

Psicrometria

- La **psicrometria** studia la miscela di aria e vapor d'acqua (aria umida) ovvero di 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 ed il comfort termico
- Valutazione della **condensazione** su superfici fredde
- **Refrigerazione** evaporativa
- Analisi di fenomeni **meteorologici**

Termodinamica dell'aria umida

- La sensazione di benessere che un individuo avverte all'interno di un ambiente confinato è legata all'ottenimento di un campo di valori per alcuni determinati parametri ambientali.
- 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.
- 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.

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 vapore 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)
- 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 alla pressione atmosferica è stata sostituita dal Pascal (Pa).

Pascal (unità di misura)

- Il pascal (Pa) 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 largamente impiegato (meteorologia)
 $1 \text{ hPa} = 100 \text{ Pa} = 1 \text{ millibar} = 10^{-3} \text{ bar} = 100 \text{ Pa}$
- Il chilopascal (kPa) è di uso comune.
 $1 \text{ kPa} = 1000 \text{ Pa} = 10 \text{ millibar}$

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 (bassa) e temperatura (alta)
- 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 (m³/kg)
- T = temperatura termodinamica del sistema (K)
- ρ = densità del gas (kg/m³)

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

- 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 $p_t = p_1 + p_2 + \dots + p_n$ 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 chimicamente 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 mediamente composta (in volume):
 - 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 °C e una pressione di 101,325 kPa (1 atm) le caratteristiche fisiche dell'aria campione sono:
 - densità media $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$
 - calore specifico a pressione costante $c_{pa} = 0,241 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}$

Componenti dell'aria

	% in volume	% in massa
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

Pressione atmosferica

- I componenti principali dell'aria sono (in volume):
 - Azoto (nella percentuale del 78%)
 - Ossigeno (nella percentuale del 21%)
 - Anidride carbonica (nella percentuale dello 0,03%)
 - Altri gas (nella percentuale dell' 1%)
- Secondo la legge di Dalton, la somma delle corrispondenti pressioni parziali deve essere uguale alla pressione atmosferica ($1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa}$) e infatti:
 - Azoto $\rightarrow 79033 \text{ Pa}$
 - Ossigeno $\rightarrow 21278 \text{ Pa}$
 - Anidride carb. $\rightarrow 10 \text{ Pa}$
 - Altri gas $\rightarrow 1013 \text{ Pa}$
 - Totale (Aria) $= 101325 \text{ Pa}$

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 massa
O ₂	32	0,239
N ₂	28	0,755
Ar	40	0,0129

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

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

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:

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

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

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):

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

$$P = p_a + p_v$$

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

Tensione vapore / pressione saturazione

- Gasolio autotraz.: $p_s \cong 0,4 \text{ kPa}$
- Acqua: $p_s \cong 7,37 \text{ kPa}$
- Etanolo, alcol etilico: $p_s \cong 18 \text{ kPa}$
- Benzina "verde": $p_s \cong 40 \text{ kPa}$
- Acetone: $p_s \cong 56 \text{ kPa}$
- Ammoniaca pura: $p_s \cong 1500 \text{ kPa}$

Valori calcolati a $t \cong 40 \text{ }^\circ\text{C}$

Umidità relativa (φ , 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 specifica) di una miscela in funzione del grado igrometrico (umidità relativa) :

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

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

Tabella delle condizioni di saturazione

Temp., °C <i>t</i>	Absolute Pressure <i>p_{ws}</i> , kPa	Specific Volume, m ³ /kg _w			Specific Enthalpy, kJ/kg _w			Specific Entropy, kJ/(kg _w ·K)			Temp., °C <i>t</i>
		Sat. Liquid <i>v_f</i>	Evap. <i>v_{fg}</i>	Sat. Vapor <i>v_g</i>	Sat. Liquid <i>h_f</i>	Evap. <i>h_{fg}</i>	Sat. Vapor <i>h_g</i>	Sat. Liquid <i>s_f</i>	Evap. <i>s_{fg}</i>	Sat. Vapor <i>s_g</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					8
9	1.1481	0.001 000	113.326	113.327	37.82	2479.47					9
10	1.2280	0.001 000	106.328	106.329	42.01	2477.11					10
11	1.3127	0.001 000	99.812	99.813	46.21	2474.74					11
12	1.4026	0.001 001	93.743	93.744	50.40	2472.38					12
13	1.4978	0.001 001	88.088	88.089	54.59	2470.02					13
14	1.5987	0.001 001	82.815	82.816	58.78	2467.66					14
15	1.7055	0.001 001	77.897	77.898	62.97	2465.30					15
16	1.8184	0.001 001	73.307	73.308	67.16	2462.93					16
17	1.9380	0.001 001	69.021	69.022	71.34	2460.57					17
18	2.0643	0.001 002	65.017	65.018	75.53	2458.21					18
19	2.1978	0.001 002	61.272	61.273	79.72	2455.85					19
20	2.3388	0.001 002	57.774	57.773	83.90	2453.48					20
21	2.4877	0.001 002	54.499	54.500	88.08	2451.12					21
22	2.6448	0.001 002	51.433	51.434	92.27	2448.75					22
23	2.8104	0.001 003	48.562	48.563	96.45	2446.39					23
24	2.9851	0.001 003	45.872	45.873	100.63	2444.02					24
25	3.1692	0.001 003	43.350	43.351	104.81	2441.66					25
26	3.3631	0.001 003	40.985	40.986	108.99	2439.29					26
27	3.5673	0.001 004	38.766	38.767	113.18	2436.92					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

$$\ln(p_{\text{sat}}) = \frac{A}{T} + B$$

$$A = -5342.64$$

$$B = 25.9824$$

$$T = \text{Kelvin}$$

$$p = \text{Pascal}$$

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)).

