



## Aria Umida

*Da pag. 238 a pag. 261 del libro Cavallini, Mattarolo  
«Termodinamica applicata» edizione Cleup*

### Sommario

- Definizione dell'aria umida
- Definizione delle principali grandezze fisiche
- Il diagramma psicrometrico di Mollier
- Il diagramma di Carrier
- Temperature di rugiada, bulbo bagnato, saturazione adb.
- Trasformazioni principali dell'aria umida
- Condizionamento ambientale: caso estivo e invernale





## Psicrometria

- La psicrometria studia la miscela di aria e vapor d'acqua (aria umida) ovvero quelle miscele binarie nelle quali una delle sue componenti è un vapore condensabile
- Il termine ha origine dalla parola greca *psukhros* (*ψυχρός*), "freddo"



## Applicazioni della Psicrometria

- Controllo della climatizzazione (uomo), in particolar modo per il condizionamento e il comfort termico
- Valutazione della condensazione su superfici fredde
- Refrigerazione evaporativa
- Analisi di fenomeni meteorologici



## Termodinamica dell'Aria Umida

- La sensazione di benessere di un individuo in un ambiente confinato è legata ad alcuni parametri ambientali (temperatura e umidità relativa ambiente); tali grandezze sono legate alle rispettive proprietà fisiche dell'aria umida.
- Al campo della psicrometria appartiene lo studio delle miscele di aria secca e vapor d'acqua e delle relative trasformazioni. Tale studio risulta fondamentale al fine di garantire condizioni di benessere in ambienti climatizzati.
- L'aria umida viene assimilata ad una miscela di due gas perfetti: un aeriforme, l'aria secca, e un componente condensabile, cioè il vapor d'acqua, il cui contenuto varia in funzione delle condizioni ambientali.



## Definizioni (1)

- **Aria atmosferica:** miscela di vapor d'acqua e aria secca
- **Vapor d'acqua:** componente condensabile il cui contenuto è variabile nelle diverse condizioni ambientali o mediante operazioni di umidificazione e deumidificazione
- **Aria secca:** miscela dei gas presenti nell'aria, in un rapporto di concentrazione che rimane inalterato nelle diverse condizioni ambientali e nei processi di umidificazione e deumidificazione.

## Definizioni (2)

- **Pressione totale:** in una miscela è data dalla somma delle pressioni parziali di ciascuna delle sue componenti.
- **Pressione parziale:** pressione che ogni componente di una miscela eserciterebbe se, alla medesima temperatura, occupasse l'intero volume della miscela.
- Volume totale
- Volume parziale



## Definizioni (3)

- **Aria non satura** (o miscela non satura): miscela di aria secca e di vapor d'acqua surriscaldato
- **Aria satura** (o miscela satura): miscela di aria secca e vapore in stato di saturazione (equilibrio fra l'aria umida e la fase liquida del vapor d'acqua)



## Atmosfera (unità di misura)

- Unità tecnico/pratica di misura della pressione (atm)
- Essa era definita come la pressione atmosferica di una colonna d'aria al livello del mare, a 0 °C di temperatura e a 45° di latitudine. Tuttavia nel determinare la pressione atmosferica, oltre alla temperatura, gioca un ruolo anche il grado di umidità relativa dell'aria stessa e le variazioni barometriche locali
- Nel sistema internazionale la pressione atmosferica è stata sostituita dal Pascal (Pa).



## Pascal (unità di misura)

- Il pascal (Pa) è un'unità di misura derivata del Sistema Internazionale. Il pascal è l'unità di misura della pressione, è equivalente a un newton su metro quadrato ( $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ )
- Poiché 1 Pa equivale a una pressione piccola, l'ettopascal (hPa) è più largamente impiegato, specialmente in meteorologia.
  - $1 \text{ hPa} = 100 \text{ Pa} = 1 \text{ millibar} = 10^{-3} \text{ bar} = 100 \text{ Pa}$
- Il chilopascal (kPa) è anch'esso di uso comune.
  - $1 \text{ kPa} = 1000 \text{ Pa} = 10 \text{ millibar}$



## Conversioni

### 1 atmosfera

- $101325 \text{ Pa} = 101325 \text{ N/m}^2 = 101325 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^2)$
- $1013,25 \text{ hPa} = 1013,25 \text{ mbar}$
- $760 \text{ torr} = 760 \text{ mm di mercurio (mm}_{\text{Hg}})$
- $1,01325 \text{ bar}$
- $1,033 \text{ g/cm}^2$
- $29,92126 \text{ pollici di mercurio}$
- $14,695949 \text{ libbre-forza per pollice quadrato (lbf/in}^2)$



## Proprietà termodinamiche dei gas perfetti

- Un modello di comportamento interessante per la termodinamica è quello cosiddetto di gas perfetto
- Il gas perfetto è un'astrazione, tuttavia tutti i gas possono essere considerati tali con buona approssimazione per particolari condizioni di pressione e temperatura
- I gas perfetti (o ideali) soddisfano l'equazione di stato e le leggi di Boyle-Mariotte, Amagat-Leduc e di Dalton



## Equazione di stato dei gas perfetti

- $R$  = costante specifica del gas in esame (J/(kg·K))
- $p$  = pressione cui si trova il sistema termodinamico (Pa)
- $v$  = volume specifico del sistema termodinamico (m<sup>3</sup>/kg)
- $T$  = temperatura termodinamica del sistema (K)
- $\rho$  = densità del gas (kg/m<sup>3</sup>)

$$pv = RT \quad \rightarrow \quad \frac{p}{\rho} = RT$$

- Sostituendo al volume specifico il volume totale  $V = m \cdot v$  diviene:

$$pV = mRT$$



## Legge di Boyle-Mariotte

La legge di Boyle e Mariotte afferma che in condizioni di temperatura costante la pressione di un gas è inversamente proporzionale al suo volume, ovvero che il prodotto della pressione del gas per il volume da esso occupato è costante. Tale costante è funzione della temperatura assoluta, della natura e della mole del gas.

$$[pV]_T = K(T)$$



## Legge di Dalton

- La legge delle pressioni parziali di Dalton afferma che la pressione totale esercitata da una miscela di gas è uguale alla somma delle pressioni che sarebbero esercitate dai gas se fossero presenti da soli in eguale volume.
- Più precisamente, la pressione  $p$  di una miscela di  $n$  gas può essere definita come la somma  $p_i = p_1 + p_2 + \dots + p_n$  dove  $p_1, p_2, p_n$  rappresentano la pressione parziale di ogni componente.
- Questo significa che ogni gas in una miscela agisce come se l'altro gas non fosse presente e pertanto le pressioni di ciascun gas possono essere semplicemente sommate. Si presume che i gas non reagiscano l'uno con l'altro.



## Legge di Dalton e Amagat-Leduc

La pressione parziale è il contributo di ciascun componente alla formazione della pressione totale della miscela

$$P = p_1 + p_2 + \dots + p_n = \sum_{i=1}^n p_i$$

$$U = \sum_i U_i$$

$$H = \sum_i H_i$$

$$V = \sum_i V_i$$



## Composizione dell'Aria Secca

- L'aria secca è a sua volta una miscela di altri gas che nelle trasformazioni del condizionamento ambientale mantengono un rapporto di concentrazione costante.
- L'aria secca risulta così mediamente composta:
  - 78% azoto ( $N_2$ )
  - 21% l'ossigeno ( $O_2$ )
  - 1% anidride carbonica ( $CO_2$ )
  - altri gas fra cui l'Argo (Ar)
  - tracce di altri gas (idrogeno e gas rari)
- Considerando una temperatura di  $15\text{ }^\circ\text{C}$  e una pressione di  $101,3\text{ kPa}$  ( $760\text{ mm}_{\text{Hg}}$ ,  $1\text{ atm}$ ) le caratteristiche fisiche dell'aria sono:
  - densità media  $\rho = 1,225\text{ kg/m}^3$
  - calore specifico a pressione costante  $c_{pa} = 0,241\text{ kcal}/(\text{kg }^\circ\text{C})$



## Componenti dell'Aria

	% in volume	% in peso
$O_2$	20,99	23,90
$N_2$	78,03	75,47
Ar	0,94	1,29
$CO_2$	0,03	0,05
$H_2$	0,01	~0,00



## Massa Molare e Costante dell'Aria Secca

Trascurando la presenza dell'anidride carbonica e dei gas rari, la massa molare dell'aria è data da:

