

Corso di Laurea  
in Ingegneria Nucleare e della Sicurezza e Protezione

## Elementi di psicrometria

a.a. 10/11

*Ing. Nicola Forgiione*

*Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione*

*E-mail: [nicola.forgione@ing.unipi.it](mailto:nicola.forgione@ing.unipi.it); tel. 0502218057*

## Elementi di psicrometria

- *La psicrometria è la scienza che studia le proprietà termodinamiche delle miscele aria-vapore e gli effetti di queste miscele sui materiali e sul comfort umano.*
- *Lo studio dell'aria atmosferica come miscela gas-vapore è alla base delle applicazioni di condizionamento dell'aria. Infatti, sebbene la quantità di acqua contenuta nell'aria ambiente sia piccola (~ 10 g per ogni kg di aria secca) essa riveste un'importanza fondamentale per il benessere dell'uomo.*

*Proprietà termodinamiche della miscela aria-vapore*

- *L'aria è una miscela di azoto (78 % in volume), ossigeno (21 % in volume) e di piccoli quantitativi di altri gas. L'aria atmosferica contiene anche vapore d'acqua (o umidità). Nel caso che l'aria non contenga vapore viene detta *aria secca*, mentre nel caso opposto viene detta *aria umida*.*
- *La temperatura dell'aria nelle applicazioni di condizionamento varia tra circa -10 °C e 50 °C. Essa risulta quindi sempre più alta della temperatura critica dell'aria secca (-141 °C) per cui l'aria è sempre in fase gassosa. Inoltre sia l'aria che il vapore si trovano ad una pressione molto minore di quella critica ( $p_{a,cr} = 37.7 \cdot 10^5$  Pa,  $p_{v,cr} = 221 \cdot 10^5$  Pa). L'aria atmosferica può quindi essere trattata come una miscela di gas perfetti la cui pressione è, per la legge di Dalton, la somma delle pressioni parziali dell'aria secca e di quella del vapore.*

$$p = p_a + p_v$$

$$\begin{cases} p_a V = m_a R_a T, & R_a = 287.06 \text{ J/(kgK)} \\ p_v V = m_v R_v T, & R_v = 461.52 \text{ J/(kgK)} \end{cases}$$

## Elementi di psicrometria

### Proprietà termodinamiche della miscela aria-vapore

- Dal momento che sia l'aria che il vapore si considerano dei gas perfetti, la loro entalpia specifica sarà funzione solo della temperatura. Se si prende 0 °C come temperatura di riferimento si ha (le entalpie sono in kJ/kg, mentre le temperature sono in °C):

$$h_a = c_{pa} t = 1.005 t$$

$$h_v = h_{fg} + c_{pv} t = 2501.3 + 1.820 t$$

$$-10 \leq t \leq 50 \text{ °C}$$

- Il titolo dell'aria umida o umidità specifica,  $\omega$ , è la massa di vapore d'acqua contenuta nell'unità di massa d'aria secca:

$$\omega \equiv \frac{m_v}{m_a} = \frac{R_a p_v}{R_v p_a} = 0.622 \frac{p_v}{p - p_v}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} p_v = \frac{\omega}{0.622 + \omega} p \\ p_a = \frac{0.622}{0.622 + \omega} p \end{cases}$$

In una trasformazione a pressione (totale) costante (trasformazioni più comuni)  $p_a$  e  $p_v$  rimangono separatamente costanti finché rimane costante il titolo  $\omega$

- L'entalpia specifica dell'aria umida,  $h$  (espressa per unità di massa dell'aria secca) è data dalla somma dell'entalpia dell'aria secca e dell'entalpia del vapor d'acqua:

$$h \equiv \frac{H_a + H_v}{m_a} = h_a + h_v \omega = 1.005 t + 2501.3 \omega + 1.82 t \omega \quad [\text{kJ}/(\text{kg aria secca})]$$

## Elementi di psicrometria

### Proprietà termodinamiche della miscela aria-vapore

- Il volume specifico dell'aria umida,  $v$ , viene valutato con riferimento all'unità di massa dell'aria secca:

$$v \equiv \frac{V}{m_a} = \frac{R_a T}{p_a} = \frac{R_a T}{p - p_v} = \frac{R_a T}{0.622 p} (0.622 + \omega) \quad [\text{m}^3/(\text{kg aria secca})]$$

Nella formula precedente  $T$  è in gradi Kelvin.

- La densità dell'aria umida,  $\rho$ , è definita come la massa d'aria umida contenuta nell'unità di volume:

$$\rho \equiv \frac{m_a + m_v}{V} = \frac{m_a}{V} (1 + \omega) = \frac{(1 + \omega)}{v} = \frac{0.622 p}{R_a T} \left( \frac{1 + \omega}{0.622 + \omega} \right) \quad [\text{kg}/\text{m}^3]$$

Dalla formula precedente si vede che, a parità di temperatura e di pressione totale della miscela aria-vapore, la densità è una funzione decrescente di  $\omega$  e, quindi, che l'aria più umida è anche più leggera. Questo comportamento è importante per mantenere le condizioni di flusso nelle torri di raffreddamento a circolazione naturale.

E', inoltre, importante notare come, in base alle precedenti definizioni, la densità dell'aria umida non risulta uguale al reciproco del volume specifico.

