

# L'aria umida e l'uso del diagramma psicrometrico





## L'aria umida e l'uso del diagramma psicrometrico

La climatizzazione dell'aria prevede una serie di trattamenti che hanno come fine quello di ottenere nell'ambiente climatizzato condizioni ottimali di temperatura ed umidità.

Tali trattamenti fanno riferimento ad aria che, nelle applicazioni tipiche del condizionamento, può essere considerata come una miscela binaria di gas perfetti: aria secca e vapor d'acqua.

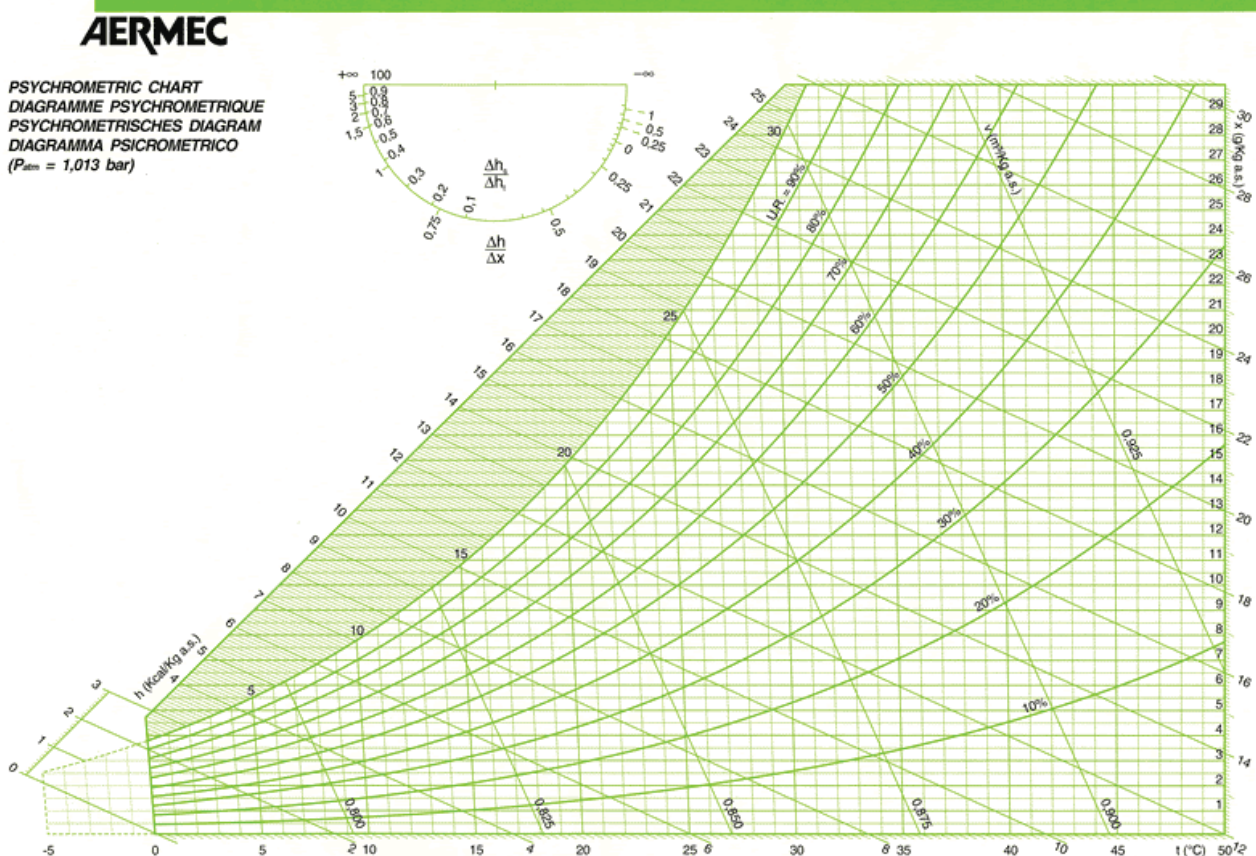
Sulla base di studi e ricerche eseguite, si è individuata la "zona del benessere" relativamente alle condizioni dell'aria nell'ambiente occupato.

In particolare, si è visto che il sistema di termoregolazione dell'organismo umano trova il suo equilibrio ideale quando in ambiente le condizioni termoisometriche assumono valori entro intervalli ben definiti:

Condizioni Ambiente	Estate	Inverno
Ta	24 ÷ 26 °C	18 ÷ 22 °C
φ	40 ÷ 60 %	40 ÷ 60 %

Naturalmente, il benessere ottimale si ottiene anche tenendo nella giusta considerazione la velocità e la purezza dell'aria.

Le trasformazioni dell'aria umida vengono studiate e rappresentate sul diagramma psicrometrico:



Su tale diagramma abbiamo la possibilità di individuare tutte le grandezze termoisometriche dell'aria da trattare:

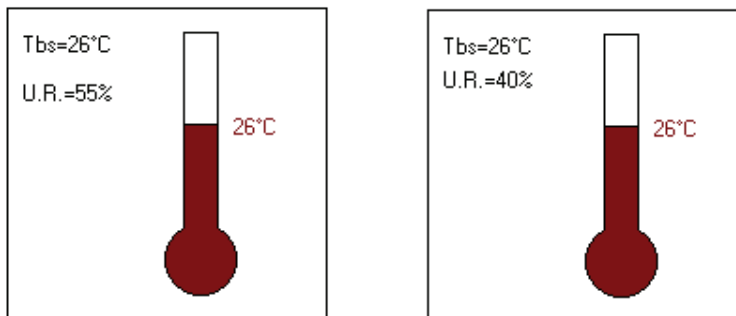
- Temperatura a bulbo secco;
- Umidità specifica;
- Umidità relativa;
- Temperatura a bulbo umido;

- Temperatura di rugiada.
- Entalpia;
- Volume specifico;

Per una chiara comprensione dell'uso del diagramma è quindi necessario conoscere alcuni concetti legati alle grandezze indicate.

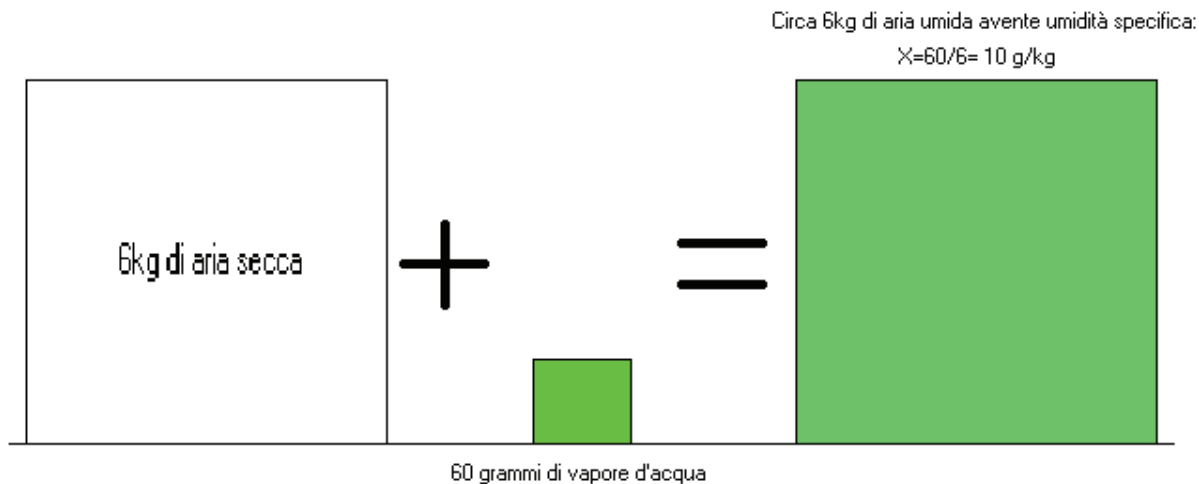
### Temperatura a bulbo secco $T_{bs}$ (°C)

È la temperatura misurata da un comune termometro a bulbo. La misura di tale temperatura è assolutamente indipendente dall'umidità relativa (U.R.) dell'aria; sul diagramma psicrometrico la scala delle temperature a bulbo secco è indicata sull'asse orizzontale.



### Umidità specifica X (g/Kg)

Come è stato detto, l'aria che ci circonda è una miscela di aria secca e vapore d'acqua; ebbene, l'umidità specifica indica quanti grammi di vapore acqueo sono presenti in ogni kg di aria secca. Sul diagramma psicrometrico l'umidità specifica è indicata sull'asse verticale posto sul lato destro.



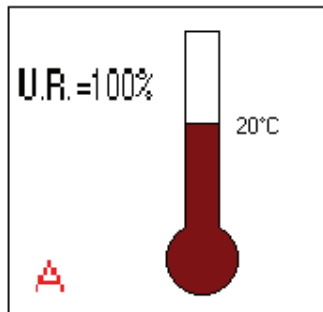
## Umidità relativa U.R. (%)

La quantità di vapore acqueo che può essere contenuto in un kg di aria secca non è illimitata: oltre una certa quantità il vapore aggiunto condensa sotto forma di minute goccioline (effetto nebbia).

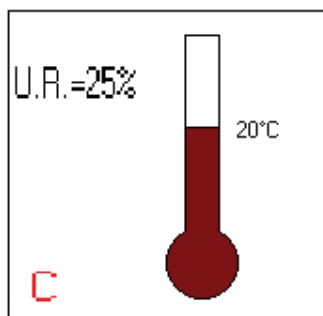
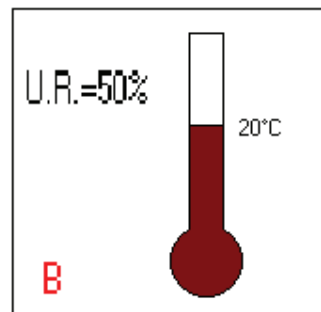
L'umidità relativa non è altro che la percentuale di vapore contenuto nell'aria in rapporto alla massima quantità in essa contenibile alla data temperatura.