	Massa molare (kg/kmol)	Frazione volumetrica
N <sub>2</sub>	28	0,7809
O <sub>2</sub>	32	0,2095
Ar	40	0,0093

$$\bar{M}_a = 28,97 \text{ kg/kmol}$$

$$R_a = \frac{\bar{R}}{\bar{M}_a} = \frac{8314}{28,97} = 287 \text{ J/(kg K)}$$



## Massa Molare e Costante del Vapore

Il vapor d'acqua ha una bassa pressione parziale (può anche essere nulla), pertanto si può considerare a comportamento ideale:

$$\bar{M}_v = 18 \text{ kg/kmol}$$

$$R_v = \frac{\bar{R}}{\bar{M}_v} = \frac{8314}{18} = 461 \text{ J/(kg K)}$$



## Sistema Termod. e Grandezze di Stato

FUNZIONI DI STATO:

entalpia H, entropia S, energia interna U

GRANDEZZE INTENSIVE ed ESTENSIVE

Regola delle fasi di Gibbs:

$$V = C - F + 2 \quad \text{equilibrio termodinamico}$$

C = componenti chimicamente distinti;

F = fasi fisicamente distinte;

V = variabili termodinamiche intensive



## Equazioni di Stato

L'equazione di stato dei gas ideali si può particularizzare rispetto al gas considerato:

ARIA SECCA

$$p_{as} V = m_{as} R_{as} T$$

VAPOR D'ACQUA

$$p_v V = m_v R_v T$$

Dalla regola delle fasi di Gibbs si ha che:

$$V = C - F + 2 = 2 - 1 + 2 = 3$$

Pressione=101325 Pa

Temperatura

Composizione o altro



## Umidità Specifica (x)

L'umidità specifica (o titolo della miscela) è il rapporto tra la massa di vapor d'acqua e la massa di aria secca contenute nello stesso volume di aria umida.

$$x = \frac{m_v}{m_a} \quad (\text{kg}_v/\text{kg}_a)$$

Nelle applicazioni pratiche, poiché il contenuto in peso del vapor d'acqua nell'aria è pari al massimo al 3%, risulta accettabile sostituire la massa dell'aria secca con quella totale del sistema.



## Umidità Specifica (x)

Ricavando  $m_v$  ed  $m_a$  dall'equazione di stato dei gas perfetti (assumendo che aria secca e vapor d'acqua si comportino nella miscela come un gas perfetto):

$$x = \frac{m_v}{m_a} = \frac{\rho_v}{\rho_a} = \frac{R_a p_v T}{R_v p_a T} = \frac{R_a p_v}{R_v p_a} = \frac{287}{461} \cdot \frac{p_v}{p_a} = 0,622 \cdot \frac{p_v}{p_a}$$

$$P = p_a + p_v$$

$$x = 0,622 \cdot \frac{p_v}{P - p_v} \quad (\text{kg}_v/\text{kg}_a)$$



## Umidità Relativa ( $\varphi$ , UR, RH)

L'umidità relativa è il rapporto tra la massa di vapor d'acqua  $m_v$  contenuta in un certo volume di aria umida e la massa  $m_s$  contenibile in condizioni di saturazione alla stessa temperatura nello stesso volume di aria umida.

$$\varphi = \frac{m_v}{m_s} \quad (\%)$$

L'umidità relativa è un rapporto adimensionale che viene comunemente espresso in termini percentuali.



## Umidità Relativa e Umidità Specifica

È possibile esprimere il titolo (umidità assoluta) di una miscela in funzione del grado igrometrico (umidità relativa) :

$$\varphi = \frac{m_v}{m_s} = \frac{\rho_v}{\rho_s} = \frac{R_v p_v T}{R_v p_s T} = \frac{p_v}{p_s}$$

$$x = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_s}{P - (\varphi \cdot p_s)} \quad (\text{kg}_v/\text{kg}_a)$$



## Tabella delle Condizioni di Saturazione

Temp., °C <i>t</i>	Absolute Pressure <i>p<sub>sat</sub></i> , kPa	Specific Volume, m <sup>3</sup> /kg <sub>w</sub>			Specific Enthalpy, kJ/kg <sub>w</sub>			Specific Entropy, kJ/(kg <sub>w</sub> ·K)			Temp., °C <i>t</i>
		Sat. Liquid <i>v<sub>f</sub></i>	Evap. <i>v<sub>g</sub></i>	Sat. Vapor <i>v<sub>g</sub></i>	Sat. Liquid <i>h<sub>f</sub></i>	Evap. <i>h<sub>fg</sub></i>	Sat. Vapor <i>h<sub>g</sub></i>	Sat. Liquid <i>s<sub>f</sub></i>	Evap. <i>s<sub>fg</sub></i>	Sat. Vapor <i>s<sub>g</sub></i>	
0	0.6112	0.001 000	206.141	206.143	-0.04	2500.81	2500.77	-0.0002	9.1555	9.1553	0
1	0.6571	0.001 000	192.455	192.456	4.18	2498.43	2502.61	0.0153	9.1134	9.1286	1
2	0.7060	0.001 000	179.769	179.770	8.39	2496.05	2504.45	0.0306	9.0716	9.1022	2
3	0.7580	0.001 000	168.026	168.027	12.60	2493.68	2506.28	0.0459	9.0302	9.0761	3
4	0.8135	0.001 000	157.137	157.138	16.81	2491.31	2508.12	0.0611	8.9890	9.0501	4
5	0.8725	0.001 000	147.032	147.033	21.02	2488.94	2509.96	0.0763	8.9482	9.0244	5
6	0.9373	0.001 000	137.653	137.654	25.22	2486.57	2511.79	0.0913	8.9077	8.9990	6
7	1.0020	0.001 000	128.947	128.948	29.42	2484.20	2513.62	0.1064	8.8674	8.9738	7
8	1.0728	0.001 000	120.850	120.851	33.62	2481.84	2515.46	0.1213	8.8273	8.9488	8
9	1.1481	0.001 000	113.326	113.327	37.82	2479.47	2517.29	0.1362	8.7878	8.9240	9
10	1.2280	0.001 000	106.328	106.329	42.01	2477.11	2519.12	0.1511	8.7484	8.8995	10
11	1.3127	0.001 000	99.812	99.813	46.21	2474.74	2520.95	0.1659	8.7093	8.8752	11
12	1.4026	0.001 001	93.743	93.744	50.40	2472.38	2522.78	0.1806	8.6705	8.8511	12
13	1.4978	0.001 001	88.088	88.089	54.59	2470.02	2524.61	0.1953	8.6319	8.8272	13
14	1.5987	0.001 001	82.815	82.816	58.78	2467.66	2526.44	0.2099	8.5936	8.8035	14
15	1.7055	0.001 001	77.897	77.898	62.97	2465.30	2528.26	0.2244	8.5556	8.7801	15
16	1.8184	0.001 001	73.307	73.308	67.16	2462.93	2530.09	0.2389	8.5178	8.7568	16
17	1.9380	0.001 001	69.021	69.022	71.34	2460.57	2531.92	0.2534	8.4804	8.7338	17
18	2.0643	0.001 002	65.017	65.018	75.53	2458.21	2533.74	0.2678	8.4431	8.7109	18
19	2.1978	0.001 002	61.272	61.273	79.72	2455.85	2535.56	0.2821	8.4061	8.6883	19
20	2.3388	0.001 002	57.774	57.775	83.90	2453.48	2537.38	0.2964	8.3694	8.6658	20
21	2.4877	0.001 002	54.499	54.500	88.08	2451.12	2539.20	0.3107	8.3329	8.6436	21
22	2.6448	0.001 002	51.433	51.434	92.27	2448.75	2541.02	0.3249	8.2967	8.6215	22
23	2.8104	0.001 003	48.562	48.563	96.45	2446.39	2542.84	0.3390	8.2607	8.5996	23
24	2.9851	0.001 003	45.872	45.873	100.63	2444.02	2544.65	0.3531	8.2249	8.5780	24
25	3.1692	0.001 003	43.350	43.351	104.81	2441.66	2546.47	0.3672	8.1894	8.5565	25
26	3.3631	0.001 003	40.985	40.986	108.99	2439.29	2548.28	0.3812	8.1541	8.5352	26
27	3.5673	0.001 004	38.766	38.767	113.18	2436.92	2550.09	0.3951	8.1190	8.5141	27
28	3.7822	0.001 004	36.682	36.683	117.36	2434.55	2551.90	0.4090	8.0842	8.4932	28
29	4.0083	0.001 004	34.726	34.727	121.54	2432.17	2553.71	0.4229	8.0496	8.4724	29
30	4.2460	0.001 004	32.889	32.889	125.72	2429.80	2555.52	0.4367	8.0152	8.4519	30

## Entalpia dell'Aria Umida (*h*)

Essendo l'aria umida una miscela ideale, la sua l'entalpia risulta pari alla somma dell'entalpia dell'aria secca e del vapor d'acqua

$$\begin{aligned}
 H &= \sum_i H_i = H_{as} + H_v = m_{as} h_{as} + m_v h_v = \\
 &= m_{as} \left( h_{as} + \frac{m_v}{m_{as}} h_v \right)
 \end{aligned}$$

## Entalpia dell'Aria Umida ( $h$ )

Risulta comodo esprimere l'entalpia dell'aria umida con riferimento ad una massa totale di miscela: *aria secca* + *vapor d'acqua*.

$$h = h_{as} + x \cdot h_v \left[ \frac{\text{J}}{\text{kg}_{as}} \right]$$



## Entalpia dell'Aria Secca ( $h_a$ )

L'entalpia di 1 kg di aria secca (gas ideale) alla temperatura  $t$  è definita:

$$h_a = c_{pa} \cdot t$$

$c_{pa}$  è il calore specifico a pressione costante dell'aria secca (pari a 1,005 kJ/(kg·K)).