## Elementi di psicrometria

### Proprietà termodinamiche della miscela aria-vapore

- L'umidità relativa dell'aria umida,  $\phi$ , è la massa di vapore che l'aria effettivamente contiene diviso la massa di vapore massima che essa potrebbe contenere alla stessa temperatura:

$$\phi = \frac{m_v}{m_{v, sat}} = \frac{p_v}{p_{v, sat}}$$

La pressione di saturazione dell'acqua può essere determinata mediante la seguente formula approssimata:  $p_{v, sat} \cong 1000 \cdot \exp\left[\frac{16.6536 - 4030.183}{t + 235}\right]$ .

- La temperatura di rugiada (dew-point temperature),  $t_r$ , è definita come quella temperatura alla quale inizia la condensazione quando si impone all'aria un raffreddamento isobaro (temperatura di saturazione alla pressione parziale del vapore):

$$t_r \cong t_{sat}(p_v)$$

- La temperatura di bulbo umido (wet bulb temperature),  $t_{bu}$ , è la temperatura misurata con un termometro il cui bulbo sia stato ricoperto con una garza bagnata con acqua pura ed esposto ad una corrente d'aria in moto turbolento (velocità maggiore di circa 3 m/s). Il termometro deve essere schermato da eventuali effetti radianti.  
Si ha:  $t_r \leq t_{bu} \leq t$ . Per l'aria satura risulta:  $t_{bu} = t_r = t$ .

## Elementi di psicrometria

### Proprietà termodinamiche della miscela aria-vapore

- L'umidità relativa dell'aria umida,  $\phi$ , è la quantità di vapore che l'aria effettivamente contiene diviso la quantità massima che essa potrebbe contenere alla stessa temperatura:

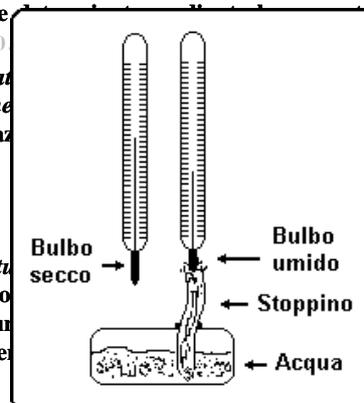
$$\phi = \frac{m_v}{m_{v, sat}} = \frac{p_v}{p_{v, sat}}$$

La pressione di saturazione dell'acqua può essere determinata mediante la seguente formula approssimata:  $p_{v, sat} \cong 1000 \cdot \exp\left[\frac{16.6536 - 4030.183}{t + 235}\right]$ .

- La temperatura di rugiada (dew-point temperature),  $t_r$ , è definita come quella temperatura alla quale inizia la condensazione quando si impone all'aria un raffreddamento isobaro (temperatura di saturazione alla pressione parziale del vapore):

$$t_r \cong t_{sat}(p_v)$$

- La temperatura di bulbo umido (wet bulb temperature),  $t_{bu}$ , è la temperatura misurata con un termometro il cui bulbo sia stato ricoperto con una garza bagnata con acqua pura ed esposto ad una corrente d'aria in moto turbolento (velocità maggiore di circa 3 m/s). Il termometro deve essere schermato da eventuali effetti radianti.  
Si ha:  $t_r \leq t_{bu} \leq t$ . Per l'aria satura risulta:  $t_{bu} = t_r = t$ .