Esempio: 1kg di aria alla temperatura a bulbo secco pari a 20°C può al massimo contenere 14.7g di vapor d'acqua (eventuale vapore aggiunto andrebbe a condensare); pertanto, la miscela costituita da 1kg di aria secca e da 14.7g di vapore acqueo ha, alla temperatura di 20°C, un'umidità relativa pari al 100% (condizioni di saturazione); alla stessa temperatura, se in 1kg di aria secca ci fossero 7.35g di vapore (cioè la metà della massima quantità di vapore miscibile a 20°C), la miscela si troverebbe ad un'umidità relativa del 50%:

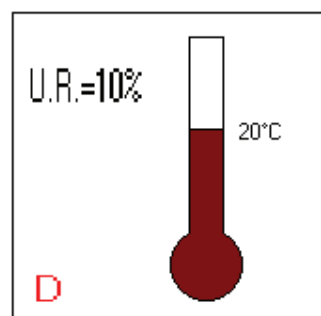
1 kg di aria secca contenente 14.7g di vapor d'acqua



1 kg di aria secca contenente 7.35g di vapor d'acqua

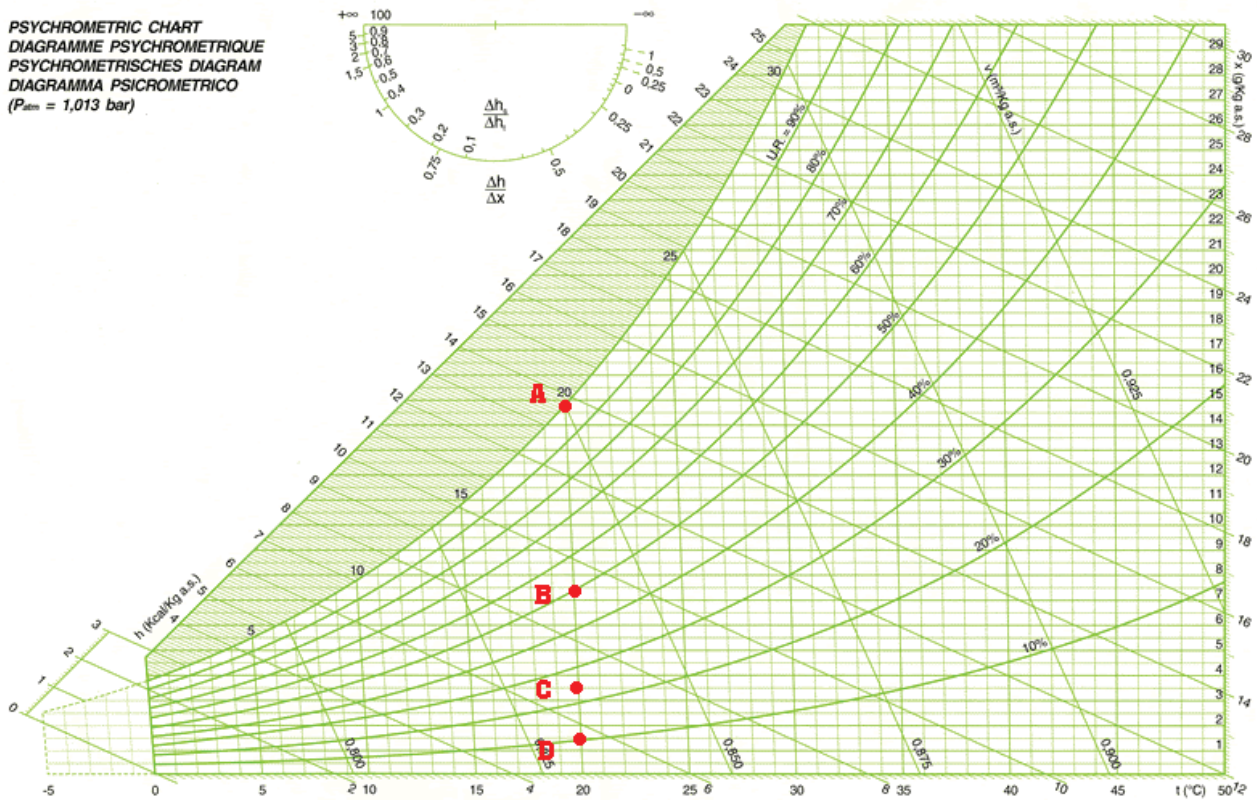


1 kg di aria secca contenente 3.675g di vapor d'acqua



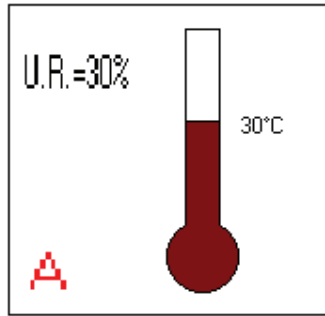
1 kg di aria secca contenente 1.47g di vapor d'acqua

PSYCHROMETRIC CHART  
 DIAGRAMME PSYCHROMETRIQUE  
 PSYCHROMETRISCHES DIAGRAMM  
 DIAGRAMMA PSICROMETRICO  
 ( $P_{atm} = 1,013 \text{ bar}$ )

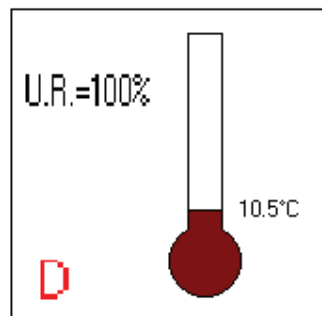
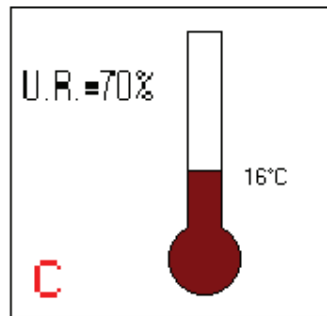
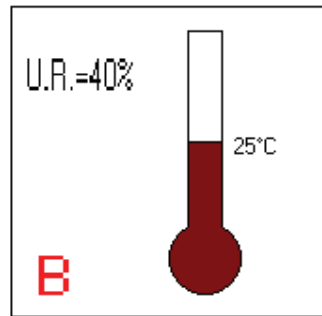


L'umidità relativa dell'aria è strettamente legata alla temperatura di bulbo secco: a parità di grammi di vapore acqueo contenuti nel kg di aria secca, l'umidità relativa aumenta al diminuire della temperatura; il motivo è il seguente: minore è la temperatura dell'aria, minore è la miscibilità del vapore acqueo nell'aria stessa (molto suggestiva in tal senso è la similitudine con lo zucchero del caffè: più il caffè è freddo, minore è la quantità di zucchero che in esso si può sciogliere). Nella figura seguente è mostrata la variazione dell'umidità relativa al variare della temperatura per una miscela di data quantità di vapore acqueo:

1 kg di aria secca contenente 8 g di vapore acqueo



1 kg di aria secca contenente 8 g di vapore acqueo

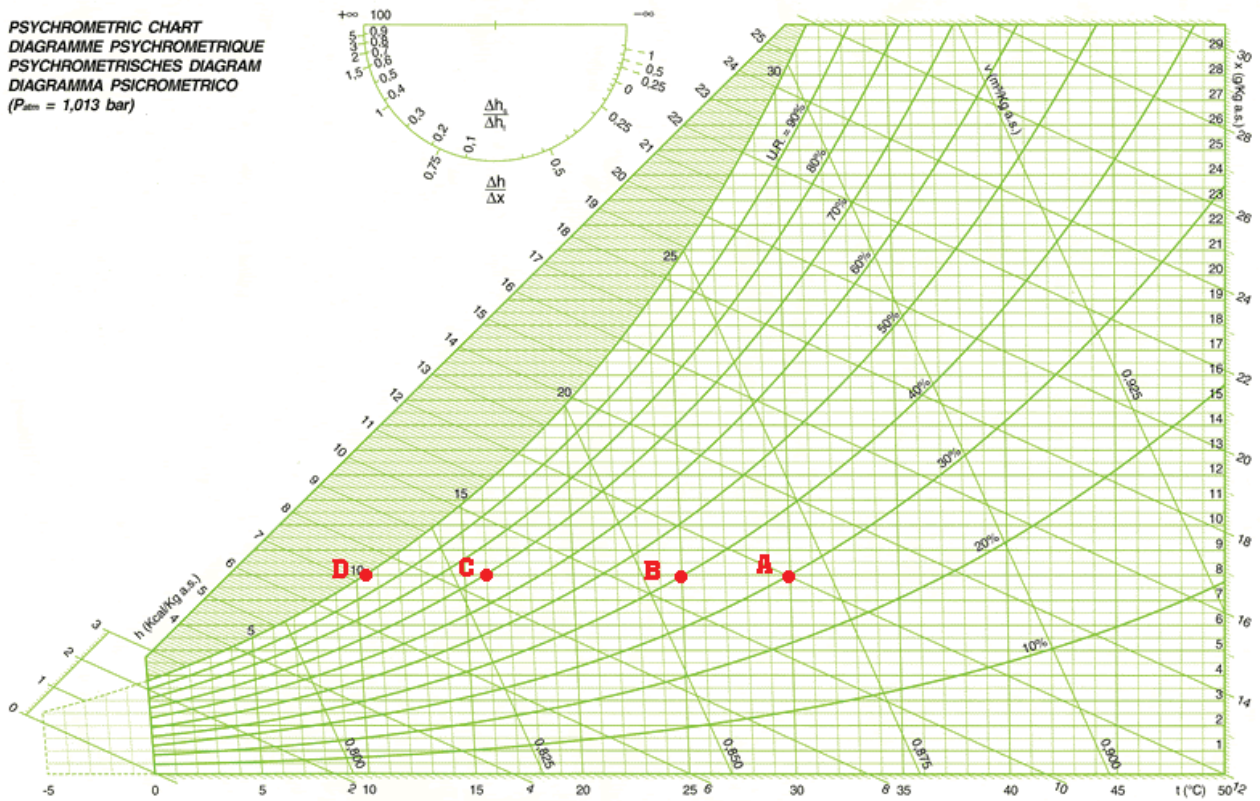


1 kg di aria secca contenente 8 g di vapore acqueo

1 kg di aria secca contenente 8 g di vapore acqueo

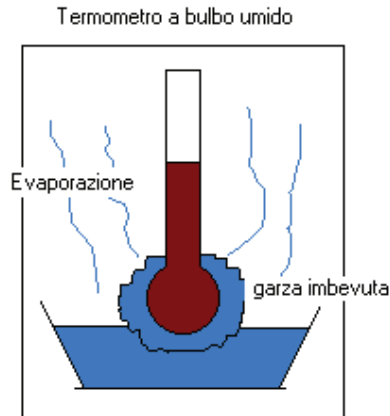
**AERMEC**

PSYCHROMETRIC CHART  
DIAGRAMME PSYCHROMETRIQUE  
PSYCHROMETRISCHES DIAGRAM  
DIAGRAMMA PSICROMETRICO  
( $P_{atm} = 1,013 \text{ bar}$ )