## Entalpia del Vapore ( $h_v$ )

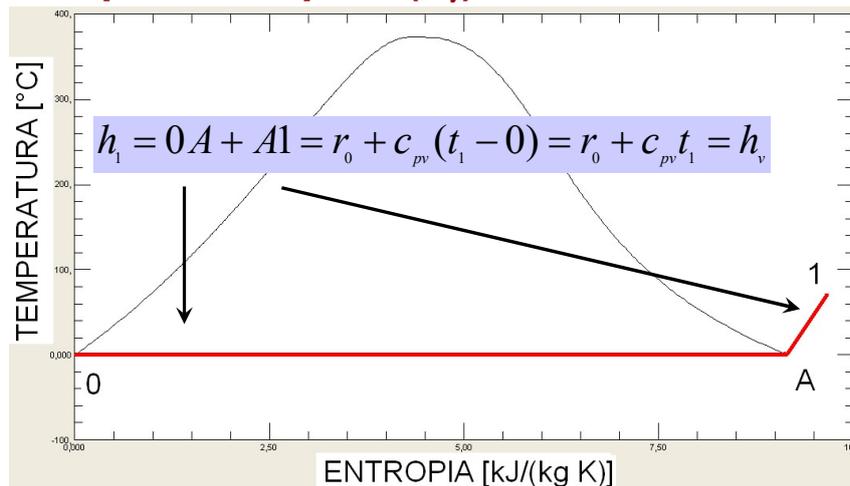
L'entalpia del vapore è l'energia necessaria (a pressione costante) a vaporizzare un kg di acqua saturata alla temperatura di  $0^\circ\text{C}$  e del calore necessario a portare tale vapore alla temperatura  $t$ :

$$h_v = x \cdot r + x \cdot c_{pv} \cdot t$$

$c_{pv}$  è il calore specifico a pressione costante del vapor d'acqua (pari a  $1,875 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ) ed  $r$  è il calore latente di vaporizzazione dell'acqua a  $0^\circ\text{C}$  ( $2501 \text{ kJ}/\text{kg}$ ).



## Entalpia del Vapore ( $h_v$ )



$r_0$  (calore latente di vapor. a  $0^\circ \text{C}$ ) =  $2501 \text{ kJ}/\text{kg}$

$c_{pv} = 1875 \text{ J}/(\text{kg K})$



## Entalpia dell'Aria Umida (h)

In definitiva l'ENTALPIA dell'aria umida è data da:

$$h = c_{pa} t + x \cdot (r_0 + c_{pv} t) \left[ \frac{\text{J}}{\text{kg}_{\text{as}}} \right]$$

$$c_{pa} = 1006 \text{ J/(kg K)}$$

$$c_{pv} = 1875 \text{ J/(kg K)}$$

$$r_0 = 2501 \text{ kJ/kg}$$

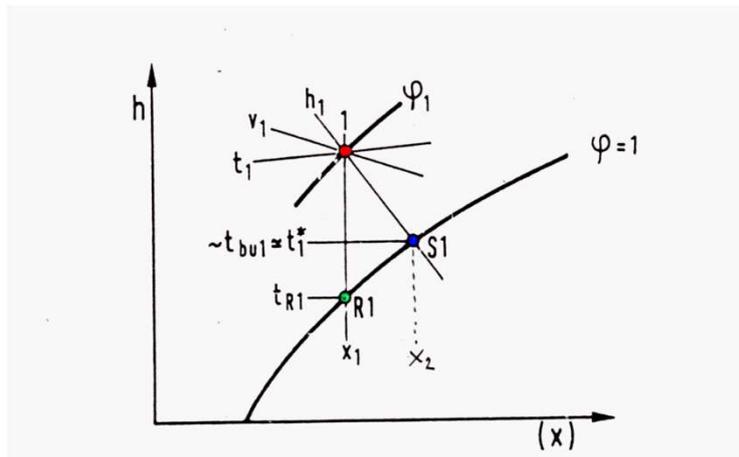
$$c_{pa} = 0.24 \text{ kcal/(kg } ^\circ\text{C)}$$

$$c_{pv} = 0.45 \text{ kcal/(kg } ^\circ\text{C)}$$

$$r_0 = 597.5 \text{ kcal/kg}$$



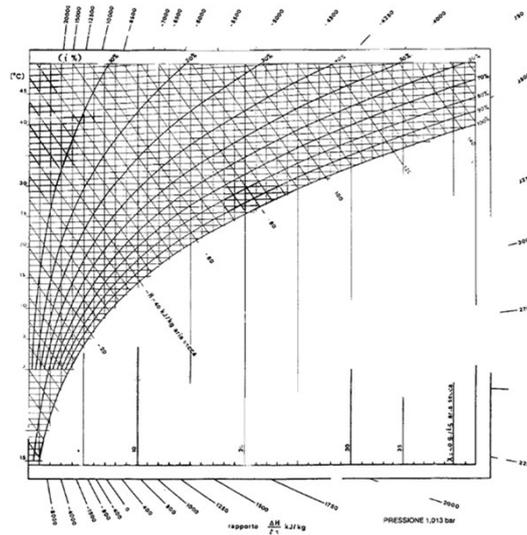
## Diagramma Psicrometrico



È possibile ricavare il diagramma psicrometrico o di Mollier che permette di mettere in relazione l'umidità specifica, la temperatura e l'entalpia specifica alla pressione  $P$  di 101,3 kPa.



## Diagramma di Mollier



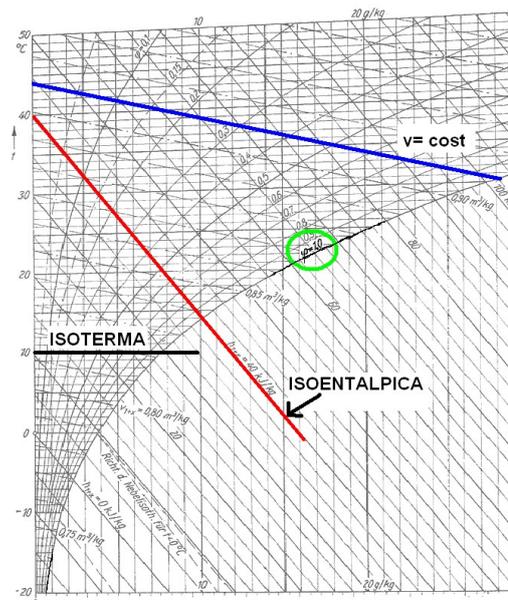
## Diagramma di Mollier

Diagramma ad assi inclinati

E' costruito alla pressione di 1 atm cioè 101325 Pa

Asse inclinato x (poi proiettato) riporta l'umidità specifica (x)

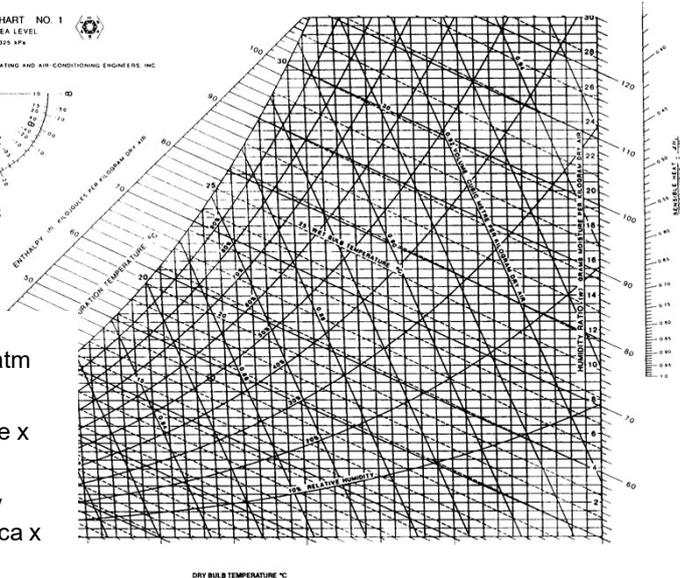
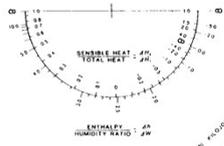
Asse verticale y rigorosamente l'entalpia!!!!