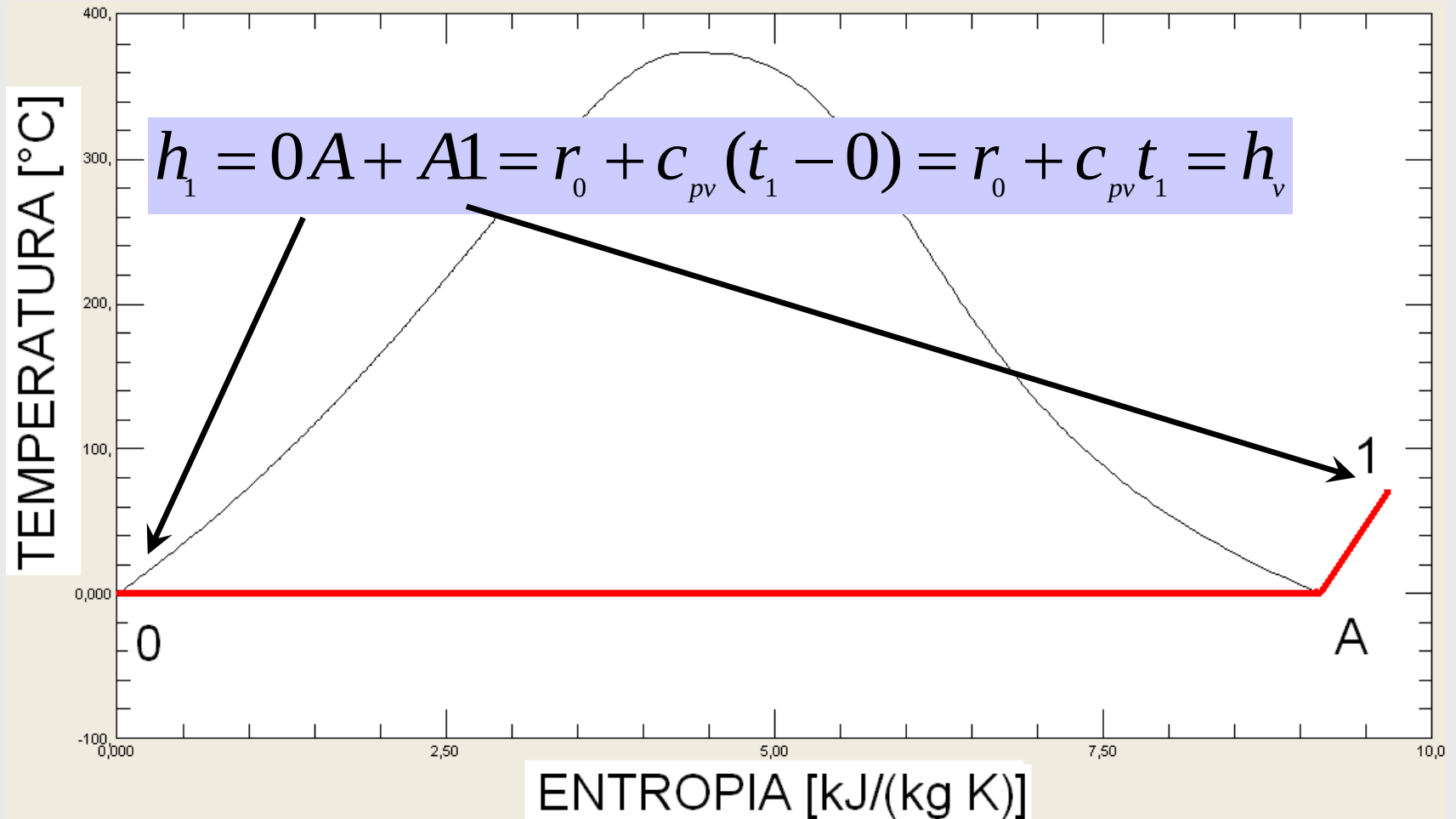
Entalpia del vapore (h_v)

L'entalpia del vapore è l'energia necessaria (a pressione costante) a vaporizzare un kg di acqua satura alla temperatura di 0°C e del calore necessario a portare tale vapore alla temperatura t :

$$h_v = r_0 + c_{pv} \cdot (t - t_0)$$

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

Entalpia del vapore (h_v)



r_0 (calore latente di vapor. a 0 ° C) = 2501 kJ/kg

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

Entalpia dell'aria umida (h)