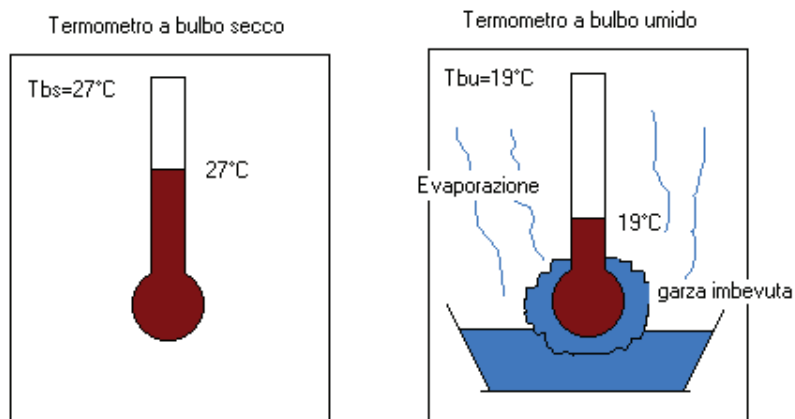


## Temperatura a bulbo umido $T_{bu}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )

Supponiamo di misurare la temperatura dell'aria umida ambiente facendo uso di un comune termometro il cui bulbo viene tenuto avvolto in una garza imbevuta d'acqua (bulbo umido).



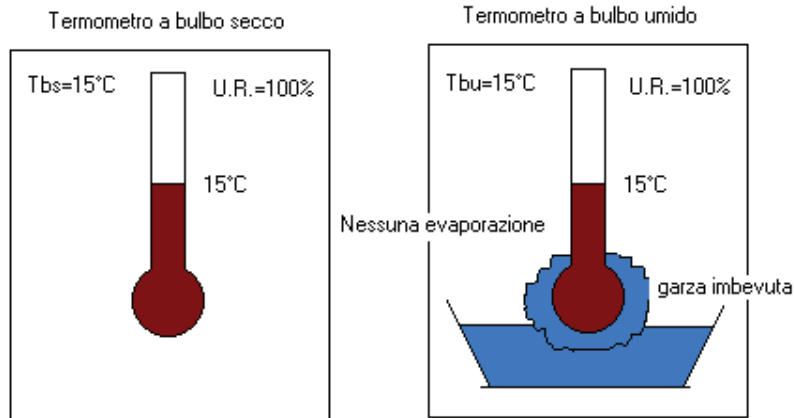
Quando il bulbo viene investito dalla corrente d'aria, parte dell'acqua contenuta nella garza evapora sottraendo calore al mercurio del termometro: l'indicazione del termometro sarà quindi più bassa rispetto a quella che darebbe lo stesso termometro a bulbo asciutto.



Chiameremo temperatura a bulbo umido  $T_{bu}$ , la temperatura dell'aria ambiente misurata dal termometro il cui bulbo è mantenuto umido dall'acqua della garza.

Facciamo notare che, nel caso in cui l'aria ambiente si trova nelle condizioni di umidità relativa pari al 100% (aria satura), dalla garza bagnata non può evaporare neanche una particella d'acqua, visto che l'aria contiene già la massima quantità di vapore acqueo consentita per le date condizioni; tale mancanza di evaporazione fa sì che la  $T_{bu}$  sia uguale alla  $T_{bs}$ .



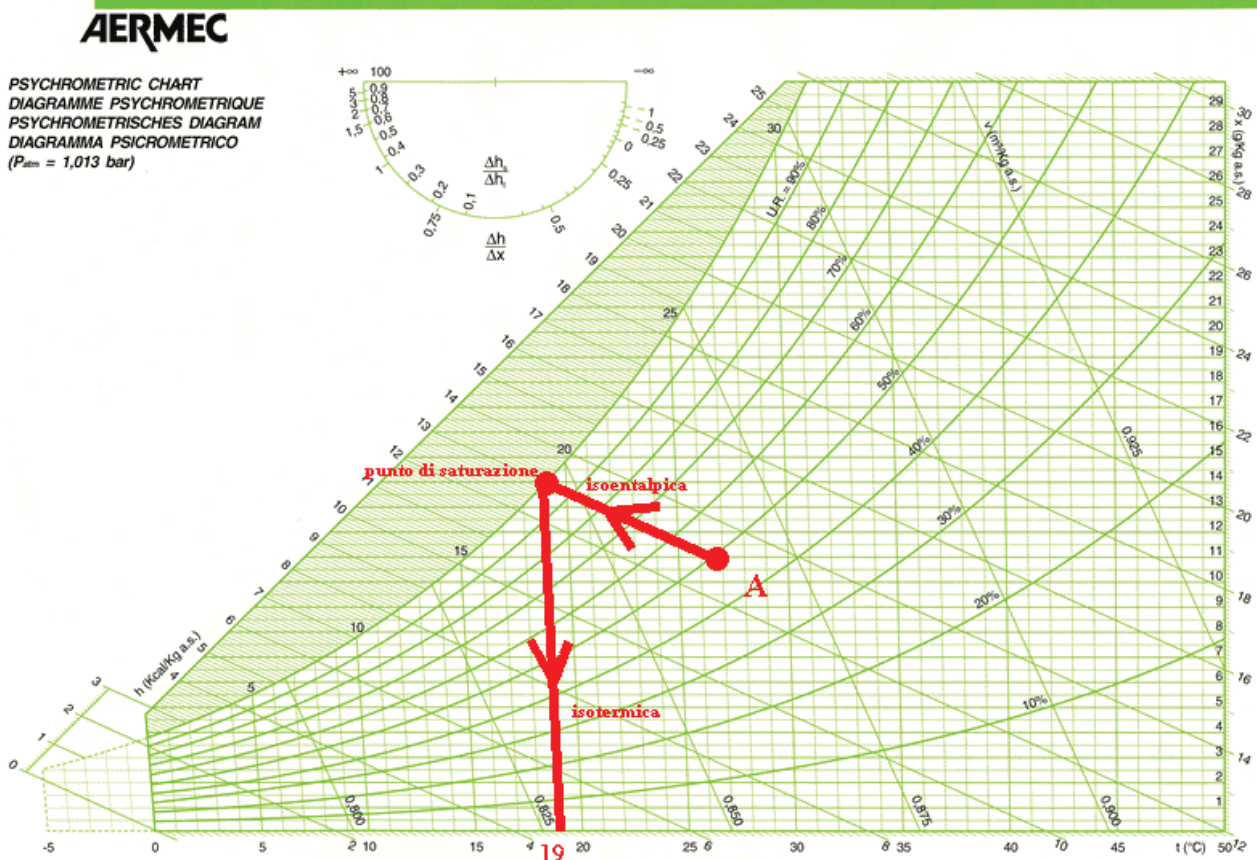


Risulta evidente che la quantità di acqua che evapora dalla garza sarà maggiore quanto minore è l'umidità relativa dell'aria (si pensi alla facilità con cui si asciugano i panni stesi nelle giornate particolarmente secche).

Il risultato è una maggiore differenza tra  $T_{bu}$  e  $T_{bs}$  ( $T_{bs} > T_{bu}$ ) al diminuire dell'umidità relativa.

Sul diagramma psicrometrico, dato un punto rappresentativo delle condizioni dell'aria umida, la temperatura a bulbo umido si determina in modo molto semplice.

Supponiamo che l'aria umida si trovi nelle condizioni di temperatura a bulbo secco  $T_{bs}=27^{\circ}\text{C}$  e di umidità relativa  $U.R.=50\%$  (punto A in figura); ebbene, la temperatura a bulbo umido sarà pari a  $T_{bu}=19^{\circ}\text{C}$  e si determina sul diagramma come è mostrato nella figura seguente:



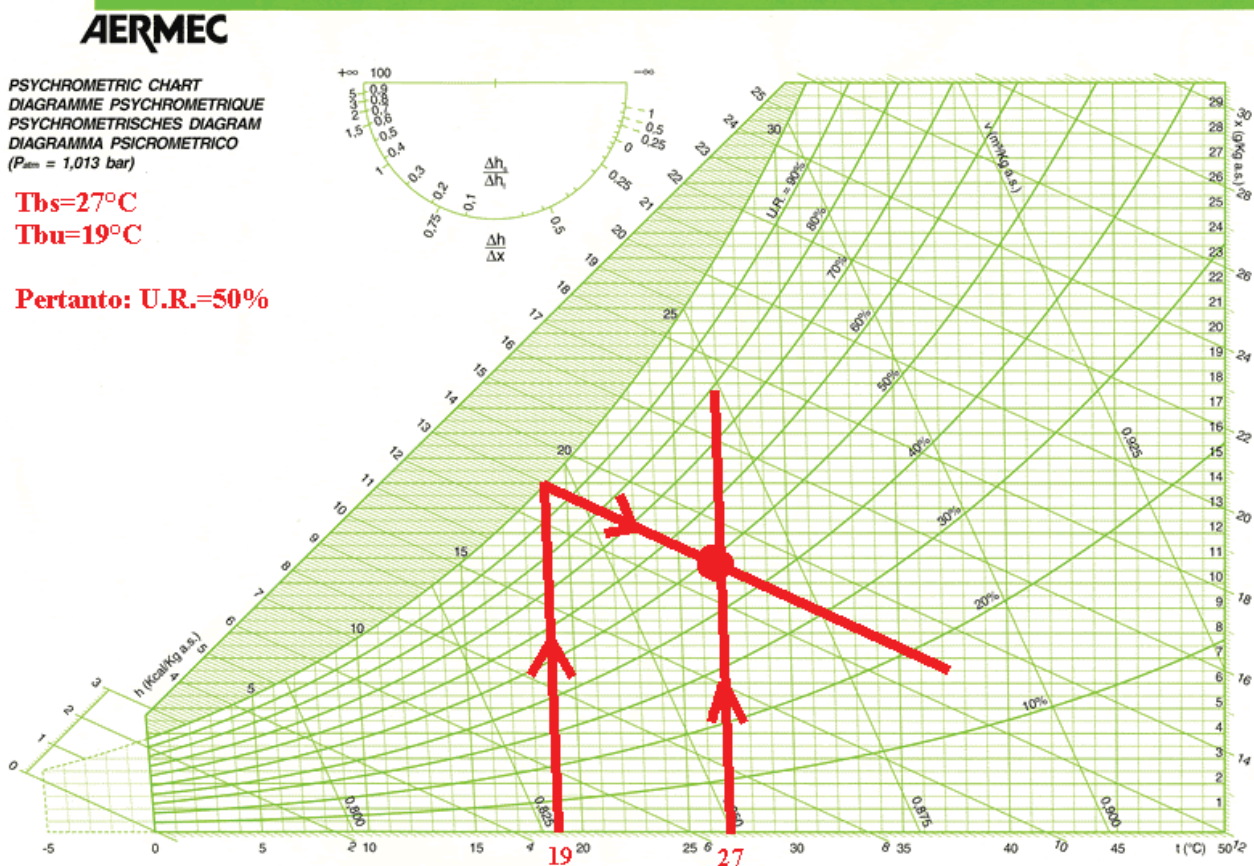
A partire dal punto A ( $T_{bs}=27^{\circ}\text{C}$ ;  $U.R.=50\%$ ), si procede parallelamente alle rette inclinate (isoentalpiche) sino ad incontrare la curva di  $U.R.=100\%$  (curva di saturazione) e poi si scende

lungo la verticale sino ad incontrare l'asse delle temperature: il punto di arrivo è proprio l'indicazione della  $T_{bu}$  cercata.

Il significato fisico di tale procedimento lo si comprenderà meglio in seguito, quando sarà chiarito il concetto di entalpia e di saturazione isoentalpica; ci limitiamo per adesso a dire che il tratto che va dal punto A al punto di saturazione rappresenta il fatto che il termometro a bulbo umido legge la temperatura dell'aria che si trova a contatto con il suo bulbo: tale aria è saturata in quanto la garza è bagnata.

In altre parole, il termometro a bulbo umido misura la temperatura dell'aria ambiente quando essa viene resa saturo secondo un processo che avviene ad entalpia costante (ecco perché si procede lungo una retta inclinata come le rette di entalpia costante).

Facciamo notare che se sono note la temperatura di bulbo secco e la temperatura di bulbo umido, risulta determinata l'umidità relativa: se ad esempio sapessi che  $T_{bs}=27^{\circ}\text{C}$  e  $T_{bu}=19^{\circ}\text{C}$ , saprei con certezza che  $U.R.=50\%$ :



Uno strumento di misura detto psicrometro di Assmann sfrutta il principio illustrato nella figura precedente, per determinare l'umidità relativa dell'aria a partire dalla misura della  $T_{bs}$  (mediante termometro a bulbo di mercurio tenuto asciutto) e della  $T_{bu}$  (mediante termometro a bulbo di mercurio tenuto bagnato).

### Temperatura di rugiada

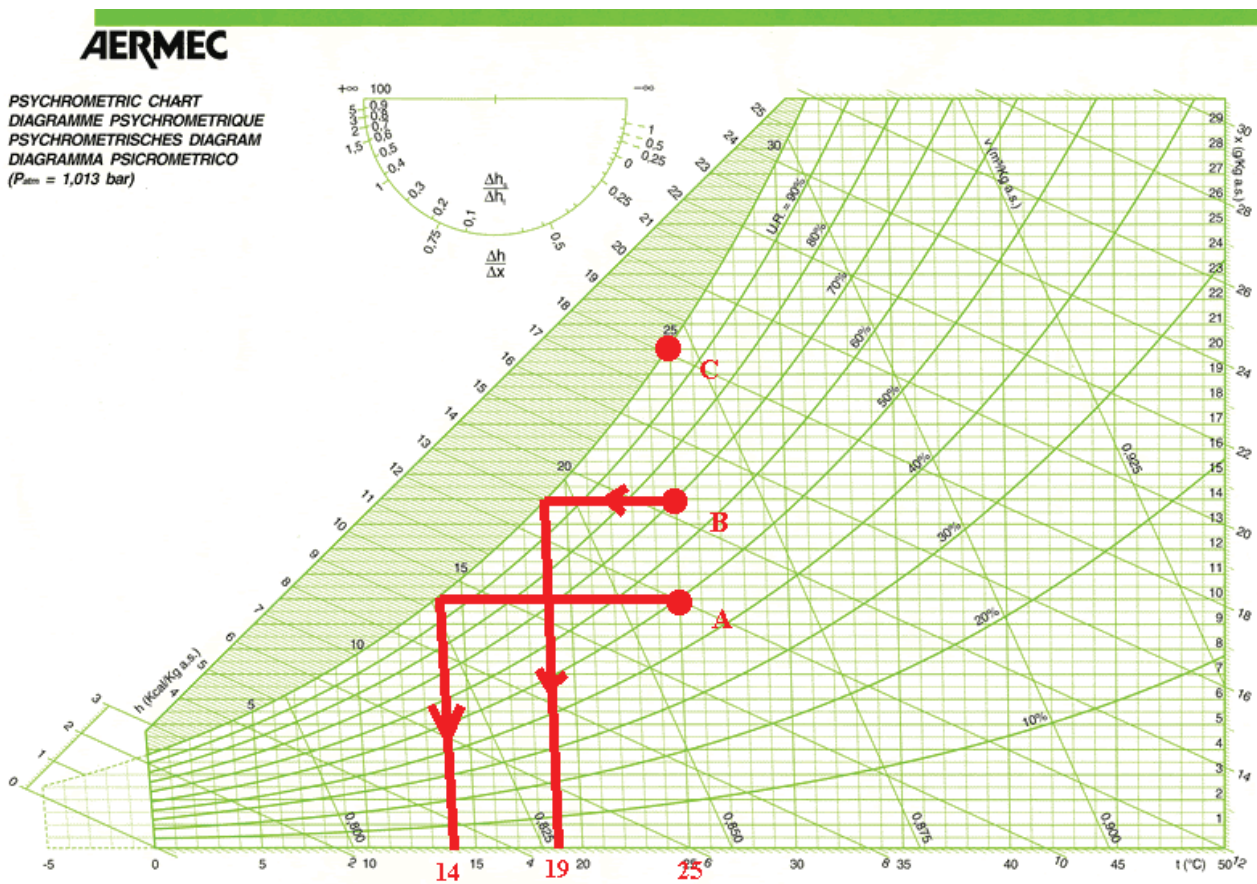
La temperatura di rugiada è la temperatura alla quale l'aria raggiunge le condizioni di saturazione ( $U.R.=100\%$ ): su ogni elemento (parete, superficie vetrata ecc...) che si trova ad una temperatura appena inferiore alla temperatura di rugiada si forma condensa (rugiada, appunto).

Supponiamo di avere aria alle condizioni di temperatura a bulbo secco  $T_{bs}=25^{\circ}\text{C}$  e di umidità relativa  $U.R.=50\%$ ; ebbene, in questo caso la temperatura di rugiada è pari a  $14^{\circ}\text{C}$  (caso A nella figura seguente).

Supponiamo ora di avere aria alle condizioni di temperatura a bulbo secco  $T_{bs}=25^{\circ}\text{C}$  e di umidità relativa  $U.R.=70\%$ ; ebbene, in questo caso la temperatura di rugiada è pari a  $19^{\circ}\text{C}$  (caso B). Si può quindi notare come la temperatura di rugiada è maggiore, a parità di temperatura a bulbo secco, al crescere dell'umidità relativa: tale risultato è facilmente spiegabile visto che l'aria a maggiore umidità relativa necessita di un minore raffreddamento per giungere a saturazione.

Naturalmente, per l'aria avente  $T_{bs}=25^{\circ}\text{C}$  ed  $U.R.=100\%$  la temperatura di rugiada è pari a  $25^{\circ}\text{C}$  (l'aria si trova già satura: caso C).