## Diagramma ASHRAE

ASHRAE PSYCHROMETRIC CHART NO. 1  
 NORMAL TEMPERATURE SEA LEVEL  
 BAROMETRIC PRESSURE 101325 hPa

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, INC.

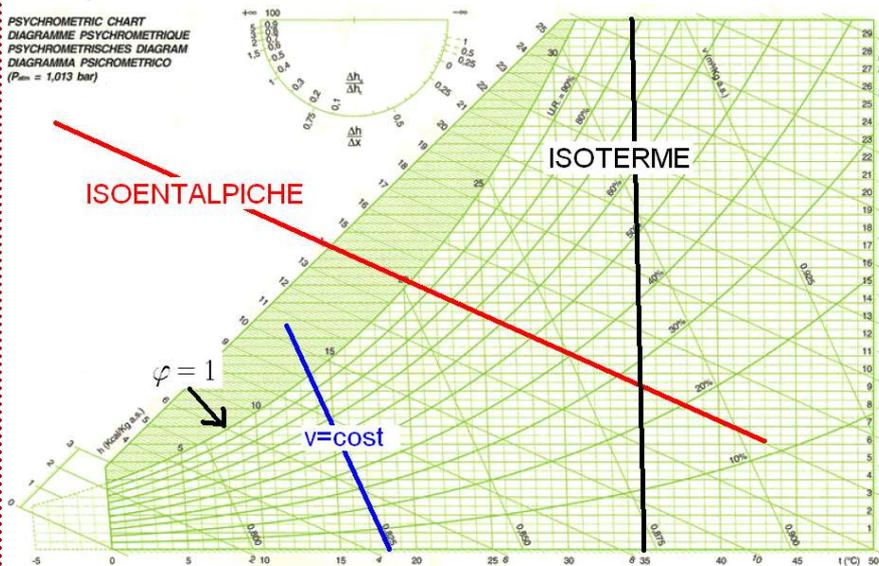


Costruito alla pressione di 1 atm cioè 101325 Pa  
 Asse orizzontale x temperatura  
 Asse verticale y l'umidità specifica x

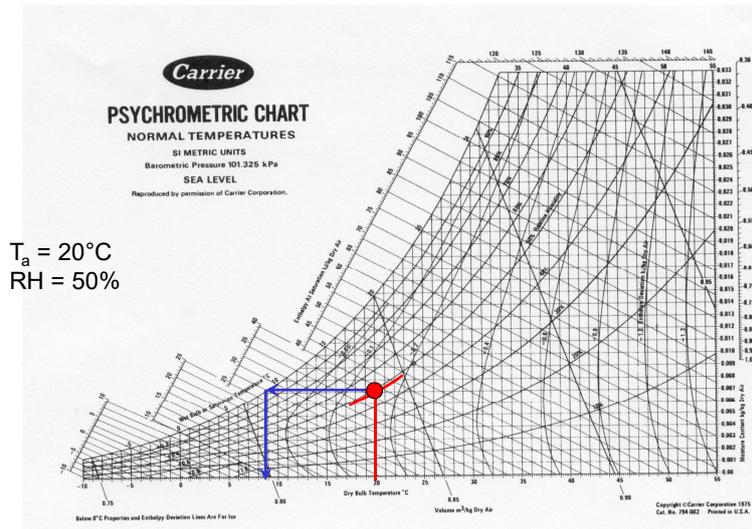


## Diagramma ASHRAE

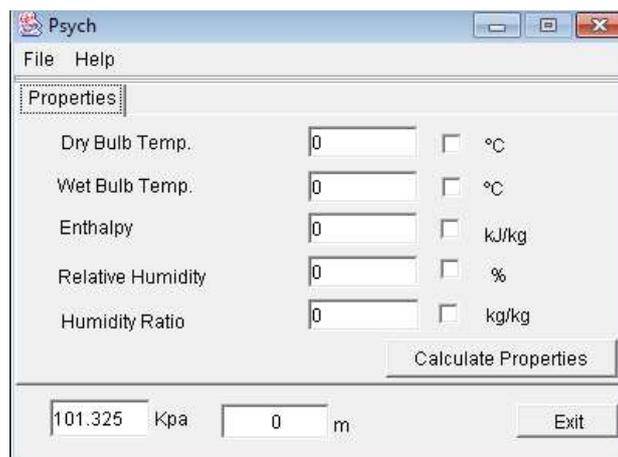
PSYCHROMETRIC CHART  
 DIAGRAMME PSYCHROMETRIQUE  
 PSYCHROMETRISCHES DIAGRAMM  
 DIAGRAMMA PSICROMETRICO  
 (P<sub>atm</sub> = 1,013 bar)



## Diagramma Carrier



## Tools (1)



[http://hvac\\_2.okstate.edu/psychrometric/psychrometric.html](http://hvac_2.okstate.edu/psychrometric/psychrometric.html)

## Tools (2)

- <http://www.psychrometric-calculator.com/HumidAirWeb.aspx>

The screenshot displays the HumidAirWeb software interface. The 'Input Data' section shows the following values:

- 1. Temperature [Tdb]: 20 °C
- 2. Relative humidity [Dry]: 50 %
- 3. Pressure (absolute) [P]: 1 bar

The 'Results' table is as follows:

Property name	Property ID	Results	Units (SI)	Constants used in calculation
<b>1. Temperatures</b>				
1. Dry bulb temperature	Tdb	20.000000000	°C	Molar mass of dry air: M = 28.9645 g/mol
2. Wet bulb temperature	Twb	13.749062549	°C	Molar mass of water: M = 18.016 g/mol
3. Dew point temperature	Tdp	9.2744829786	°C	
<b>2. Pressures</b>				
4. Pressure	P	1.000000000	bar	Reference state (zero enthalpy and entropy) is set at:
5. Saturation water pressure	Ps	0.0233880370	bar	Temperature: t = 0 °C
6. Saturation pressure at wet bulb temperature	Pub	0.0157240600	bar	Pressure: p = 1.01325 bar
7. Saturation pressure at dew point temperature	Pdp	0.0116956662	bar	
<b>3. Fractions</b>				
8. Mole fraction of water	Xiw	0.0117412223	dimensionless	
9. Mole fraction of air	Xia	0.9882587771	dimensionless	
10. Weight fraction of water	Wie	0.0073353394	dimensionless	

The 'Output Panel' shows the following data:

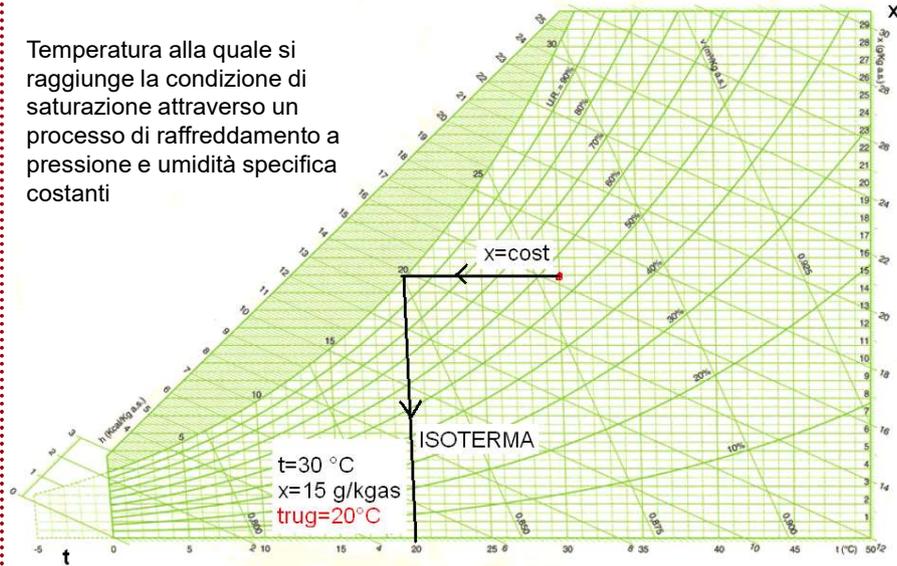
	Tdb [°C]	Twb [°C]	Tdp [°C]	P [bar]	W [kg moisture]	RH [-]	Va [m³/kg dry air]	Wa [m³/kg dry air]	Da [(kg dry air)/m³]	Dm [(kg dry air)/m³]
1	20.000000000	13.749062549	9.2744829786	1.000000000	0.0073895684	0.500000000	0.8412058455	0.8511757576	1.1887696756	1.1748454900
2										
3										
4										
5										
6										

