatura dell'aria misurata con un termometro con l'elemento sensibile (bulbo) asciutto.

Temperatura a bulbo umido/bagnato t_{bb} : temperatura dell'aria misurata con un termometro con bulbo costantemente **bagnato** (avvolto in una garza imbevuta d'acqua).

Il bulbo umido misura la **temperatura della garza** bagnata → rileva **indirettamente** la **temperatura dell'aria** (in equilibrio termico con la garza).

Aria a contatto con la garza **satura** (continua evaporazione dell'acqua grazie a **scambio termico molto efficace** con l'aria mossa da un ventilatore)

Raffreddamento dell'aria di **entità rilevante** per **bassi valori di umidità relativa**, di **piccola entità** per **elevati valori di umidità relativa** → con buona approssimazione **linea isoentalpica** → *temperatura a bulbo bagnato \cong temperatura di saturazione adiabatica.*

Misura contemporanea di T_{ba} e T_{bb} (psicrometro di Assmann) → misura dell'**umidità relativa**

- $t_{ba} > t_{bb}$.
- Δt : indice dell'**umidità relativa**:

Elevata differenza → **bassa umidità** relativa

Piccola differenza → **elevata umidità** relativa

Psicrometro di ASSMANN

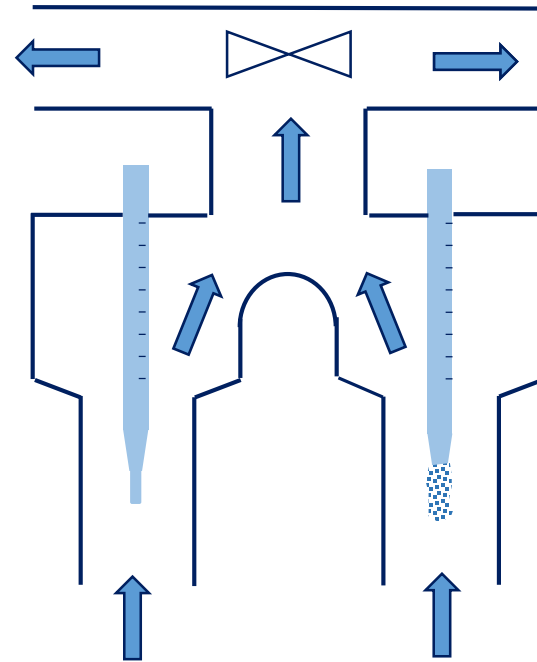
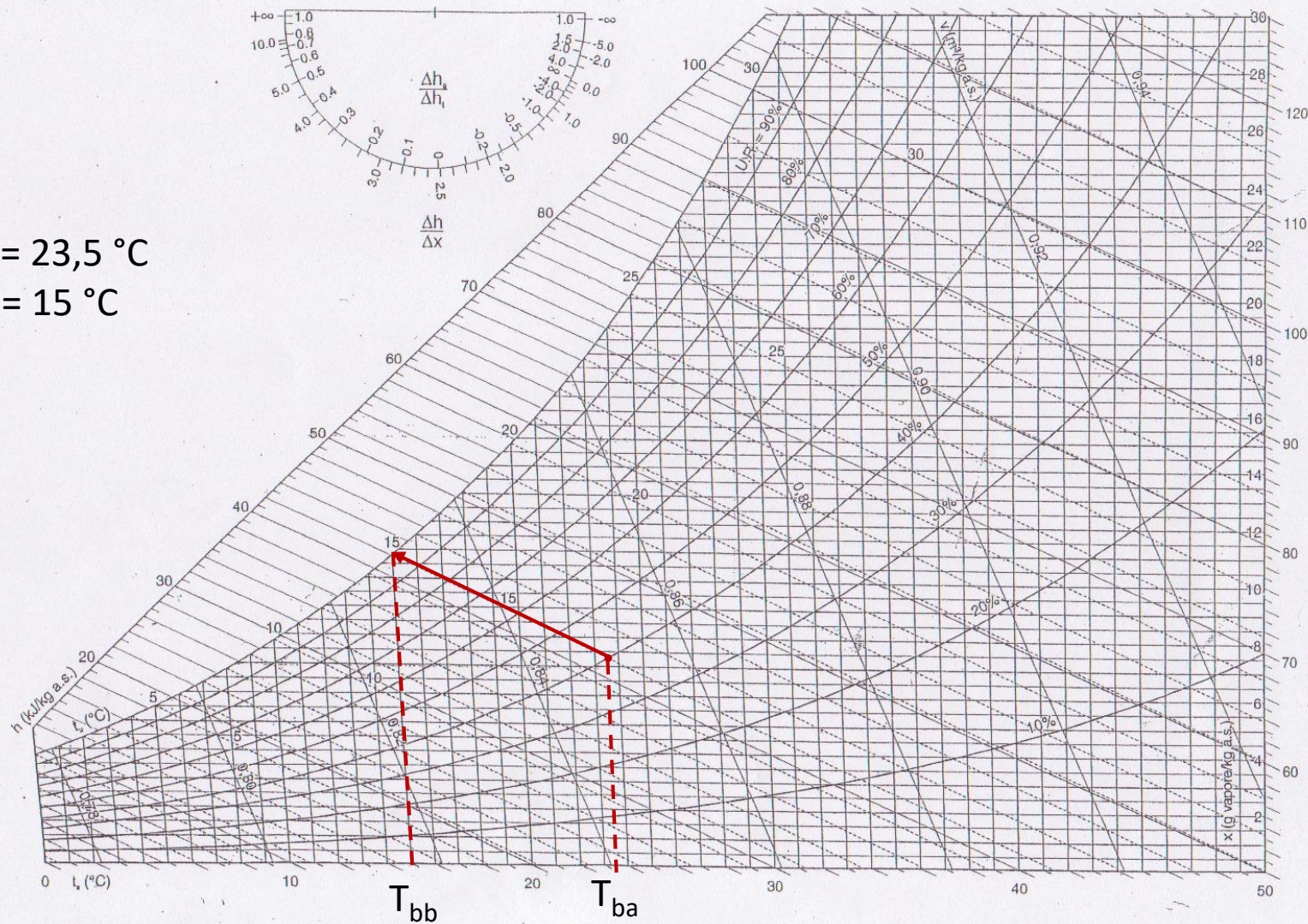