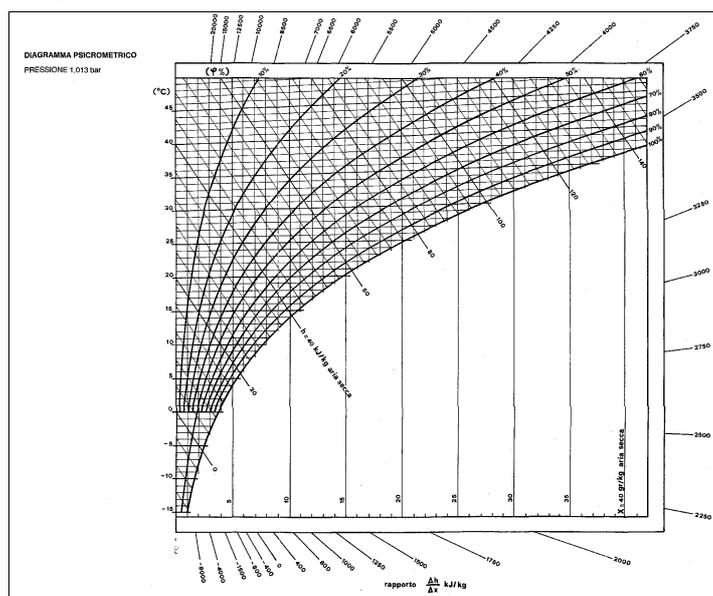
## Elementi di psicrometria

### I diagrammi psicometrici

- Nello studio dei problemi relativi al condizionamento dell'aria si ricorre ai cosiddetti diagrammi psicometrici (riferiti normalmente alla pressione di 1 atm = 101325 Pa) che consentono una risoluzione grafica dei problemi stessi. Questi diagrammi permettono, note due grandezze tra  $t$ ,  $t_{bu}$ ,  $t_r$ ,  $\phi$ ,  $\omega$ ,  $v$ ,  $h$  della miscela aria-vapore, di identificare tutte le altre grandezze.
- I diagrammi psicometrici più comunemente usati sono tre. Il *diagramma psicometrico di Mollier*: è un diagramma ad assi obliqui le cui coordinate sono umidità specifica ed entalpia, generalmente noto nel formato dovuto all'*ASHRAE*. Il *diagramma psicometrico Carrier*: è l'unico che usa le coordinate rettangolari (temperatura di bulbo secco ed umidità specifica).
- La differenza tra i diagrammi ASHRAE e Carrier è quasi impercettibile: nel diagramma ASHRAE, le linee isoentalpiche sono parallele e quelle a temperatura di bulbo asciutto lievemente divergenti; nel diagramma Carrier avviene l'opposto.
- Nel diagramma Carrier sull'asse delle ascisse è riportata la temperatura di bulbo secco e sull'asse delle ordinate l'umidità specifica; all'interno sono disegnate diverse famiglie di linee, facilmente distinguibili, il cui significato è riportato nello schema semplificato mostrato nel seguito.