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

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

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

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

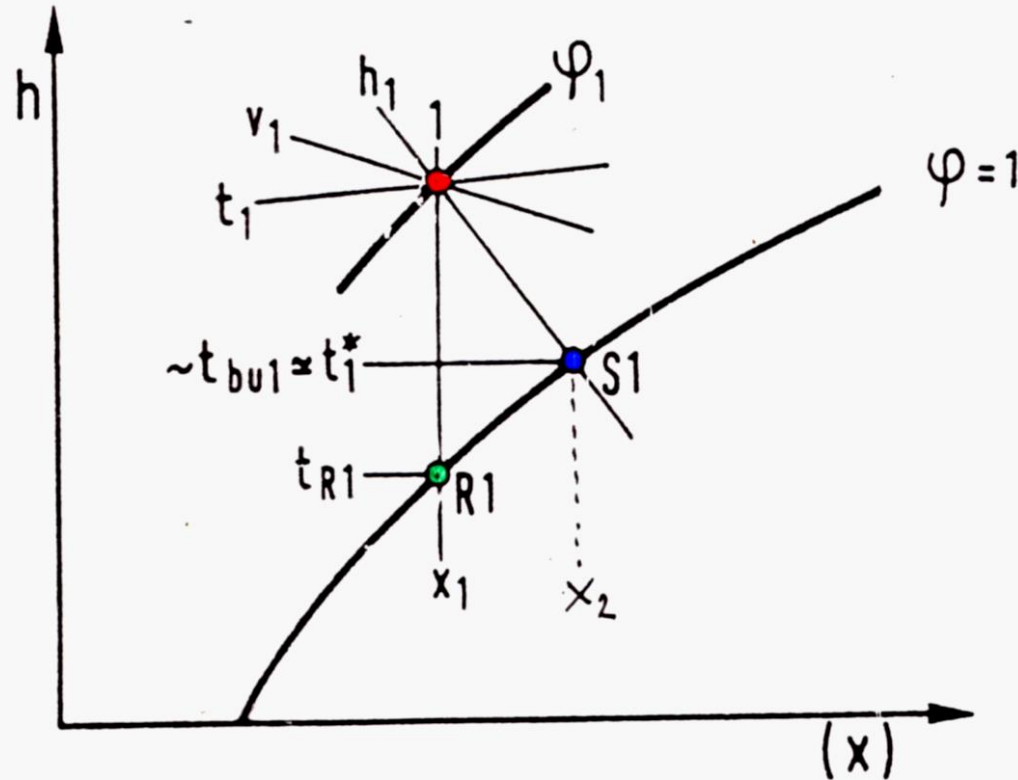
$$r_0 = 2501 \text{ kJ/kg}$$

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

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

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

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

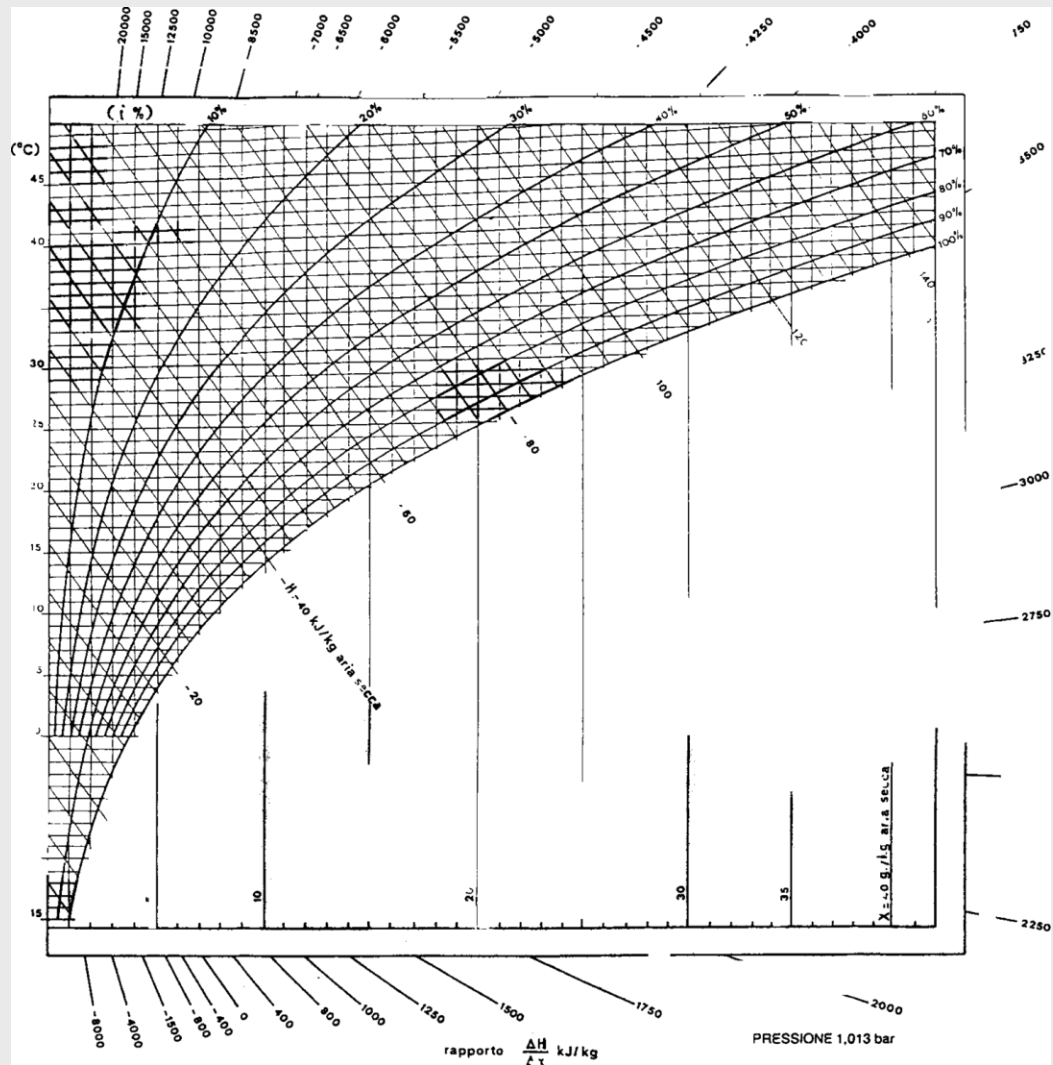


Diagramma di Mollier

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!!!!