Nella seguente figura è illustrato quanto detto:



### Entalpia specifica $h$ (kcal/kg a.s.)

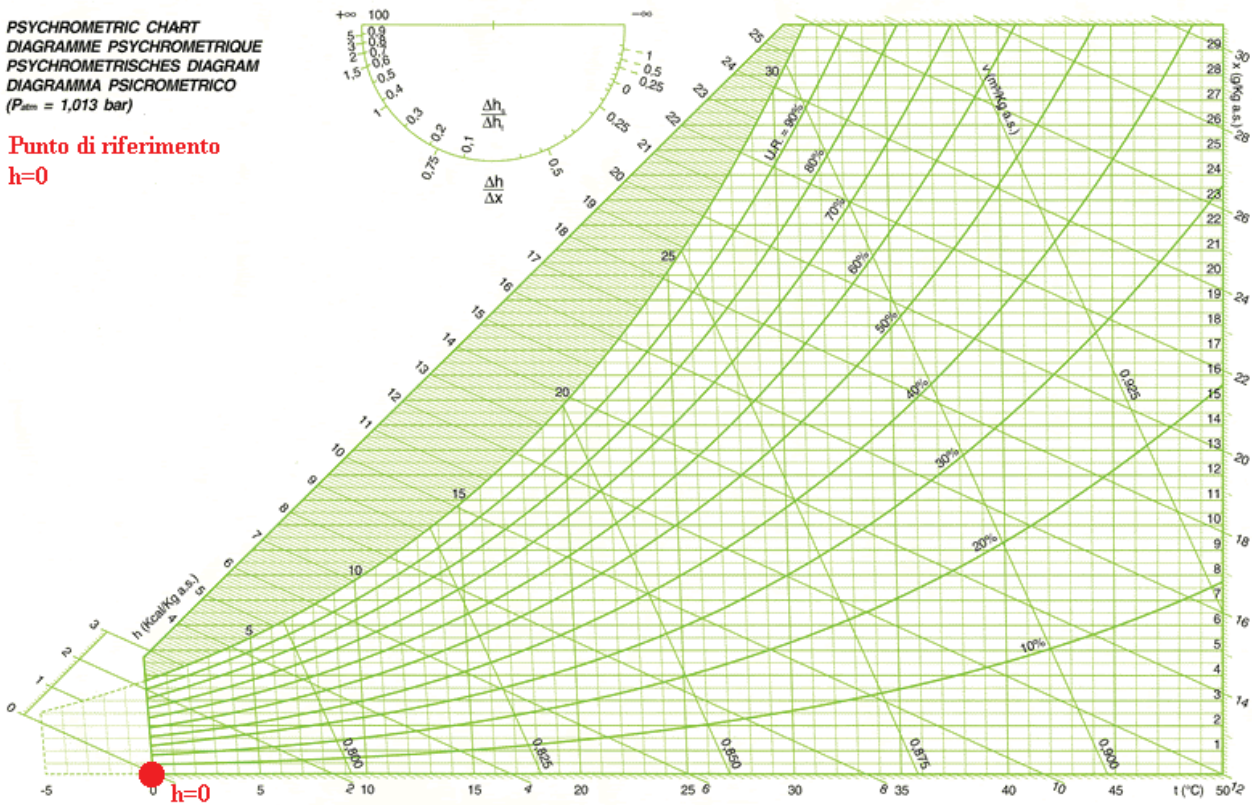
L'entalpia è la grandezza termodinamica che indica il contenuto energetico di una sostanza alle date condizioni di temperatura, pressione ecc...

Poiché nelle varie trasformazioni termodinamiche ciò che interessa è la variazione di entalpia dallo stato iniziale allo stato finale, si può fissare ad arbitrio uno stato termodinamico di riferimento al quale si fa corrispondere il valore di entalpia pari a zero.

Sul diagramma psicrometrico utilizzato in questa trattazione, fissiamo tale punto ad  $h=0$  in corrispondenza alla  $T_{bs}=0^{\circ}\text{C}$  e all'umidità specifica nulla (figura seguente):

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

Punto di riferimento  
 h=0



Per calcolare l'entalpia di tutti gli altri punti del diagramma basta calcolare il calore necessario per:

- Portare l'aria secca (1kg) dalla temperatura di 0°C alla temperatura finale;
- Far evaporare a 0°C gli X grammi di acqua contenuti nell'aria umida;
- Riscaldare da 0°C a 20°C gli X grammi di vapore;

Ad esempio, l'aria alla temperatura di 20°C con umidità specifica X=10g/kg ha entalpia specifica pari a 10.85 kcal/kg a.s.in quanto:

- $h_a=4.8$  kcal servono per portare il kg di aria secca da 0°C a 20°C ( $m \cdot c_p \cdot \Delta T=1 \times 0.24 \times 20$ )<sup>1</sup>;
- $h_v=6.05$  kcal servono per fare evaporare i 10 grammi di acqua a 0°C e poi a riscaldare il vapore da 0°C a 20°C:  $0.010 \times (r + c_{pv} \times t) = 0.010 \text{ kg} \times (596 \text{ kcal/kg} + 0.46 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C} \times 20^\circ\text{C})$ <sup>2</sup>

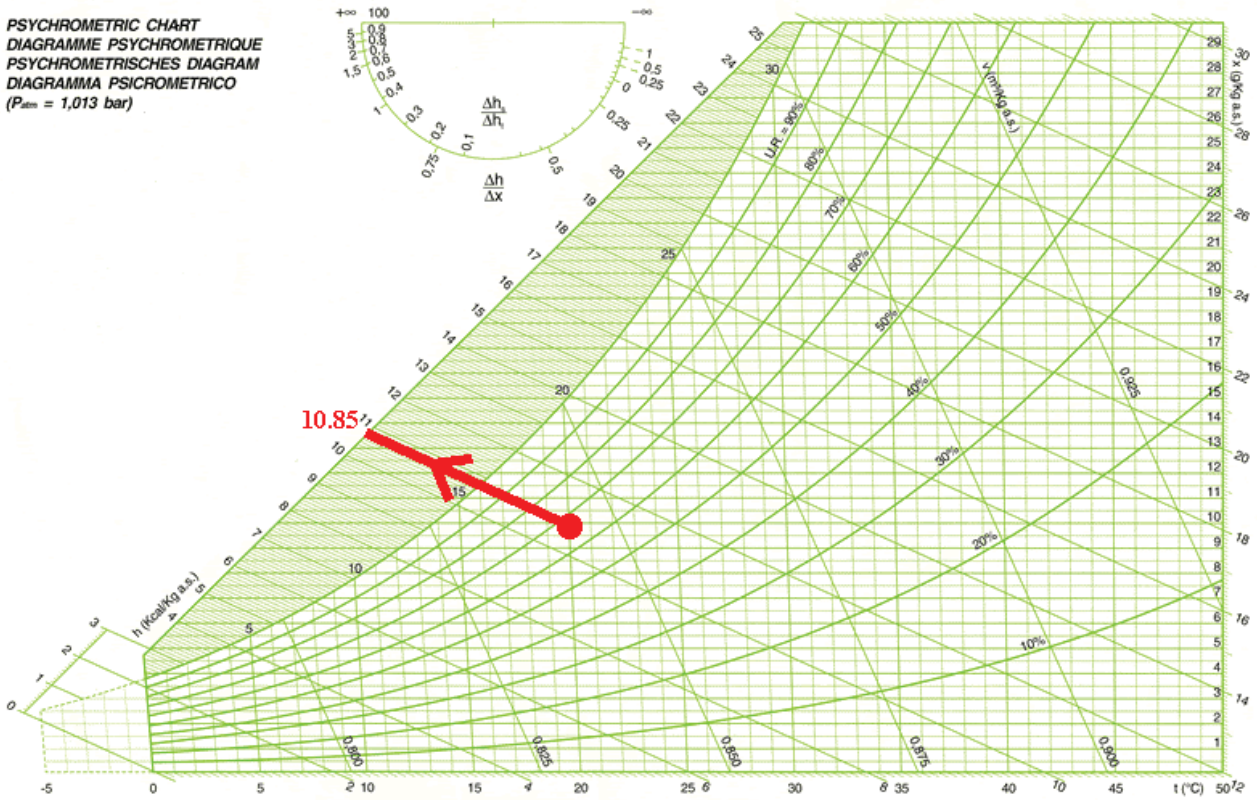
L'entalpia specifica si misura in chilocalorie su chilogrammo di aria secca (kcal/kg a.s.) perché sul diagramma psicrometrico tutto è riferito al kg di aria secca.

La figura seguente mostra come si individua l'entalpia specifica dell'aria umida alle condizioni dell'esempio precedente:

<sup>1</sup> Il calore specifico a pressione costante dell'aria secca è pari a:  $c_p=0.24 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}$  (S.I.:  $1,005 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ ).

<sup>2</sup>  $r = 596 \text{ kcal/kg}$  è il calore di vaporizzazione a 0°C,  $c_{pv} = 0.46 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$  è il calore specifico a pressione costante del vapore surriscaldato.

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



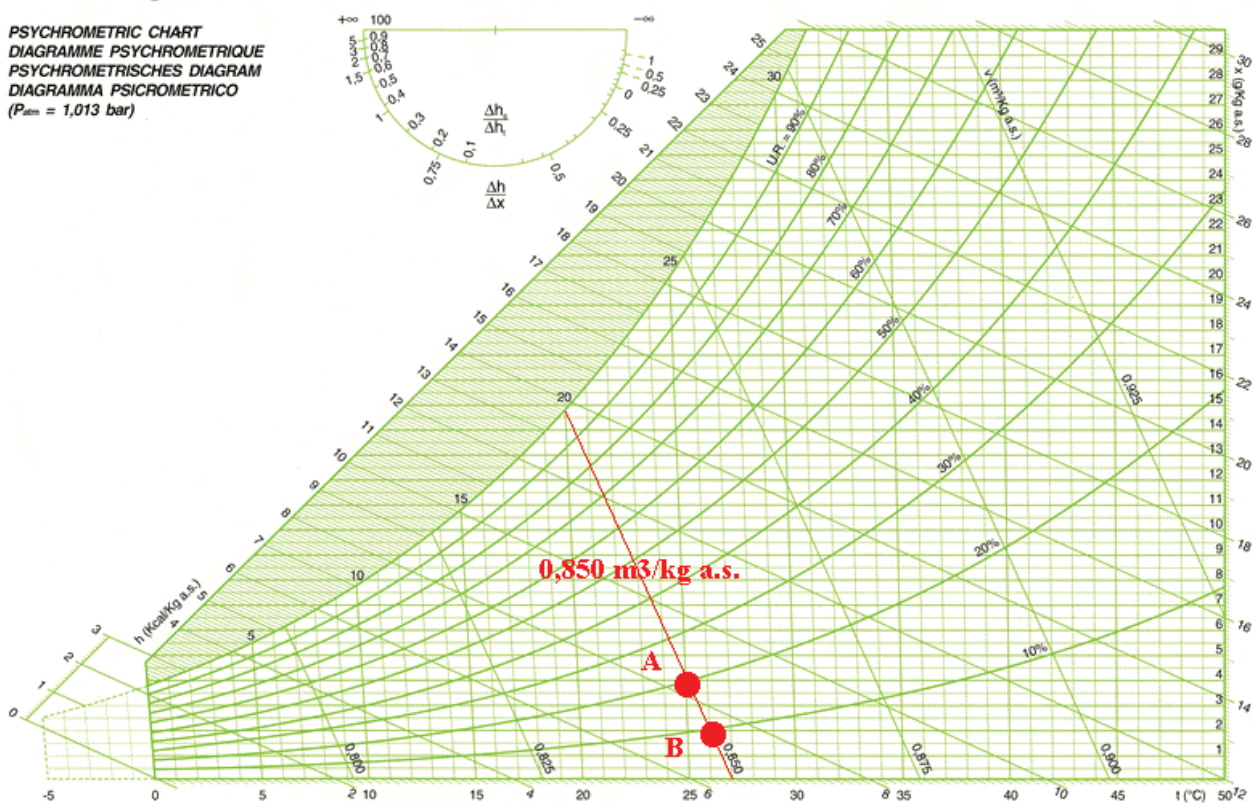
**Volume specifico (m<sup>3</sup>/kg a.s.)**

Il volume specifico è il volume occupato dall'aria umida facendo come sempre riferimento al kg di aria secca.