DIAGRAMMA PSICROMETRICO
(P = 101,325 kPa)

$T_{ba} = 23,5\text{ }^{\circ}\text{C}$
 $T_{bb} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$



TRATTAMENTO ESTIVO

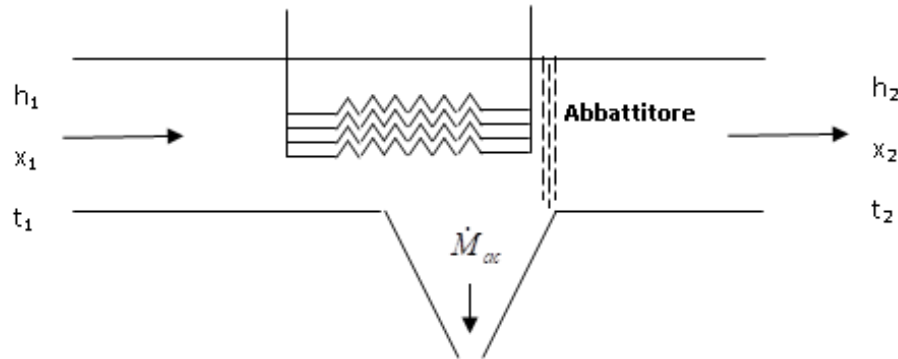
PROCESSO COMBINATO DI RAFFREDDAMENTO E DEUMIDIFICAZIONE

Regime estivo → **carichi termici entranti** (irraggiamento, trasmissione, carichi interni)



Raffrescamento di solito accompagnato da **deumidificazione** mediante **condensazione del vapore** in eccesso.

Nella UTA: batteria fredda a **temperatura superficiale < temperatura di rugiada**. L'aria esce in condizioni prossime alla saturazione. In molti casi necessario **post-riscaldamento**.



A valle dello scambiatore freddo **abbattitore di gocce: piastre forate tra loro parallele e perpendicolari alla velocità dell'aria** (vuoti dell'una corrispondenti ai pieni della successiva).

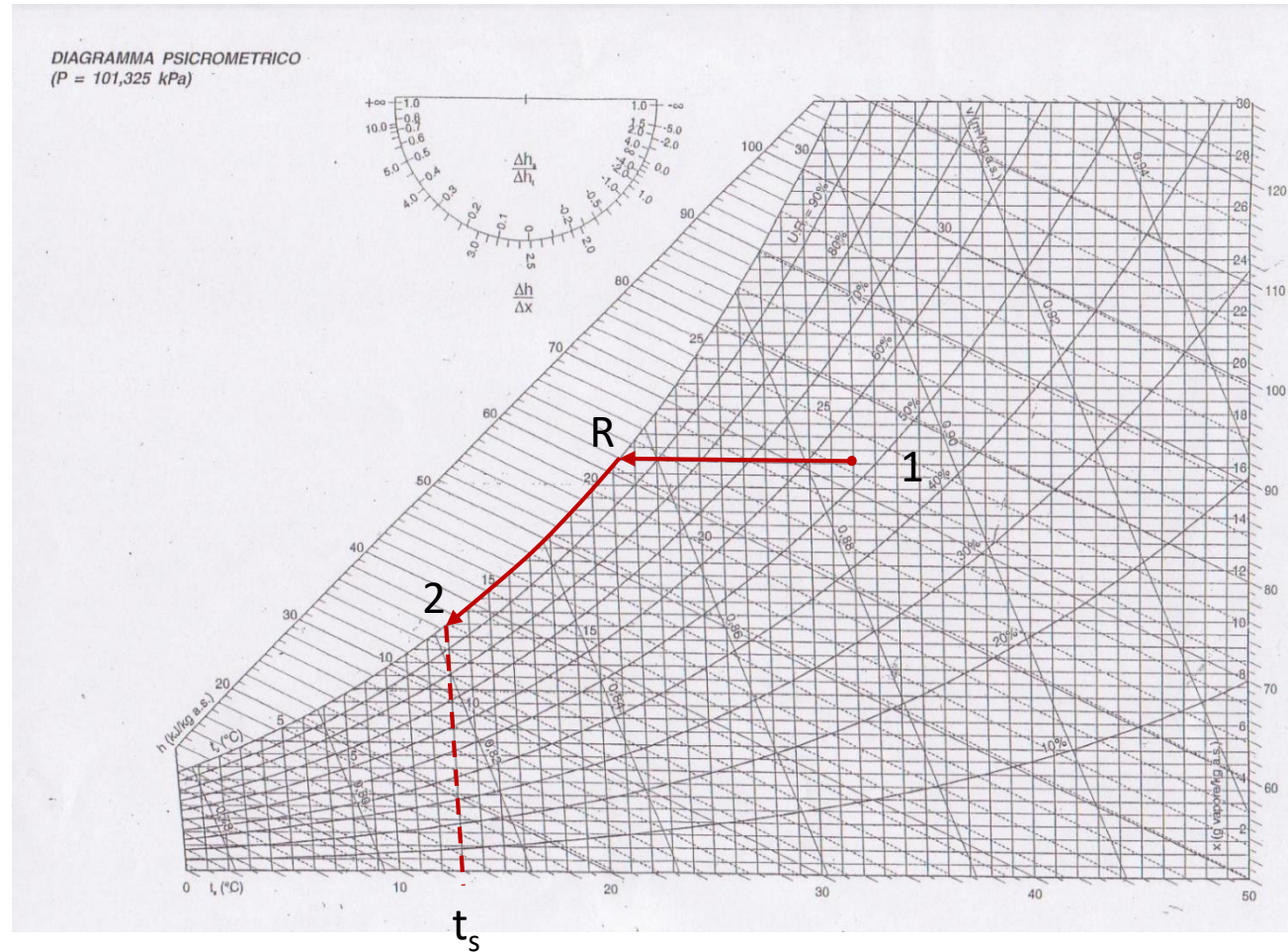
L'aria attraversa agevolmente l'abbattitore, le gocce (maggiore quantità di moto ⇒ maggiore inerzia) se superano la prima lastra si schiacciano sulla successiva e precipitano nel raccogliatore di condensa

H_p: scambio termico perfetto ed uniforme tra la corrente d'aria e la superficie di scambio

Tutta l'aria raggiunge l'**equilibrio termico con la superficie di scambio** alla sua stessa temperatura t_s (batteria di **capacità termica infinitamente grande**).

Trasformazione ideale:
spezzata curvilinea 1-R-2

Trasformazione reale:
stati finali delle singole
particelle **statisticamente**
distribuiti **tra gli stati 1 e 2.**



Schema fittizio di funzionamento per descrivere il fenomeno reale:

Una **parte dell'aria** subisce un **trattamento ideale (punto finale 2)** e la **parte rimanente by-passata** non subisce **alcun trattamento (punto finale 1)**

Miscelazione adiabatica tra **aria trattata in modo ideale** e **aria by-passata** → **punto finale 2'** (punto finale della **trasformazione reale**)

2' sul **segmento 12** a **distanze inversamente proporzionali** al rapporto delle portate

Fattore di by-pass: rapporto tra **portata d'aria by-passata** e **portata d'aria totale**

$$F_{bp} = \frac{\dot{M}_{bp}}{\dot{M}_{tot}} \quad 0 < F_{bp} < 1$$

$$\dot{M}_{bp} = F_{bp} \cdot \dot{M}_{tot}$$

$$\dot{M}_{id} = \dot{M}_{tot} - \dot{M}_{bp} = \dot{M}_{tot} \cdot (1 - F_{bp}) \Rightarrow \frac{\dot{M}_{bp}}{\dot{M}_{id}} = \frac{F_{bp}}{1 - F_{bp}}$$

2' **tanto più vicino** alla linea di **saturazione** quanto **più efficiente** è la **batteria** (fattore di by-pass piccolo).

Valore comune del fattore di by-pass: **0,2**

DIAGRAMMA PSICROMETRICO
(P = 101,325 kPa)

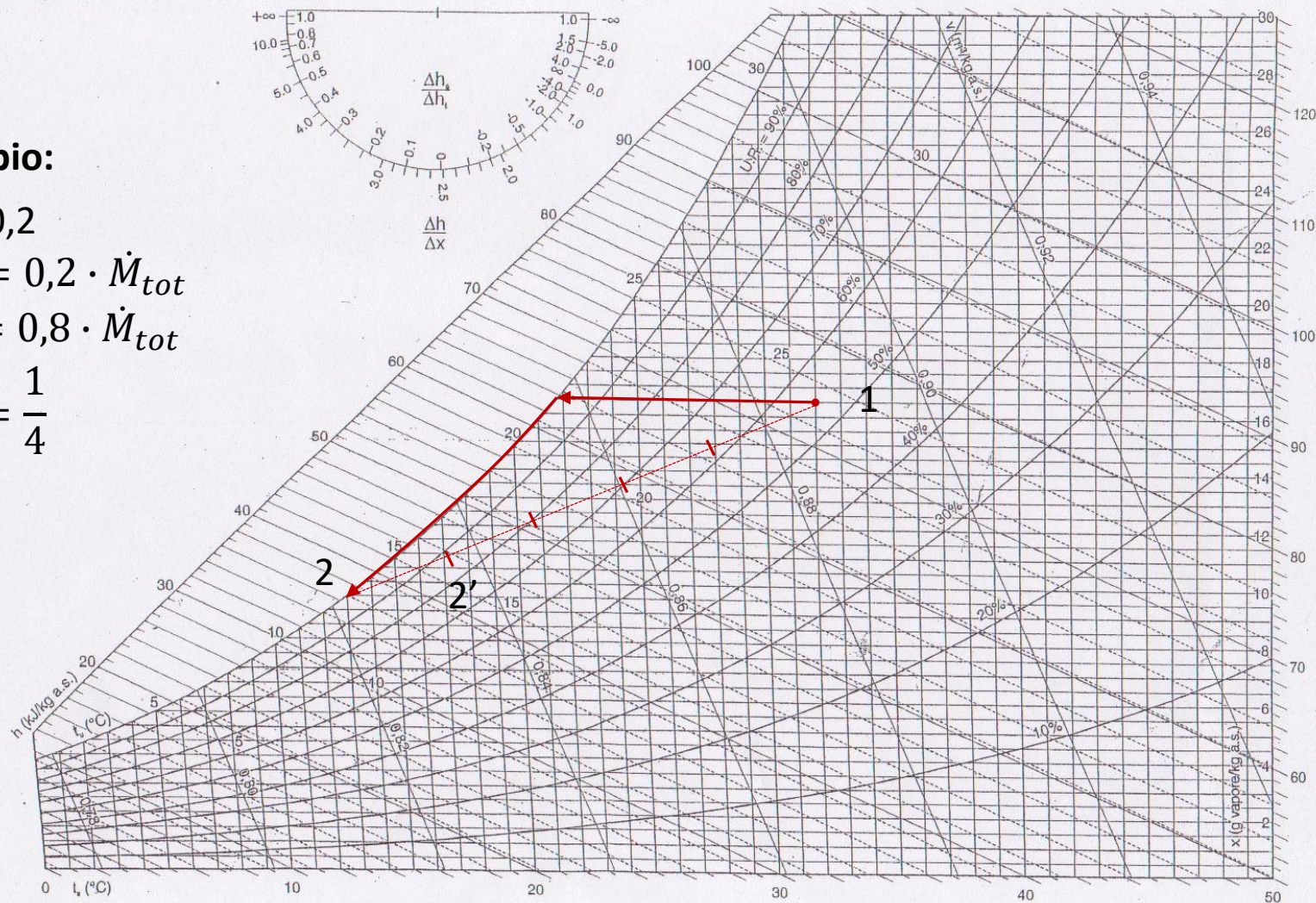
Esempio:

$$F_{bp} = 0,2$$

$$\dot{M}_{bp} = 0,2 \cdot \dot{M}_{tot}$$

$$\dot{M}_{id} = 0,8 \cdot \dot{M}_{tot}$$

$$\frac{\dot{M}_{bp}}{\dot{M}_{id}} = \frac{1}{4}$$



TRATTAMENTO ESTIVO COMPLETO

Processo combinario di **RAFFREDDAMENTO, DEUMIDIFICAZIONE E POST-RISCALDAMENTO**

Il trattamento di **raffreddamento e deumidificazione** produce **aria vicina** alle condizioni di **saturazione**



Può rendersi **necessaria** una operazione di **post-riscaldamento** per raggiungere le **condizioni di introduzione**



Impiego di **energia termica** (caldaia, riscaldatore elettrico) **in regime estivo!**



Gli **impianti di climatizzazione** sono **molto energivori**, ne andrebbe **limitato l'impiego**



Importante una **maggiore consapevolezza energetica** nella progettazione

DIAGRAMMA PSICROMETRICO
(P = 101,325 kPa)