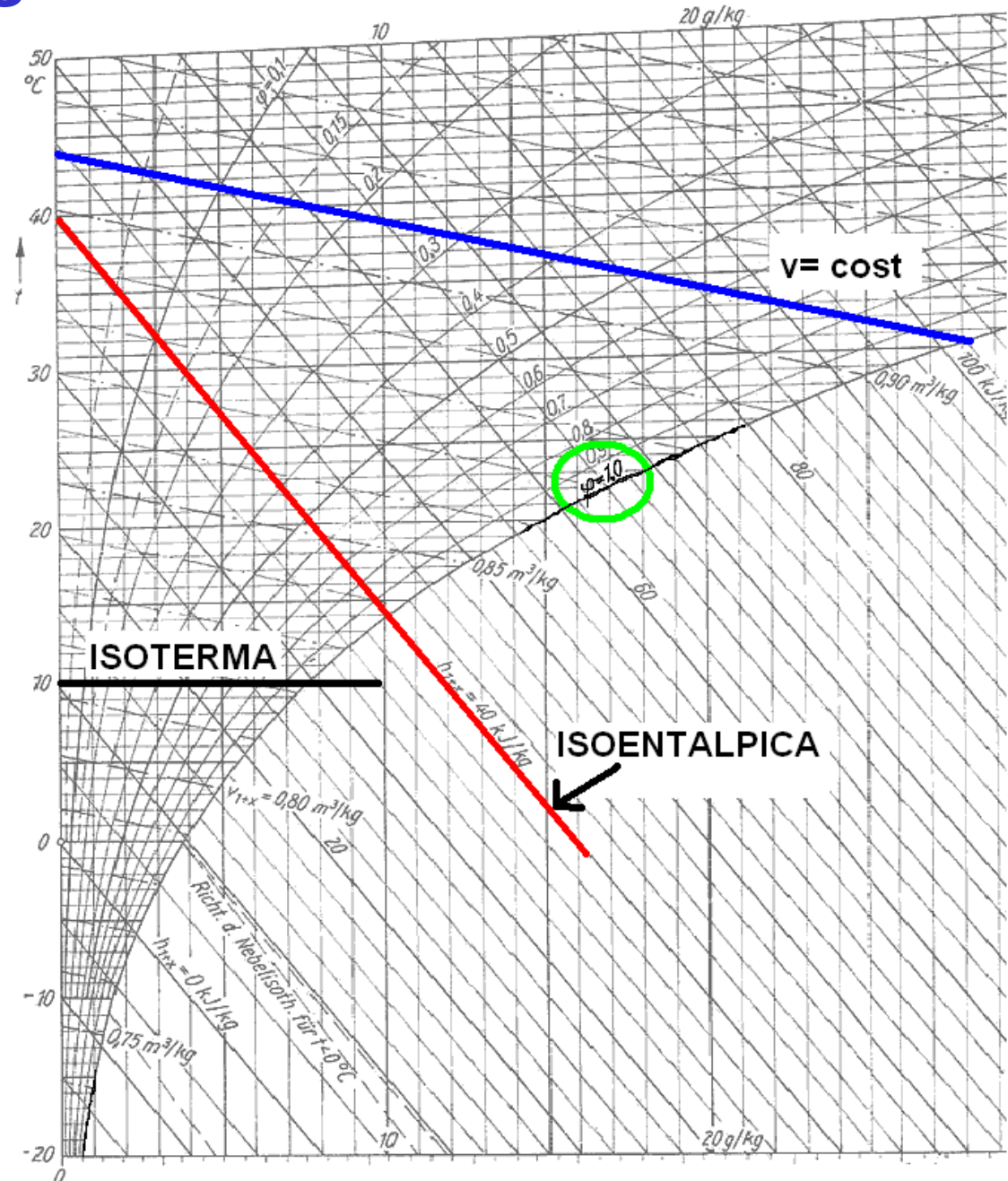


Diagramma ASHRAE o Carrier

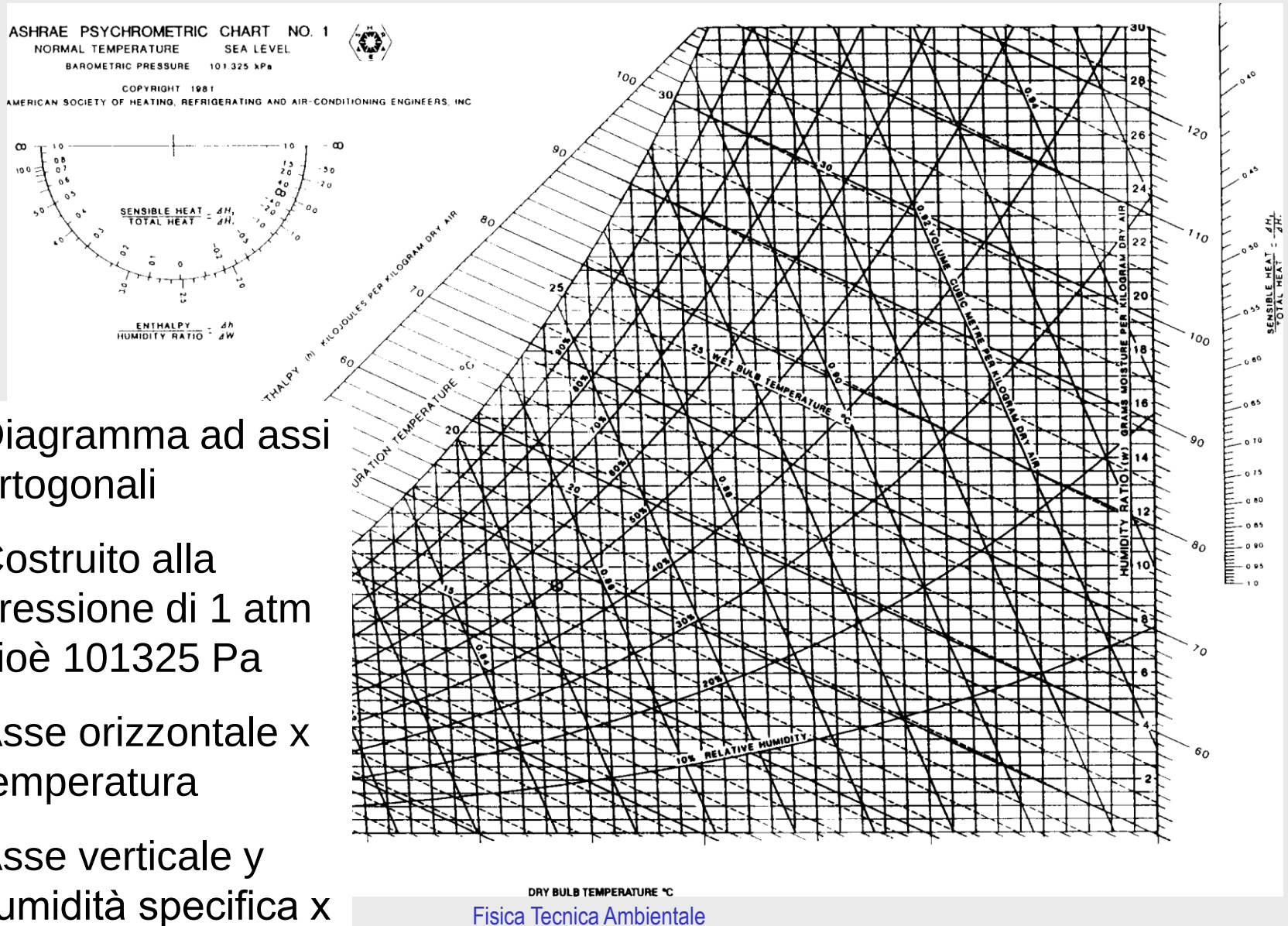
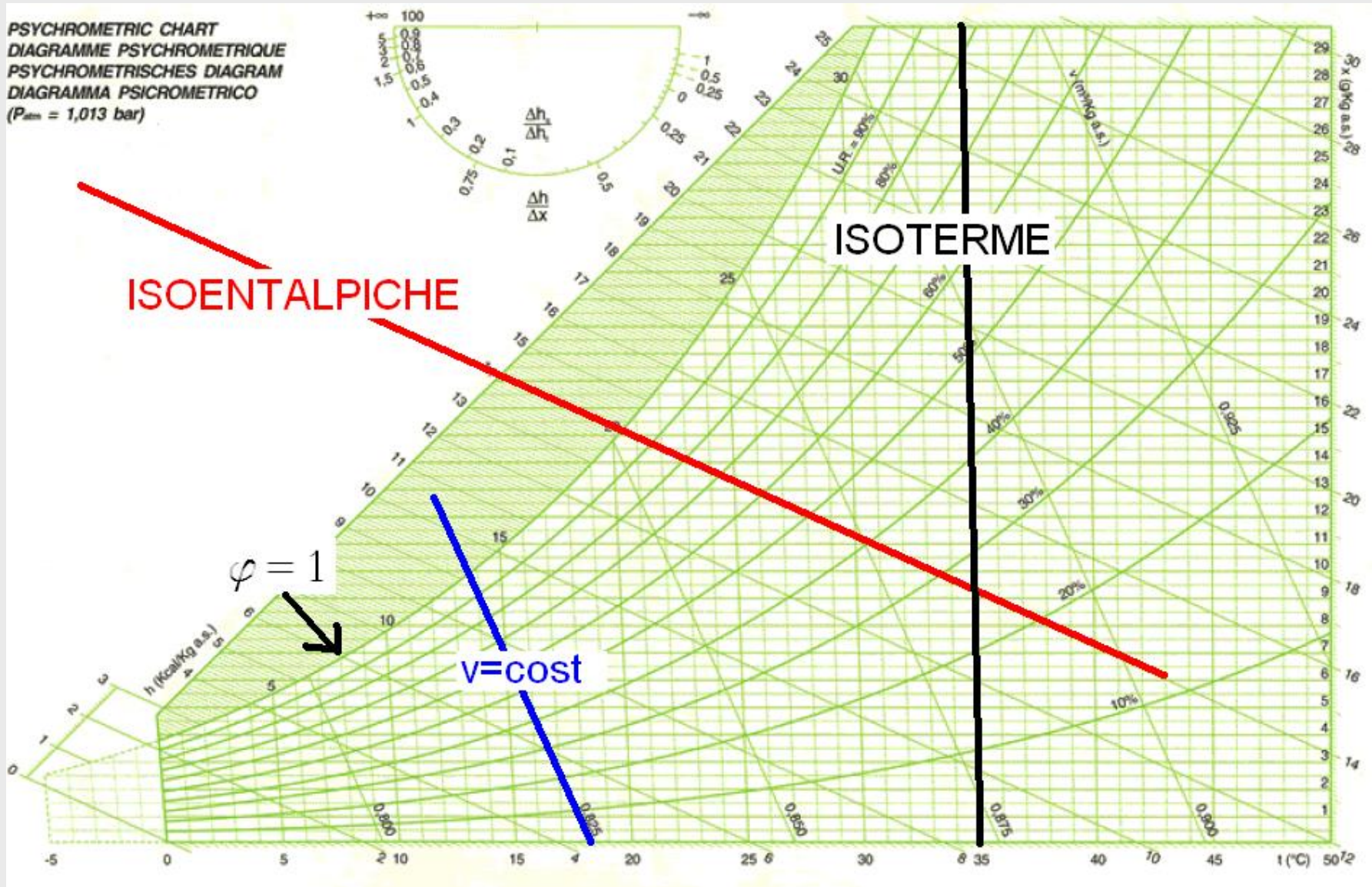


Diagramma ASHRAE o Carrier

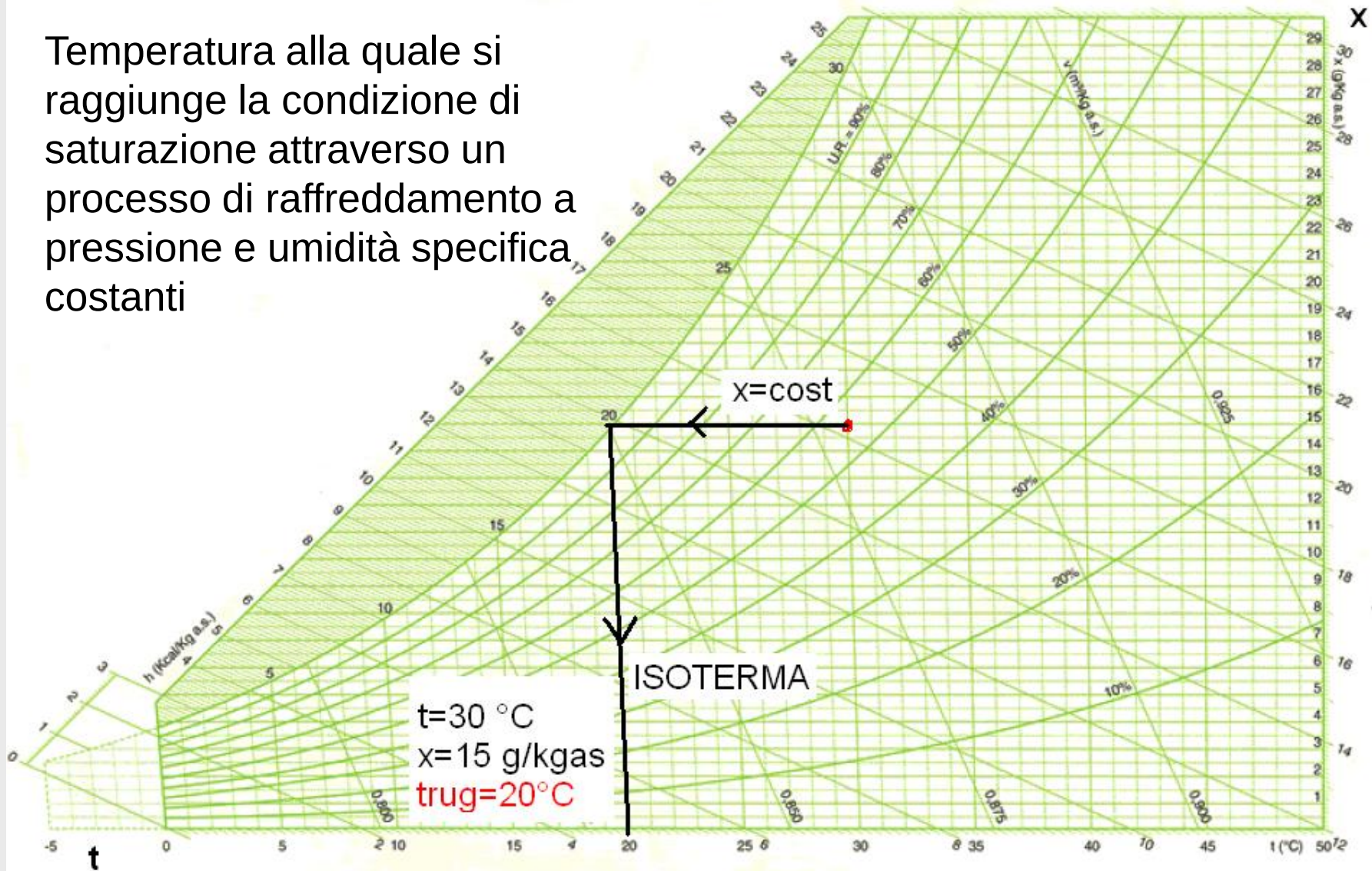


Temperature

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

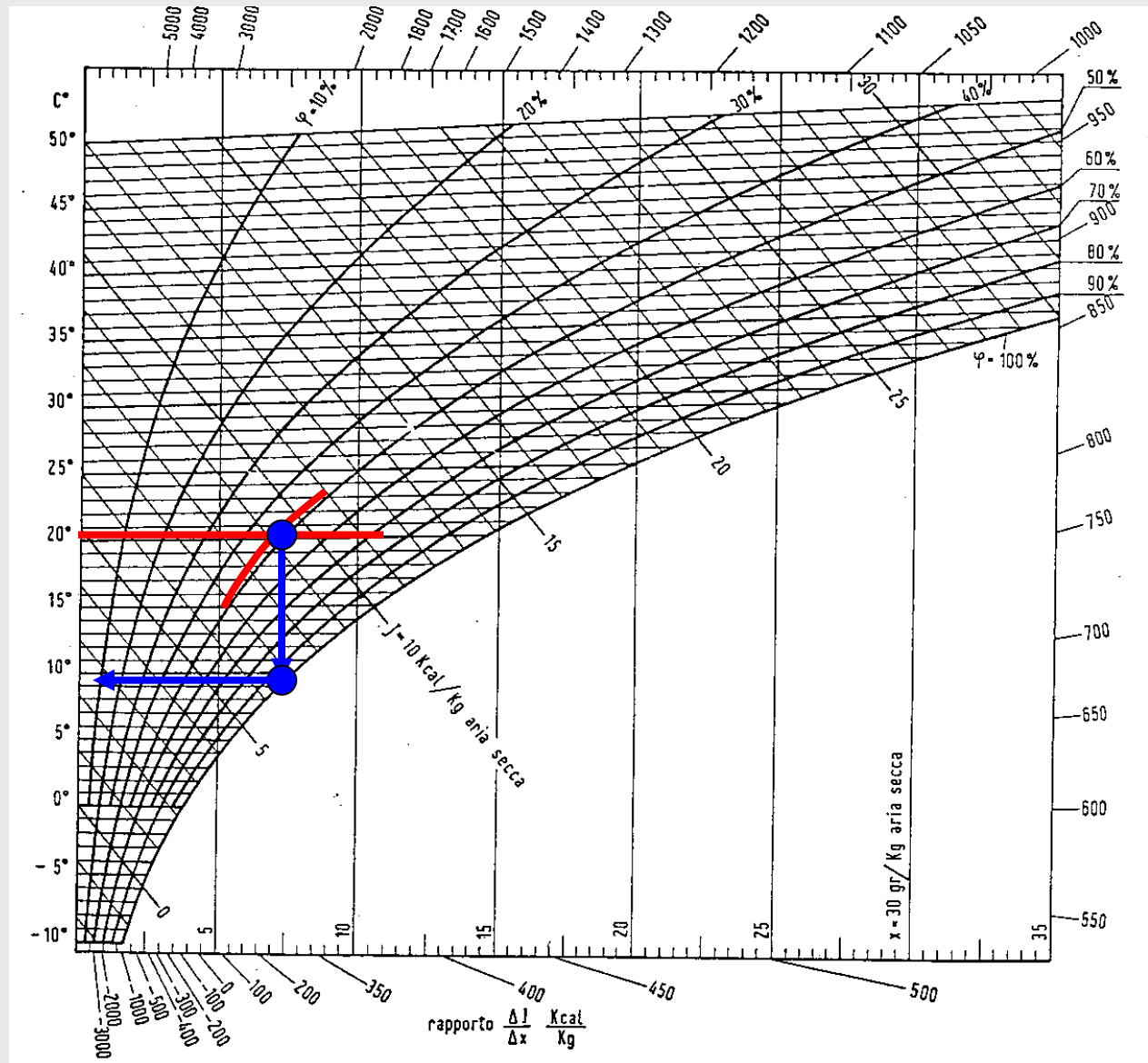
Temperatura di rugiada

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



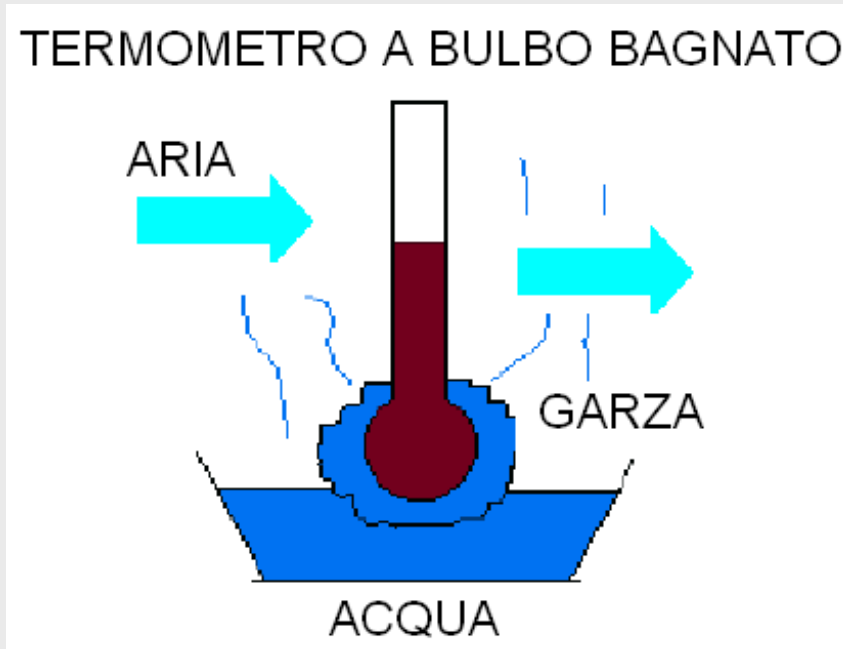
Temperatura di rugiada

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



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

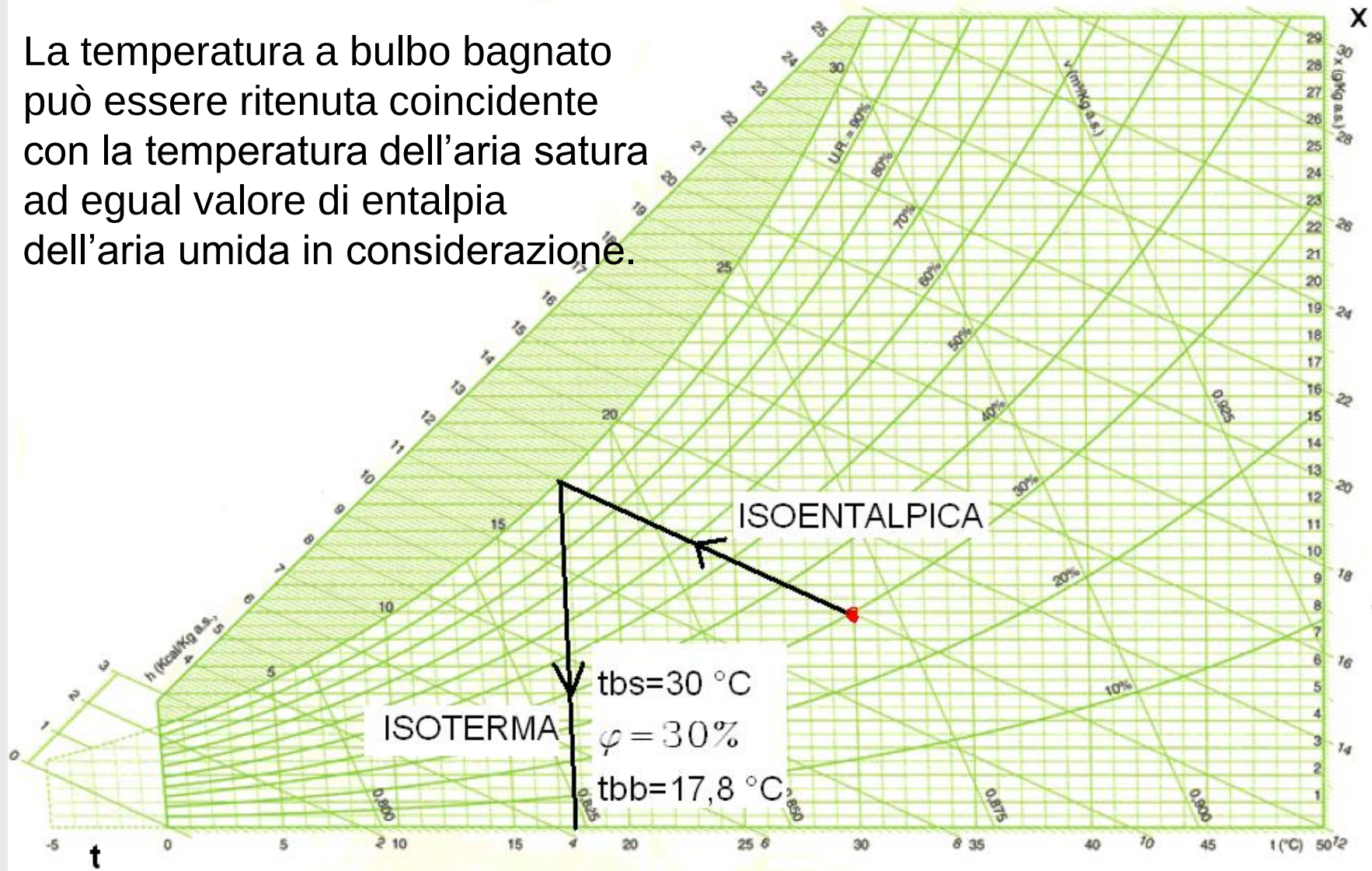


1. L'aria non satura lambisce la garza e l'acqua tende ad evaporare.
2. Per evaporare l'acqua assorbe calore dall'aria.
3. Questo calore all'equilibrio sarà uguale al flusso termico convettivo ceduto dall'aria all'acqua che bagna il bulbo.
4. Allora l'acqua sarà a temperatura inferiore rispetto all'aria

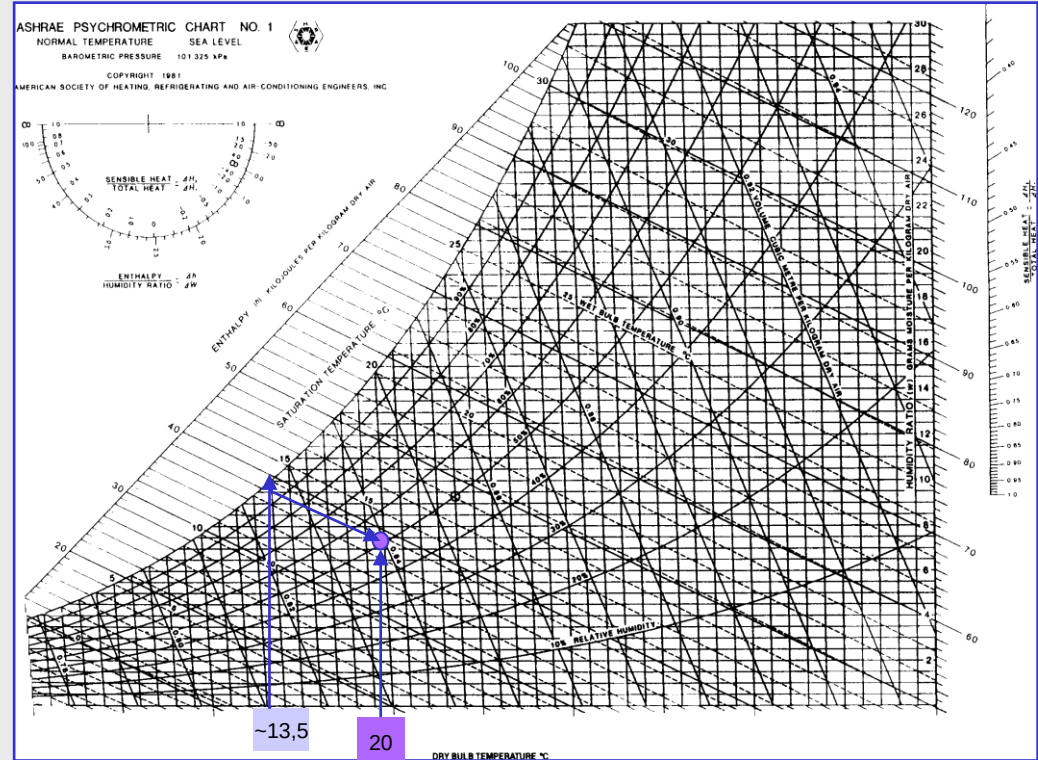
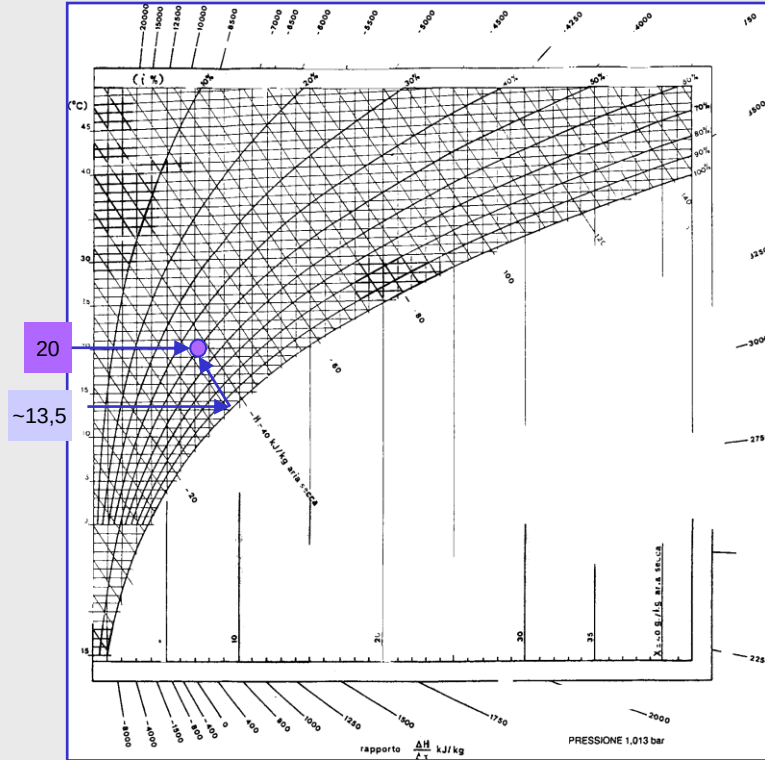
5. Se la velocità dell'aria è $u > 3$ m/s fino a oltre 40 m/s la temperatura dipende solo dalle condizioni termoigrometriche dell'aria umida → temperatura a bulbo bagnato.

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.



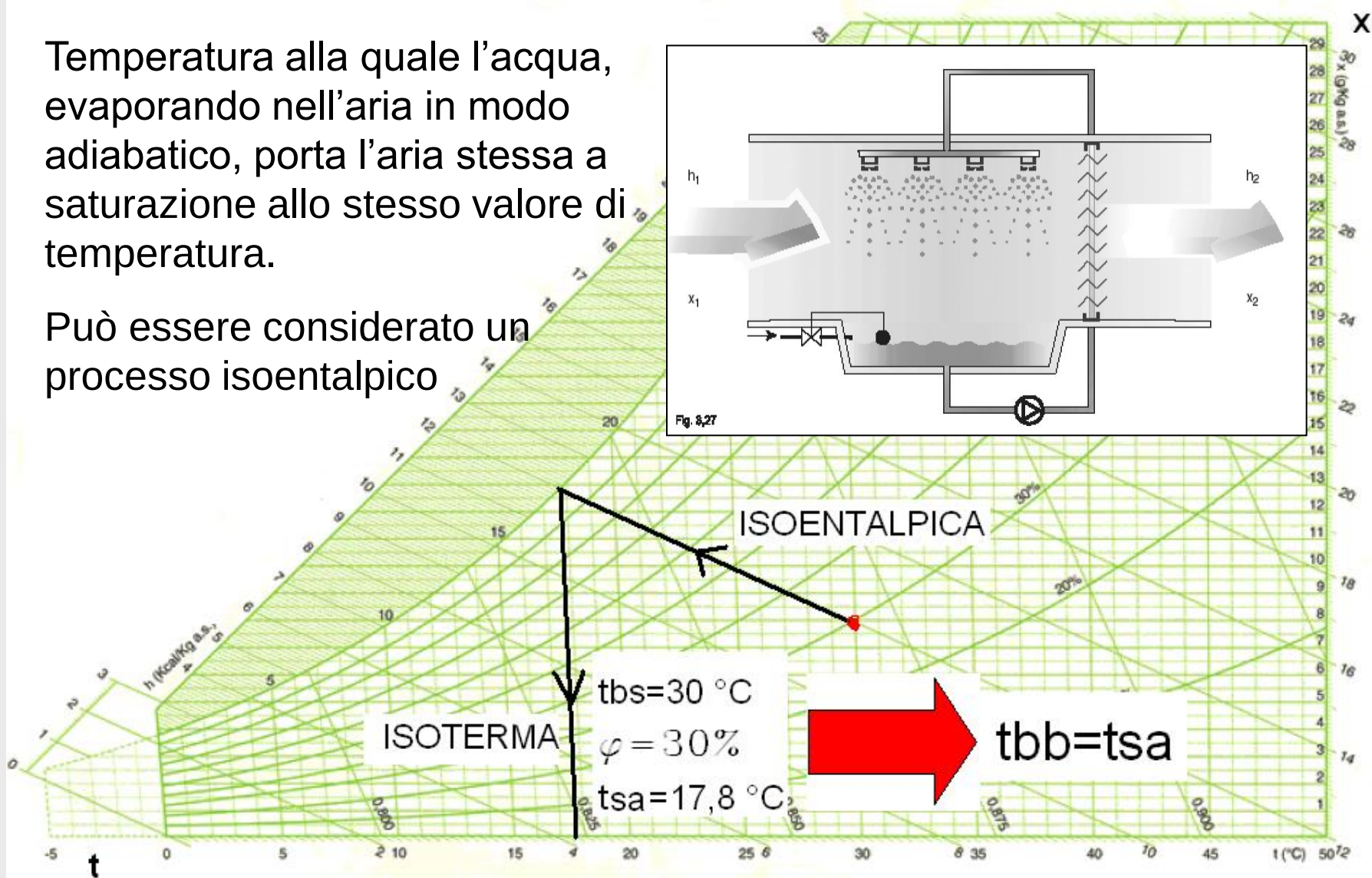
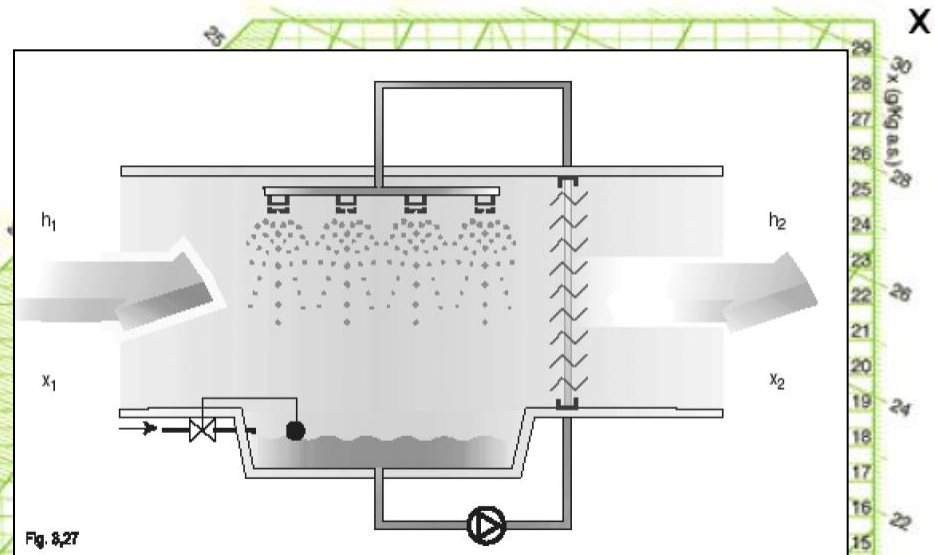
Temperatura a bulbo umido



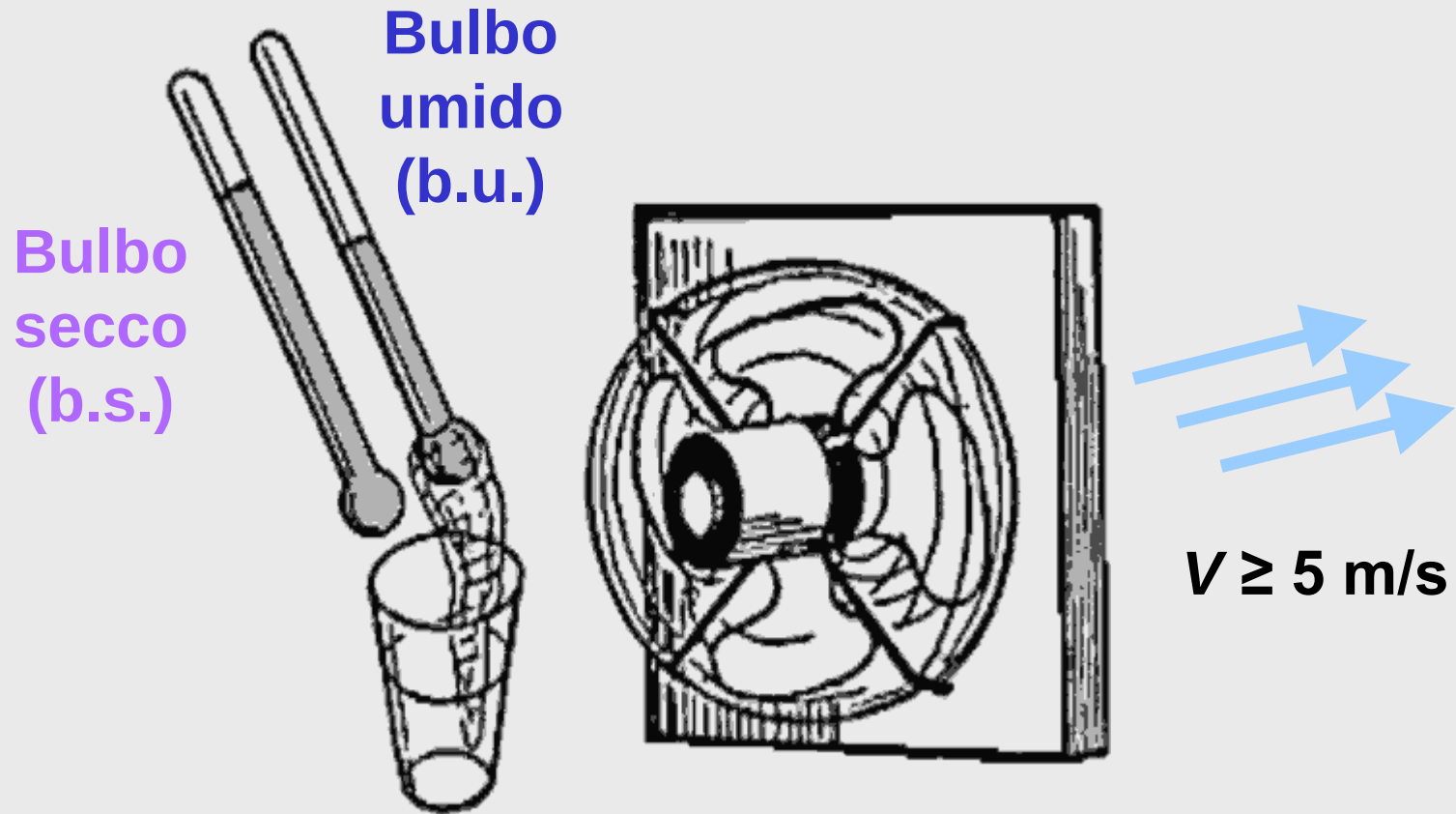
Temperatura di saturazione adb.

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

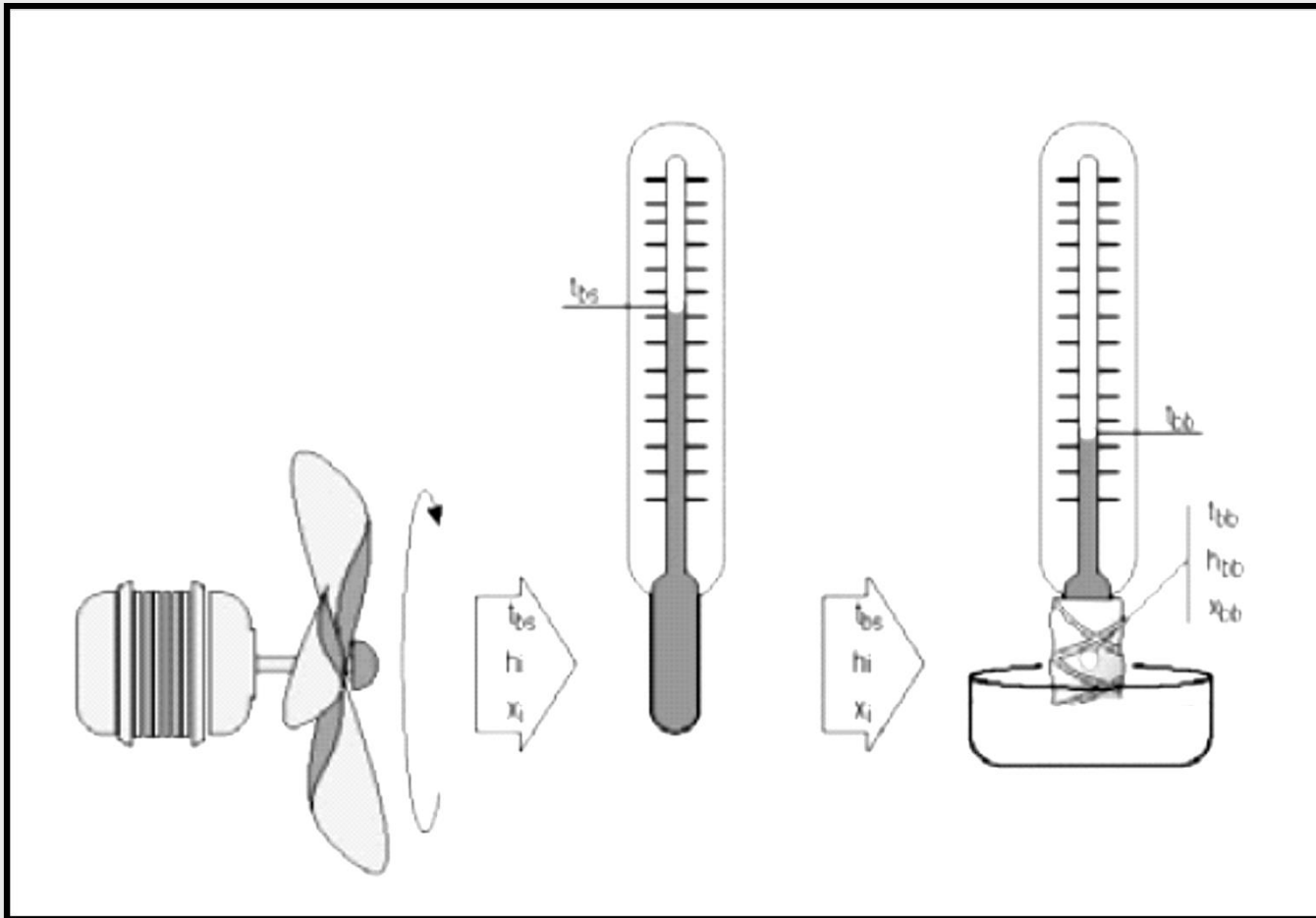


Psicrometro ad aspirazione



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

Psicrometro ad aspirazione



Per la misura del grado igrometrico si usano vari strumenti quali il *termoigrometro 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

Formule

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

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

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

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

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

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

$$pV = \bar{R}T$$

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

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

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

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

$$pV = m\bar{R}T$$

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

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

$$P = p_a + p_v$$

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

$$h = h_a + h_v$$

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

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

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

$$h = t + x \cdot (1,9 \cdot t + 2500)$$

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