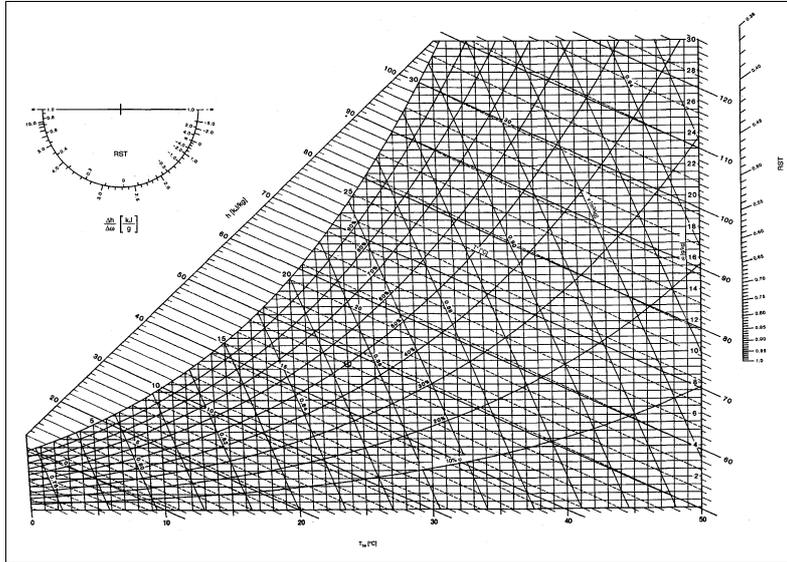
## Elementi di psicrometria

### Il diagramma psicometrico di Mollier



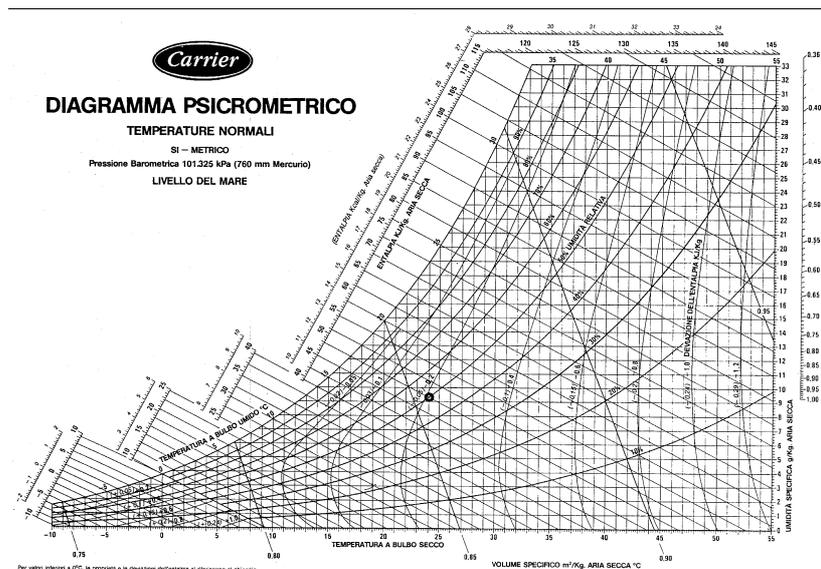
# Elementi di psicrometria

## Il diagramma psicrometrico ASHRAE



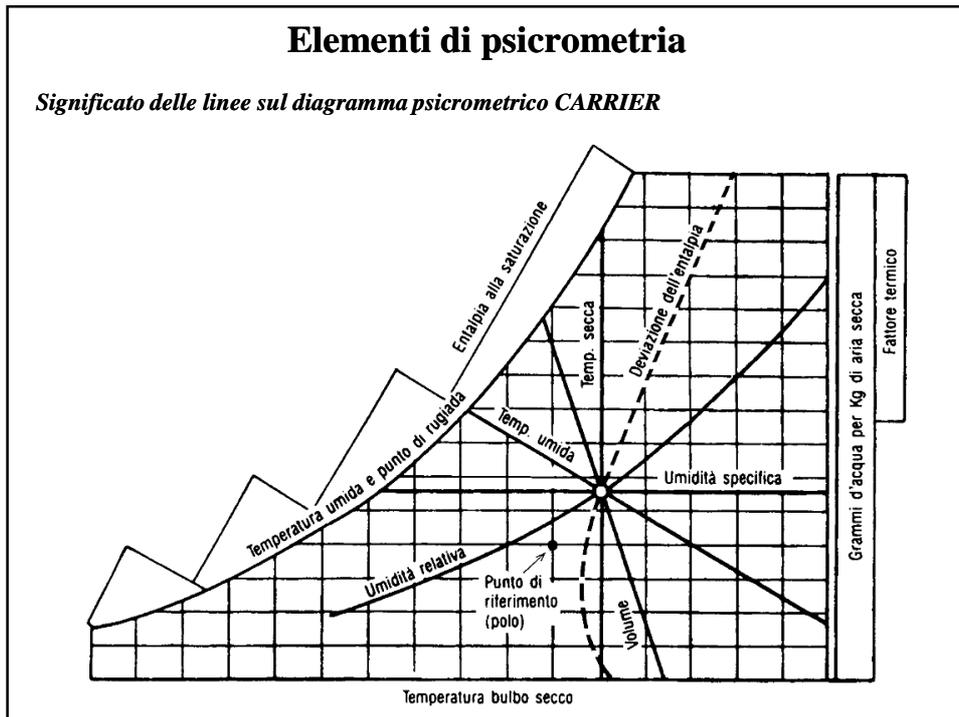
# Elementi di psicrometria

## Il diagramma psicrometrico CARRIER



## Elementi di psicrometria

Significato delle linee sul diagramma psicrometrico CARRIER



## Elementi di psicrometria

Equazioni di bilancio delle trasformazioni per il condizionamento dell'aria

- Si consideri un sistema aperto a regime in cui entrano delle portate in massa  $W_e$  ed escono delle portate  $W_u$  d'aria secca. Inoltre, nel sistema entrano (o escono) delle portate  $W_l$  di acqua (allo stato liquido o vapore). Il sistema scambia con l'ambiente una potenza termica  $Q$  ed una potenza meccanica  $L'_m$ . In queste condizioni, possiamo scrivere i bilanci di massa (aria secca ed acqua) ed energia come segue:

**Bilancio di massa dell'aria secca**

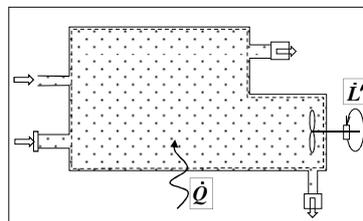
$$\sum_e W_e - \sum_u W_u = 0$$

**Bilancio di massa dell'acqua**

$$\sum_e W_e \omega_e - \sum_u W_u \omega_u \pm \sum W_l = 0$$

**Bilancio di energia dell'aria umida**

$$\sum_e W_e h_e - \sum_u W_u h_u \pm \sum W_l h_l + \dot{Q} - \dot{L}'_m = 0$$

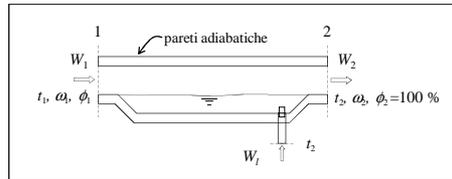


- **N.B.:** La portata di aria,  $W$ , è espressa in (kg di aria secca/s) e quindi per una corrente di aria umida non rappresenta la portata massica totale. Questa scelta risiede nel fatto che la portata massica espressa in termini della sola aria secca rimane costante in presenza di umidificazione o deumidificazione della corrente di aria umida.

## Elementi di psicrometria

*La temperatura di saturazione adiabatica (o temperatura di bulbo umido termodinamica)*

- Un metodo pratico per determinare l'umidità specifica e l'umidità relativa dell'aria umida che si trovi in certe condizioni termoigrometriche (stato 1) è quello di far subire all'aria una trasformazione di saturazione adiabatica:



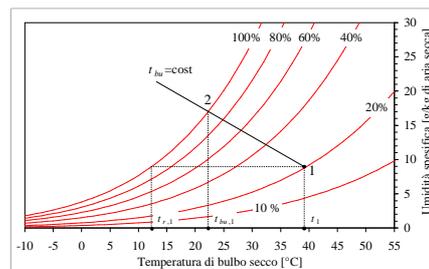
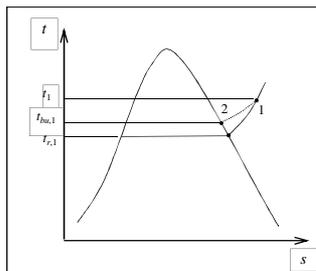
$$\begin{cases} W_1 - W_2 = 0 & \text{(bilancio di massa dell'aria secca)} \\ W_1 \omega_1 - W_2 \omega_2 + W_i = 0 & \text{(bilancio di massa dell'acqua)} \\ W_1 h_1 - W_2 h_2 + W_i h_{i,2} = 0 & \text{(bilancio di energia dell'aria umida)} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} W_2 = W_1 = W \\ W_i = W(\omega_2 - \omega_1) \end{cases} \Rightarrow \omega_1 = \omega_2 - \frac{(h_2 - h_1)}{h_{i,2}}$$

Se si ipotizza che l'aria in uscita sia satura ( $\phi_2 = 100\%$ ) e che l'acqua di reintegro si trovi alla temperatura  $t_2$ , l'unica incognita nelle precedenti equazione è  $\omega_1$  (si noti che  $h_1$  può essere scritta in funzione di  $\omega_1$ ). L'umidità specifica e quella relativa per lo stato 1 possono quindi essere determinate, in modo indiretto, misurando la pressione e la temperatura dell'aria all'ingresso ed all'uscita di un sistema che realizza una trasformazione di saturazione adiabatica.