## Temperature

1. Temperatura bulbo secco
2. Temperatura di rugiada
3. Temperatura bulbo bagnato
4. Temperatura di saturazione adiabatica

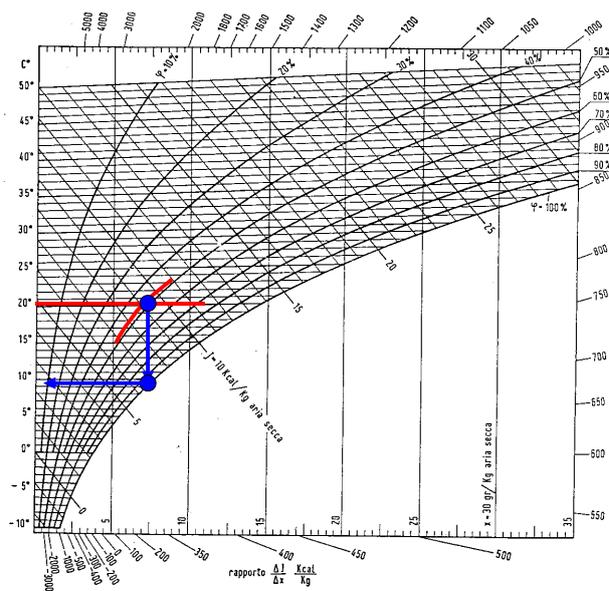
## Temperatura di Rugiada

Temperatura alla quale si raggiunge la condizione di saturazione attraverso un processo di raffreddamento a pressione e umidità specifica costanti



## Temperatura di Rugiada

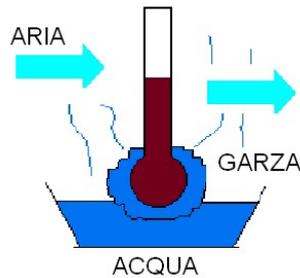
$T_a = 20^\circ\text{C}$   
 $UR = 50\%$



## Temperatura di Bulbo Bagnato

Temperatura alla quale si porta l'acqua in condizioni di scambio di calore convettivo e di massa con aria in moto fortemente turbolento

TERMOMETRO A BULBO BAGNATO



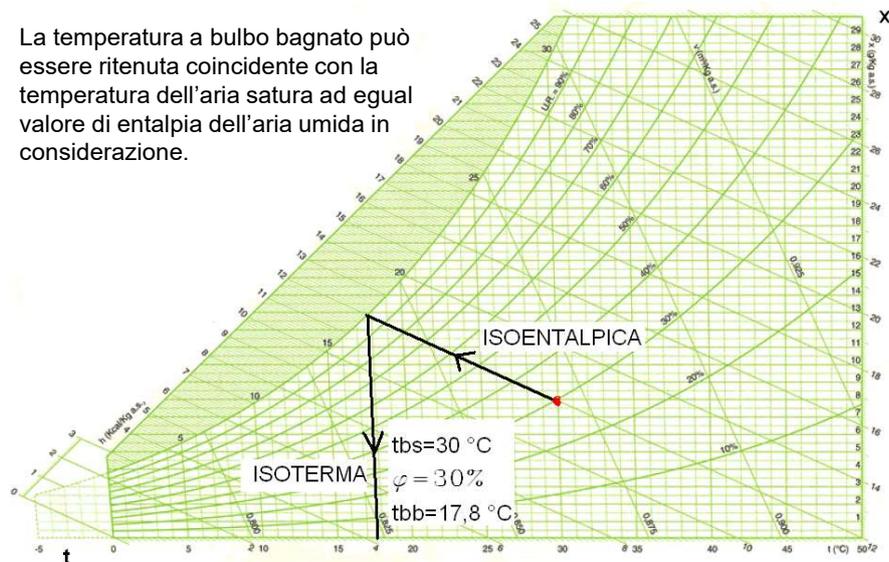
1. L'aria non satura lambisce la garza e l'acqua tende ad evaporare.
2. Per evaporare l'acqua assorbe calore dall'aria.
3. Questo calore all'equilibrio sarà uguale al flusso termico convettivo ceduto dall'aria all'acqua che bagna il bulbo.
4. Allora l'acqua sarà a temperatura inferiore rispetto all'aria

5. Se la velocità dell'aria è  $u > 3$  m/s fino a oltre 40 m/s la temperatura dipende solo dalle condizioni termoisometriche dell'aria umida → temperatura a bulbo bagnato.

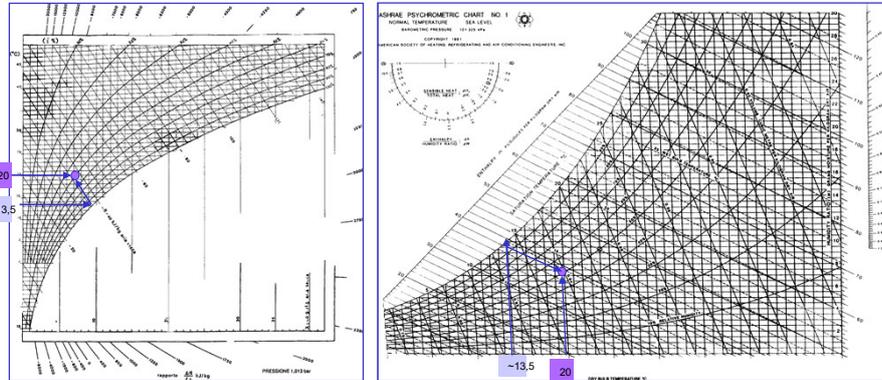


## Temperatura di Bulbo Bagnato

La temperatura a bulbo bagnato può essere ritenuta coincidente con la temperatura dell'aria satura ad egual valore di entalpia dell'aria umida in considerazione.



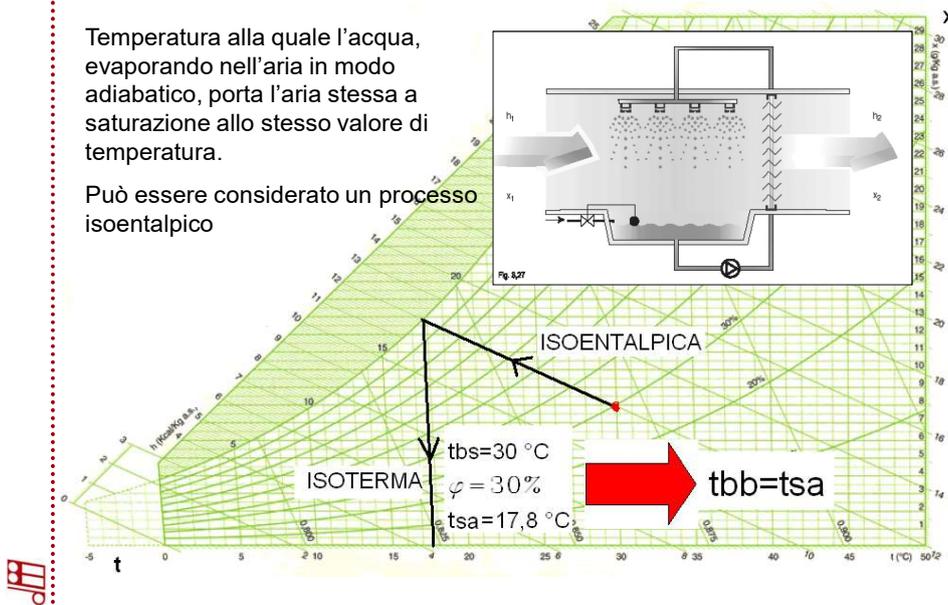
## Temperatura a Bulbo Umido



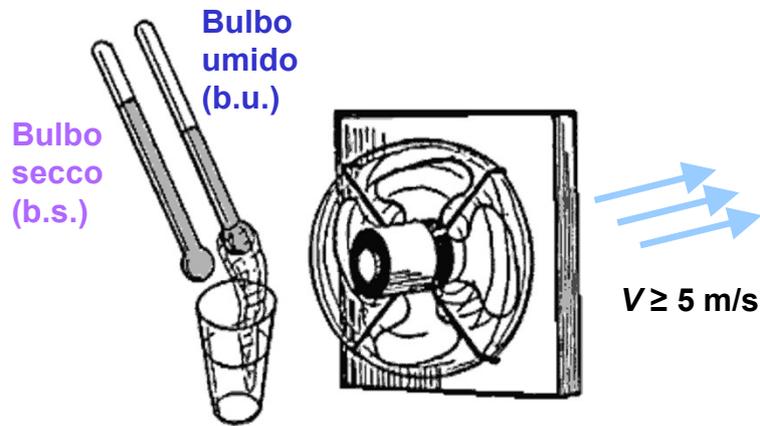
## Temperatura di Saturazione Adiabatica

Temperatura alla quale l'acqua, evaporando nell'aria in modo adiabatico, porta l'aria stessa a saturazione allo stesso valore di temperatura.

Può essere considerato un processo isoentalpico



## Psicrometro ad Aspirazione



Per la misura del grado igrometrico si usano vari strumenti quali il termigrometro a fascio di capelli e lo psicrometro.

## Determinazione dell'Umidità Relativa

L'umidità relativa della miscela si individua sul diagramma psicrometrico a partire dal valore della temperatura a b.u. con la seguente procedura:

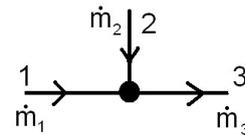
- si riportano sul diagramma psicrometrico i valori di b.s. e b.u. letti dallo psicrometro;
- si porta il valore di b.u. fino alla curva di saturazione;
- a partire da tale punto si traccia la retta ad entalpia costante fino ad incontrare il valore della retta a temperatura costante di b.s.;
- in corrispondenza dell'intersezione è possibile leggere il valore dell'umidità relativa della miscela;
- tale punto nel diagramma rappresenta quindi lo stato fisico della miscela.

## Trasformazioni dell'Aria Umida

1. Miscelamento adiabatico di due portate di aria umida
2. Riscaldamento di una portata di aria umida
3. Raffreddamento sensibile di una portata di aria umida
4. Raffreddamento con deumidificazione
5. Umidificazione dell'aria per iniezione di acqua



## Miscelamento Adiabatico



bilancio di massa a.s.:  $\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3$

bilancio di energia:  $\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 = \dot{m}_3 h_3$   
 $\dot{Q}_1 = 0 \quad \dot{L}_1 = 0 \quad \Delta E_k = 0 \quad \Delta E_p = 0$

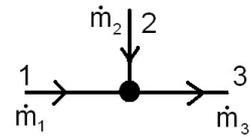
bilancio di massa vapore:  $\dot{m}_1 x_1 + \dot{m}_2 x_2 = \dot{m}_3 x_3$

Si ottengono:  $\dot{m}_1 (h_3 - h_1) + \dot{m}_2 (h_3 - h_2) = 0$

$$\dot{m}_1 (x_3 - x_1) + \dot{m}_2 (x_3 - x_2) = 0$$



## Miscelamento Adiabatico



Risulta infine:

$$\frac{(h_2 - h_3)}{(h_3 - h_1)} = \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_2} = \frac{(x_2 - x_3)}{(x_3 - x_1)}$$

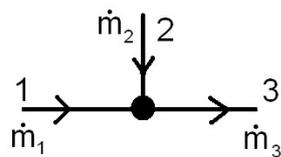
Il punto di miscela si trova allineato con i punti 1 e 2; il punto di miscela 3 si trova sul segmento 1-2 in posizione tale da dividerlo in due segmenti 1-3 e 3-2 secondo il rapporto:

$$\frac{23}{31} = \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_2}$$

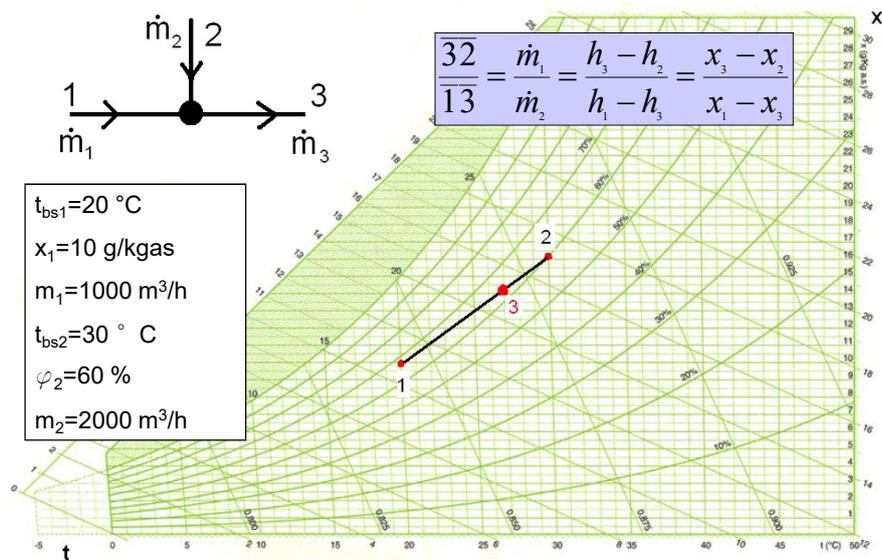
In altre parole le condizioni della miscela sono più vicine a quelle della portata maggiore.



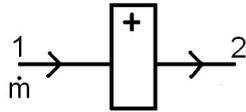
## Miscelamento Adiabatico



$t_{bs1} = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$   
 $x_1 = 10 \text{ g/kgas}$   
 $m_1 = 1000 \text{ m}^3/\text{h}$   
 $t_{bs2} = 30 \text{ } ^\circ\text{C}$   
 $\varphi_2 = 60 \%$   
 $m_2 = 2000 \text{ m}^3/\text{h}$



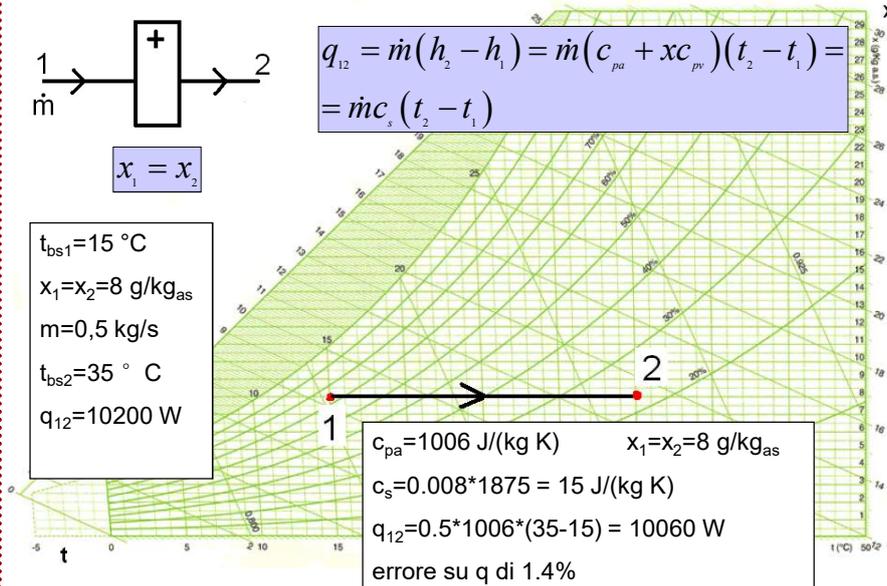
## Riscaldamento Sensibile



$$x_1 = x_2$$

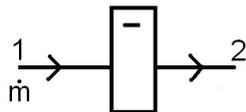
$t_{bs1} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$   
 $x_1 = x_2 = 8 \text{ g/kg}_{as}$   
 $m = 0,5 \text{ kg/s}$   
 $t_{bs2} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$   
 $q_{12} = 10200 \text{ W}$

$$q_{12} = \dot{m}(h_2 - h_1) = \dot{m}(c_{pa} + xc_{pv})(t_2 - t_1) = \dot{m}c_s(t_2 - t_1)$$



$c_{pa} = 1006 \text{ J/(kg K)}$       $x_1 = x_2 = 8 \text{ g/kg}_{as}$   
 $c_s = 0.008 \cdot 1875 = 15 \text{ J/(kg K)}$   
 $q_{12} = 0.5 \cdot 1006 \cdot (35 - 15) = 10060 \text{ W}$   
 errore su q di 1.4%