Le rette ad inclinazione ripida sono le rette a volume specifico costante.

Per fare un esempio, l'aria umida con T<sub>bs</sub>=25°C e con U.R.=20% (punto A nella figura seguente) e l'aria umida con T<sub>bs</sub>=26°C e con U.R.=10% (punto B) hanno lo stesso volume specifico pari a 0.850 m<sup>3</sup>.

PSYCHROMETRIC CHART  
 DIAGRAMME PSYCHROMETRIQUE  
 PSYCHROMETRISCHES DIAGRAM  
 DIAGRAMMA PSICROMETRICO  
 ( $P_{atm} = 1,013 \text{ bar}$ )



## Esercizio

In un grosso serbatoio a tenuta stagna vi sono contenuti 10 kg di aria secca (10 kg a.s.) e 100g di vapore acqueo.

La pressione che regna all'interno del serbatoio è pari alla pressione atmosferica (1.013 bar).

La temperatura a bulbo secco all'interno del serbatoio è pari a:  $T_{bs}=25^{\circ}\text{C}$ .

Individuare sul diagramma psicrometrico il punto rappresentativo delle condizioni dell'aria umida all'interno del serbatoio.

Poiché la pressione regnante è pari a 1.013bar, faremo uso di un diagramma psicrometrico relativo a tale pressione (esistono anche diagrammi psicrometrici relativi a pressioni diverse, utili ad esempio per climatizzare ambienti in alta montagna); il valore della pressione di riferimento è in genere indicato in alto a sinistra, dove solitamente si trova l'intestazione.

Per individuare le condizioni dell'aria umida sul diagramma psicrometrico, occorre entrare con due parametri noti (ad es.  $T_{bs}$  ed  $h$ ,  $T_{bs}$  e  $T_{bu}$ ,  $T_{bs}$  e  $X$ , etc...).

Nel caso in esame, è nota la temperatura a bulbo secco ( $T_{bs}=25^{\circ}\text{C}$ ).

Il secondo parametro, necessario per l'individuazione del punto cercato, sarà l'umidità specifica  $X$ . Bisogna però fare molta attenzione!

Poiché tutto ciò che è sul diagramma psicrometrico fa riferimento al kg di aria secca, occorrerà calcolare la quantità in grammi di vapore che è contenuto per kg di aria secca.

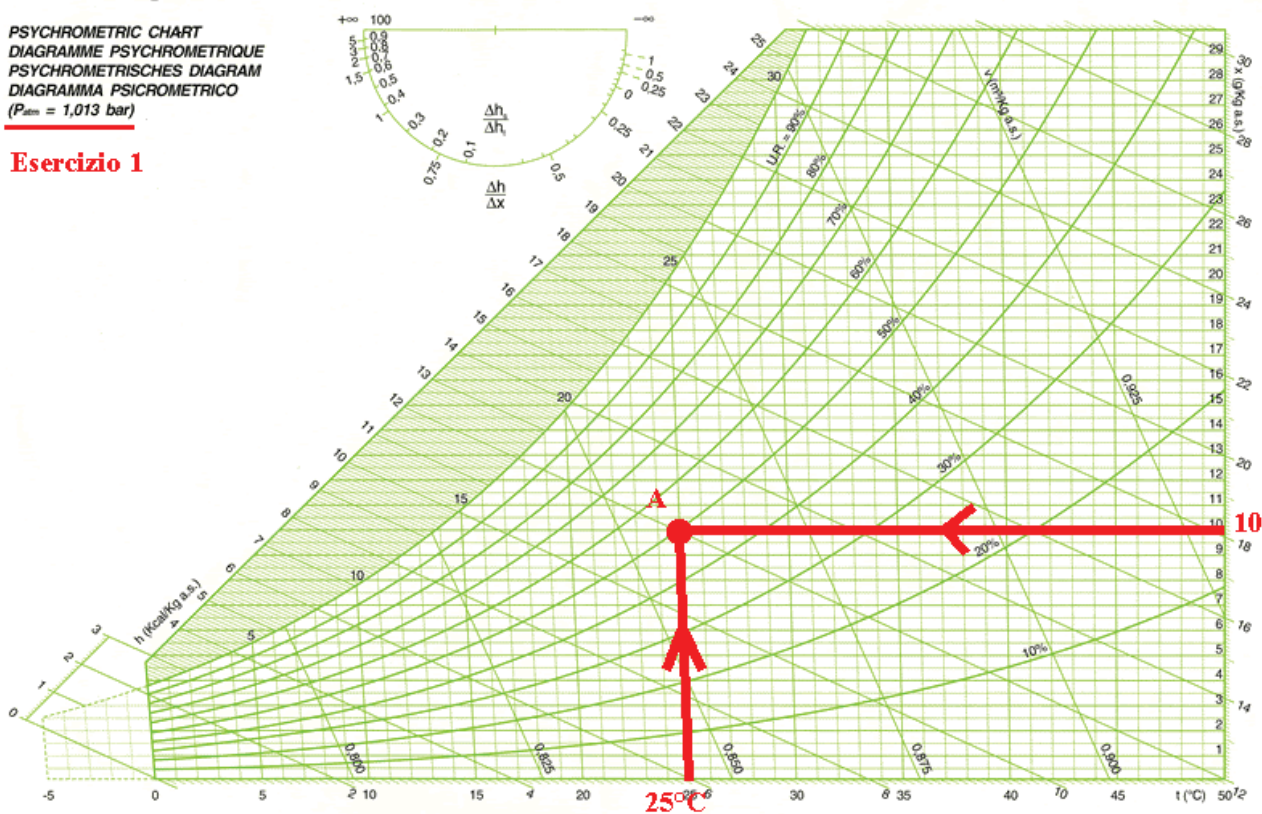
Sarà, cioè:

$$X=100\text{g}/10\text{kg a.s.}=10\text{g}/\text{kg a.s.}$$

Essendo ora noti due parametri, si può individuare il punto cercato sul diagramma:

PSYCHROMETRIC CHART  
 DIAGRAMME PSYCHROMETRIQUE  
 PSYCHROMETRISCHES DIAGRAMM  
 DIAGRAMMA PSICROMETRICO  
 ( $P_{atm} = 1,013 \text{ bar}$ )

## Esercizio 1



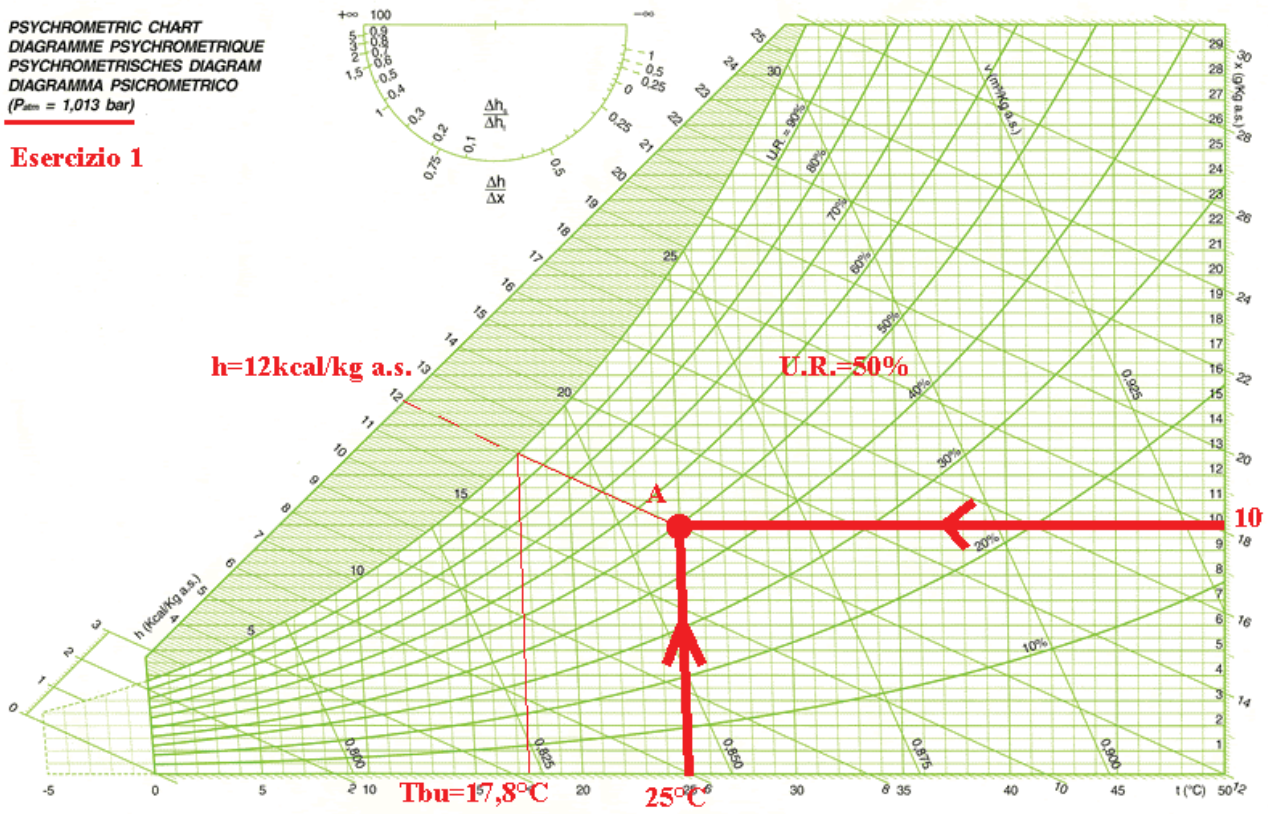
Individuato il punto sul diagramma, si possono avere diverse informazioni circa l'aria umida contenuta nel serbatoio:

In particolare si ricava:

- U.R.=50%
- $h=12 \text{ kcal/kg a.s.}$
- $T_{bu}=17.8^\circ\text{C}$
- $T_{rugiada}=14^\circ\text{C}$
- $v=0.860 \text{ m}^3/\text{kg a.s.}$

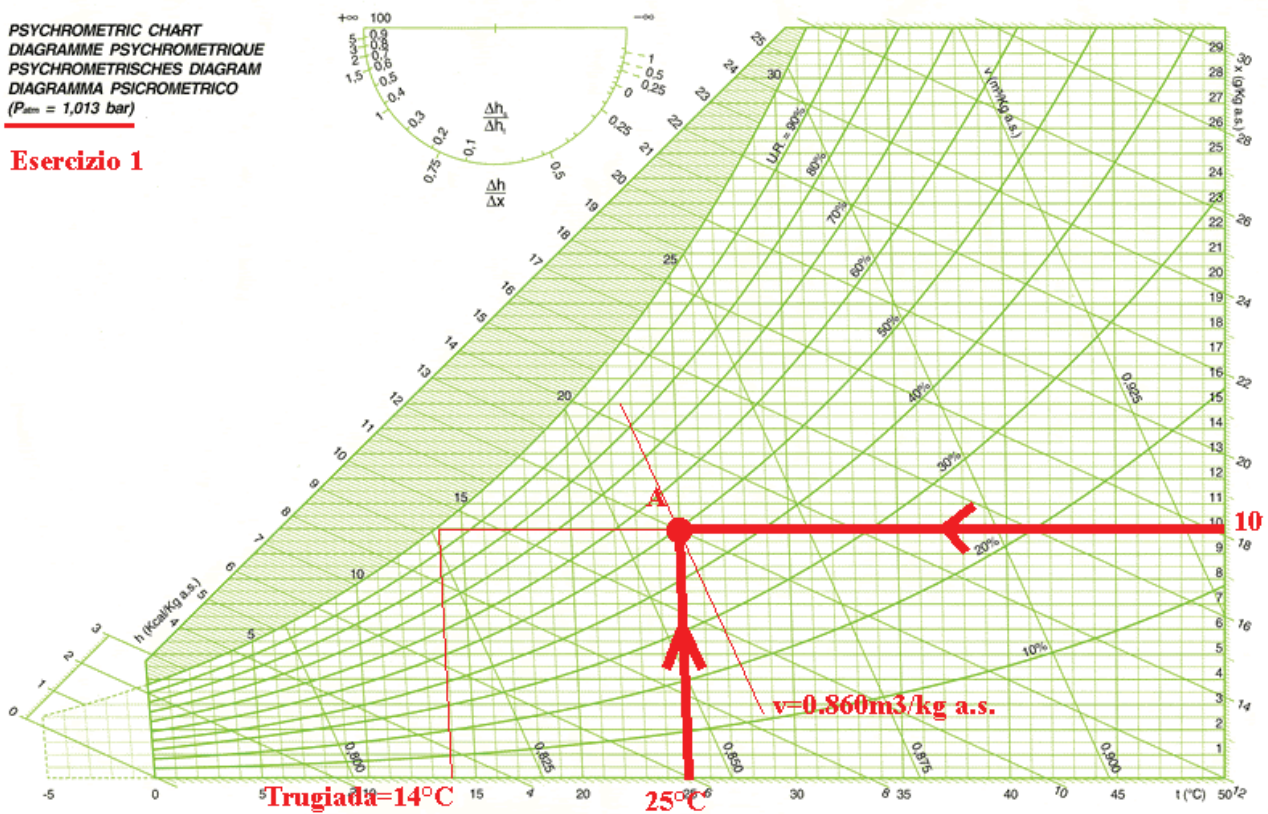
PSYCHROMETRIC CHART  
 DIAGRAMME PSYCHROMETRIQUE  
 PSYCHROMETRISCHES DIAGRAM  
 DIAGRAMMA PSICROMETRICO  
 ( $P_{atm} = 1,013 \text{ bar}$ )

**Esercizio 1**



PSYCHROMETRIC CHART  
 DIAGRAMME PSYCHROMETRIQUE  
 PSYCHROMETRISCHES DIAGRAM  
 DIAGRAMMA PSICROMETRICO  
 ( $P_{atm} = 1,013 \text{ bar}$ )

**Esercizio 1**





Visti i risultati, si può trarre spunto per porre qualche interessante quesito:

**D: Qual è il contenuto energetico di tutta l'aria umida del serbatoio?**

R: Dal diagramma psicrometrico abbiamo visto che per ogni kg di aria secca l'entalpia specifica dell'aria umida nelle condizioni date è pari a 12 kcal; ciò significa che il contenuto energetico della totalità dell'aria umida del serbatoio è data da:

$$H = 12 \text{ (kcal/kg a.s.)} \times 10 \text{ (kg a.s.)} = 120 \text{ kcal}$$

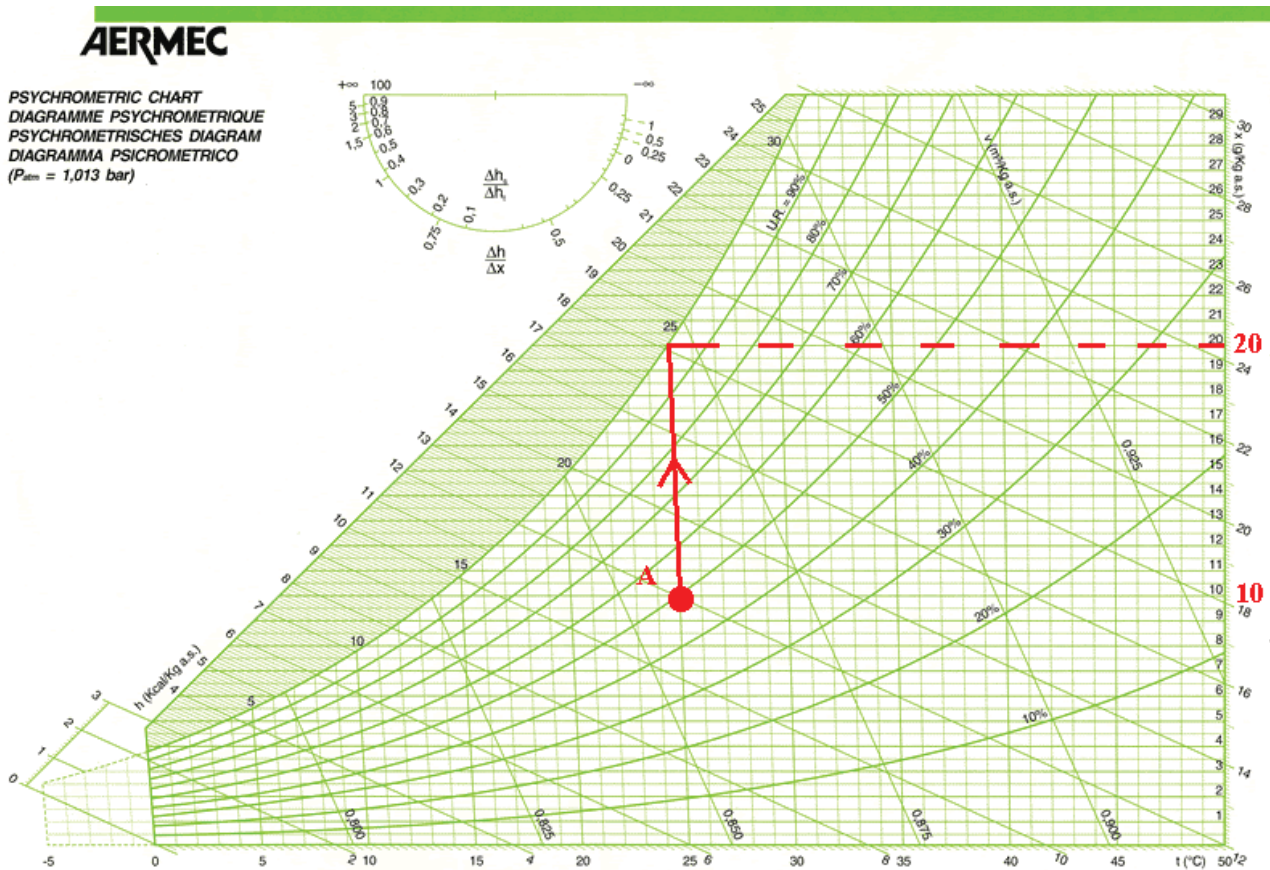
Le 1200 kcal sono quelle necessarie per scaldare i 10 kg di aria secca da 0°C a 25°C; per scaldare i 100 g di acqua da 0°C a 25°C; per fare evaporare a 25°C i 100 g di acqua.

**D: Se le pareti del serbatoio si trovano ad una temperatura pari a T=10°C cosa succede all'aria umida a contatto con esse?**

R: Poiché la temperatura delle pareti del serbatoio è inferiore alla temperatura di rugiada relativa all'aria umida interna ( $T_r = 14^\circ\text{C}$ ), l'aria a contatto con le pareti andrà a saturazione e sulla superficie interna del serbatoio si formerà dell'acqua di condensa (fenomeno del tutto analogo a quello che fa appannare le vetrate fredde).