## Elementi di psicrometria

*La temperatura di saturazione adiabatica (o temperatura di bulbo umido termodinamica)*

- La temperatura di uscita del saturatore adiabatico, detta *temperatura di saturazione adiabatica*, è una proprietà termodinamica dell'aria umida nello stato di ingresso. La temperatura di saturazione adiabatica è compresa tra la temperatura di bulbo secco e la temperatura di rugiada (vedi figura). Per miscele aria-vapore alla pressione atmosferica la temperatura di saturazione adiabatica è molto vicina alla temperatura di bulbo umido (misurabile ad esempio con uno psicrometro a fionda).
- Dal punto di vista teorico la temperatura di saturazione adiabatica e quella di bulbo umido sono due concetti differenti, anche se nella pratica i due valori coincidono. Dato il piccolo valore della  $h_{i,2}$ , in pratica una trasformazione di saturazione adiabatica è anche pressoché isoentalpica.



## Principali processi di trasformazione dell'aria umida

*Processo di riscaldamento sensibile (o raffreddamento sensibile) dell'aria umida*

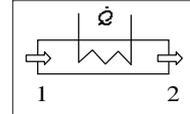
- Questi processi avvengono senza sottrazione o addizione di acqua ( $W_1=W_2$ ). Il processo è analogo a quello che avviene in uno scambiatore di calore a superficie. L'elemento scaldante può essere costituito da una serpentina in cui scorre acqua calda o da una resistenza elettrica, mentre quello refrigerante può essere costituito da una serpentina in cui scorre acqua fredda, o dall'evaporatore di un impianto frigorifero.

*Bilancio di massa dell'aria secca*

$$W_1 - W_2 = 0 \Rightarrow W_1 = W_2 = W$$

*Bilancio di massa dell'acqua*

$$W_1 \omega_1 - W_2 \omega_2 = 0 \Rightarrow \omega_1 = \omega_2$$



*Bilancio di energia dell'aria umida*

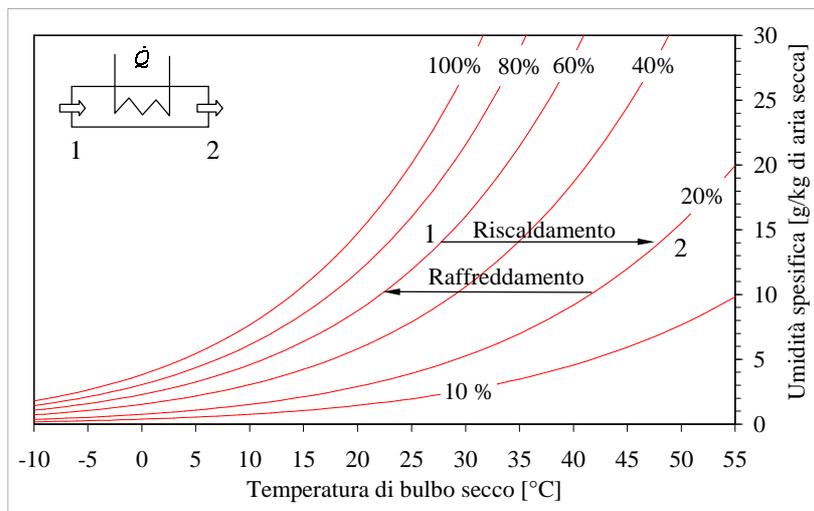
$$W_1 h_1 - W_2 h_2 + \dot{Q} = 0 \Rightarrow \dot{Q} = W(h_2 - h_1)$$

Durante il riscaldamento l'umidità relativa dell'aria diminuisce anche se l'umidità specifica rimane costante (il contrario si verifica nel caso di raffreddamento). E' questo il motivo per il quale, generalmente, un processo di riscaldamento è sempre accompagnato da un processo di umidificazione, mentre un processo di raffreddamento è sempre associato ad un processo di deumidificazione.

## Principali processi di trasformazione dell'aria umida



*Processo di riscaldamento sensibile (o raffreddamento sensibile) dell'aria umida*



## Principali processi di trasformazione dell'aria umida

### Processo di mescolamento adiabatico di due correnti d'aria umida

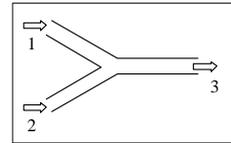
- In questo processo si mescolano due correnti d'aria umida senza apporto di energia dall'esterno. Il processo è analogo a quello che avviene in uno scambiatore di calore a miscelamento.

#### Bilancio di massa dell'aria secca

$$W_1 + W_2 - W_3 = 0 \Rightarrow W_3 = W_1 + W_2$$

#### Bilancio di massa dell'acqua

$$W_1 \omega_1 + W_2 \omega_2 - W_3 \omega_3 = 0 \Rightarrow \frac{\omega_2 - \omega_3}{\omega_3 - \omega_1} = \frac{W_1}{W_2}$$



#### Bilancio di energia dell'aria umida

$$W_1 h_1 + W_2 h_2 - W_3 h_3 = 0 \Rightarrow \frac{h_2 - h_3}{h_3 - h_1} = \frac{W_1}{W_2}$$

In alternativa si può scrivere:

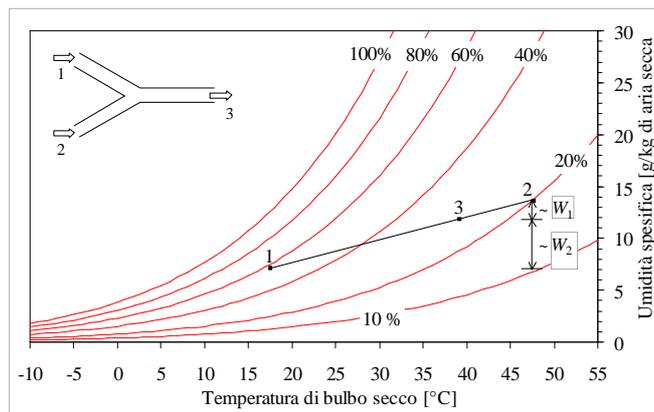
$$\omega_3 = \frac{W_1 \omega_1 + W_2 \omega_2}{W_1 + W_2}$$

$$h_3 = \frac{W_1 h_1 + W_2 h_2}{W_1 + W_2}$$

## Principali processi di trasformazione dell'aria umida



### Processo di mescolamento adiabatico di due correnti d'aria umida



Quando due differenti flussi d'aria vengono miscelati adiabaticamente, il punto rappresentativo della miscela (punto 3) sul diagramma psicrometrico si trova sulla retta congiungente i due punti originari 1 e 2 ed il rapporto tra le distanze 2-3 su 3-1 è pari al rapporto tra le portate  $W_1$  su  $W_2$ .

## Principali processi di trasformazione dell'aria umida

### Processo di raffreddamento con deumidificazione

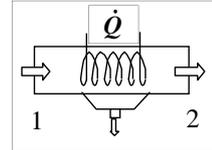
- Nella maggior parte degli impianti di condizionamento estivo dell'aria si richiedono, contemporaneamente, il raffreddamento e la deumidificazione dell'aria trattata.

#### Bilancio di massa dell'aria secca

$$W_1 - W_2 = 0 \Rightarrow W_1 = W_2 = W$$

#### Bilancio di massa dell'acqua

$$W_1 \omega_1 - W_2 \omega_2 - W_l = 0 \Rightarrow W_l = W (\omega_1 - \omega_2)$$



#### Bilancio di energia dell'aria umida

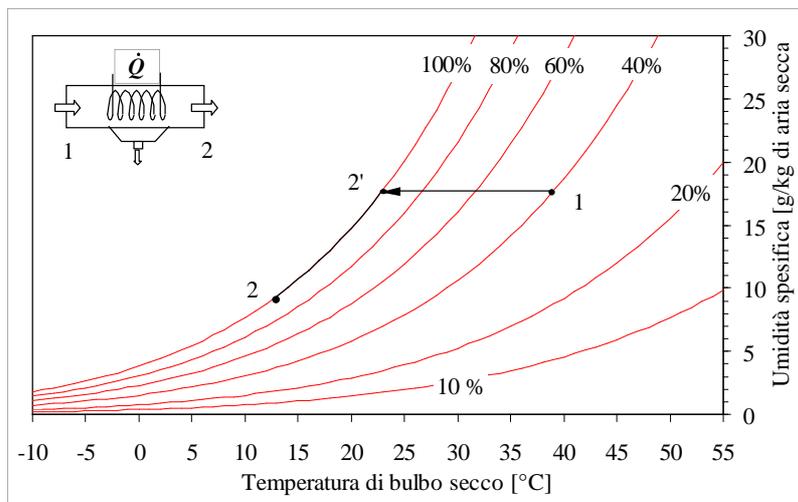
$$W_1 h_1 - W_2 h_2 - W_l h_l + \dot{Q} = 0 \Rightarrow h_2 = h_1 - (\omega_1 - \omega_2) h_l + \dot{Q} / W$$

Per il calcolo dell'entalpia del liquido ( $h_l$ ) si assume che esso sia estratto alla temperatura  $t_2$  (in realtà esso viene estratto a temperature comprese tra quelle del punto 2' e del punto 2). Il contributo dell'entalpia del liquido al bilancio energetico è comunque quasi sempre trascurabile.

L'aria in uscita (condizioni 2) è satura e occorre generalmente un successivo processo di riscaldamento sensibile per riportarla in condizioni di umidità relativa gradevoli.

## Principali processi di trasformazione dell'aria umida

### Processo di raffreddamento con deumidificazione



## Principali processi di trasformazione dell'aria umida

### Processo di deumidificazione con by-pass

- In realtà nel processo di raffreddamento con deumidificazione *solo una parte d'aria viene in contatto con la superficie raffreddante subendo la trasformazione 1-2 (linea in grassetto del grafico precedente)*. La rimanente parte dell'aria (aria by-passata) non subisce alcuna trasformazione (rimane cioè nello stato 1). Inoltre, alcune volte si può introdurre intenzionalmente un circuito di by-pass esterno per evitare il successivo processo di riscaldamento sensibile.
- All'uscita della batteria di raffreddamento si avrà quindi un mescolamento tra l'aria nelle condizioni S (la temperatura  $t_s$  è la temperatura media della superficie della batteria) e l'aria nelle condizioni 1 che risulta in una miscela nelle condizioni 2 (vedi secondo grafico).
- Si definisce *fattore di bypass, F*, il rapporto tra la portata d'aria by-passata e quella totale:

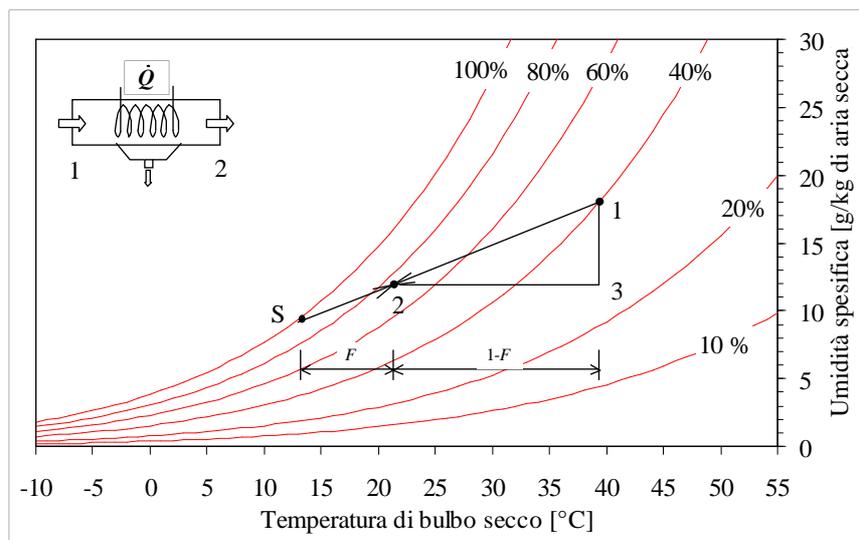
$$F \equiv W_{bp} / W$$

- Il calore sottratto all'aria umida serve in parte per raffreddarla (calore sensibile) ed in parte per deumidificarla (calore latente). Se si trascura il flusso convettivo d'energia del condensato dal bilancio d'energia discende che:

$$\dot{Q}_{tot} \equiv W(h_2 - h_1) = \dot{Q}_{sens} + \dot{Q}_{lat} = W(h_2 - h_3) + W(h_3 - h_1)$$

## Principali processi di trasformazione dell'aria umida

### Processo di deumidificazione con by-pass

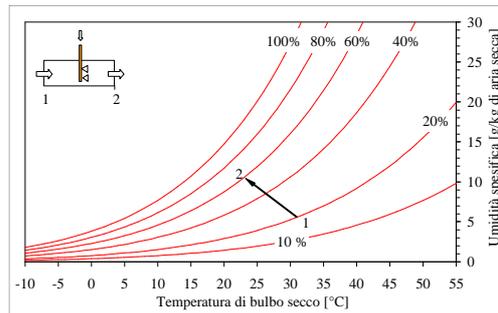


## Principali processi di trasformazione dell'aria umida

### Processo di raffreddamento per evaporazione diretta

- Il solo raffreddamento dell'aria umida si può ottenere anche mediante *evaporazione di acqua in fase liquida*. L'acqua per evaporare deve assorbire calore latente di evaporazione dall'acqua stessa o dall'aria circostante. Sia l'aria che l'acqua possono raffreddarsi durante il processo di evaporazione. *Il raffreddamento per evaporazione è un processo identico alla trasformazione di saturazione adiabatica*, eccetto per il fatto che non è detto che l'aria in uscita sia satura. Per questo motivo *il processo di raffreddamento per evaporazione viene rappresentato sul diagramma psicrometrico come una linea a temperatura di bulbo umido costante* (ciò non è esatto se l'acqua viene spruzzata ad una temperatura diversa da quella di uscita dell'aria).

- Dal momento che le linee a temperatura di bulbo umido costante sono praticamente coincidenti con quelle ad entalpia costante, si può assumere che anche l'entalpia durante questo processo rimanga costante.



## Principali processi di trasformazione dell'aria umida

### Processo di riscaldamento con umidificazione

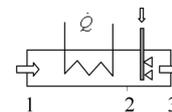
- Nella maggior parte degli impianti di condizionamento invernale dell'aria si richiedono, contemporaneamente, il riscaldamento e l'umidificazione dell'aria trattata. I bilanci della sez. 1-2 sono già stati visti (vedi riscaldamento sensibile) per cui le equazioni di bilancio riportate di seguito sono relative alla sola sezione di umidificazione (2-3).

#### Bilancio di massa dell'aria secca nella sezione di umidificazione

$$W_2 - W_3 = 0 \Rightarrow W_2 = W_3 = W_1 = W$$

#### Bilancio di massa dell'acqua nella sezione di umidificazione

$$W_2 \omega_2 - W_3 \omega_3 + W_v = 0 \Rightarrow W_v = W (\omega_3 - \omega_2) = W (\omega_3 - \omega_1)$$

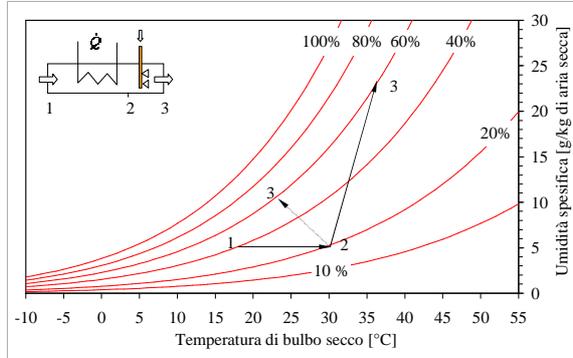


#### Bilancio di energia dell'aria umida nella sezione di umidificazione

$$W_2 h_2 - W_3 h_3 + W_v h_v = 0 \Rightarrow h_3 = h_2 + (\omega_3 - \omega_2) h_v = h_1 + \dot{Q}_{sens} / W + (\omega_3 - \omega_1) h_v$$

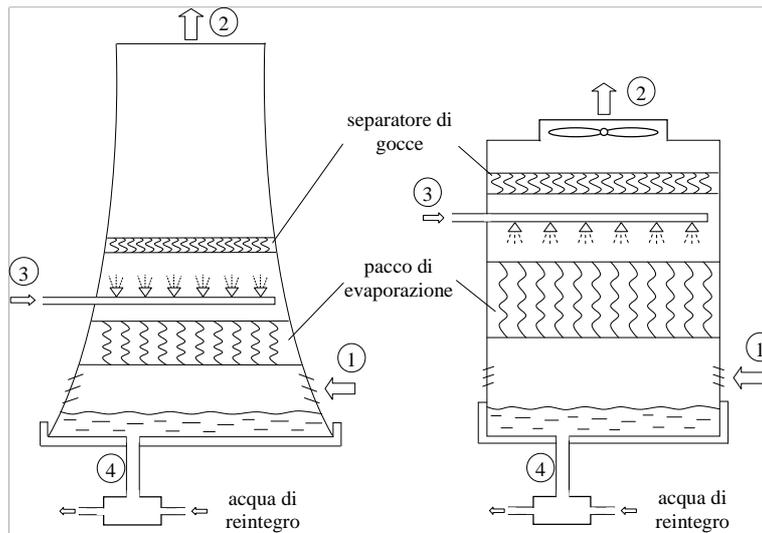
## Principali processi di trasformazione dell'aria umida

### Processo di riscaldamento con umidificazione



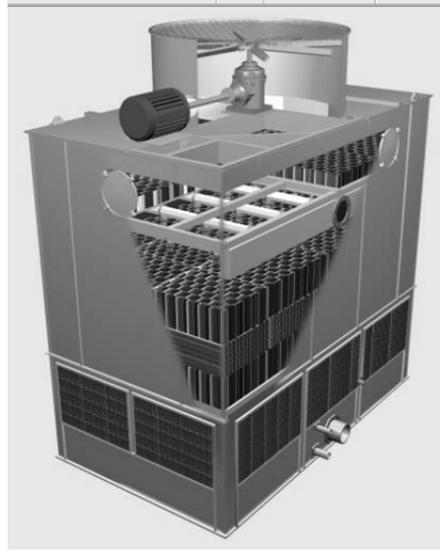
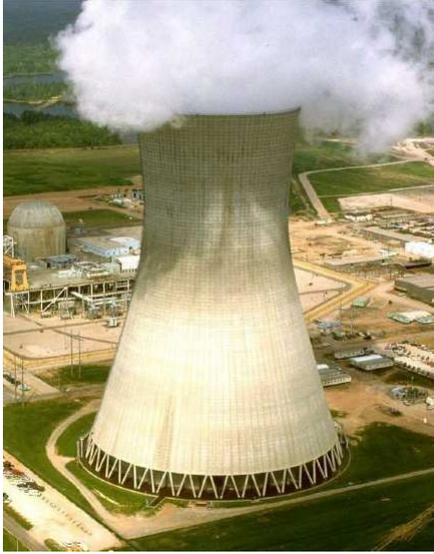
Questo processo è caratterizzato da un aumento di entalpia e di umidità specifica dell'aria trattata. La temperatura finale di bulbo secco ( $T_3$ ) può essere minore, uguale o maggiore di quella iniziale, a seconda del processo di umidificazione. Se si introduce vapore surriscaldato nella sezione di umidificazione, come nell'esempio considerato, si avrà umidificazione (crescita dell'umidità) con contemporaneo riscaldamento. Se l'umidificazione viene realizzata spruzzando acqua nella corrente d'aria, parte del calore latente di evaporazione sarà sottratto all'aria che quindi si raffredda (vedi trasformazione 2-3 riportata in figura con linea tratteggiata).

## Principali processi di trasformazione dell'aria umida



Torre di raffreddamento a circolazione naturale (a sinistra)  
ed a circolazione forzata (a destra)

## Principali processi di trasformazione dell'aria umida



**Torre di raffreddamento a circolazione naturale (a sinistra)  
ed a circolazione forzata (a destra)**