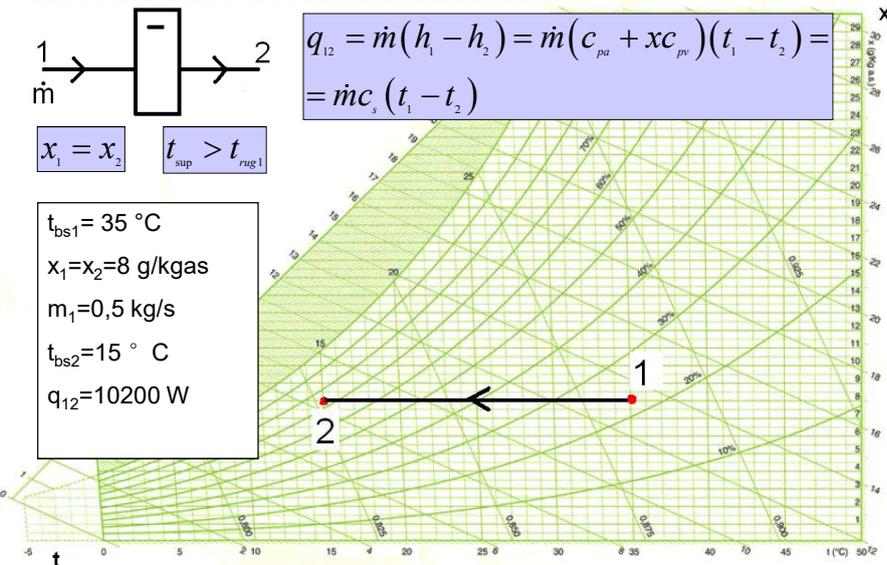
## Raffreddamento Sensibile



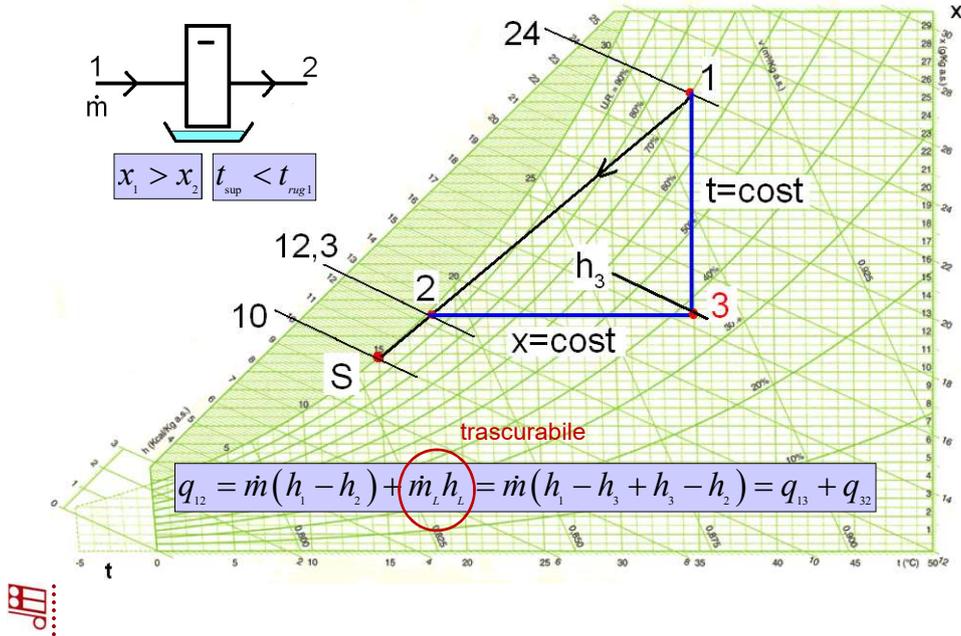
$$x_1 = x_2 \quad t_{sup} > t_{reg1}$$

$t_{bs1} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$   
 $x_1 = x_2 = 8 \text{ g/kg}_{as}$   
 $m_1 = 0,5 \text{ kg/s}$   
 $t_{bs2} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$   
 $q_{12} = 10200 \text{ W}$

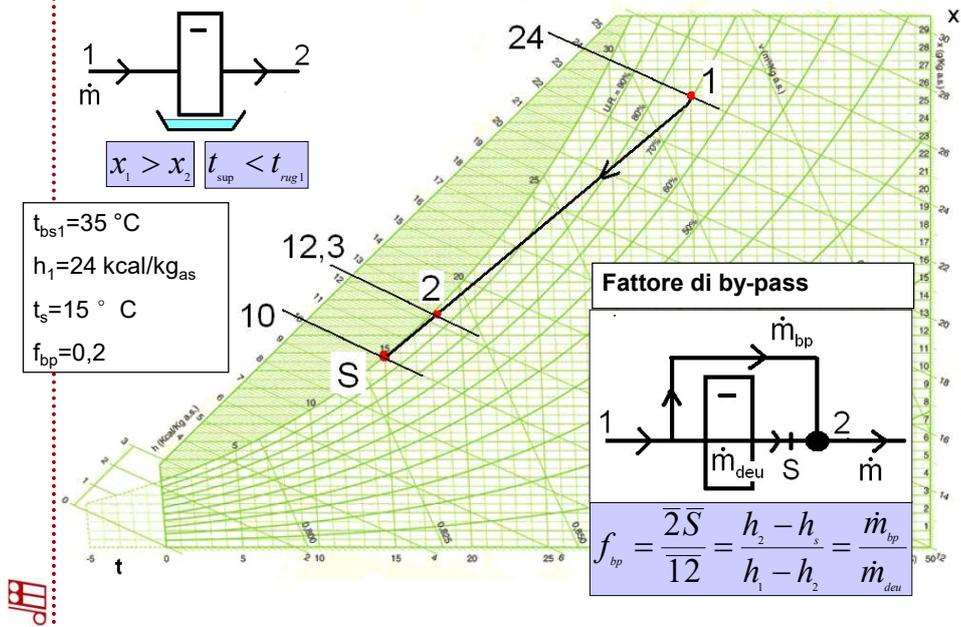
$$q_{12} = \dot{m}(h_1 - h_2) = \dot{m}(c_{pa} + xc_{pv})(t_1 - t_2) = \dot{m}c_s(t_1 - t_2)$$



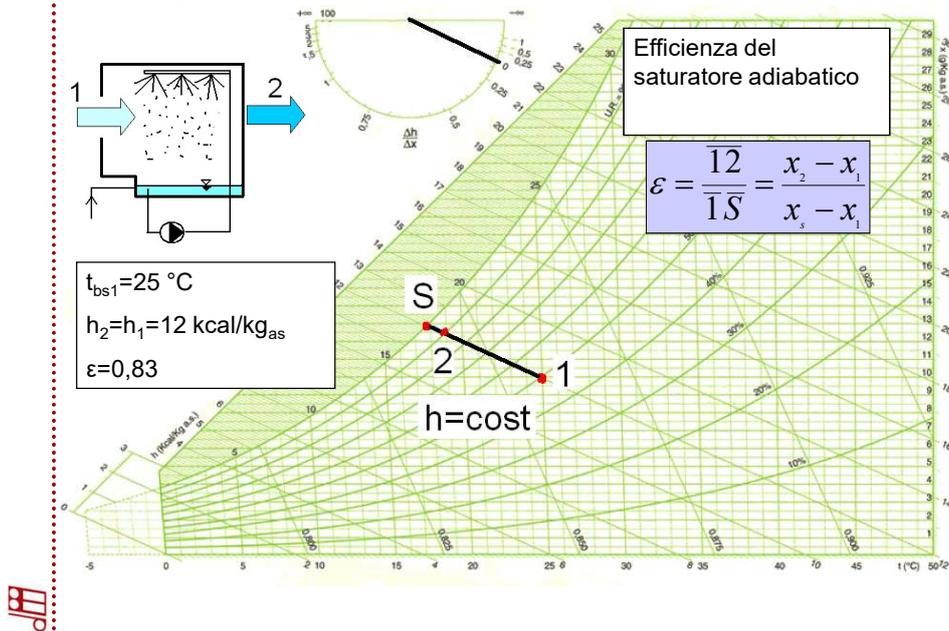
## Raffreddamento con Deumidificazione



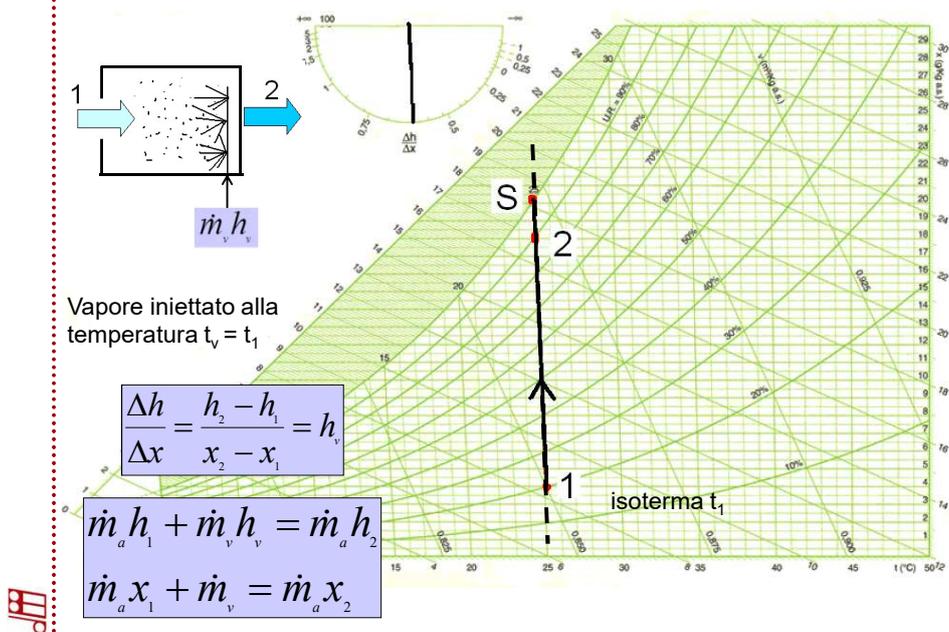
## Raffreddamento con Deumidificazione



## Umidificazione dell'Aria con Acqua



## Umidificazione dell'Aria con Vapore



## Applicazioni: climatizzazione

•Parametri controllati: temperatura ( $t_A$ ) e umidità relativa ( $\phi_A$ )

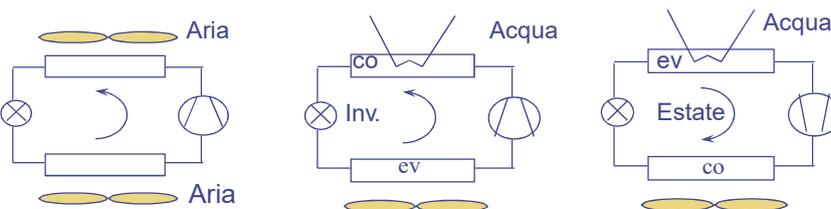
INVERNO		ESTATE	
Umidità $\phi_A$ [%]	Temperatura $t_A$ [°C]	Umidità $\phi_A$ [%]	Temperatura $t_A$ [°C]
50	20-21	50	26

Velocità di immissione dell'aria deve essere minore di 0,15 m/s

Per ogni individuo circa 20 litri di CO<sub>2</sub> all'ora → si devono immettere dai 28-33 m<sup>3</sup>/h di aria pulita per ogni persona presente nell'ambiente



## Macchine frigorifere Aria-Aria e Aria-Acqua



Sorgente esterna: aria

✓ Sistemi **idronici** (ad acqua) o ad **espansione diretta** (split, multisplit, VRV/VRF)

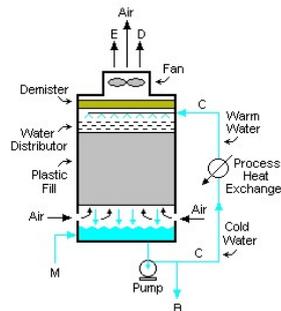
✓ Caratteristiche:

- semplicità di installazione
- forte **dipendenza delle prestazioni dalle condizioni climatiche**, sia in inverno che in estate
- in inverno, problemi di formazione di **brina all'evaporatore** (sbrinamento ad inversione di ciclo e/o con batterie elettriche)
- ingombro e **rumorosità** dell'unità esterna
- non disponibili per grandi potenzialità (oltre i 1000 kW, circa), per le dimensioni eccessive dell'unità esterna

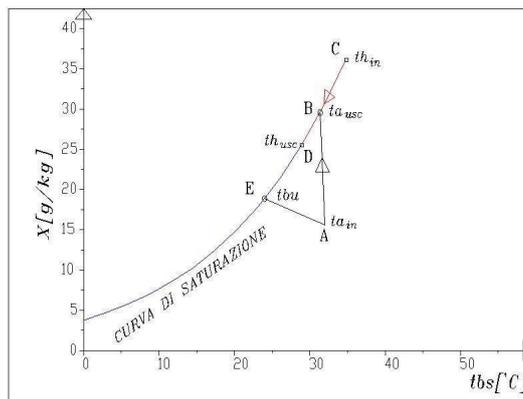


## Macchine frigorifere con condensazione mediante torre evaporativa

- ✓ A parità di temperatura dell'aria ambiente, si può raffreddare meglio l'acqua di condensazione, raggiungendo  $T$  più basse (se il processo fosse perfettamente adiabatico, in teoria si potrebbe far uscire l'acqua ad una  $T = T_{bu}$  dell'aria)
- ✓ Inconvenienti: è necessario il reintegro dell'acqua che evapora => consumo di acqua DEMI, da trattare chimicamente anche per evitare proliferazione batterica

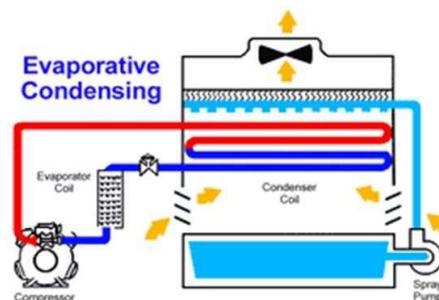
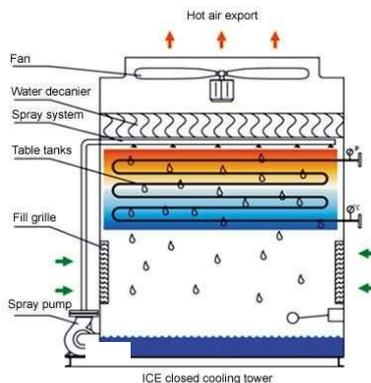


C = Circulating cooling water  
M = Makeup water  
E = Evaporated water  
D = Drift or windage water loss  
B = Blowdown or drawoff water



## Condensazione mediante torre evaporativa a circuito chiuso o condensatore evaporativo

- ✓ Possibile anche l'uso di:
  - **torri a circuito chiuso**, in cui il circuito dell'acqua di condensazione rimane separato dall'acqua di torre; si perde in efficienza, ma **si evita di contaminare il circuito dell'acqua** di condensazione;
  - **condensatori evaporativi**, in cui nella torre viene direttamente raffreddato il refrigerante.



## Formule

$$P = p_1 + p_2 + \dots + p_n = \sum_{i=1}^n p_i$$

$$[pV]_T = K(T)$$

$$h_a = c_{pa} \cdot t$$

$$h_v = x \cdot r + x \cdot c_{pv} \cdot t$$

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

$$\varphi = \frac{m_v}{m_s}$$

$$pV = RT$$

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

$$\frac{p}{\rho} = RT$$

$$x = 0,622 \cdot \frac{p_v}{P - p_v}$$

$$x = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_s}{P - (\varphi \cdot p_s)}$$

$$pV = mRT$$

$$x = \frac{m_v}{m_a} = \frac{p_v}{p_a} = \frac{R_a p_v T}{R_s p_a T} = \frac{R_a p_v}{R_s p_a} = \frac{287}{461} \cdot \frac{p_v}{p_a} = 0,622 \cdot \frac{p_v}{p_a}$$

$$\varphi = \frac{m_v}{m_s} = \frac{p_v}{R_s p_s T} = \frac{p_v}{p_s}$$

$$P = p_a + p_v$$

$$\bar{M}_a = 0,78 \cdot 28 + 0,21 \cdot 32 + 0,01 \cdot 40 = 28,9 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

$$h = h_a + h_v$$

$$\bar{M}_v = 18 \text{ kg/kmol}$$

$$\bar{M}_s = 28,97 \text{ kg/kmol}$$

$$R_v = \frac{\bar{R}}{\bar{M}_v} = \frac{8314}{18} = 461 \text{ J/(kgK)}$$

$$h = 1,005 \cdot t + x \cdot (1,9 \cdot t + 2500) \text{ kJ/kg}_{\text{as}}$$

$$R_s = \frac{\bar{R}}{\bar{M}_s} = \frac{8314}{28,97} = 287 \text{ J/(kgK)}$$