**D: Quanti grammi di vapore acqueo occorre aggiungere per portare l'aria a saturazione alla temperatura costante di 25°C?**

R: Per rispondere a questa domanda facciamo riferimento al diagramma psicrometrico:



Dal diagramma si vede che occorre aggiungere 10 grammi di vapore per ogni kg di aria secca (non ci stancheremo mai di ribadire che tutto ciò che è sul diagramma fa riferimento al kg di aria secca); poiché i kg di aria secca contenuti nel serbatoio sono 10, occorre aggiungere in totale:  
 $10 \text{ (g/kg a.s.)} \times 10 \text{ (kg a.s.)} = 100 \text{ g di vapore per saturare a } 25^\circ\text{C l'aria del serbatoio.}$

### Miscela di due quantità di aria

Date due masse di aria umida M1 ed M2 di date condizioni psicrometriche (individuate sul diagramma dai punti A1 ed A2, rispettivamente) vogliamo determinare il punto rappresentativo della miscela.

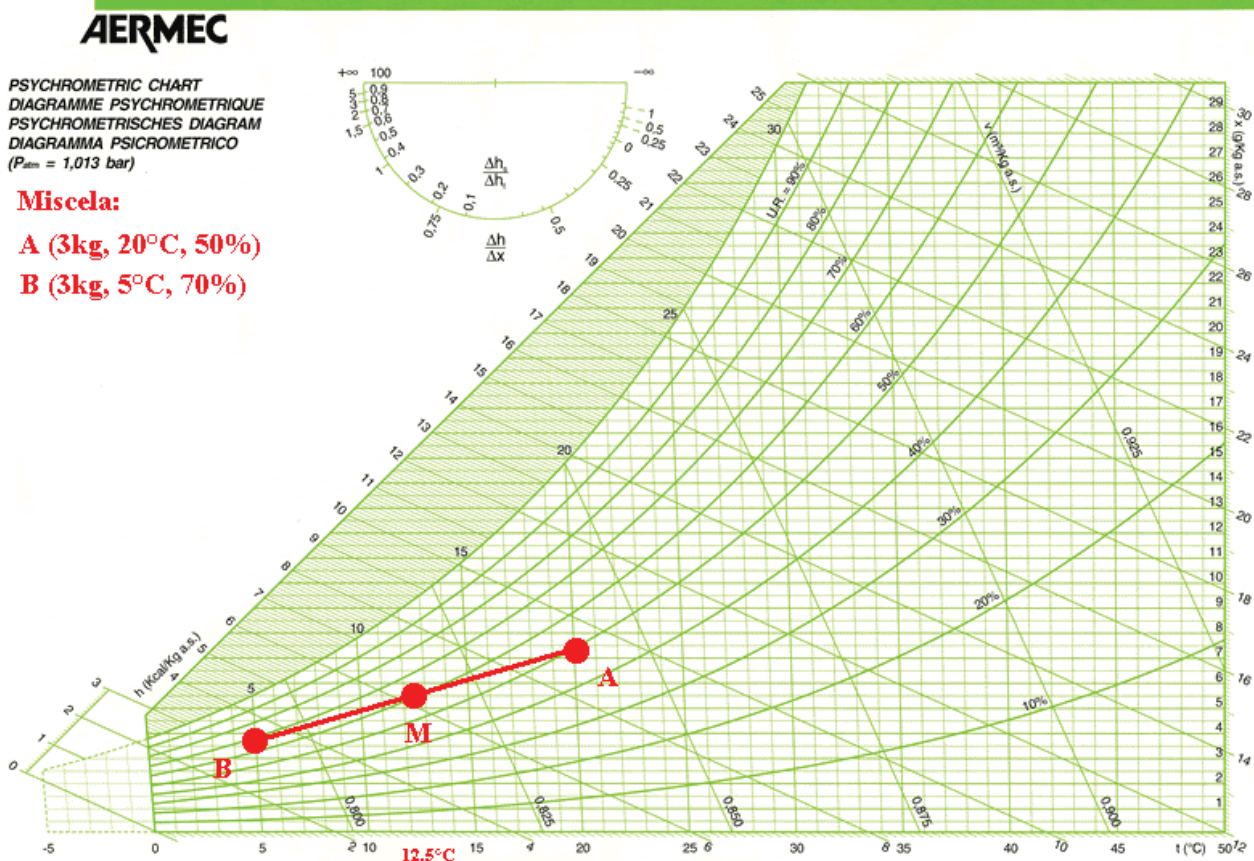
Le condizioni della miscela si trovano sul diagramma psicrometrico sul segmento congiungente i punti rappresentativi delle due quantità d'aria umida da miscelare; il punto di miscela sarà più vicino al punto rappresentativo della massa maggiore.

Se, ad esempio, misceliamo due quantità di stessa massa, il punto di miscela è il punto medio sulla congiungente i due punti; facciamo una serie di esempi per meglio chiarire il concetto.

#### Esempio 1

Miscela tra A: (3 kg, 20°C, 50%) e B: (3 kg, 5°C, 70%).

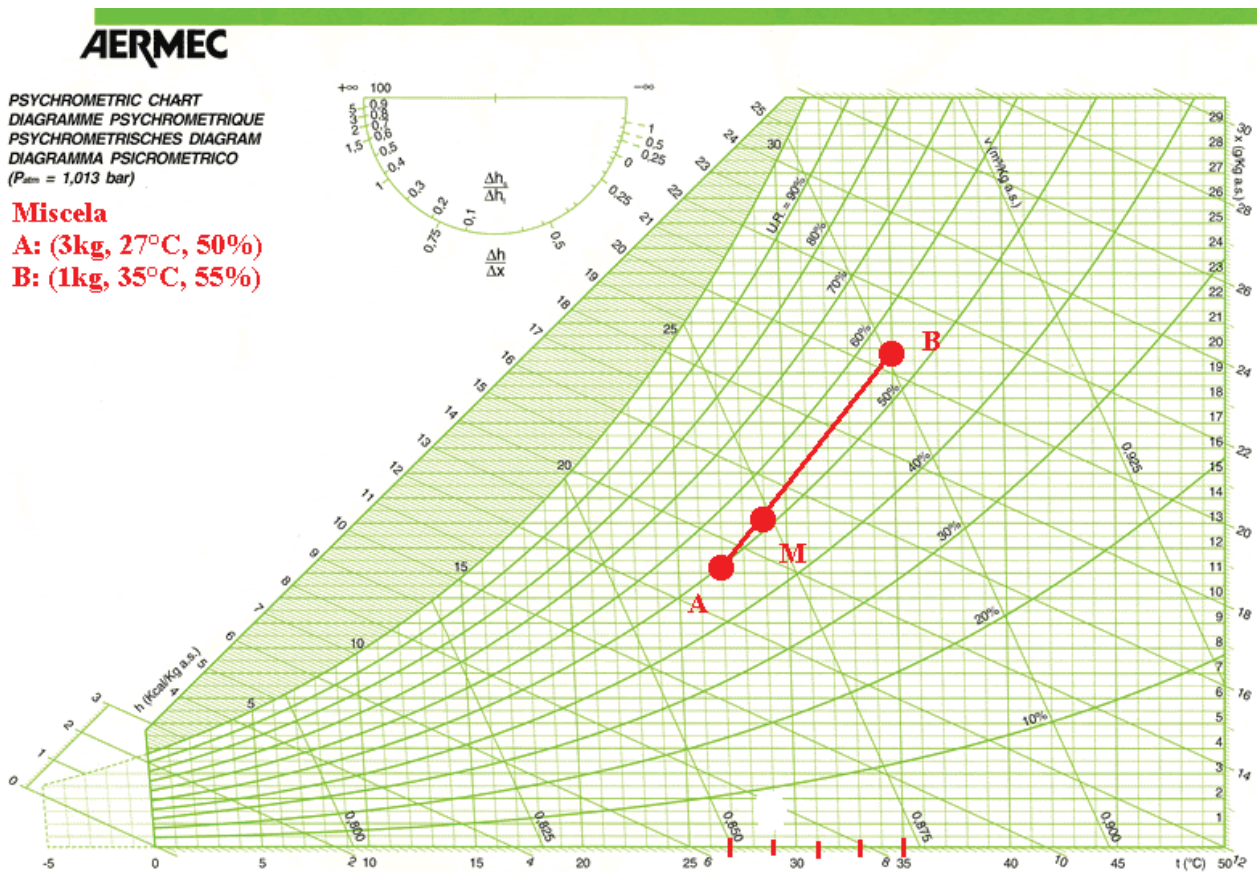
Si traccia, innanzitutto, il segmento congiungente i punti A e B: è su tale segmento che si troverà il punto di miscela; la posizione del punto cercato sul segmento sarà perfettamente equidistante da A e da B, essendo uguali le due masse da miscelare (un metodo semplice e corretto per individuare il punto medio del segmento è quello di riferirsi alla scala delle temperature: nel caso in esame, il punto M avrà ascissa pari a  $(5+20)/2=12.5^\circ\text{C}$ ):



## Esempio 2

Miscela tra A: (3kg, 27°C, 50%) e B: (1kg, 35°C, 55%)

Il punto di miscela sarà più vicino al punto A, essendo la massa A maggiore rispetto alla massa B. Più precisamente, se divido il segmento AB in quattro parti uguali (la massa totale è pari a 4kg), il punto di miscela sarà ad una distanza da A pari ad un quarto della lunghezza totale del segmento. Per maggiore semplicità, si dividerà in quattro parti uguali la distanza tra A e B misurata sull'asse delle temperature a bulbo secco (asse orizzontale):



Nelle applicazioni pratiche del condizionamento si fa riferimento a portate d'aria. Proviamo allora a fare un esempio di miscela tra portate d'aria.

## Esempio 3

Miscela tra A: (7000m<sup>3</sup>/h, 27°C, 50%) e B: (1000m<sup>3</sup>/h, 35°C, 55%).

Basta dividere il segmento AB in 8 parti uguali: il punto M sarà spostato verso A, come mostrato nella figura seguente: