

AIR CONDITIONING
AERMEC

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.

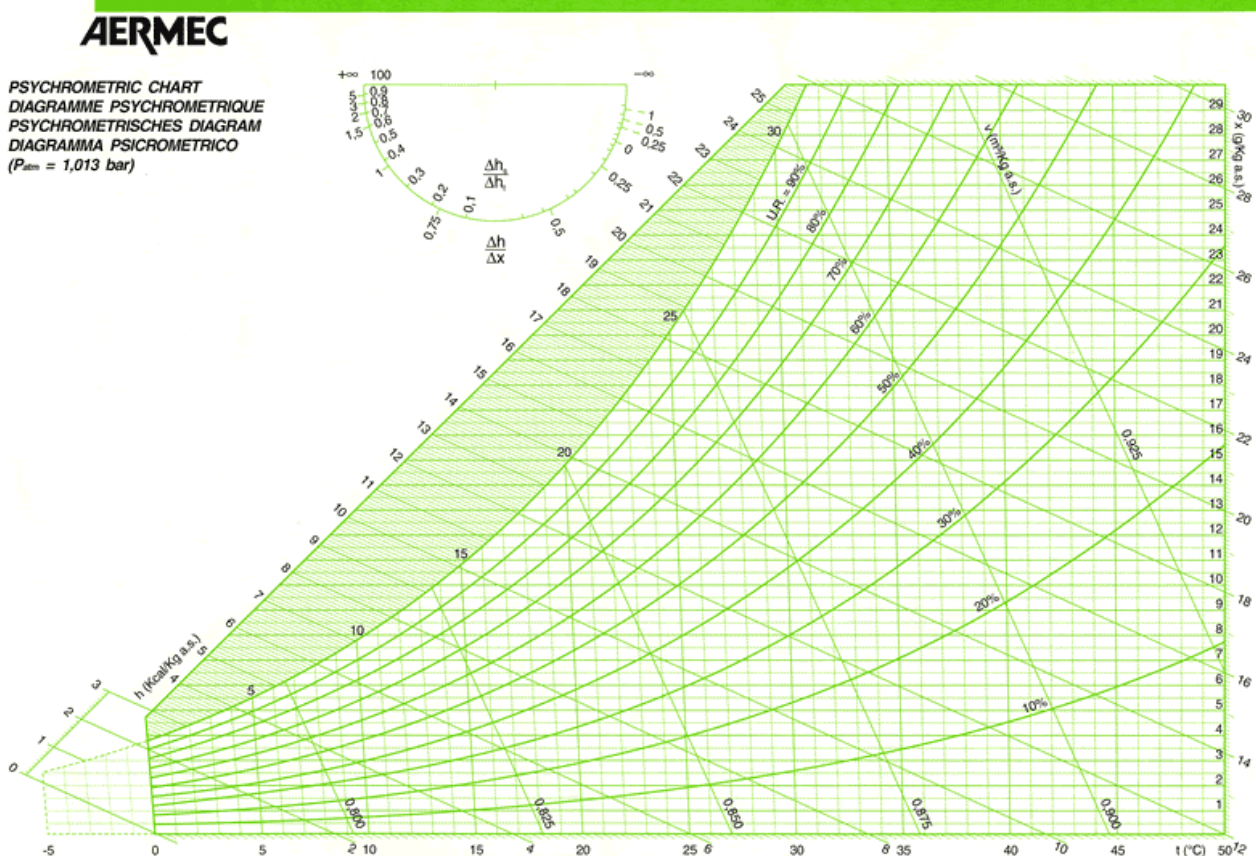
Sulla base di studi e ricerche eseguite, si è individuata la "zona del benessere" relativamente alle condizioni dell'aria nell'ambiente occupato.

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:

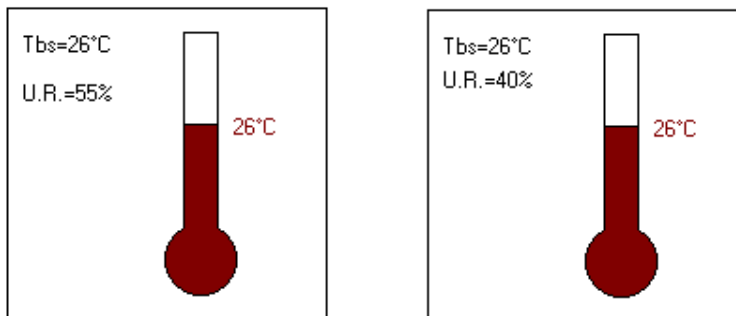
- Temperatura a bulbo secco;
- Umidità specifica;
- Umidità relativa;
- Temperatura a bulbo umido;

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

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

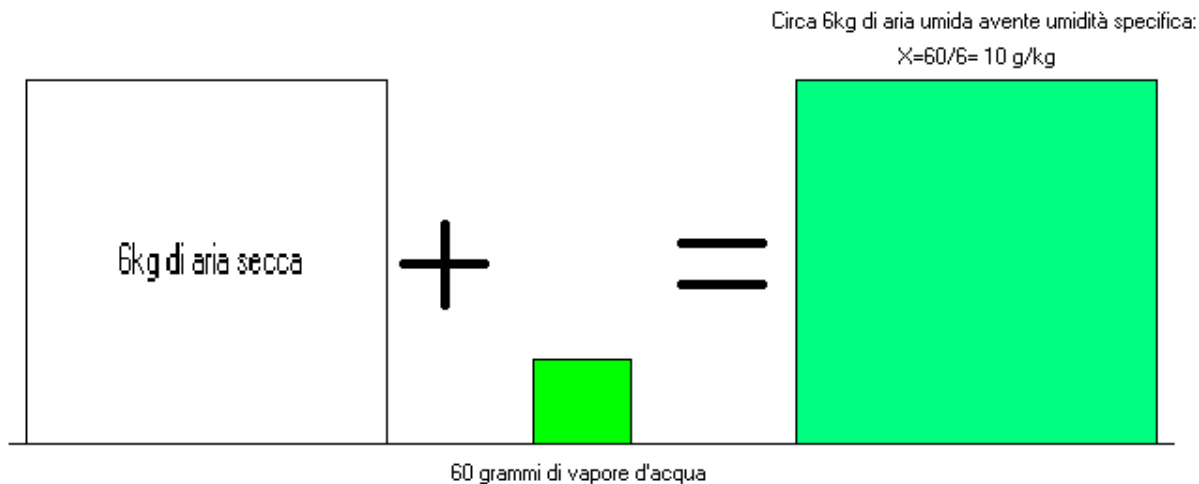
Temperatura a bulbo secco T_{bs} (°C)

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.



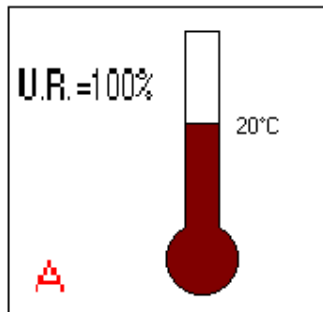
Umidità relativa U.R. (%)

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).

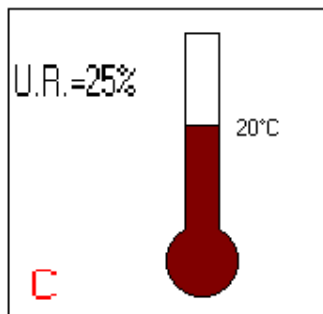
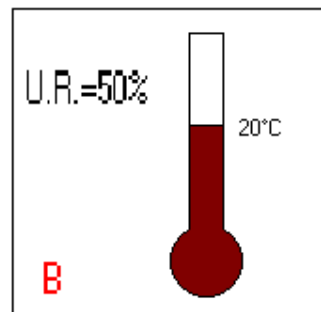
L'umidità relativa non è altro che la percentuale di vapore contenuto nell'aria in rapporto alla massima quantità in essa contenibile alla data temperatura.

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%:

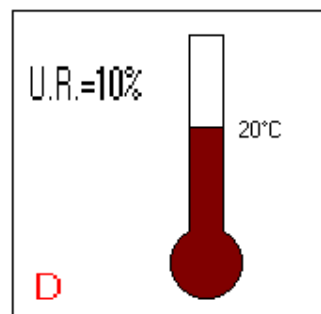
1 kg di aria secca contenente 14.7g di vapor d'acqua



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

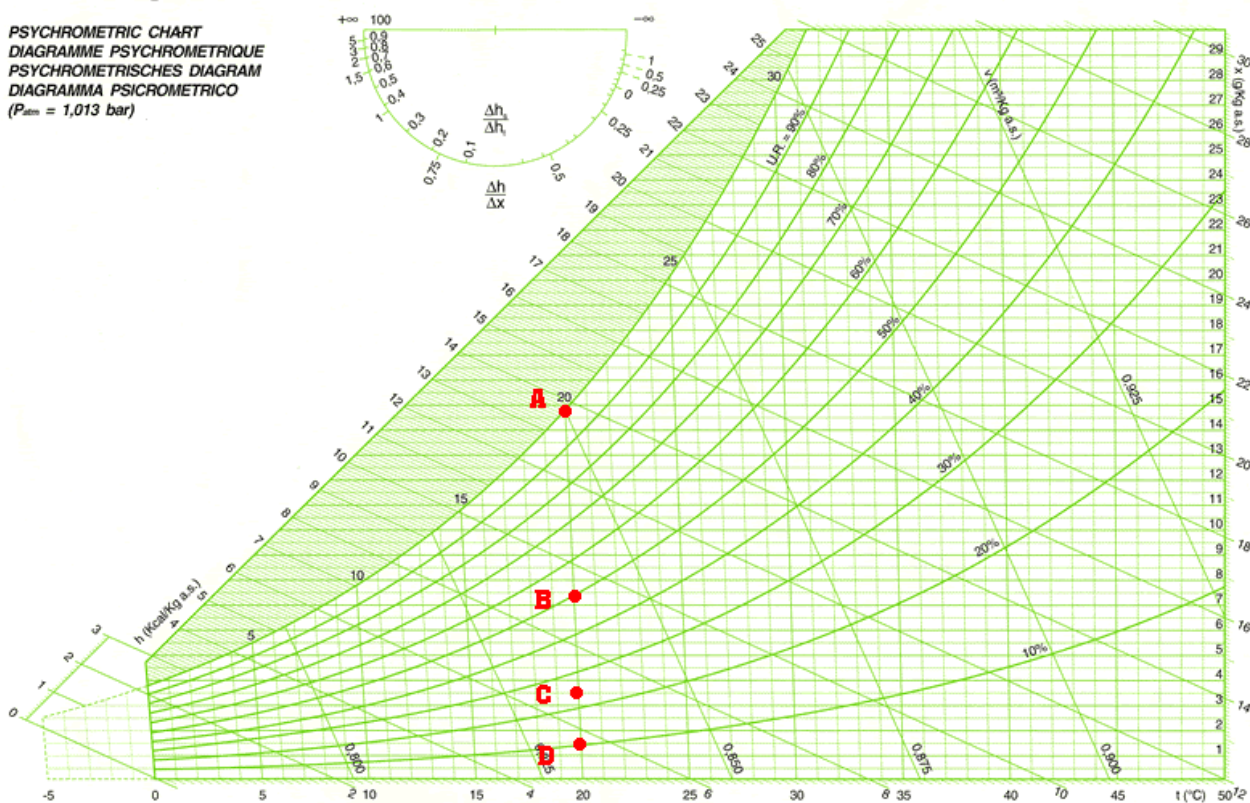


1 kg di aria secca contenente 3.675g di vapor d'acqua



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

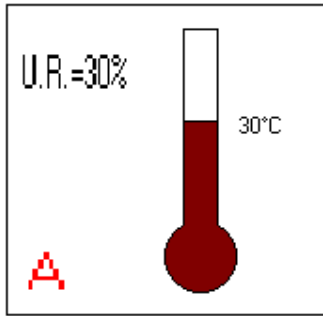
PSYCHROMETRIC CHART
 DIAGRAMME PSYCHROMETRIQUE
 PSYCHROMETRISCHES DIAGRAMM
 DIAGRAMMA PSICROMETRICO
 (P_{atm} = 1,013 bar)



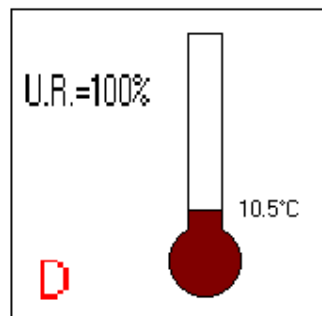
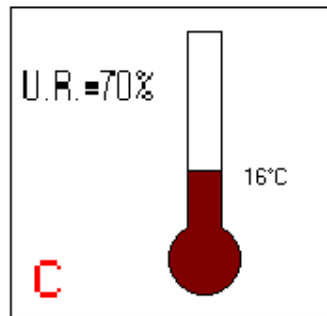
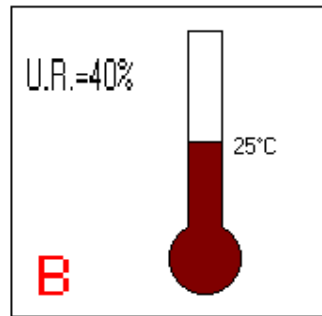
L'umidità relativa dell'aria è strettamente legata alla temperatura di bulbo secco: a parità di grammi di vapore acqueo contenuti nel kg di aria secca, l'umidità relativa aumenta al diminuire della temperatura; il motivo è il seguente: minore è la temperatura dell'aria, minore è la miscibilità del vapore 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

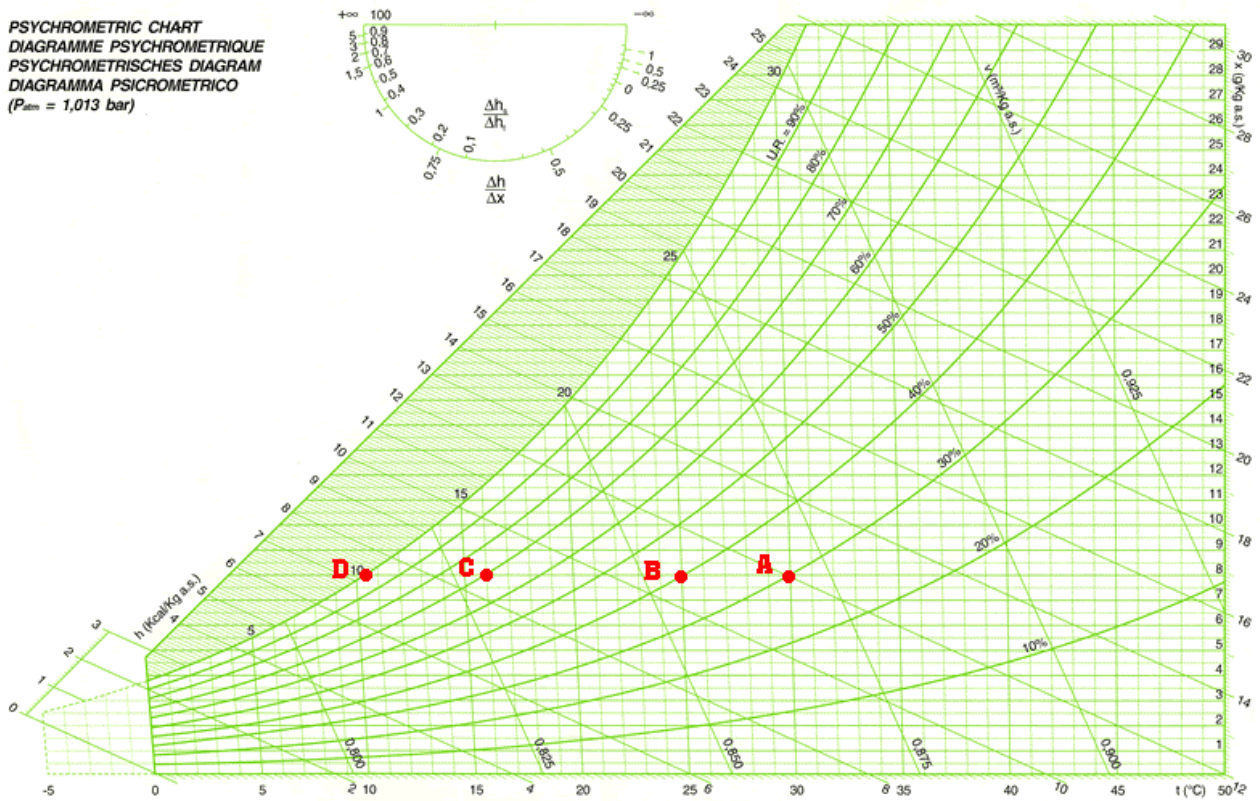


1 kg di aria secca contenente 8 g di vapore acqueo

1 kg di aria secca contenente 8 g di vapore acqueo

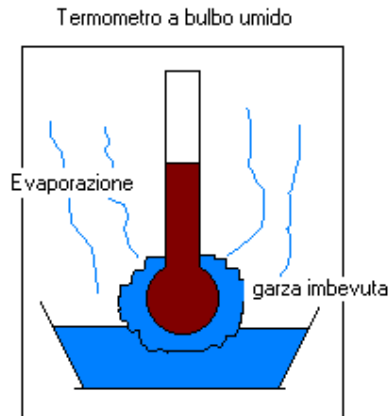
AERMEC

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

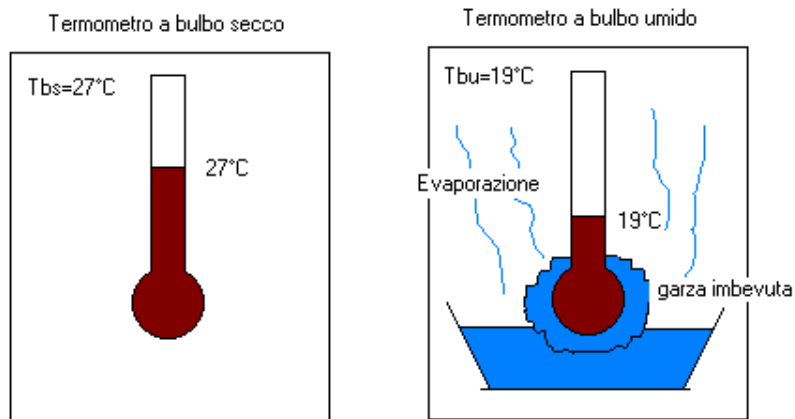


Temperatura a bulbo umido T_{bu} ($^{\circ}\text{C}$)

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).

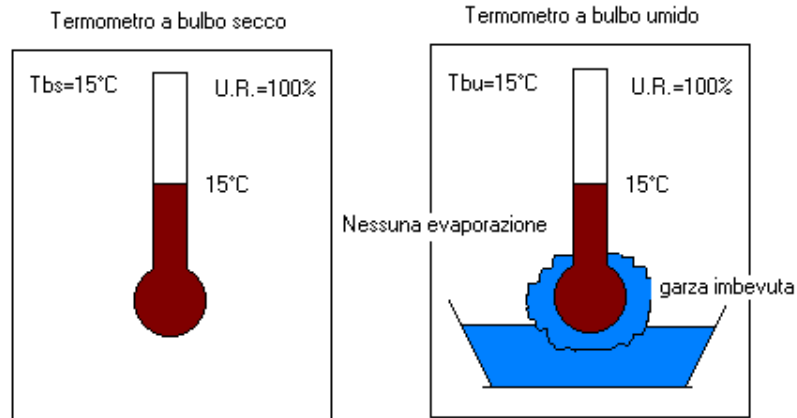


Quando il bulbo viene investito dalla corrente d'aria, parte dell'acqua contenuta nella garza evapora sottraendo calore al mercurio del termometro: l'indicazione del termometro sarà quindi più bassa rispetto a quella che darebbe lo stesso termometro a bulbo asciutto.



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} .

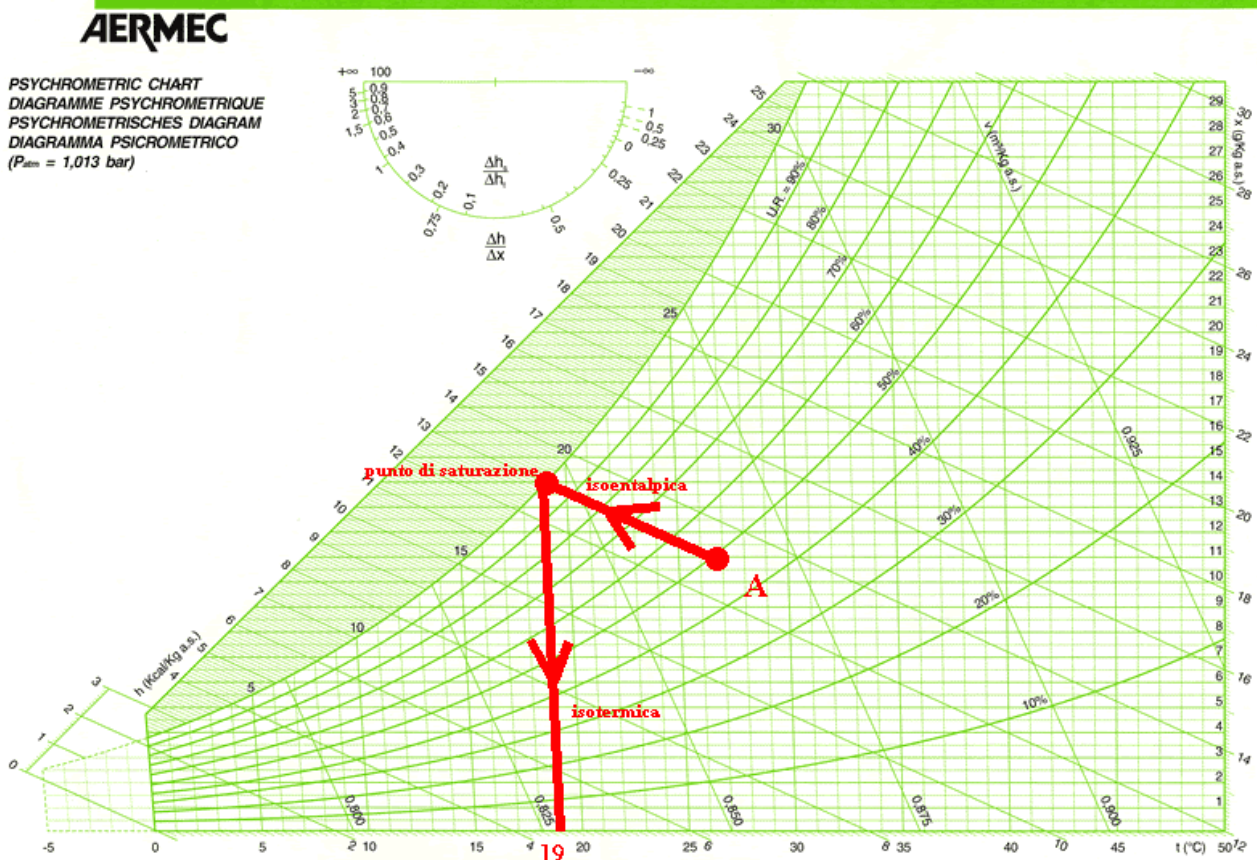


Risulta evidente che la quantità di acqua che evapora dalla garza sarà maggiore quanto minore è l'umidità relativa dell'aria (si pensi alla facilità con cui si asciugano i panni stesi nelle giornate particolarmente secche).

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:



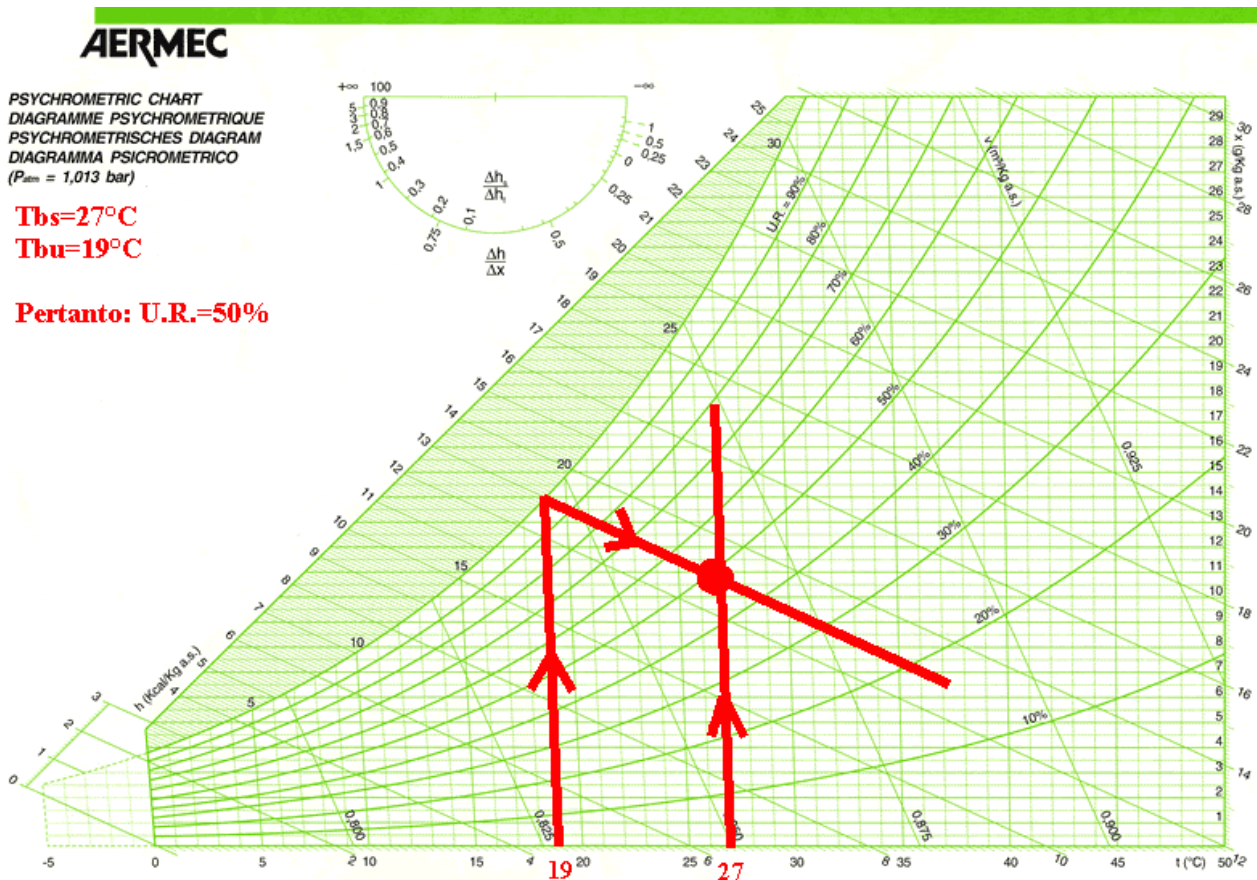
A partire dal punto A ($T_{bs}=27^{\circ}\text{C}$; $U.R.=50\%$), si procede parallelamente alle rette inclinate (isoentalpiche) sino ad incontrare la curva di $U.R.=100\%$ (curva di saturazione) e poi si scende

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

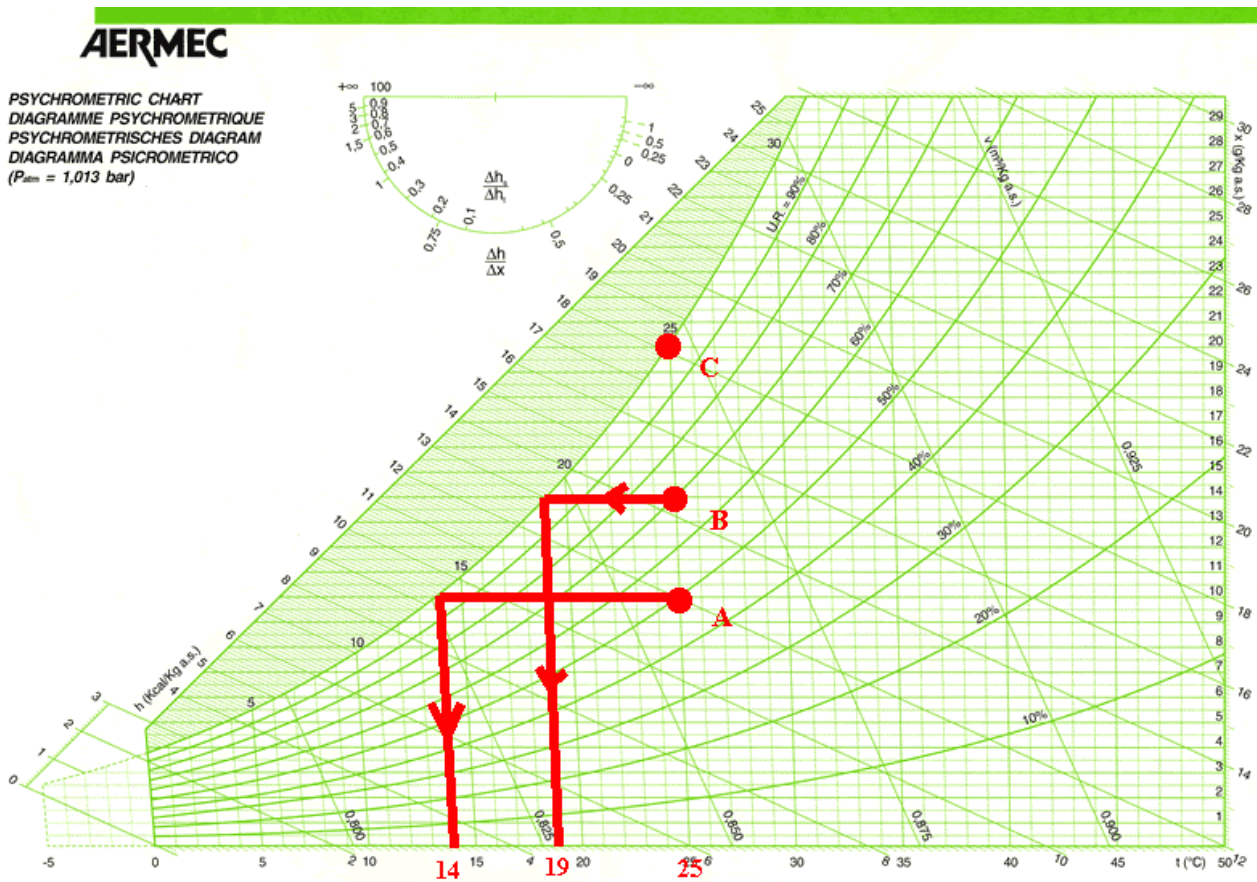
La temperatura di rugiada è la temperatura alla quale l'aria raggiunge le condizioni di saturazione ($U.R.=100\%$): su ogni elemento (parete, superficie vetrata ecc...) che si trova ad una temperatura appena inferiore alla temperatura di rugiada si forma condensa (rugiada, appunto).

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°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°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°C (l'aria si trova già satura: caso C).

Nella seguente figura è illustrato quanto detto:



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

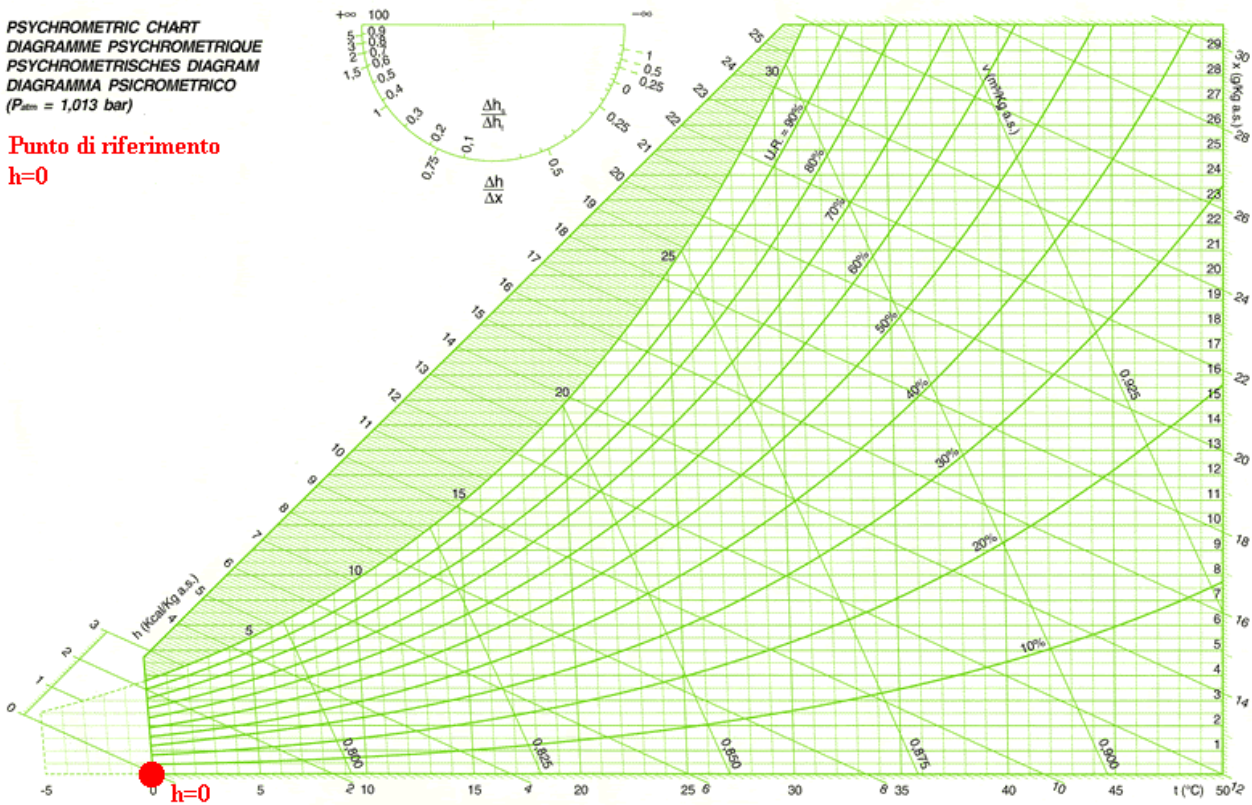
L'entalpia è la grandezza termodinamica che indica il contenuto energetico di una sostanza alle date condizioni di temperatura, pressione ecc...

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_{atm} = 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:

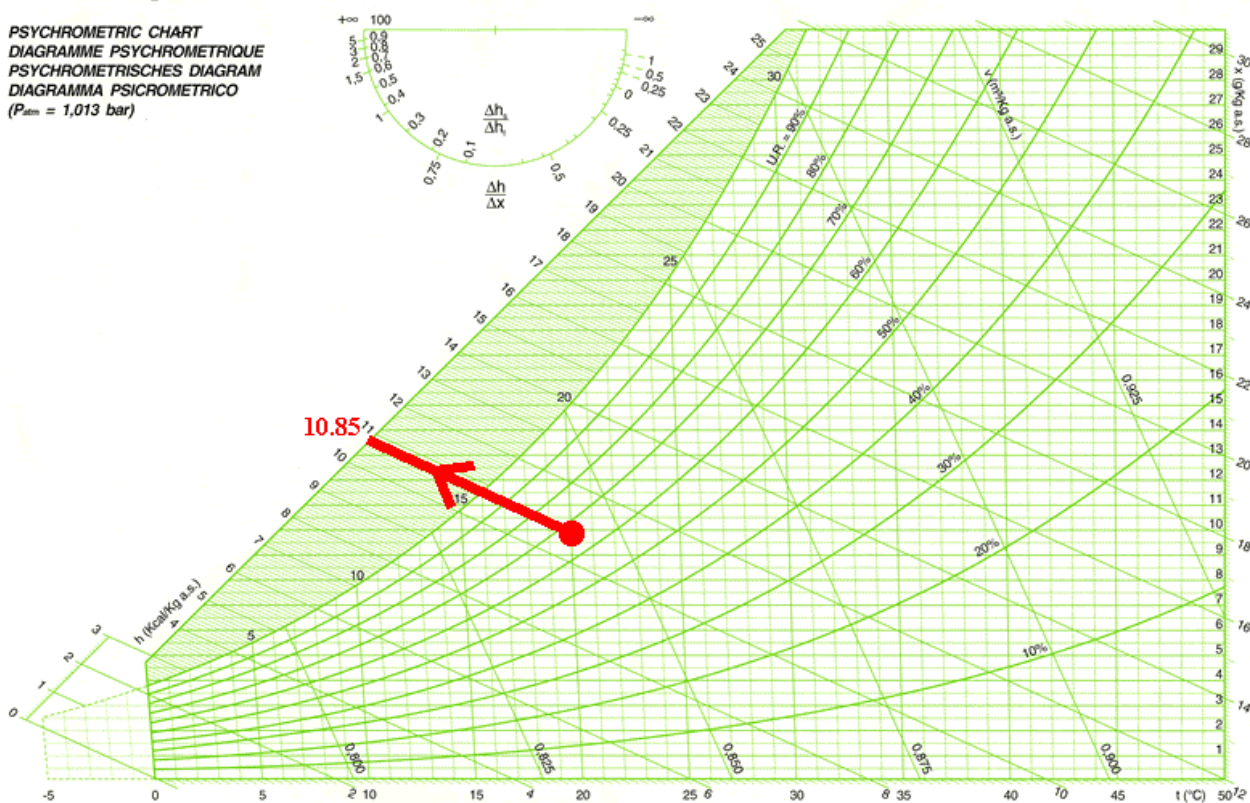
- $h_a=4.8$ kcal servono per portare il kg di aria secca da 0°C a 20°C ($m \cdot c_p \cdot \Delta T=1 \times 0.24 \times 20$)¹;
- $h_v=6.05$ kcal servono per fare evaporare i 10 grammi di acqua a 0°C e poi a riscaldare il vapore da 0°C a 20°C: $0.010 \times (r + c_{pv} \times t) = 0.010 \text{ kg} \times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

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:

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

² $r = 596 \text{ kcal/kg}$ 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_{atm} = 1,013 bar)



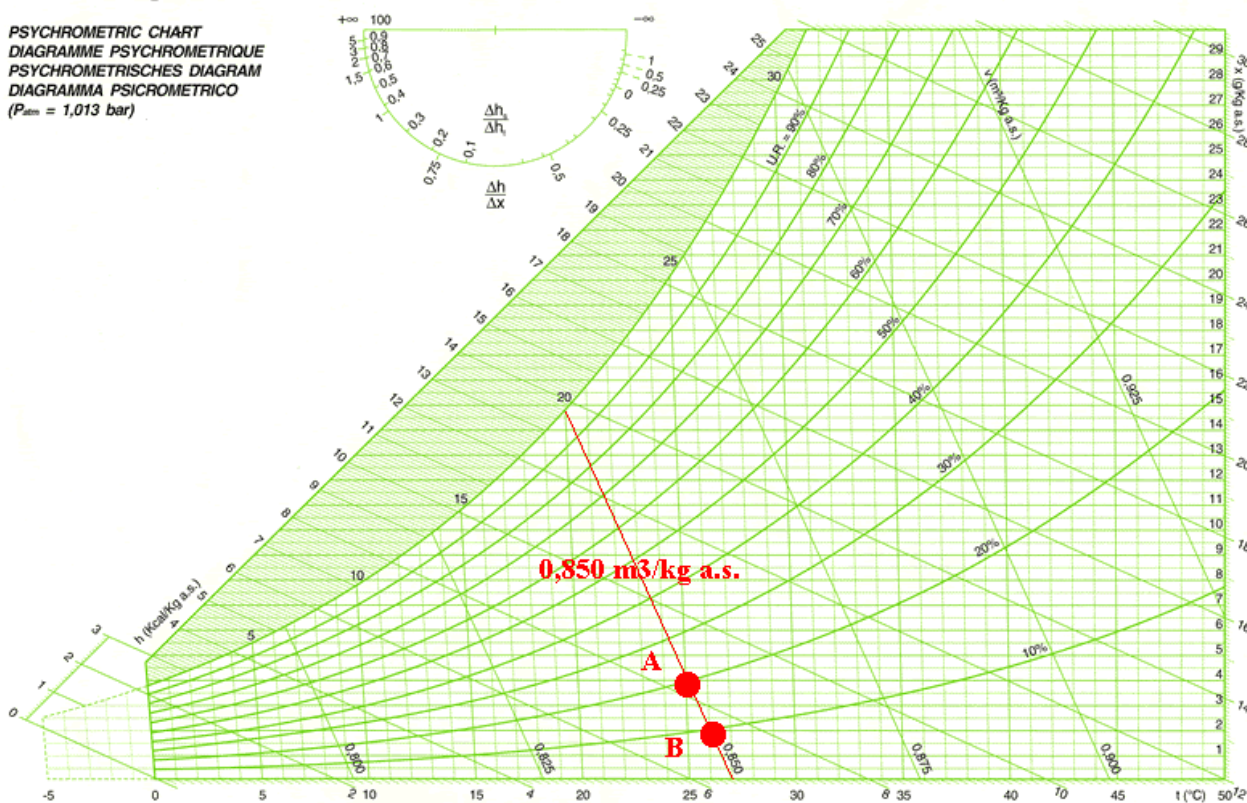
Volume specifico (m3/kg a.s.)

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_{bs}=25°C e con U.R.=20% (punto A nella figura seguente) e l'aria umida con T_{bs}=26°C e con U.R.=10% (punto B) hanno lo stesso volume specifico pari a 0.850 m³.

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.

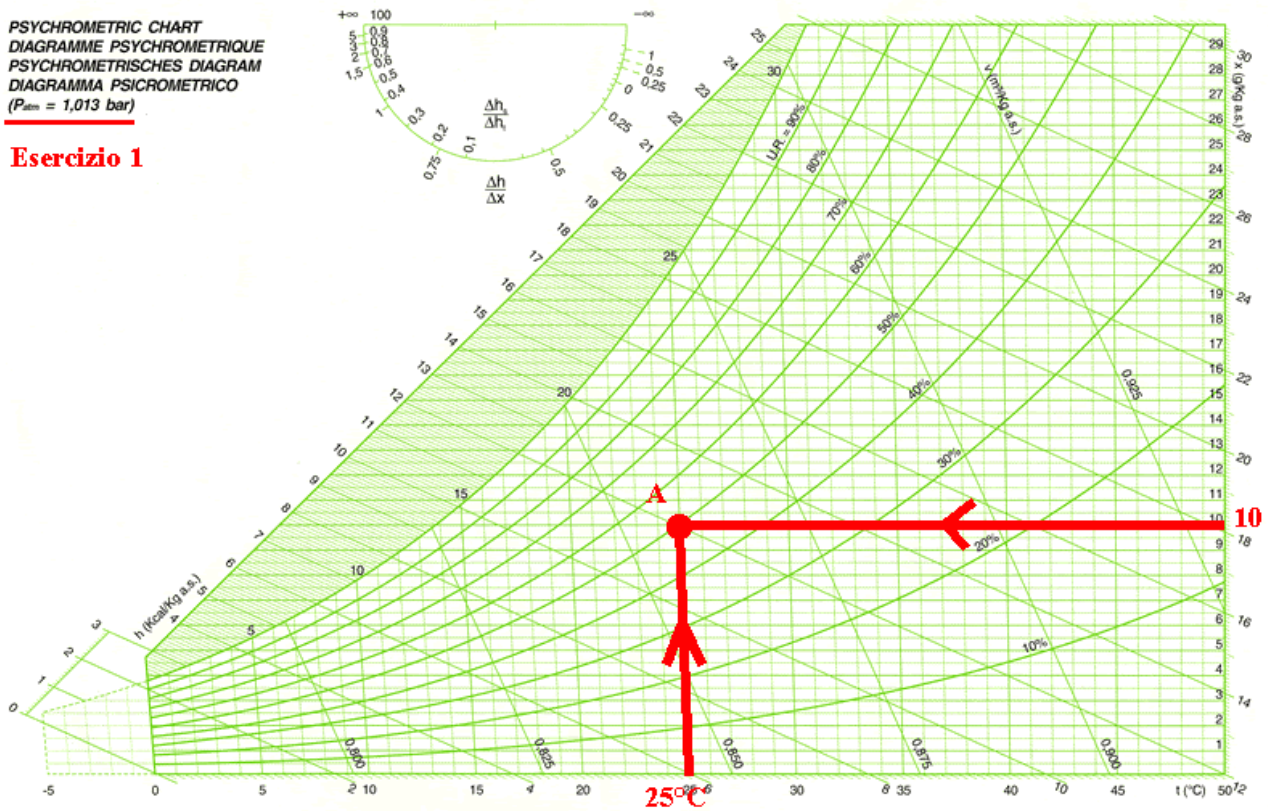
Sarà, cioè:

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

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



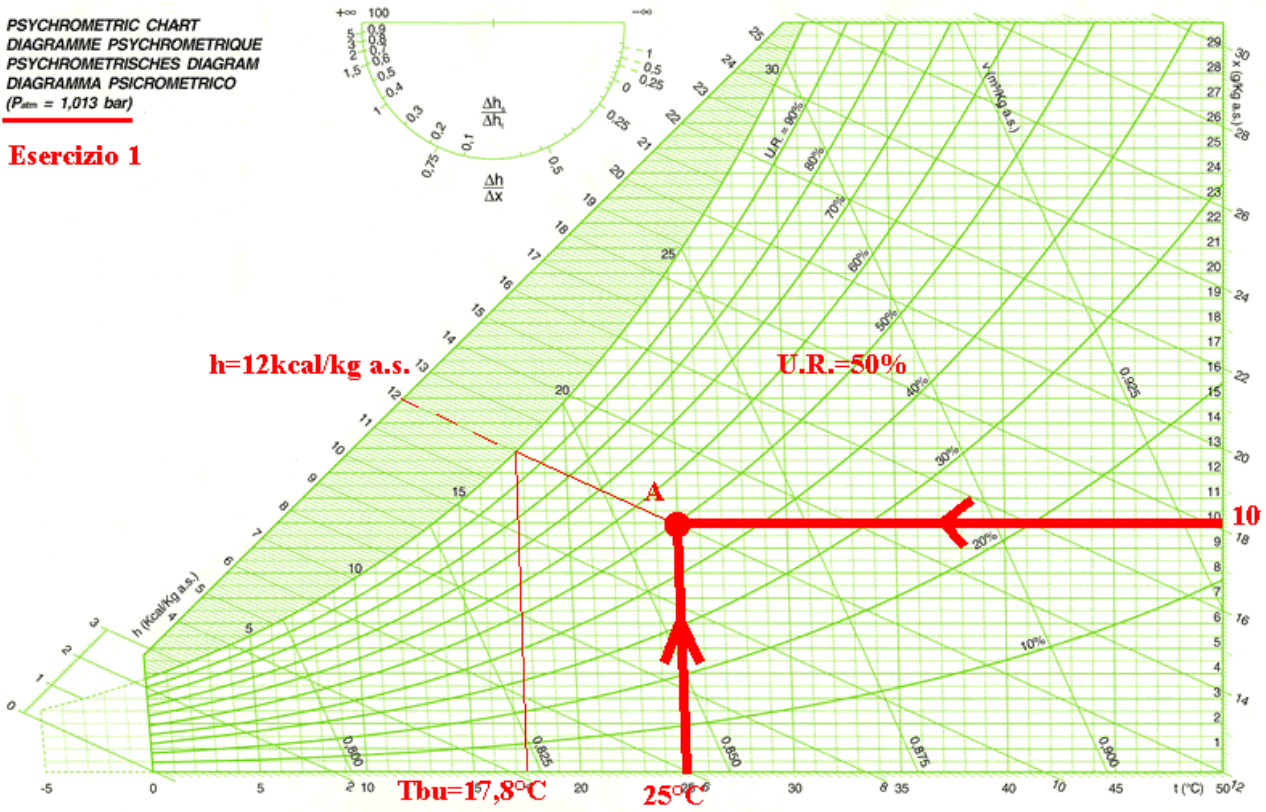
Individuato il punto sul diagramma, si possono avere diverse informazioni circa l'aria umida contenuta nel serbatoio:

In particolare si ricava:

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

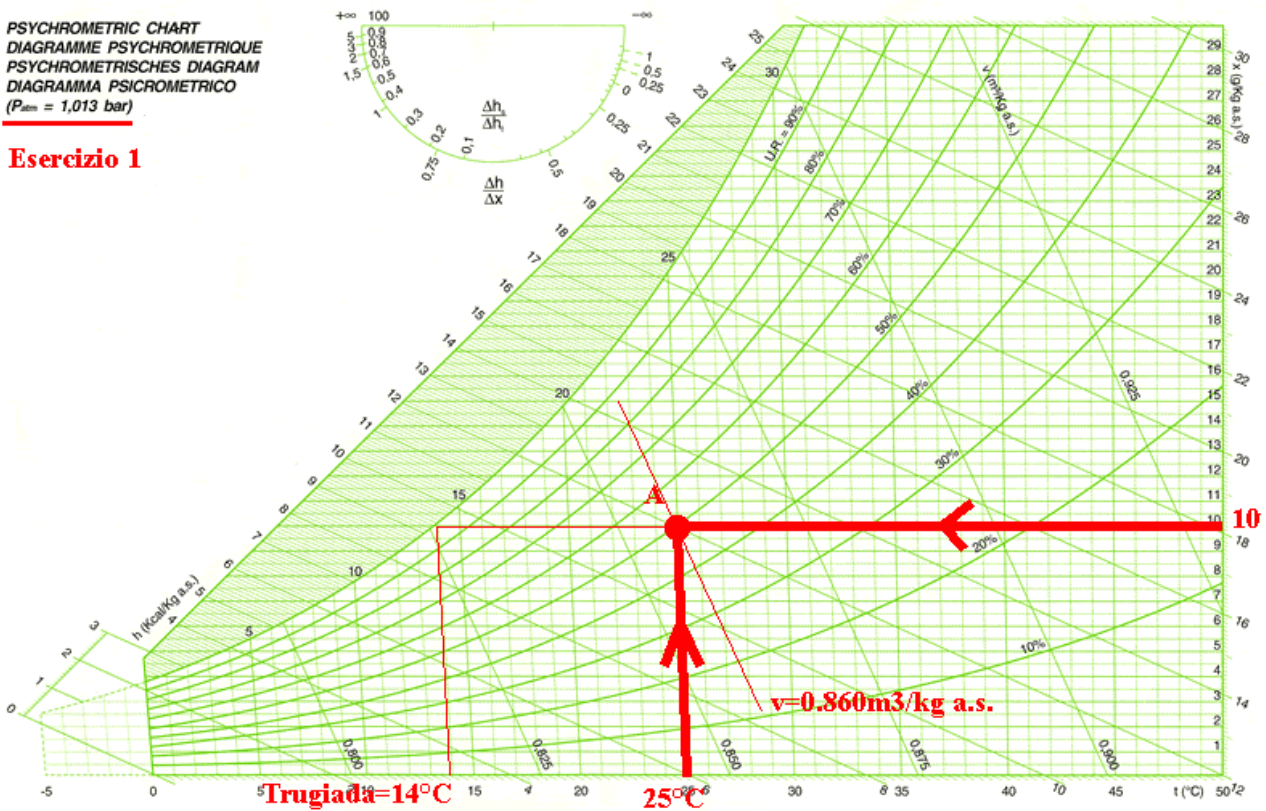
PSYCHROMETRIC CHART
 DIAGRAMME PSYCHROMETRIQUE
 PSYCHROMETRISCHES DIAGRAM
 DIAGRAMMA PSICROMETRICO
 ($P_{atm} = 1,013 \text{ bar}$)

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:

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

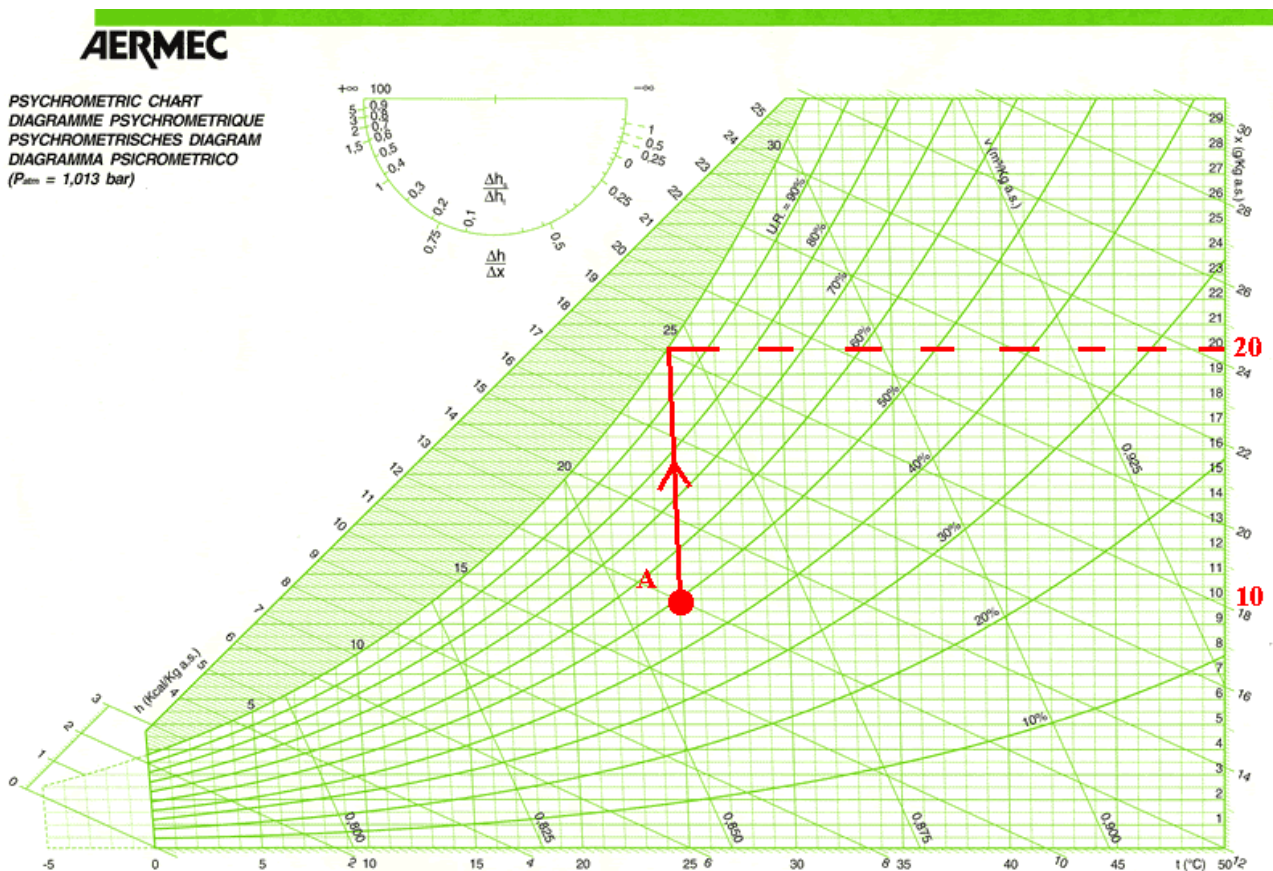
Le 1200 kcal sono quelle necessarie per scaldare i 10 kg di aria secca da 0°C a 25°C; per scaldare i 100 g di acqua da 0°C a 25°C; per fare evaporare a 25°C i 100 g di acqua.

D: Se le pareti del serbatoio si trovano ad una temperatura pari a $T=10^\circ\text{C}$ 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.

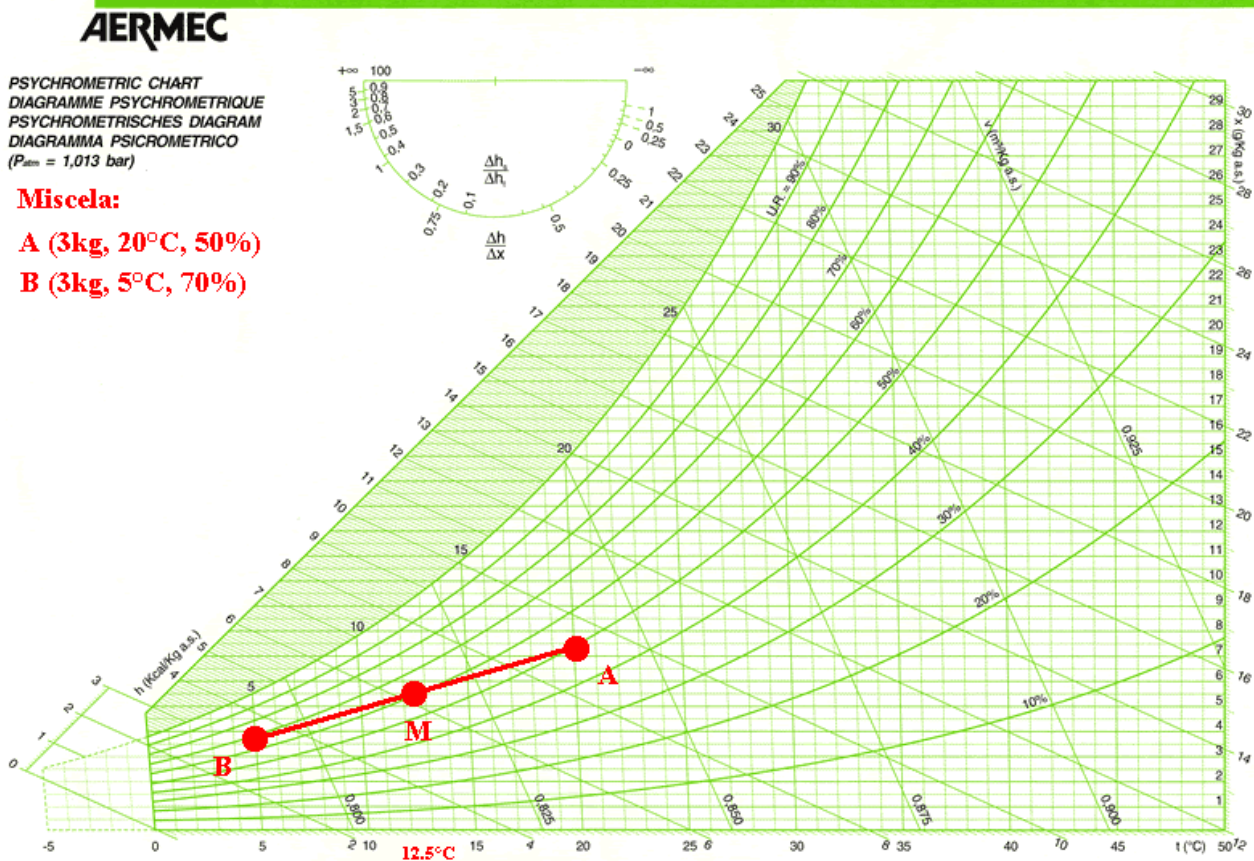
Le condizioni della miscela si trovano sul diagramma psicrometrico sul segmento congiungente i punti rappresentativi delle due quantità d'aria umida da miscelare; il punto di miscela sarà più vicino al punto rappresentativo della massa maggiore.

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%).

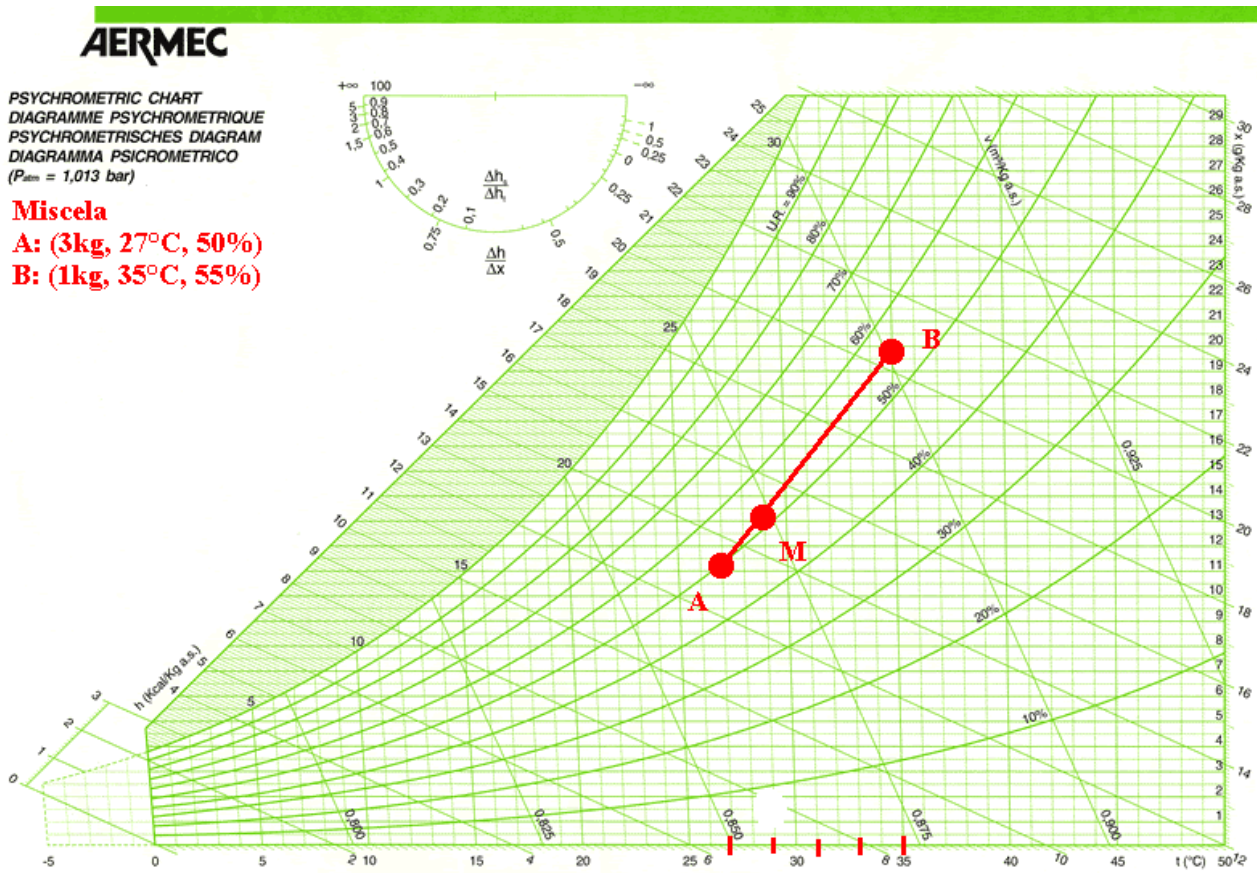
Si traccia, innanzitutto, il segmento congiungente i punti A e B: è su tale segmento che si troverà il punto di miscela; la posizione del punto cercato sul segmento sarà perfettamente equidistante da A e da B, essendo uguali le due masse da miscelare (un metodo semplice e corretto per individuare il 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.

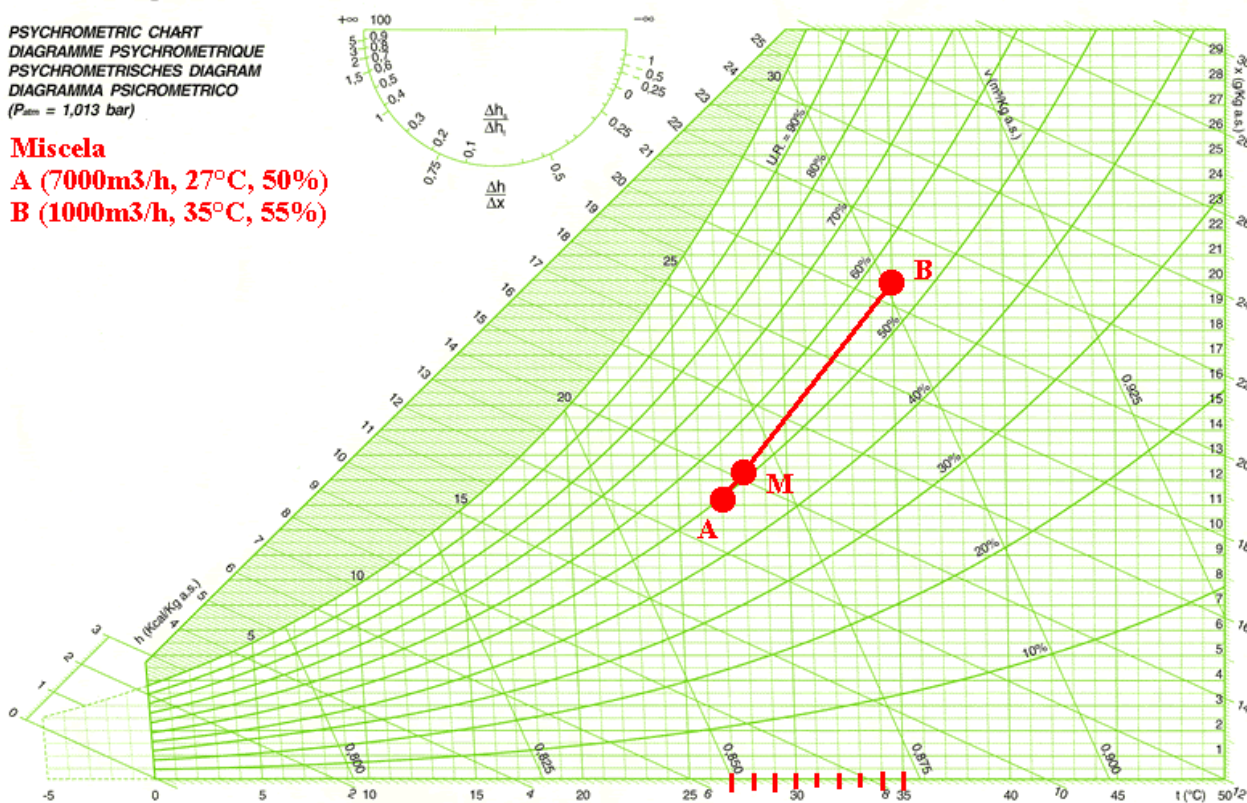
Esempio 3

Miscela tra A: (7000m³/h, 27°C, 50%) e B: (1000m³/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:

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

Miscela
A (7000m³/h, 27°C, 50%)
B (1000m³/h, 35°C, 55%)



Calore sensibile

Il calore sensibile è l'energia termica che produce una variazione di temperatura nella sostanza interessata (è definito "sensibile" proprio perché produce un effetto "sensibile": la variazione di temperatura).

La formula generale del calore sensibile è la seguente:

$$Q_s = m c \Delta T \quad [\text{kcal nel Sistema Tecnico}] \quad [\text{kJ nel Sistema Internazionale}]$$

dove:

- m è la massa della sostanza che scambia calore sensibile [kg]
- c è il calore specifico della sostanza stessa [kcal/kgK nel S.T.] [kJ/kgK nel S.I.]
- ΔT è la variazione di temperatura che lo scambio termico produce nella sostanza.

Il calore specifico è definito come la quantità di calore sensibile necessaria per far variare di 1K la temperatura di 1kg di sostanza.

Per l'aria umida il calore specifico è riferito al kg di aria secca (kg a.s.); esso vale:

$$c=0.245 \text{ kcal/kg a.s. K (nel S.T.)}$$

$$c=1.02 \text{ kJ/kg a.s. K (nel S.I.)}$$

Vediamo ora alcuni esempi di scambio di calore sensibile sul diagramma psicrometrico.

ESEMPIO 4

10kg di aria secca contenenti 100g di vapore acqueo devono essere riscaldati da 15°C a 40°C. Calcolare il calore sensibile necessario e rappresentare la trasformazione sul diagramma psicrometrico.

Faccio uso della formula per calcolare il calore sensibile da fornire all'aria:

$$Q_s = 10 \times 0.245 \times (40-15) = 61.25 \text{ kcal (S.T.)}$$

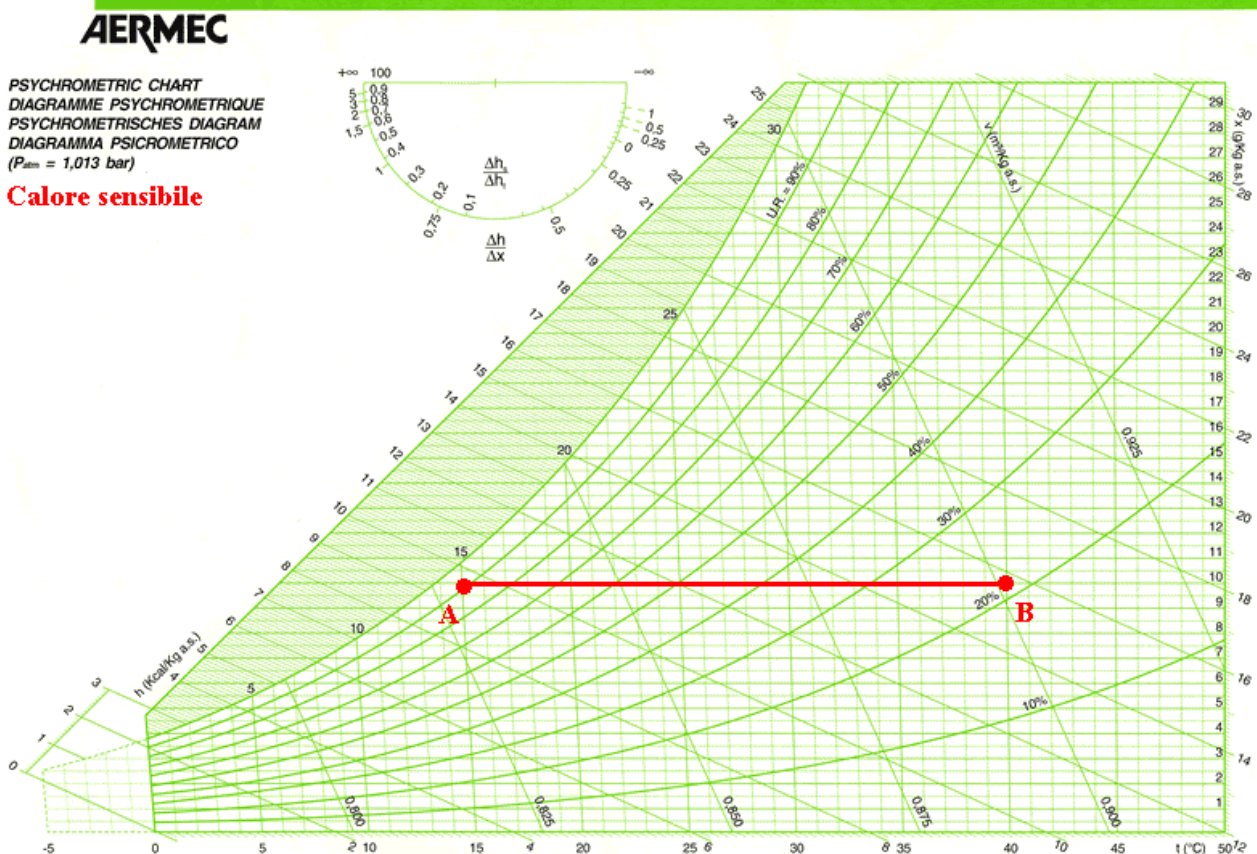
$$Q_s = 10 \times 1.02 \times (40-15) = 255 \text{ kJ (S.I.)}$$

Sul diagramma psicrometrico il riscaldamento sensibile è rappresentato da una retta orizzontale, visto che non varia l'umidità specifica (come vedremo in seguito, le variazioni di umidità specifica sono indotte solo da scambi di calore latente).

L'umidità specifica vale:

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

Note le X e le T iniziali e finali, si può passare alla rappresentazione sul diagramma:



Calore latente

Il calore latente è la quantità di energia associata alla vaporizzazione (o alla condensazione) dell'acqua contenuta nell'aria umida.

Il termine “latente” deriva dal latino e vuol dire “senza manifestazione visibile”; il calore latente è infatti una quantità di energia che non produce variazioni di temperatura a bulbo secco.

L'espressione generale per il calore latente è la seguente:

$$Ql = m C_v \Delta X \quad [\text{kcal nel Sistema Tecnico}] \quad [\text{kJ nel Sistema Internazionale}]$$

dove:

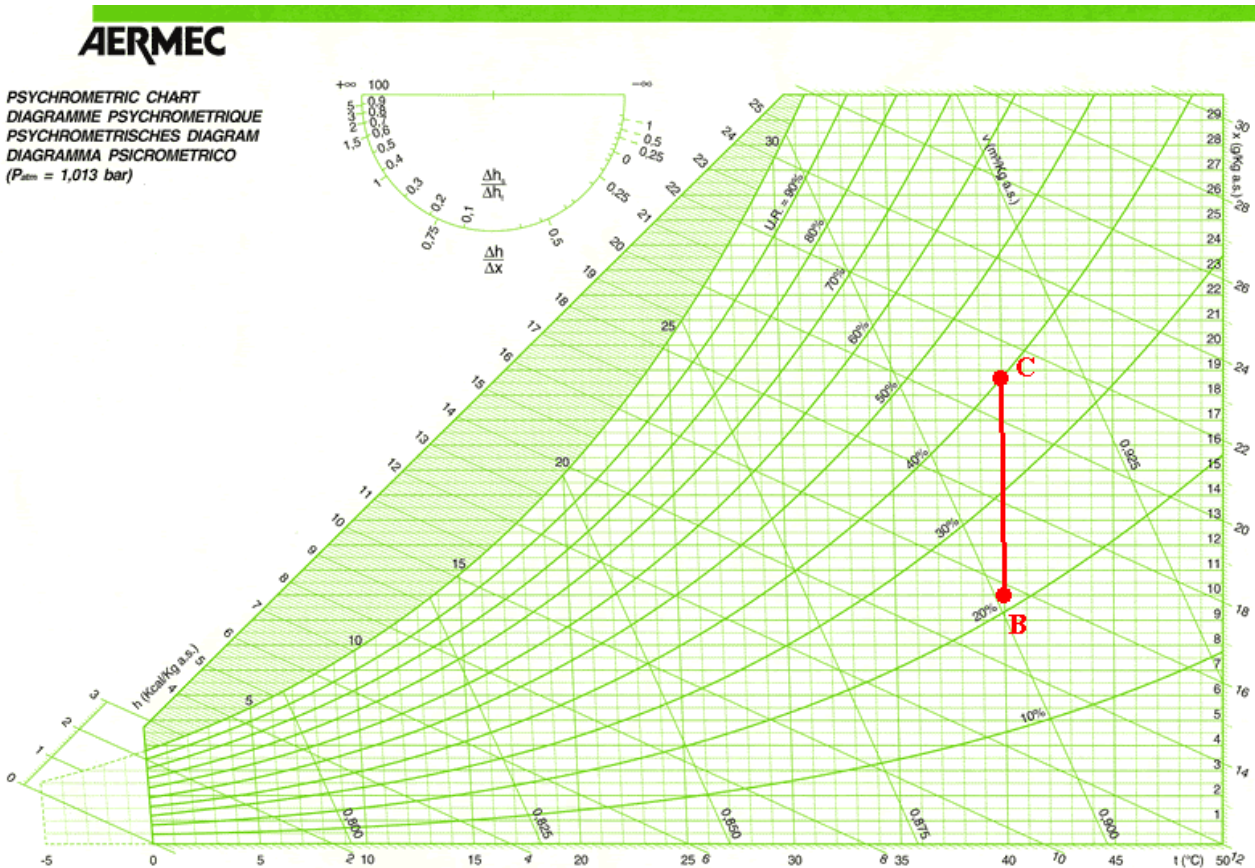
- m è la massa d'aria che scambia calore latente [kg]
- C_v è il calore latente di vaporizzazione [596 kcal/kg acqua nel S.T.] [2490 kJ/kg acqua nel S.I.]
- ΔX è la variazione di umidità specifica.

Si ha scambio di solo calore latente nelle trasformazioni in cui varia l'umidità specifica senza variare la temperatura a bulbo secco.

Per meglio chiarire il concetto si può vedere il seguente esempio:

Esempio 5

Nella seguente figura è rappresentata una trasformazione in cui l'aria umida riceve solo calore latente: la temperatura a bulbo secco resta costante.



Il calore latente vale:

$$Q_l = 10 \text{ kg a.s.} \times 0.596 \text{ kcal/g acqua} \times (19-10) \text{ g/kg a.s.} = 53.64 \text{ kcal} \text{ (stesso che facendo } \Delta h)$$

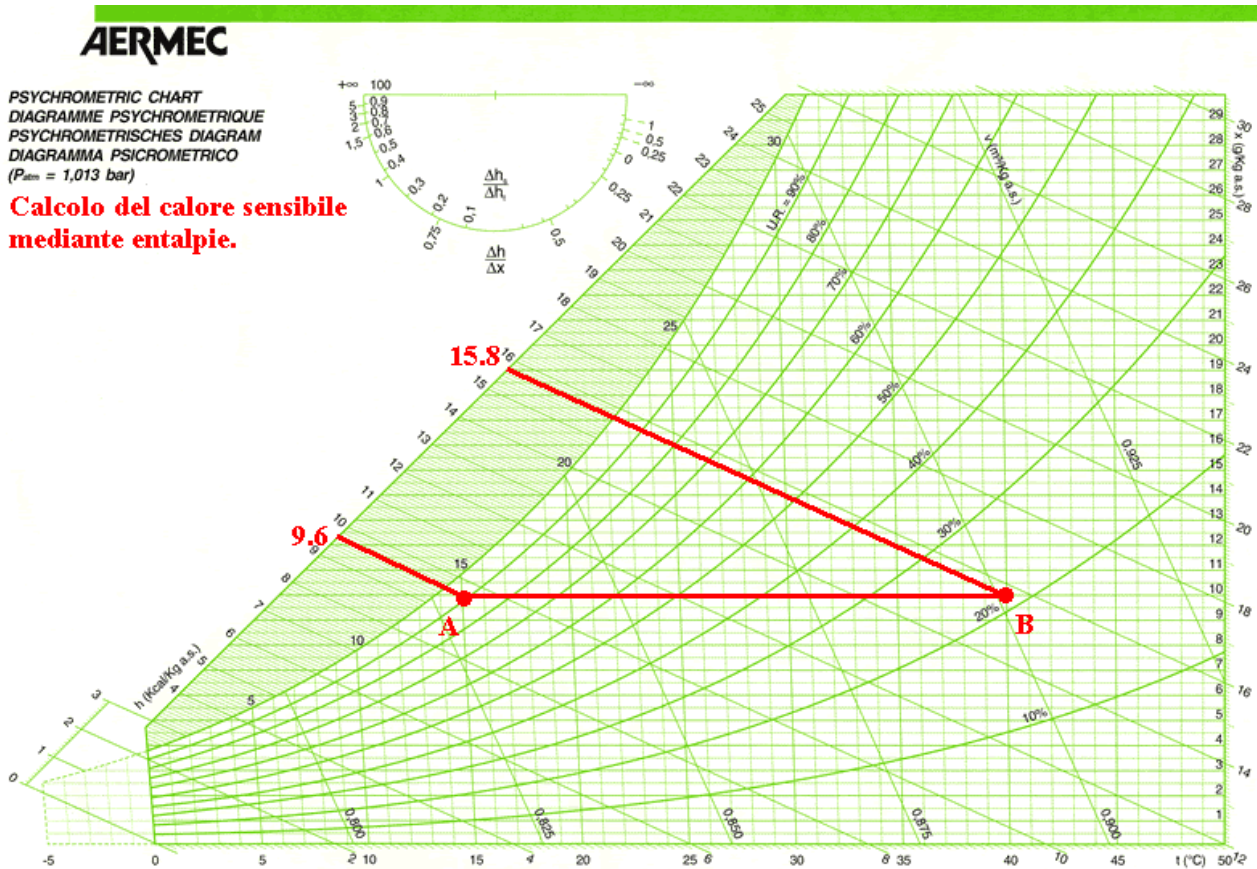
Un'unica espressione per il calore scambiato

Lo scambio di calore, che sia sensibile o latente, può essere espresso come variazione di entalpia. L'espressione generale dello scambio termico in termini di variazione di entalpia è la seguente:

$$Q = m \Delta h (*)$$

Utilizzando questa espressione si può calcolare il calore scambiato (sensibile o latente) direttamente leggendo le entalpie sul diagramma psicrometrico.

Ad esempio calcoliamo il calore sensibile dell'esempio 4 e il calore latente dell'esempio 5 usando la (*):

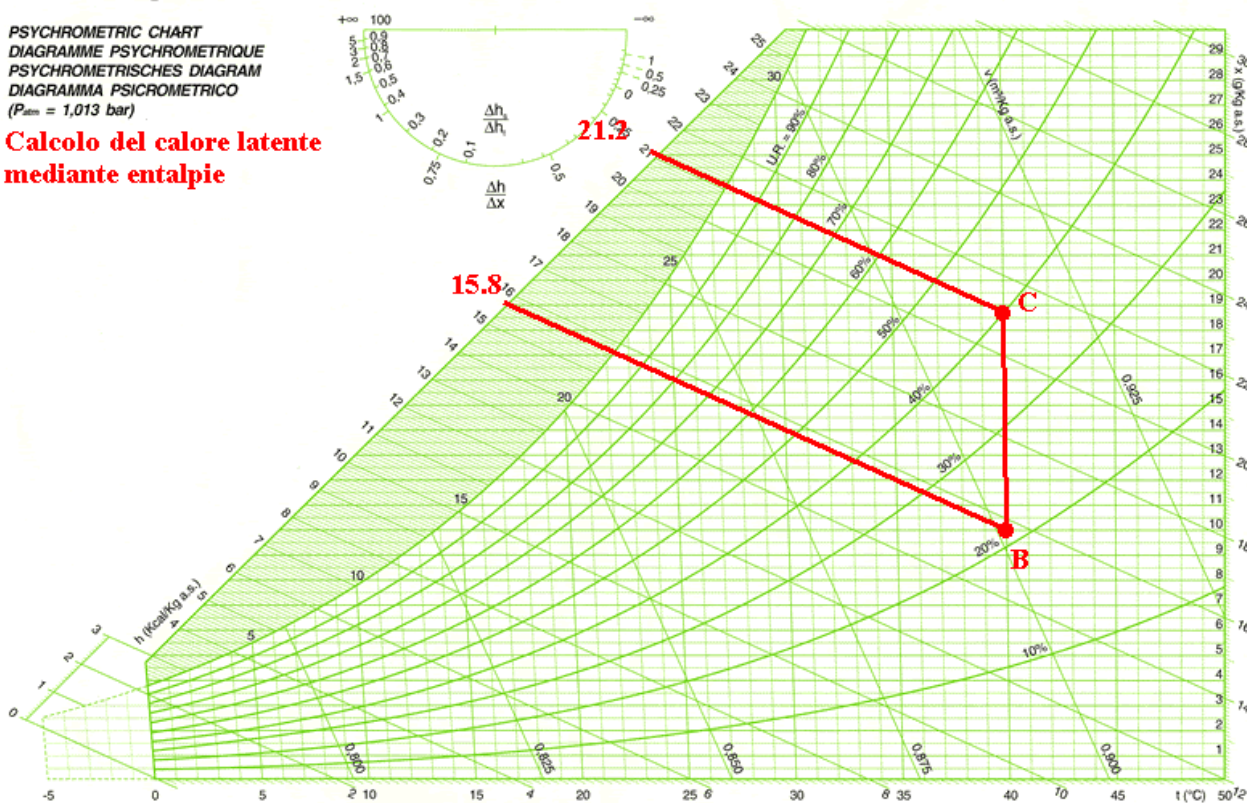


$$Q_s = 10 \text{ kg a.s.} \times (15,8-9,6) \text{ kcal/kg a.s.} = 62 \text{ kcal}^3$$

³ Dal calcolo si era ottenuto 61.25 kcal. La differenza è dovuta all'imprecisione dell'operatore nel determinare le entalpie sul diagramma: si tratta tuttavia di una differenza che non produce nessun effetto pratico.

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

**Calcolo del calore latente
 mediante entalpie**



$$Ql = 10 \text{ kg a.s.} \times (21,2 - 15,8) \text{ kcal/kg a.s.} = 54 \text{ kcal}^4$$

Notare come la formula che fa uso del Δh ci permette di calcolare il calore ceduto (o sottratto) all'aria indipendentemente dal fatto che si tratti di calore sensibile o calore latente (la formula usata ha la stessa espressione: $m \Delta h$).

Calore totale

Intenderemo per calore totale la somma di calore sensibile e calore latente:

$$Q_{tot} = Q_s + Q_l$$

Il calore totale può allora essere espresso nel seguente modo:

$$Q_{tot} = m c \Delta T + m C_v \Delta X$$

Oppure, usando direttamente le entalpie:

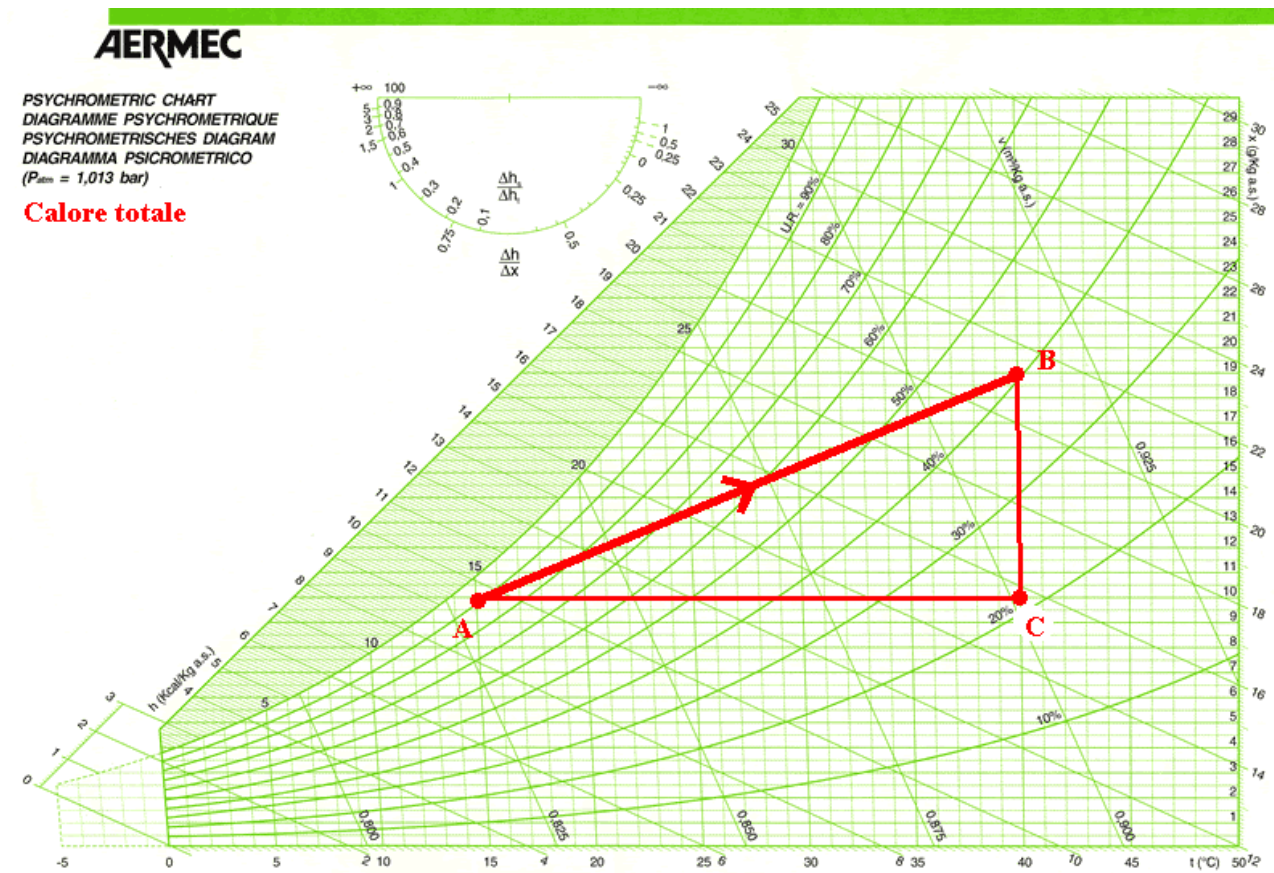
$$Q_{tot} = m \Delta h$$

Facciamo un esempio di calcolo del calore totale facendo uso delle due diverse formule.

⁴ Notare il valore non molto differente da quello precedentemente calcolato con la formula del ΔX .

Esempio 6

Calcolare il calore totale fornito all'aria umida formata da 10 kg di aria secca lungo la trasformazione AB:



La trasformazione AB la si può pensare come somma della trasformazione AC e della trasformazione CB (la trasformazione AC è la “componente sensibile” della trasformazione totale, mentre la trasformazione CB è la “componente latente”).

Il calore totale è dato da:

$$Q_{tot} = Q_s + Q_l = Q_{ac} + Q_{cb} = m c \Delta T + m C_v \Delta X =$$

$$=[10 \text{ kg a.s.} \times 0,245 \text{ kcal/kg a.s.} \times \text{K} \times (40-15)\text{K}] + [10 \text{ kg a.s.} \times 0,596 \text{ kcal/g acqua} \times (19-10)\text{g/kg a.s.}] =$$

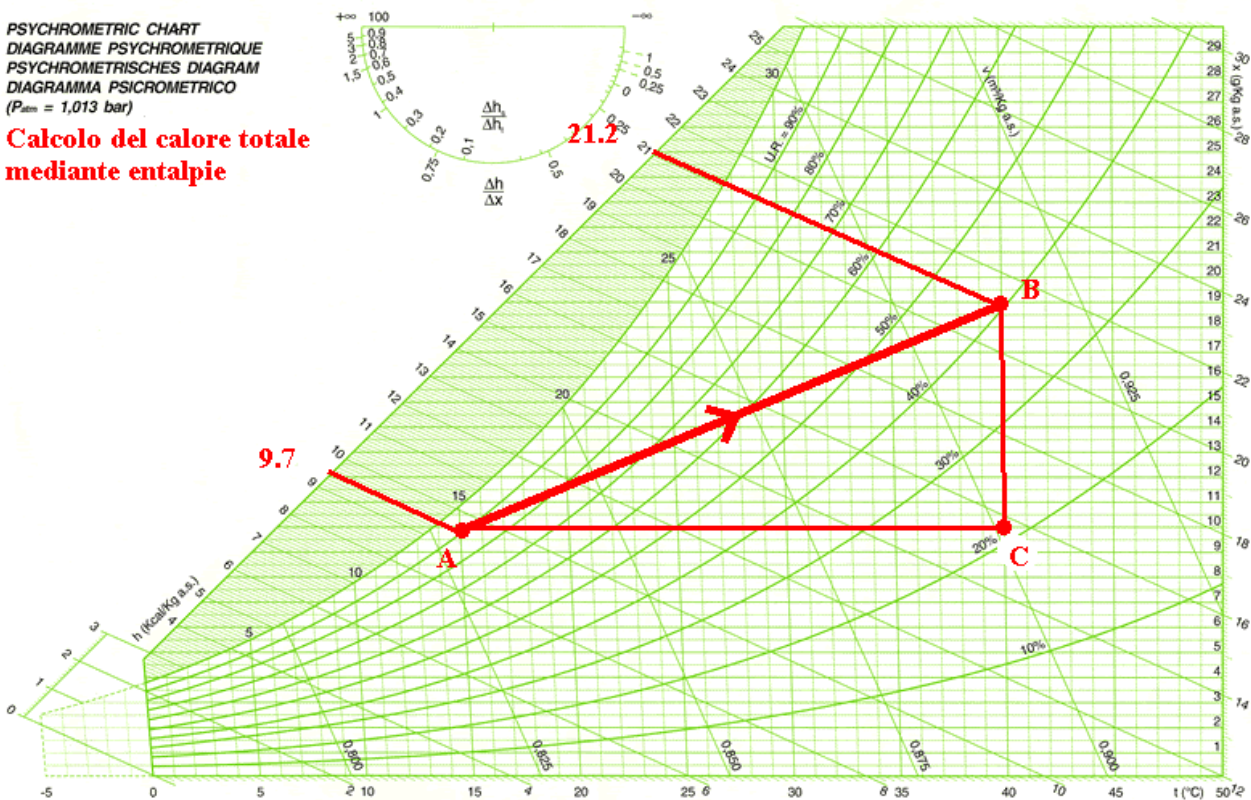
$$= (61,25 + 53,64) \text{ kcal} = \mathbf{114,89 \text{ kcal}}$$

Aniché procedere con le formule del calore latente e del calore sensibile, posso determinare il calore totale fornito all'aria umida partendo dalle entalpie del punto finale e del punto iniziale:

AERMEC

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

**Calcolo del calore totale
 mediante entalpie**



$$Q_{tot} = 10 \text{ kg a.s.} \times (21,2 - 9,7) \text{ kcal/kg a.s.} = 115 \text{ kcal}$$

Potenza termica (o frigorifera)

Sinora si è parlato di scambio termico in termini di quantità di calore; nella pratica progettuale è più opportuno riferirsi alla **potenza** (termica se fornita all'aria, frigorifera se sottratta all'aria).

La potenza è la quantità di calore fornita (o sottratta) nell'unità di tempo:

$$P = Q/t \text{ [kcal/h nel S.T.]} \text{ [kW=kJ/s nel S.I.]}$$

Anche per la potenza si può parlare di potenza sensibile e di potenza latente, che nella somma danno la potenza totale.

Per il calcolo della potenza si possono usare le stesse formule usate per il calore, sostituendo la portata di massa [kg a.s./s o anche, con le opportune conversioni, m³/h] alla massa m [kg].

Facciamo un esempio di calcolo della potenza totale, facendo uso delle diverse formule sin qui viste.

Esempio 7

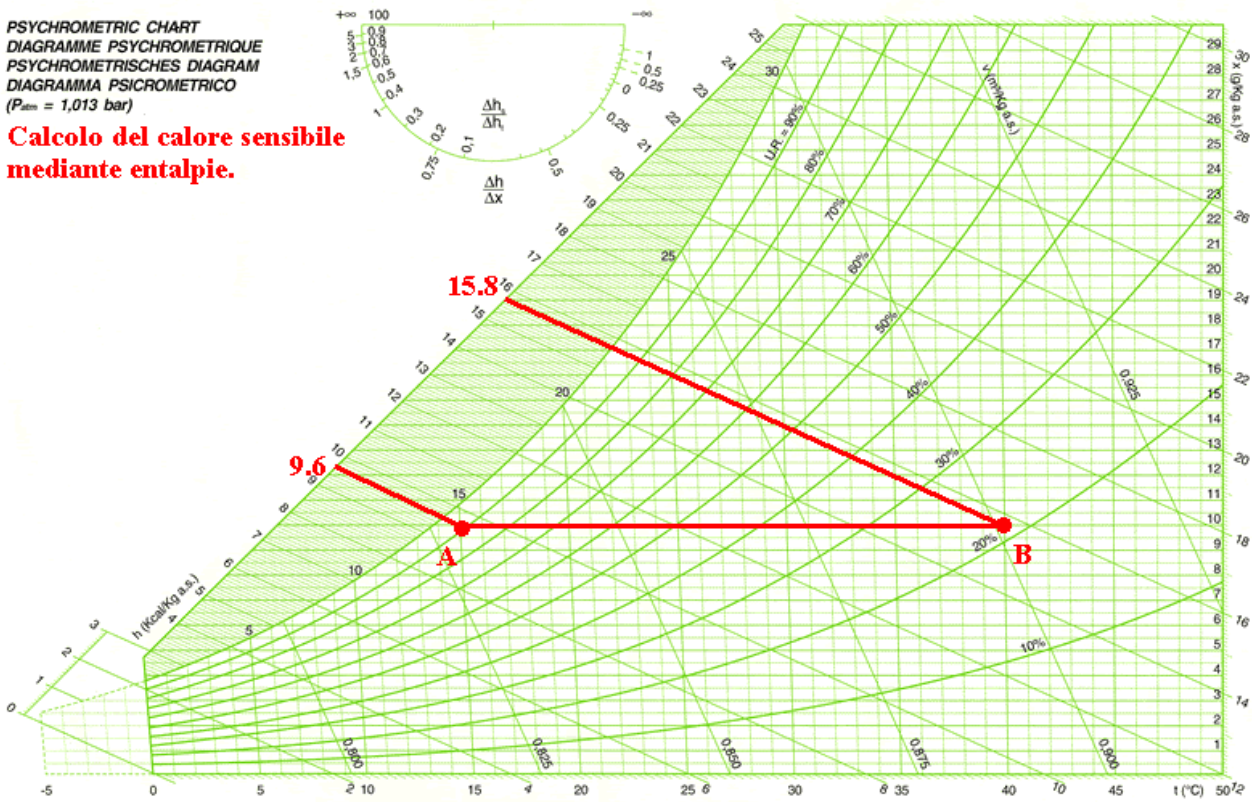
Calcolare la **potenza** termica sensibile da fornire a 3000m³/h per portare le sue condizioni da A a B:

A (T_{bs}=15°C; U.R.=90%)

B (T_{bs}=40°C; U.R.=22%)

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

**Calcolo del calore sensibile
 mediante entalpie.**



Calcoliamo la potenza facendo uso della formula:

$$P = M c \Delta T \quad (M \text{ è portata in m}^3/\text{h}) \quad (c=0.29 \text{ kcal/m}^3\text{K nel S.T.}; c=1.2 \text{ kJ/m}^3\text{K nel S.I.})^5$$

$$P = 3000\text{m}^3/\text{h} \times 0.29 \text{ kcal/m}^3\text{K} \times (40-15)\text{K} = 21750 \text{ kcal/h (S.T.)}$$

$$P = 3000\text{m}^3/\text{h} \times 1.2 \text{ kJ/m}^3/\text{K} \times (40-15)\text{K} / 3600 \text{ s} = 25 \text{ kW (S.I.)}$$

Per realizzare la trasformazione AB è quindi necessaria una macchina capace di fornire 25 kW termici.

Adesso calcoliamo la potenza a partire dalle entalpie individuate sul diagramma psicrometrico:

$$P = M \Delta h = 3000 \text{ m}^3/\text{h} \times 1.2 \text{ kg/m}^3 \times (15,8-9,6) \text{ kcal/kg} = 22320 \text{ kcal/h}^6 \text{ (S.T.)}$$

Per passare al Sistema Internazionale basta fare:

$$P \text{ (kW)} = P \text{ (kcal/h)} / 860 = 25,9 \text{ kW}$$

⁵ I valori del calore specifico dell'aria umida riferiti al m³ si ottengono a partire da quelli relativi al kg, passando per il peso specifico dell'aria umida: 1.2 kg/m³ (valore medio utilizzato nella pratica).

⁶ La leggera (ma ininfluenza ai fini pratici) differenza dal valore trovato con la formula $M c \Delta T$, potrebbe dipendere da piccole imprecisioni nell'individuazione dei valori delle entalpie sul diagramma.

Ora che abbiamo una certa dimestichezza su come ci si muove sul diagramma psicrometrico, possiamo passare ad uno studio più dettagliato dei vari trattamenti che si possono effettuare sull'aria umida, portando anche vari esempi pratici.

Raffreddamento senza deumidificazione

Se la temperatura della batteria fredda è superiore alla temperatura di rugiada dell'aria trattata, non avviene sulla batteria alcuna condensazione: la batteria sottrae all'aria soltanto calore sensibile.

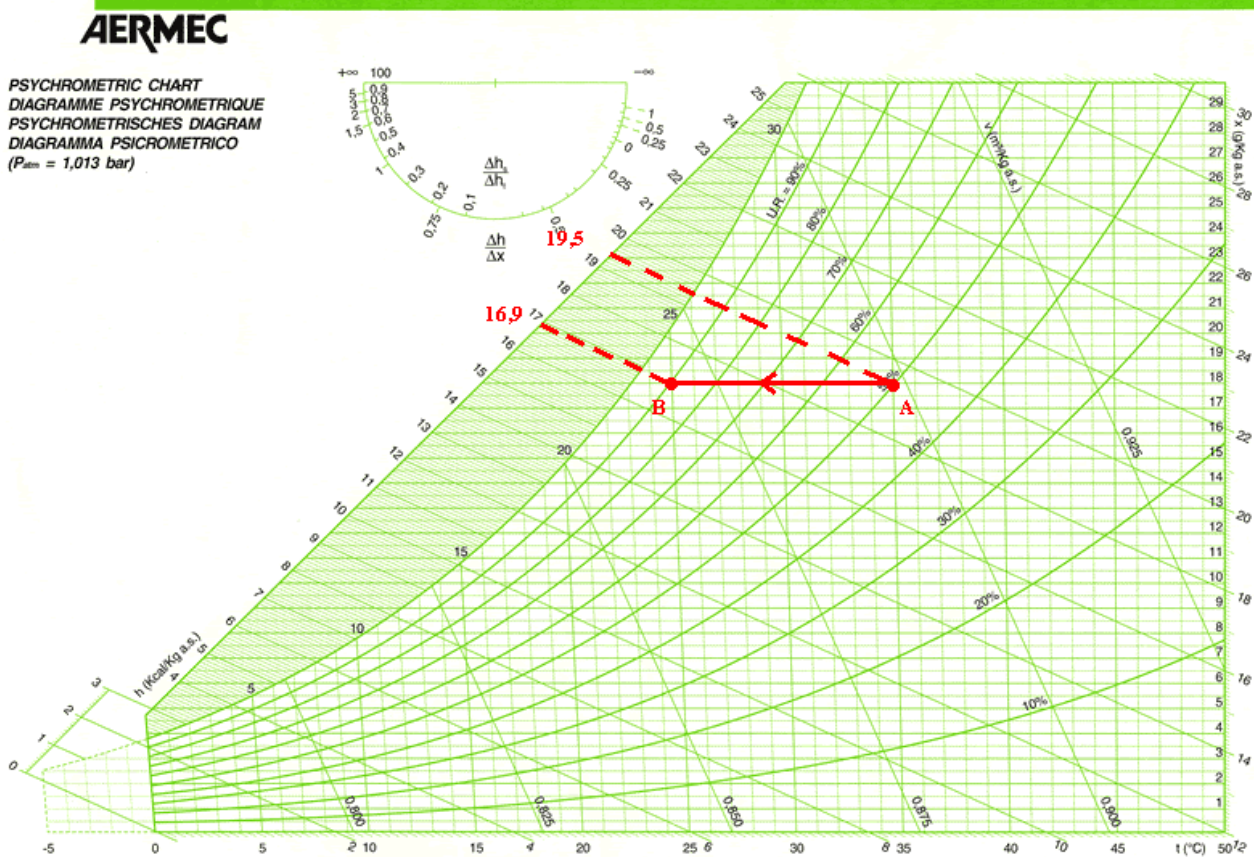
Con "temperatura della batteria" si intende indicare la temperatura media della superficie delle alette che con buona approssimazione è pari a:

$$T_{\text{batteria}} = (T_{\text{uscita acqua}} - T_{\text{ingresso acqua}})/2 + 1^{\circ}\text{C}.$$

Facciamo qualche esempio di trasformazioni di raffreddamento senza deumidificazione.

Esempio 8

Una portata d'aria di 1000m³/h viene raffreddata dal punto A(35°C; 50%) al punto B(25°C; 90%). Calcolare la potenza frigorifera della batteria e la quantità di acqua condensata sulla batteria fredda.



La Potenza frigorifera della batteria è pari a:

$$P_f = 1000\text{m}^3/\text{h} \times 1,2\text{kg}/\text{m}^3 \times (19,5-16,9) \text{ kcal}/\text{kg} = 3120 \text{ kcal}/\text{h} \quad (3,6 \text{ kW})$$

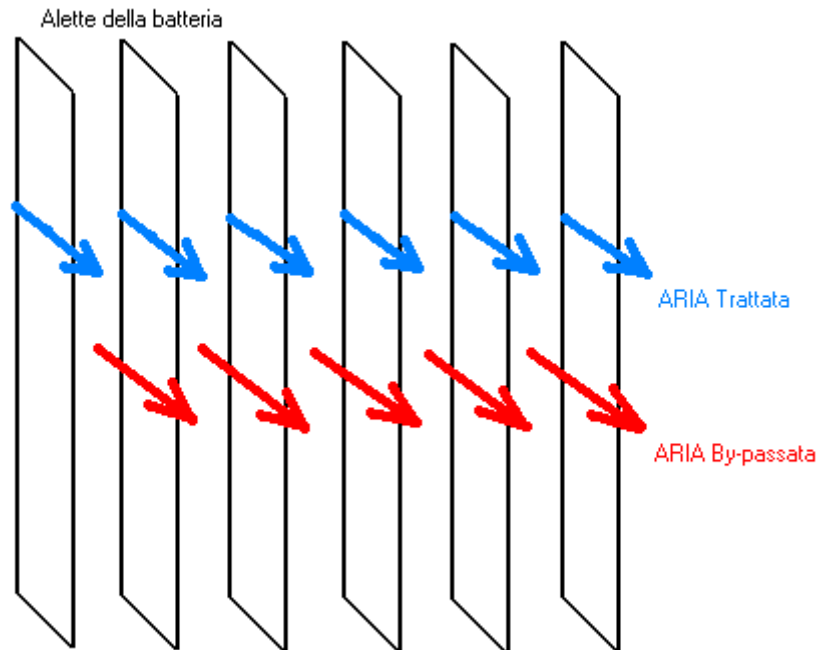
Tale potenza frigorifera è solo sensibile, visto che l'aria non scende al di sotto della temperatura di rugiada (che per le condizioni date è pari a circa 23°C).

Poiché non c'è componente latente della potenza frigorifera, non si avrà formazione di condensa sulla superficie della batteria e non si ridurrà l'umidità specifica dell'aria trattata ($\Delta x=0$).
 Se vogliamo ridurre il contenuto di vapore dell'aria umida, occorre abbassare la temperatura della batteria al di sotto della temperatura di rugiada: questo risultato lo possiamo ottenere solo riducendo la temperatura dell'acqua refrigerata che attraversa i ranghi della batteria di scambio termico.

Raffreddamento con deumidificazione

Per ottenere l'effetto di deumidificazione per raffreddamento è necessario che la temperatura della batteria sia inferiore alla temperatura di rugiada relativa all'aria da trattare; in tal modo, parte dell'umidità contenuta nell'aria condensa sulle alette della batteria fredda e si ottiene, così, la deumidificazione.

Al fine di una semplice rappresentazione sul diagramma psicrometrico della trasformazione di raffreddamento con deumidificazione, si può trattare la trasformazione come se si trattasse di una **miscela tra due quantità d'aria**: l'aria che entra in contatto con le alette della batteria (aria trattata) e l'aria che attraversa la batteria senza lambirne in alcun modo le alette (aria by-passata), restando così alle condizioni iniziali senza subire alcuna trasformazione:



Definiamo fattore di by-pass il rapporto tra la portata d'aria di by-pass e la portata totale.
 Dei parametri che contribuiscono a determinare il valore del fattore di by-pass parleremo in seguito.
 Per adesso concentriamo la nostra attenzione su un esempio relativo ad una trasformazione di raffreddamento con umidificazione.

Esempio 9

Una batteria è attraversata da acqua refrigerata avente in ingresso una temperatura pari a 7°C ed in uscita pari a 12°C ; il fattore di by-pass della batteria è $bpf=0.04$.
 Le condizioni dell'aria a monte della batteria sono: $A(35^{\circ}\text{C}; 50\%)$.
 La portata d'aria è pari a $1000\text{m}^3/\text{h}$.

Determinare il punto rappresentativo dell'aria a valle della batteria, facendo uso del diagramma di Mollier.

Innanzitutto determino la temperatura media delle alette della batteria:

$$T_{batteria} = (T_{ingresso\ acqua} + T_{uscita\ acqua}) / 2 + 1^{\circ}C = (7 + 12) / 2 + 1 = 10.5^{\circ}C$$

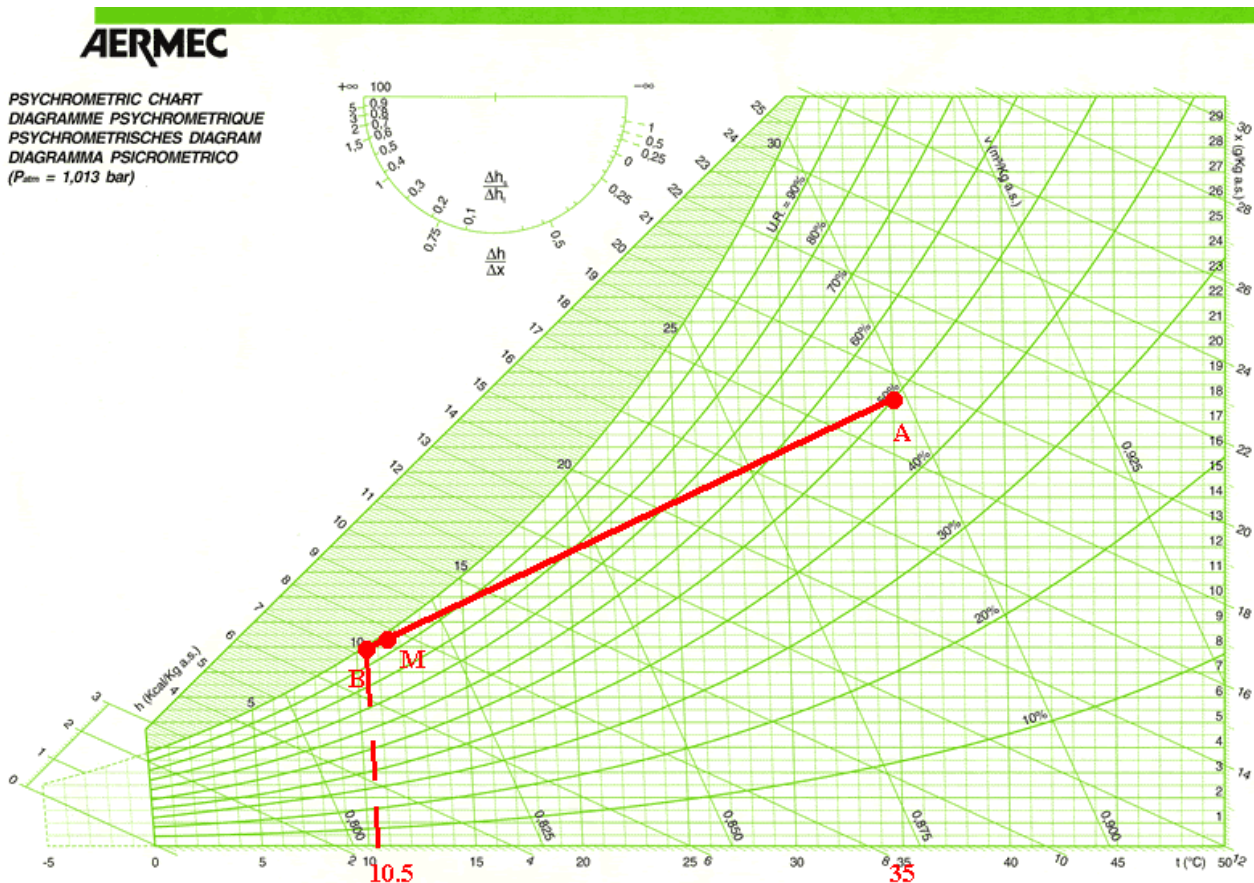
Notare che la temperatura di batteria è inferiore alla temperatura di rugiada relativa all'aria da trattare (che è pari a 23°C); questo ci assicura la deumidificazione dell'aria (parte del calore asportato all'aria sarà di tipo latente).

La trasformazione di raffreddamento con deumidificazione la tratteremo come una miscela tra l'aria by-passata (che è alle condizioni A, visto che attraversa la batteria senza subire alcuna trasformazione) e l'aria trattata B (aria che lambisce le alette della batteria portandosi alla temperatura di batteria e sulla curva di saturazione, visto che sulle alette avviene la condensazione dell'umidità contenuta nell'aria).

La portata di aria di by-pass è data da: $Q_{bp} = bpf \times Q_{tot} = 0.04 \times 1000 = 40\text{m}^3/\text{h}$.

I restanti: $1000 - 40 = 960\text{m}^3$ sono i metri cubi che in un'ora lambiscono le alette della batteria.

Sul diagramma psicrometrico si opererà come per qualsiasi miscela tra due quantità di aria:



Poiché l'aria A è il 4% dell'aria totale, dividendo in 100 parti uguali il segmento AB il punto di miscela M si troverà a 4 parti di distanza dal punto B (di maggiore portata) ($bpf = BM/AB$).

Come si può notare, è stata tolta umidità specifica all'aria:

$$\Delta X = 18 - 8 = 10\text{g/kg a.s.}$$

Una portata di $1000\text{m}^3/\text{h}$ corrisponde ad una portata in kg/h pari a:

$$Q = 1000\text{m}^3/\text{h} \times 1.2\text{kg/m}^3 = 1200\text{kg/h}$$

L'umidità asportata in un'ora sarà quindi pari a:

$$\Delta X' = 10\text{g/kg} \times 1200\text{kg/h} = 12000\text{g/h} = 12 \text{ litri/h}$$

Si può naturalmente calcolare la potenza frigorifera necessaria alla trasformazione AM, mediante la formula:

$$P = Q \Delta h = 1000\text{m}^3/\text{h} \times 1.2\text{kg/m}^3 \times (19.5-7.8)\text{kcal/kg} = 14040\text{kcal/h} = 14040\text{frig/h} = 16.32 \text{ kW}$$

Poiché è noto il ΔT dell'acqua che scorre all'interno dei tubi della batteria (pari a: $12-7=5\text{K}$), è possibile ricavare la portata dell'acqua, a partire dalla potenza totale sottratta all'aria (per il bilancio energetico, la potenza sottratta all'aria deve essere pari alla potenza fornita all'acqua).

$$P_{\text{acqua}} = P_{\text{aria}} = 14040\text{kcal/h} = (\text{formula per l'acqua}) = mc\Delta T$$

Pertanto:

$$m = 14040 \text{ (kcal/h)} / (1\text{kcal/kgK} \times 5\text{K}) = 2808 \text{ kg/h} = 2808 \text{ l/h} = 0.78 \text{ l/s}$$

è la portata d'acqua refrigerata che attraversa la batteria.

Determinazione del fattore di by-pass di una batteria alettata

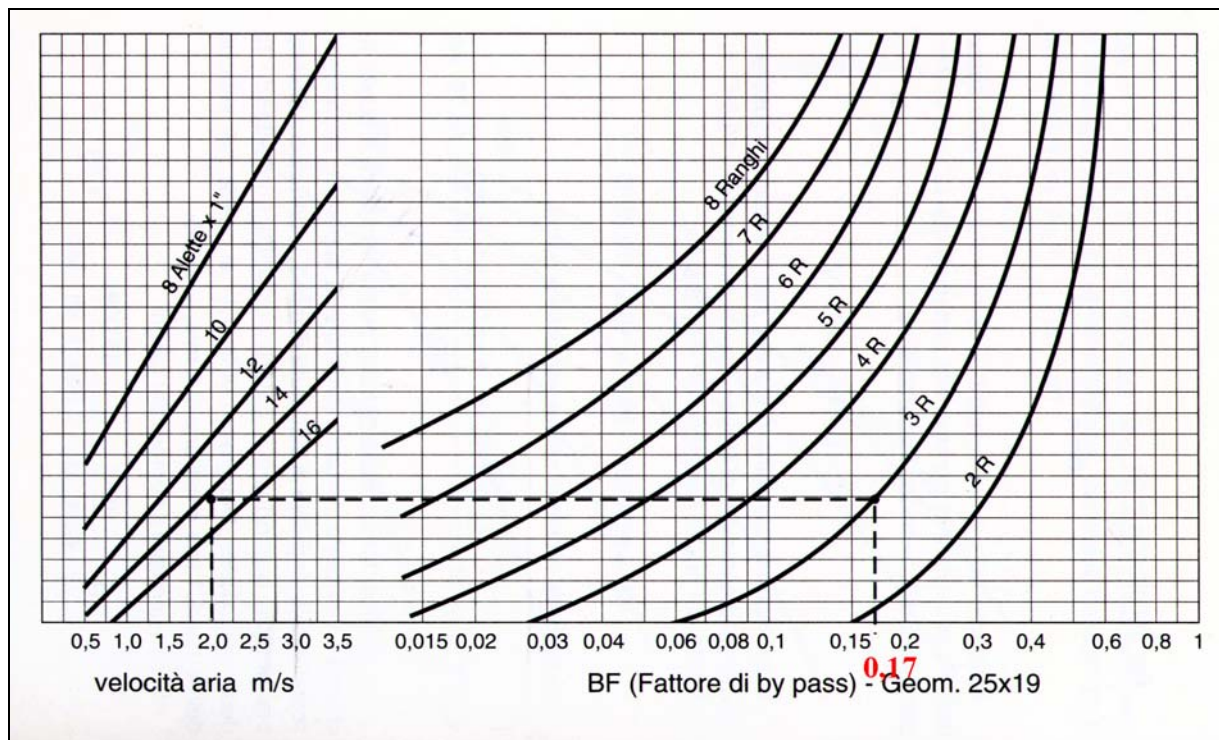
Il fattore di by-pass di una batteria alettata dipende dalla geometria della batteria e dalla velocità dell'aria trattata. I parametri geometrici da cui il bpf dipende sono:

- Passo trasversale St (è la distanza tra due tubi adiacenti di uno stesso rango)
- Passo longitudinale Sl (è la distanza tra due ranghi adiacenti)
- Numero di alette per pollice
- Numero di ranghi

Per determinare il fattore di by-pass è possibile fare uso del diagramma seguente, relativo ad una batteria a tubi sfalsati di geometria 25×19 ($St=25\text{mm}$; $Sl=19\text{mm}$):

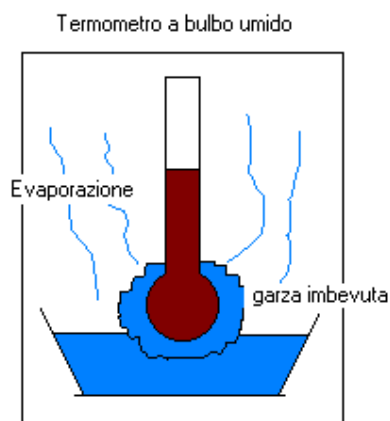
Dati: $St=25\text{mm}$; $Sl=19\text{mm}$; velocità aria= 2m/s ; n° di alette per pollice:14; n° Ranghi batteria: 3

Risultato: bpf=0.17

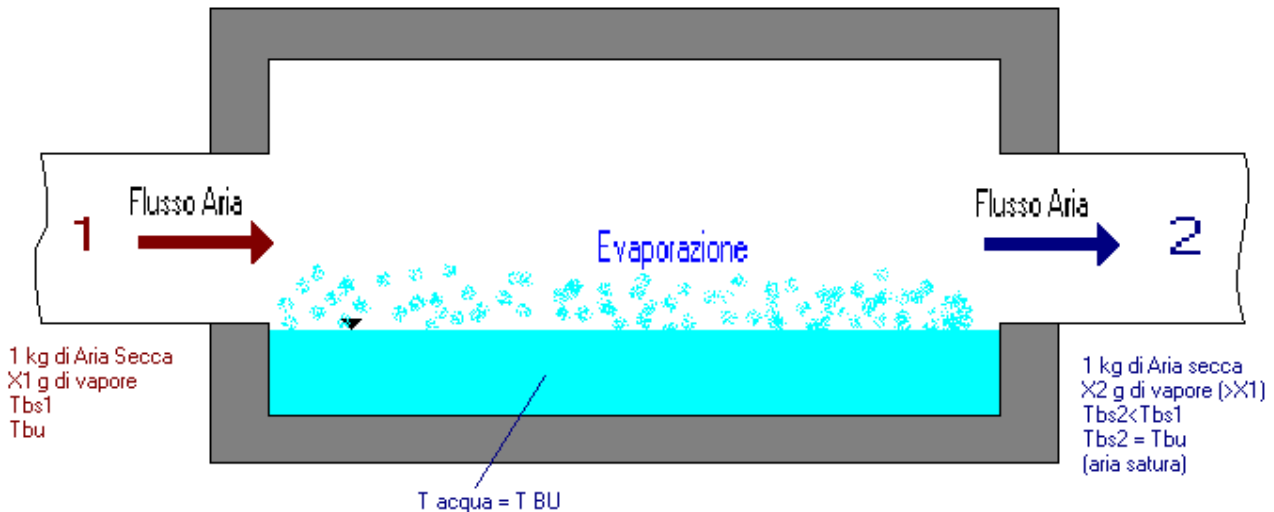


Saturazione adiabatica dell'aria umida

Abbiamo visto che la garza imbevuta dello psicrometro di Assmann si porta alla temperatura di bulbo umido relativa all'aria che la investe; questo vuol dire che, a regime, tutta l'acqua della vaschetta si porta alla temperatura di bulbo umido relativa all'aria che la investe.



Analogamente, anche l'acqua contenuta nel saturatore adiabatico mostrato in figura si porterà, a regime, alla temperatura di bulbo umido dell'aria che la investe:

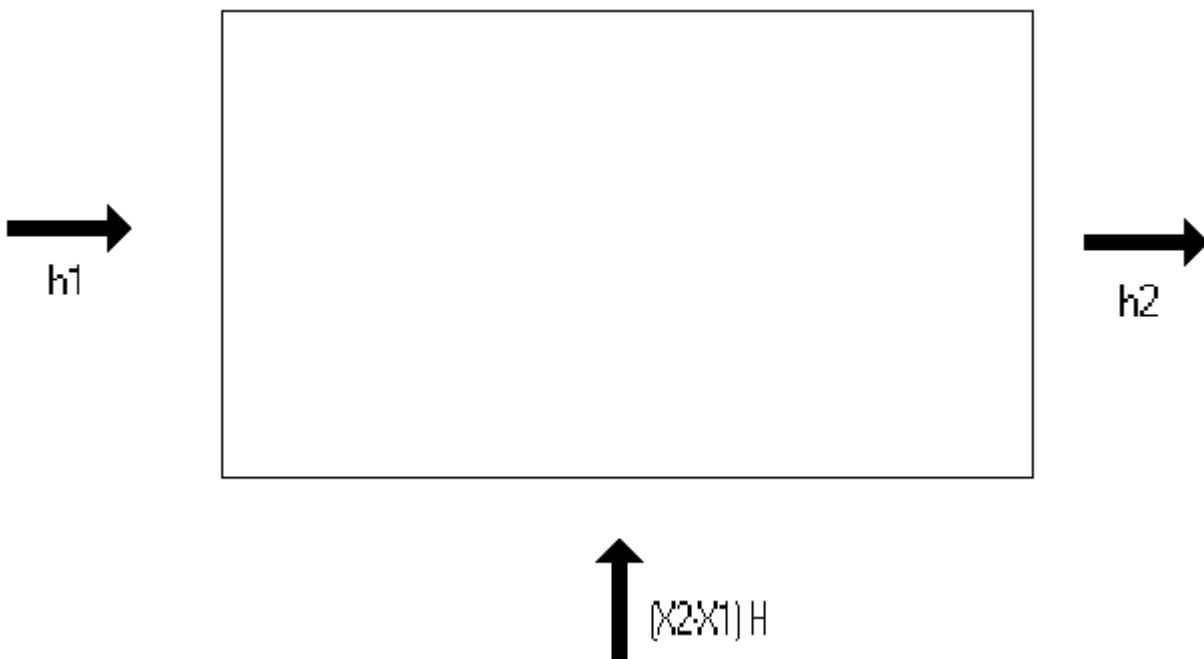


Le pareti del saturatore siano adiabatiche, non vi sia cioè scambio termico con l'ambiente esterno. La trasformazione 12 sarà, quindi, adiabatica; l'aria entra nel saturatore adiabatico alle condizioni 1 e incrementa la propria umidità specifica portando con sé dell'acqua che evapora dalla vaschetta; supponendo il saturatore lungo abbastanza (in teoria di lunghezza infinita) l'aria esce satura alle condizioni 2 ($T_{bs2}=T_{bu}$).

La temperatura a bulbo secco dell'aria scende da T_{bs1} a $T_{bs2}=T_{bu}$: ciò significa che l'acqua sottrae all'aria del calore sensibile; l'acqua fornisce inoltre all'aria del calore latente sotto forma di vapore aggiunto all'aria. Naturalmente, essendo il processo adiabatico, il calore sensibile sottratto all'aria è uguale al calore latente ad essa ceduto (l'aria non acquista né cede calore).

Facciamo il bilancio entalpico del saturatore, relativamente al kg di aria secca:

$$h_1 + (X_2 - X_1) H = h_2$$



$(X_2 - X_1)H$ è l'entalpia contenuta negli $X_2 - X_1$ grammi di acqua liquida alla temperatura pari a T_{bu} che dalla vaschetta vanno ad aggiungersi all'aria da 1 a 2.

$(X_2 - X_1)H$ ⁷ è l'entalpia di pochi grammi d'acqua liquida e vale molto poco, al punto che si può trascurare rispetto ad h_1 .

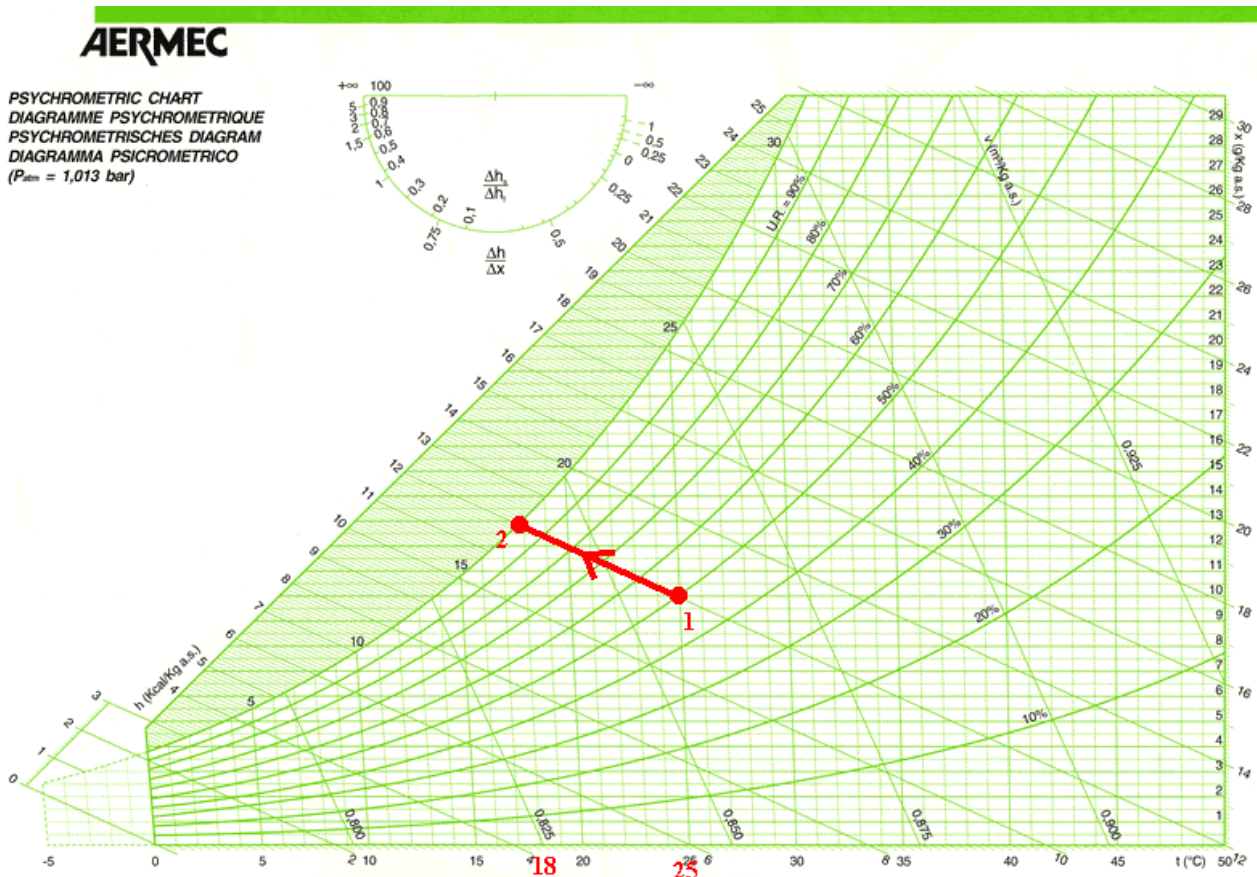
Si può pertanto ritenere che sia: $h_2 = h_1$, e che, quindi, il processo di saturazione adiabatico sia anche isoentalpico.

Notare che all'aria viene sottratto calore sensibile, essendo l'acqua più fredda dell'aria.

L'acqua fornisce però all'aria del calore latente.

Esempio 10

Dimostrare che $(X_2 - X_1)H$ è trascurabile rispetto ad h_1 – e che, quindi, la saturazione adiabatica è assimilabile ad una isoentalpica – , facendo uso del diagramma psicrometrico.



L'acqua della vaschetta del saturatore adiabatico si trova alla T_{bu} relativa all'aria entrante, cioè a 18°C.

A 18°C l'entalpia specifica dell'acqua liquida vale: $H = 18$ kcal/kg.

I grammi di acqua che vanno a saturare l'aria da 1 a 2 sono per kg di aria secca:

$$X_2 - X_1 = 13 - 10 = 3 \text{ g/kg a.s.}$$

Pertanto è: $(X_2 - X_1)H = 0.003 \text{ kg} \times 18 \text{ kcal/kg} = 0.054 \text{ kcal}$, trascurabile rispetto ad $h_1 = 12 \text{ kcal}$.

⁷ H è l'entalpia specifica dell'acqua liquida e vale, ad una temperatura intorno ai 20°C (temperatura indicativa):

$$H = 20 \text{ kcal/kg}$$

$$\text{infatti: } m c_p \Delta T = m \Delta H: 1 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C} \times (20 - 0)^\circ\text{C} = H(20^\circ\text{C}) - H(0^\circ\text{C}) \Rightarrow H(20^\circ\text{C}) = 20 \text{ kcal/kg}$$

Umidificazione con acqua

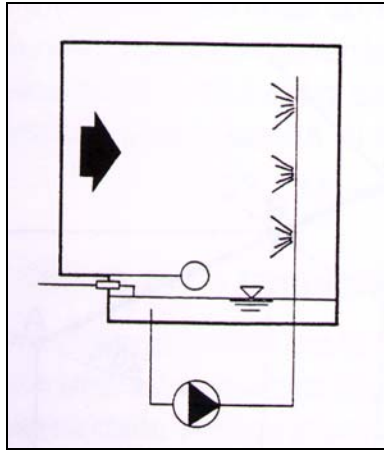
L'aria può essere umidificata mediante spruzzamento di acqua finemente polverizzata.

L'acqua a regime si porta alla temperatura di bulbo umido dell'aria in ingresso e l'umidificazione avviene a bulbo umido costante, quasi isoentalpicamente.

Nella realtà pratica non si arriva alla saturazione dell'aria, visto che l'umidificatore avrà un'efficienza minore del 100% (l'efficienza dell'umidificatore è il rapporto tra il ΔX realmente ottenuto ed il ΔX di saturazione, come vedremo meglio nel prossimo esempio).

Il rendimento di un umidificatore dipende dalla sua geometria e dalla velocità dell'aria.

Una schematizzazione di un umidificatore ad acqua è riportata nella figura seguente:



Esempio11

Una portata di $1000\text{m}^3/\text{h}$ di aria umida alle condizioni A(20°C , 40%) viene fatta passare attraverso un umidificatore ad acqua di efficienza $\varepsilon = 80\%$ ⁸.

Tracciare sul diagramma psicrometrico la trasformazione corrispondente.

Calcolare inoltre la quantità d'acqua fornita all'aria in un'ora.

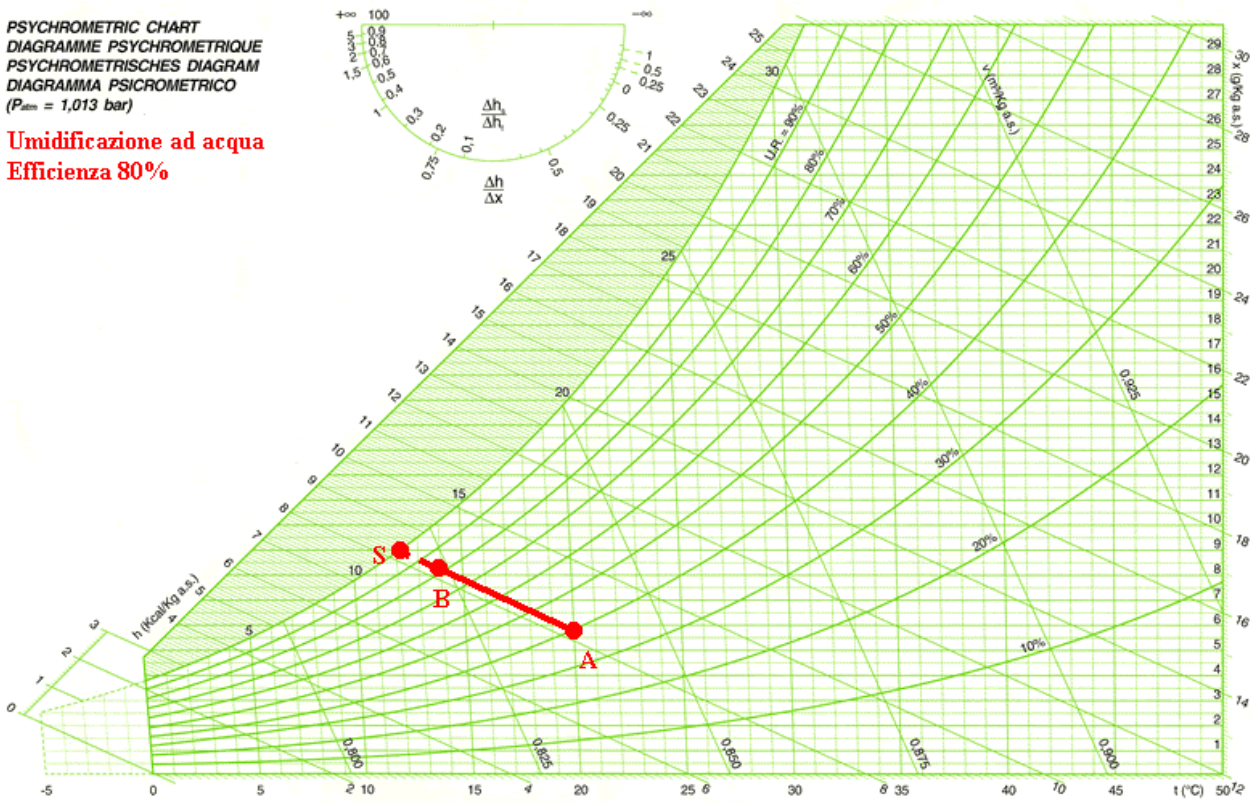
L'umidificazione segue, a regime, una retta ad entalpia costante.

Poiché l'efficienza dell'umidificatore è pari all'80%, la trasformazione AB è rappresentata da un segmento la cui lunghezza è pari all'80% della lunghezza del segmento AS, essendo S il punto ottenuto intersecando l'isoentalpica di umidificazione con la curva di saturazione:

⁸ Per gli umidificatori ad acqua l'efficienza va dal 70% al 90%.

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

Umidificazione ad acqua
Efficienza 80%



Notare che è: $AB=0.80AS$

Per calcolare la quantità d'acqua fornita all'aria, è necessario individuare sul diagramma il ΔX della trasformazione:

$$\Delta X = (8.5 - 6) = 2.5 \text{ g/kg a.s.}$$

La portata d'aria in massa è data da:

$$M = 1000 \text{ m}^3/\text{h} \times 1.2 \text{ kg/m}^3 = 1200 \text{ kg/h}$$

La portata d'acqua fornita all'aria è:

$$M_w = M \times \Delta X = 1200 \text{ kg/h} \times 2.5 \text{ g/kg} = 3000 \text{ g/h} = 3 \text{ litri/ora}$$

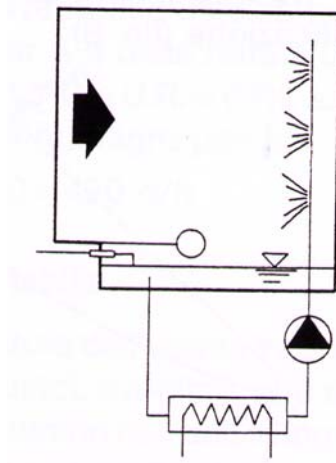
Ogni ora occorre fornire all'aria 3 litri di acqua⁹ per umidificare con efficienza 80%.

Umidificazione con acqua preriscaldata o prerrefrigerata

Abbiamo visto che l'acqua dell'umidificatore si porta, a regime, alla temperatura a bulbo umido dell'aria in ingresso; questo accade se l'acqua che viene spruzzata sull'aria è prelevata da una vaschetta in continuo scambio termico con la sola aria.

Se l'acqua viene riscaldata o refrigerata da uno scambiatore di calore posto a monte degli ugelli spruzzatori (ved. figura seguente), l'umidificazione non sarà adiabatica e non avverrà, quindi, secondo un'isoentalpica (a meno che l'acqua non venga portata proprio alla T_{bu} dell'aria!).

⁹ Questo dato è molto importante per provvedere all'acqua di reintegro dell'umidificatore.



A seconda della temperatura dell'acqua spruzzata sull'aria, avremo diversi andamenti della trasformazione subita dall'aria.

Se la temperatura dell'acqua è superiore alla temperatura a bulbo secco dell'aria (caso A nella figura seguente), l'acqua cederà all'aria del calore sensibile (l'acqua riscalda l'aria) oltre al calore latente dovuto all'umidificazione.

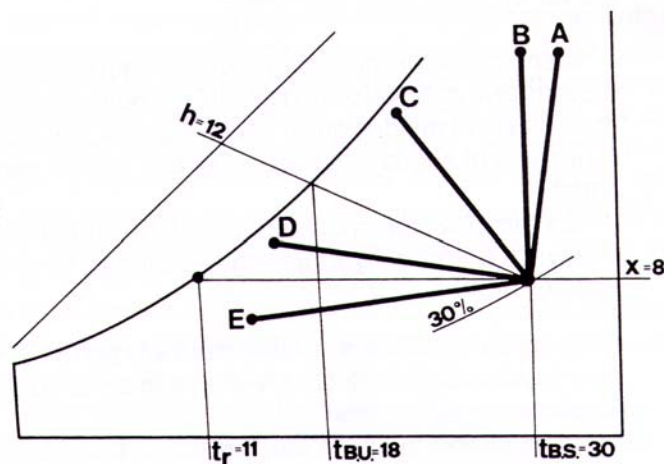
Se l'acqua viene spruzzata alla temperatura a bulbo secco dell'aria si avrà cessione di solo calore latente (caso B):

In tutti i casi in cui la temperatura dell'acqua è inferiore alla temperatura di bulbo secco dell'aria viene sottratto all'aria calore sensibile (casi C, D, E).

Se la temperatura dell'acqua è inferiore alla temperatura di rugiada non riusciamo ad umidificare; per contro, avremo la condensazione di parte dell'umidità dell'aria sulle gocce d'acqua fredda (caso E) e la trasformazione sarà di deumidificazione.

In generale, più è calda l'acqua, maggiore sarà l'effetto di umidificazione dell'aria.

Per individuare l'inclinazione della trasformazione sul diagramma psicrometrico, basta unire il punto iniziale dell'aria con il punto intersezione tra l'isoterma relativa alla temperatura dell'acqua la curva di saturazione.



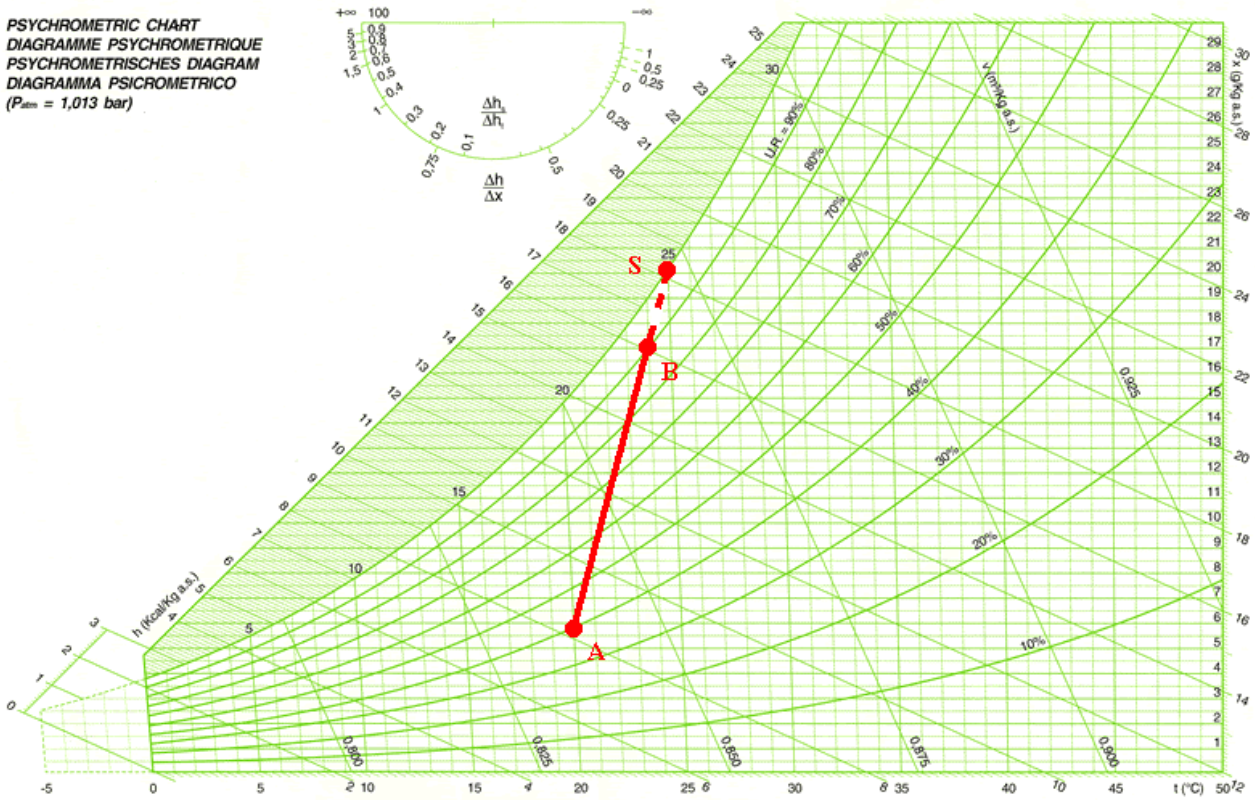
Esempio12

Rappresentare la trasformazione di umidificazione effettuata mediante acqua riscaldata ad una temperatura pari a 25°C.

L'aria entrante sia alle condizioni A(20°C; 40%).

L'efficienza dell'umidificatore sia pari all'80% ($AB=0.80AS$).

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



Notare che l'acqua cede all'aria del calore sensibile, essendo la temperatura dell'acqua superiore alla temperatura a bulbo secco dell'aria entrante.

Umidificazione a vapore

Un tipo di umidificazione molto usato in tutti quei casi in cui è necessario avere condizioni particolari di igiene (si pensi alle applicazioni in ambienti sanitari) è certamente l'umidificazione a vapore.

L'umidificazione avviene soffiando del vapore saturo (temperatura 100°C) direttamente sull'aria da trattare.

L'entalpia specifica del vapor d'acqua alle diverse temperature è data dalla formula:

$$h_v = (596 + 0.46t) \text{ kcal/kg} \quad (0.46 \text{ è il calore specifico del vapore})$$

A 100°C l'entalpia specifica del vapore è pari dunque a (S.T.):

$$h_v = 596 + 0.46 \times 100 = 596 + 46 = 642 \text{ kcal/kg} \quad (2687 \text{ kJ/kg nel S.I.})$$

Ogni kg di vapore saturo a 100°C ha quindi un'entalpia pari a 642 kcal.

Vediamo come si rappresenta una trasformazione AB di umidificazione a vapore saturo sul diagramma psicrometrico.

Sia $\Delta X = (X_B - X_A)$ (g/kg a.s.) l'incremento di titolo subito dall'aria a seguito dell'umidificazione.

Sia $\Delta h = (h_B - h_A)$ (kcal/kg a.s.) l'incremento di entalpia subito dall'aria a seguito dell'umidificazione.

L'incremento di entalpia subito dall'aria è pari all'entalpia del vapore che viene ad essa aggiunto.

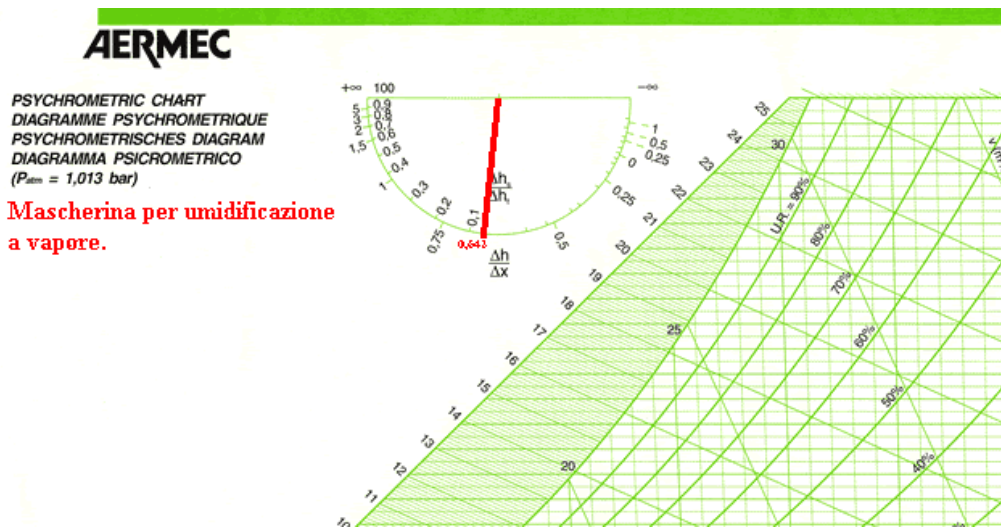
Il vapore aggiunto all'aria è pari proprio al ΔX (è il vapore a fare incrementare il titolo dell'aria).
 Ogni grammo di vapore saturo possiede un'entalpia pari a 0.642 kcal.
 Posso allora scrivere, riferendomi al kg di a.s.:

$$h_B = h_A + 0.642 \Delta X \text{ (notare che dimensionalmente è: } 0,642 \text{ [kcal/g]} \times \Delta X \text{ [g/kg a.s.]} = \text{[kcal/kg a.s.]}$$

Pertanto è:

$$\Delta h = 0.642 \Delta X \Rightarrow \Delta h / \Delta X = 0.642$$

Sul diagramma psicrometrico è presente nella parte alta una mascherina grafica che ci permette di tracciare gli andamenti delle trasformazioni di dato rapporto $\Delta h / \Delta X$ (ved. figura):



In particolare, se uso (come accade in genere) vapore saturo a 100°C, il rapporto $\Delta h / \Delta X$ è pari a 0,642: la trasformazione di umidificazione a vapore avrà allora stessa pendenza della retta ottenuta dalla mascherina.

Poiché tale pendenza non è molto diversa da quella delle trasformazioni isoterme, si può assimilare la trasformazione di umidificazione a vapore ad una isoterma.

Esempio13

Una portata d'aria di 2000m³/h viene umidificata tramite umidificatore a vapore saturo da 100°C.

In particolare, vengono forniti all'aria 13 kg/h di vapore.

L'aria parte dalle condizioni A(25°C; 30%).

Determinare le condizioni dell'aria a valle dell'umidificatore e rappresentare la trasformazione sul diagramma psicrometrico.

Ogni ora il vapore fornisce all'aria la seguente entalpia:

$$H_v = 13 \text{ kg/h} \times 642 \text{ kcal/kg} = 8346 \text{ kcal/h}$$

Ogni ora vengono fornite all'aria 8346 kcal.

Per poter individuare la trasformazione sul Mollier, occorre riferirsi al kg di aria secca.

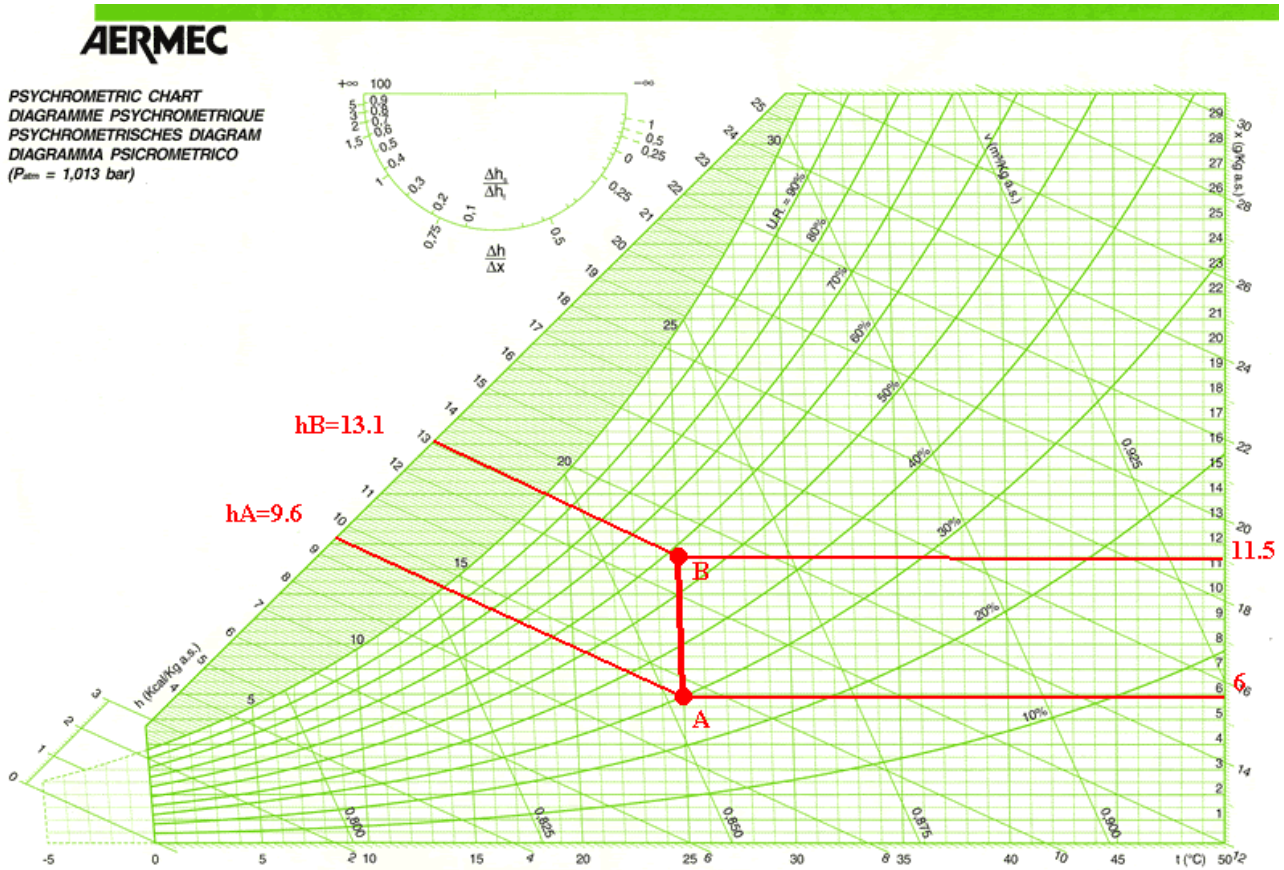
Vogliamo cioè vedere quanti kg di aria secca attraversano l'umidificatore in un'ora.

$$M = 2000 \text{ m}^3/\text{h} \times 1.2 \text{ kg/m}^3 = 2400 \text{ kg a.s./h}$$

Al kg a.s. vengono fornite dal vapore in un'ora:

$$\Delta h = (8346 \text{ kcal/h}) / (2400 \text{ kg a.s./h}) = 3,5 \text{ kcal/kg a.s. (quindi è: } h_B = 9,6 + 3,5 = 13,1 \text{ kcal/kg a.s.)}$$

Noto il Δh , è possibile tracciare la trasformazione sul diagramma psicrometrico (la trasformazione sarà approssimata ad una isoterma):



Si poteva ottenere il punto B anche facendo diverse considerazioni. Tutto il vapore che viene fornito all'aria ce lo ritroveremo come incremento di titolo. I grammi di acqua forniti al kg di aria secca si ottengono facendo:

$$\Delta X = (13 \text{ kg vapore} / 2400 \text{ kg aria secca}) \times 1000 = 5,5 \text{ g}$$

Da titolo 6 si arriva infatti a titolo 11,5.

Adesso faremo un esempio che è esattamente opposto rispetto al problema dell'esempio 13: vedremo, cioè, a partire dalla trasformazione, come si determina la portata di vapore saturo necessaria all'umidificazione voluta.

Esempio14

Data la trasformazione dell'esempio precedente, determinare la portata di vapore necessaria.

Dal diagramma psicrometrico si ricava un ΔX pari a:

$$\Delta X = 11,5 - 6 = 5,5 \text{ g/kg a.s.}$$

Pertanto, sappiamo che occorre fornire 5,5 g per ogni kg di aria secca. Poiché i kg/h di aria secca sono:

$$M = 2000 \text{ m}^3/\text{h} \times 1.2 \text{ kg}/\text{m}^3 = 2400 \text{ kg a.s.}/\text{h}$$

Occorre fornire all'aria:

$$M_{\text{vapore}} = 5,5 \text{ g}/\text{kg a.s.} \times 2400 \text{ kg a.s.}/\text{h} = 13200 \text{ g}/\text{h} = 13,2 \text{ kg}/\text{h}$$

(notare che ritroviamo più o meno i 13 kg/h dell'esempio precedente).

Fattore di carico, retta ambiente

Ora siamo in grado di tracciare sul diagramma ogni tipo di trattamento psicrometrico.

È adesso necessario individuare, in base ai carichi termici che interessano il locale da climatizzare, le condizioni che deve avere l'aria da immettere in ambiente. I trattamenti che l'aria dovrà subire saranno allora quelli necessari ad ottenere le condizioni individuate.

Il carico termico che agisce su un ambiente potrà essere in parte sensibile ed in parte latente; ogni caso è quindi caratterizzato da una combinazione di questi due tipi di carico termico; chiameremo *fattore di carico* il rapporto tra carico sensibile e carico totale (somma di carico sensibile e carico latente):

$$F_c = Q_s/Q_{\text{tot}} = Q_s/(Q_s+Q_l)$$

Il fattore di carico è un numero che fornisce indicazioni importantissime circa la "qualità" del carico termico che agisce sul locale da condizionare: un fattore di carico $F_c=1$ indica un locale sul quale agisce solo carico sensibile; un fattore di carico pari a 0.8 indica che il calore sensibile è pari all'80% del totale (avremo, quindi, per l'80% calore sensibile e per il 20% calore latente)¹⁰; un fattore di carico pari a 0.7 indica che il calore sensibile è pari al 70% del totale (avremo, quindi, per l'70% calore sensibile e per il 30% calore latente)¹¹; il fattore di carico sarà noto una volta calcolato il carico sensibile ed il carico latente (calcolo delle dispersioni o delle rientrate termiche).

Noto il fattore di carico, si può tracciare sul diagramma psicrometrico la *retta ambiente* corrispondente: la retta ambiente è la retta passante per il punto rappresentativo delle condizioni che vogliamo mantenere in ambiente (ad esempio: 25°C; 50%) ed avente la pendenza data dal valore del fattore di carico (per la pendenza si farà uso della mascherina che si trova in alto a sinistra sul diagramma psicrometrico).

La retta ambiente sarà il luogo di tutti i punti che rappresentano le condizioni psicrometriche che deve avere l'aria da immettere nel locale da climatizzare, per mantenerci le condizioni volute.

Tutto sarà più chiaro grazie all'esempio seguente:

Esempio15

Un locale che si vuole mantenere nelle condizioni A(25°C; 50%) è interessato da un carico termico sensibile pari a 144kW e da un carico latente pari a 36kW.

Tracciare la retta ambiente.

La retta ambiente sarà la retta passante per il punto A ed avente la pendenza data dal valore del fattore di carico:

$$F_c = Q_s/Q_{\text{tot}} = Q_s/(Q_s+Q_l) = 144/(144+36) = 144/180 = 0.8$$

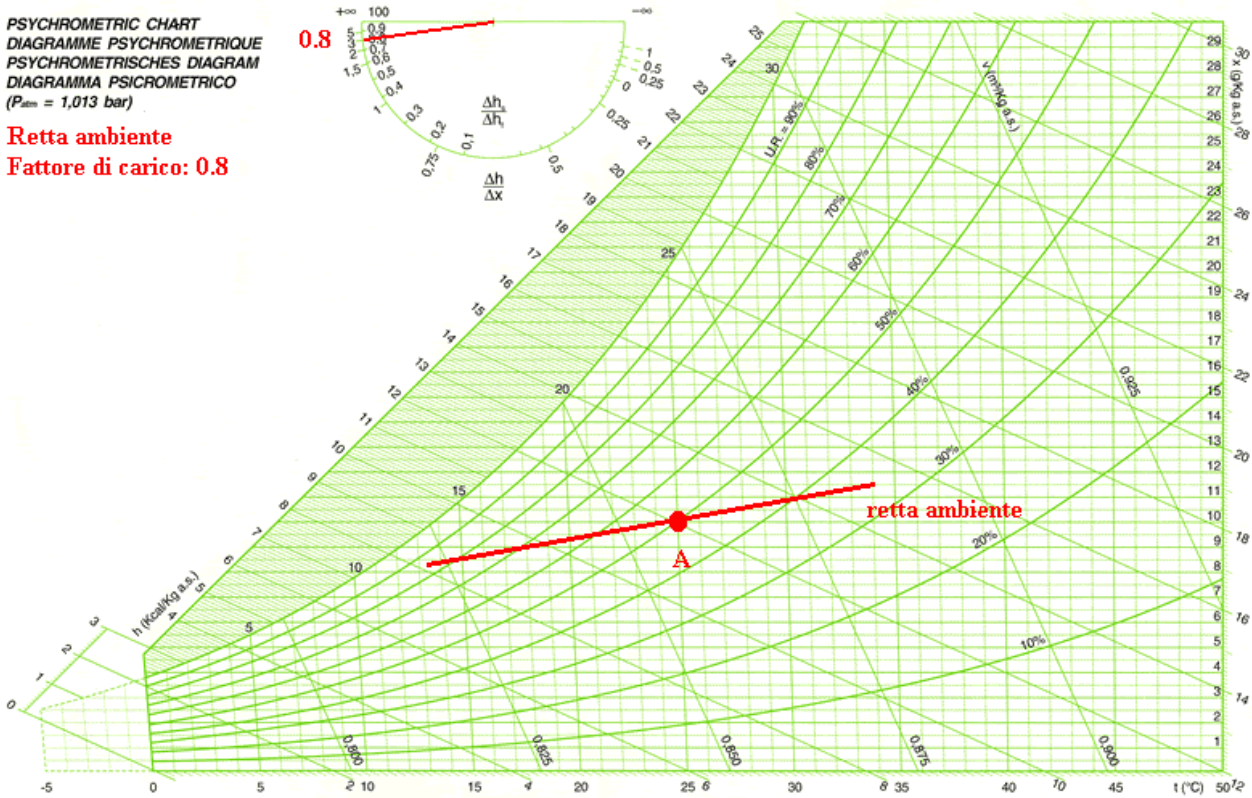
La figura seguente mostra la retta ambiente del caso in esame:

¹⁰ 0.8 è un fattore di carico tipico delle condizioni più comuni (residenziale, negozi, uffici).

¹¹ 0.7 è un fattore di carico tipico di ambienti molto affollati (cinema, teatri, sale congressi etc.).

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

Retta ambiente
Fattore di carico: 0.8

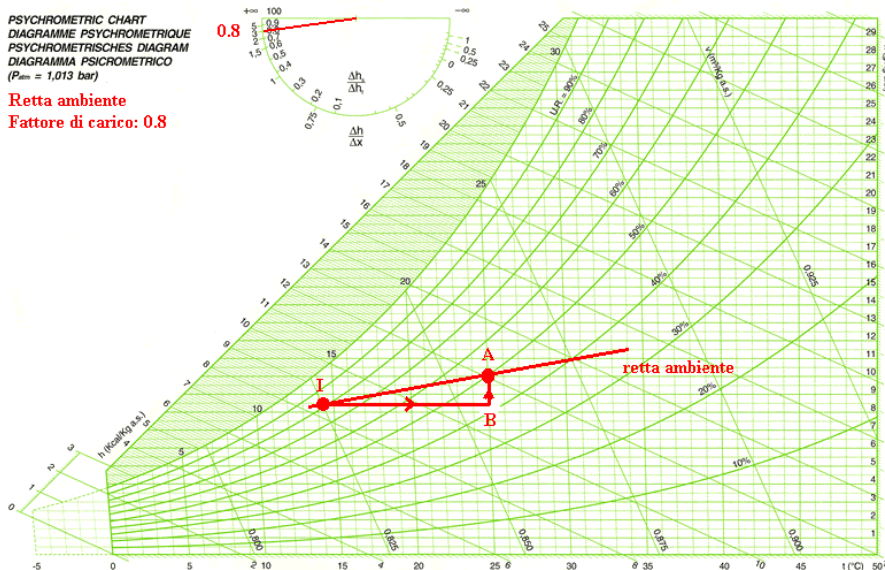


L'aria da immettere nel locale dovrà avere le condizioni psicrometriche rappresentate da uno qualsiasi dei punti del ramo sinistro della retta ambiente; il motivo è molto semplice: l'aria immessa nel locale sarà soggetta al carico termico che il locale subisce; poiché tale carico termico è per l'80% sensibile, se vogliamo che l'aria immessa si porti al punto A è necessario che essa parta da un punto che sia su una retta inclinata dell'80% e passante per A.

Se, ad esempio, il punto di immissione è I (ved. figura seguente) l'aria riceverà 144kW sensibili e 36kW latenti (ci rifacciamo all'esempio precedente, con $F_c=0.8$) e si porterà al punto A voluto:

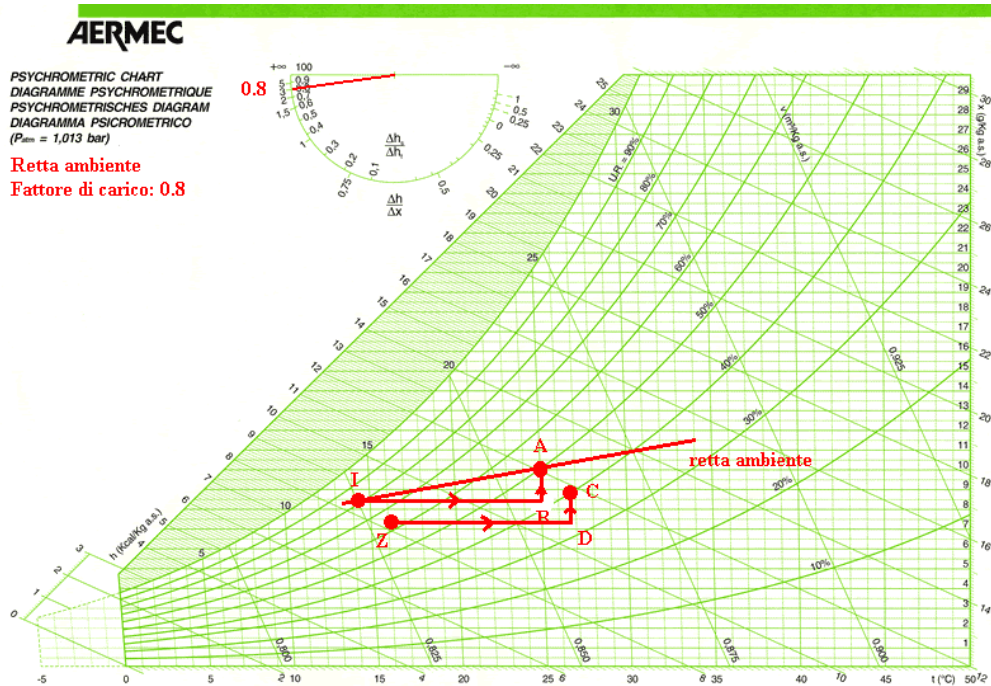
PSYCHROMETRIC CHART
 DIAGRAMME PSYCHROMETRIQUE
 PSYCHROMETRISCHES DIAGRAMM
 DIAGRAMMA PSICROMETRICO
 ($P_{amb} = 1,013 \text{ bar}$)

Retta ambiente
Fattore di carico: 0.8



Il rapporto $IB/(IB+AB)$ è pari a 0.8 ed è proprio in virtù di questo che l'aria "I" si porta in "A" quando viene immessa nel locale da climatizzare.

Se immettessi l'aria partendo da un punto non appartenente alla retta ambiente (ad esempio da Z) l'aria non potrebbe mai arrivare alle condizioni A (ved. fig. seguente):



L'aria immessa Z riceve calore sensibile e calore latente secondo il fattore termico 0.8, tipico del caso in esame. In tal modo le condizioni alle quali si porterà l'aria nel locale saranno quelle rappresentate dal punto C (condizioni ben diverse da quelle volute).

Con questo semplice esempio abbiamo dimostrato che per ottenere le condizioni A in ambiente, occorre partire da un punto della retta ambiente (purché alla sinistra di A).

Ma nasce ancora una domanda: quale punto della retta è più opportuno scegliere per le condizioni di immissione?

Facciamo innanzitutto notare che più il punto di immissione si trova vicino al punto ambiente A, maggiore sarà la portata d'aria da immettere nel locale.

Illustriamo questo concetto con il seguente esempio:

Esempio16

Si vogliono mantenere le condizioni A(25°C, 50%) in un locale sul quale agisce un carico termico così composto:

$Q_{sensibile} = 144kW$

$Q_{latente} = 36kW$

Scegliere due diverse condizioni di immissione sulla retta ambiente e mostrare come la portata d'aria necessaria sia maggiore quanto più ci avviciniamo al punto A.

$$M = 144 \text{ (kW)} / 1.2 \text{ (kJ/m}^3\text{°C)} (25-13) \text{ (°C)} \times 3600 \text{ (s/h)} = 36000 \text{ m}^3\text{/h}$$

Abbiamo così dimostrato che più ci allontaniamo da A, minore è la portata d'aria da immettere (con enormi risparmi dovuti alle minori dimensioni delle macchine e delle canalizzazioni).

Per ridurre la portata d'aria basta quindi immettere aria più fredda possibile: non è però il caso di scendere sotto i 13°C, visto che ciò potrebbe arrecare fastidio agli occupanti che si venissero a trovare in prossimità delle bocchette di immissione.

Nel caso invernale il carico termico sensibile è negativo (abbiamo dispersioni termiche) e quindi l'aria di immissione sarà rappresentata da un punto posto sulla parte della retta ambiente che sta a destra del punto ambiente.

Più calda sarà l'aria immessa, minore sarà la portata necessaria; ma non è il caso di immettere aria a temperatura superiore a 40°C (darebbe fastidio a chi si trovasse in prossimità delle bocchette).

Poiché, salvo in casi particolari, la produzione di vapore all'interno del locale è ridotta, il calcolo delle dispersioni termiche si limita al sensibile e la retta ambiente è orizzontale.

Facciamo allora un esempio di determinazione del punto di immissione nel caso invernale.

La portata d'aria la considero imposta e pari a quella del caso estivo (l'unità di trattamento dell'aria smaltisce stessa portata sia in inverno sia in estate, salvo regolazioni stagionali ben poco diffuse nella pratica).

Esempio17

Si vogliono mantenere le condizioni A(20°C, 50%) in un locale sul quale agisce un carico termico invernale pari a:

$$Q_{\text{sensibile}} = 150 \text{ kW}$$

Determinare le condizioni di immissione, sapendo che la portata è imposta uguale a quella del funzionamento estivo: 36000 m³/h.

La retta ambiente sarà la retta orizzontale (carico solo sensibile) passante per il punto A.

Le condizioni di immissione sono fissate, essendo fissata la portata d'aria:

$$Q = M c \Delta T = 150 \text{ kW}$$

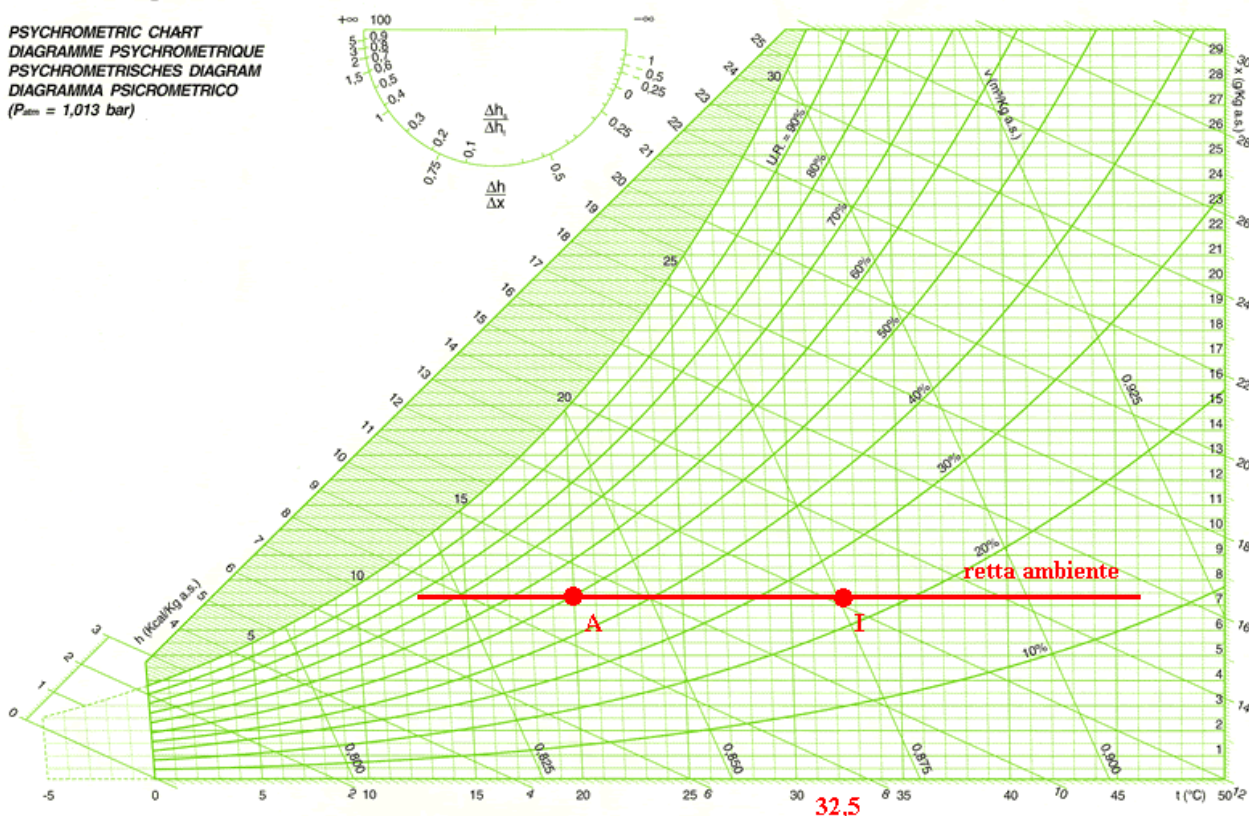
$$Q = 36000 \text{ (m}^3\text{/h)} \times 1.2 \text{ (kJ/m}^3\text{°C)} \times \Delta T \text{ (°C)} / 3600 \text{ (s/h)} = 150 \text{ kW}$$

Pertanto:

$$\Delta T = 150 \times 3600 / 36000 \times 1,2 = \mathbf{12.5^\circ C}$$

Adesso sappiamo che il punto di immissione deve essere a distanza pari a 12.5 °C dal punto A; Possiamo quindi tracciare il punto di immissione sul diagramma di Mollier:

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



Abbiamo visto come si individua il punto di immissione a partire dai carichi che interessano il locale da climatizzare sia nel caso estivo, sia nel caso invernale.

Adesso vedremo come si riescono ad ottenere le condizioni di immissione volute, a partire dalle condizioni dell'aria di aspirazione (sia essa tutta aria esterna, tutta aria di ricircolo o una miscela aria esterna-aria di ricircolo) del sistema di climatizzazione.

Climatizzazione estiva a tutta aria esterna

Riprendiamo l'esempio 16:

Esempio18

Si vogliono mantenere le condizioni A(25°C, 50%) in un locale sul quale agisce un carico termico così composto:

Q_{sensibile} = 144kW

Q_{latente} = 36kW

L'aria esterna si trova alle condizioni E(35°C; 50%).

Individuare i trattamenti da operare sull'aria esterna E per mantenere in locale le condizioni A.

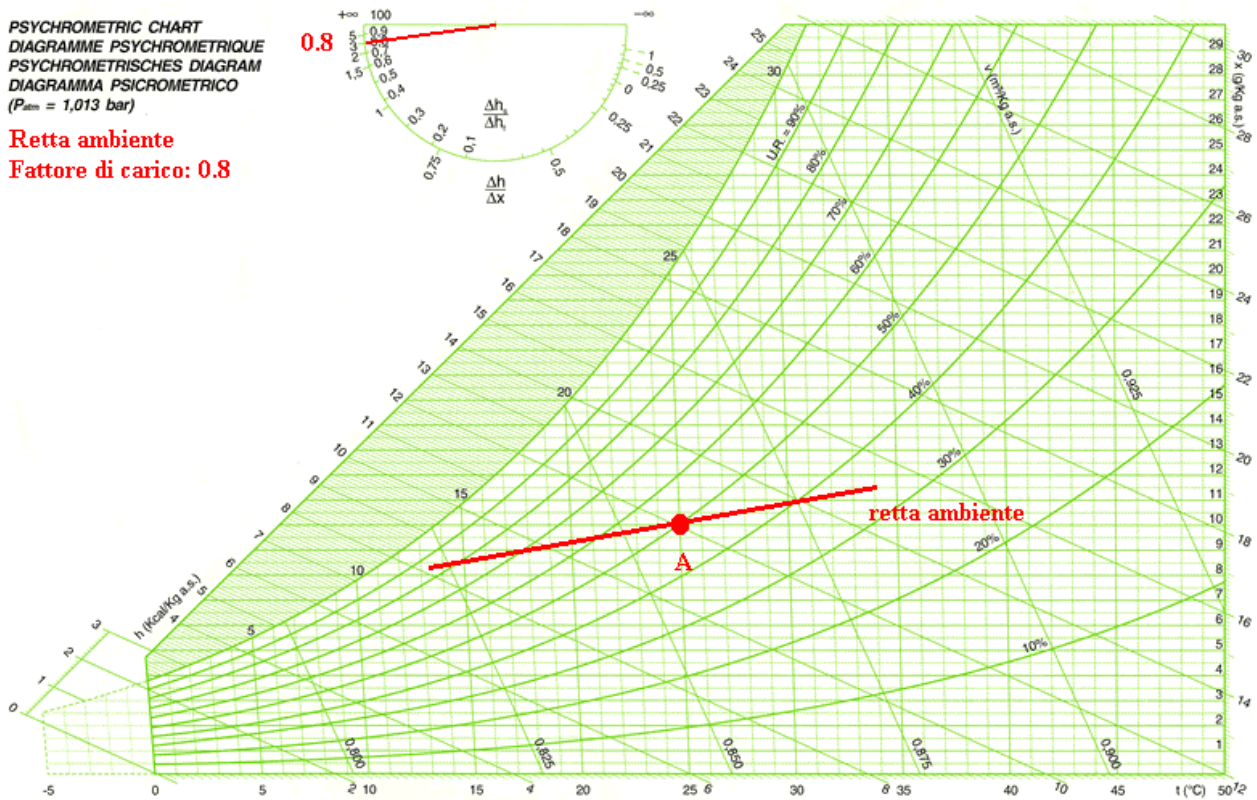
Innanzitutto occorre individuare la retta ambiente, poi, su questa retta, si fissa il punto di immissione I: la macchina per il condizionamento avrà il compito di portare l'aria dalle condizioni esterne E alle condizioni di immissione I.

La retta ambiente è la retta passante per il punto ambiente A ed avente pendenza data dal fattore di carico:

$$F_c = Q_s / Q_t = 144 / (144 + 36) = 0,80$$

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

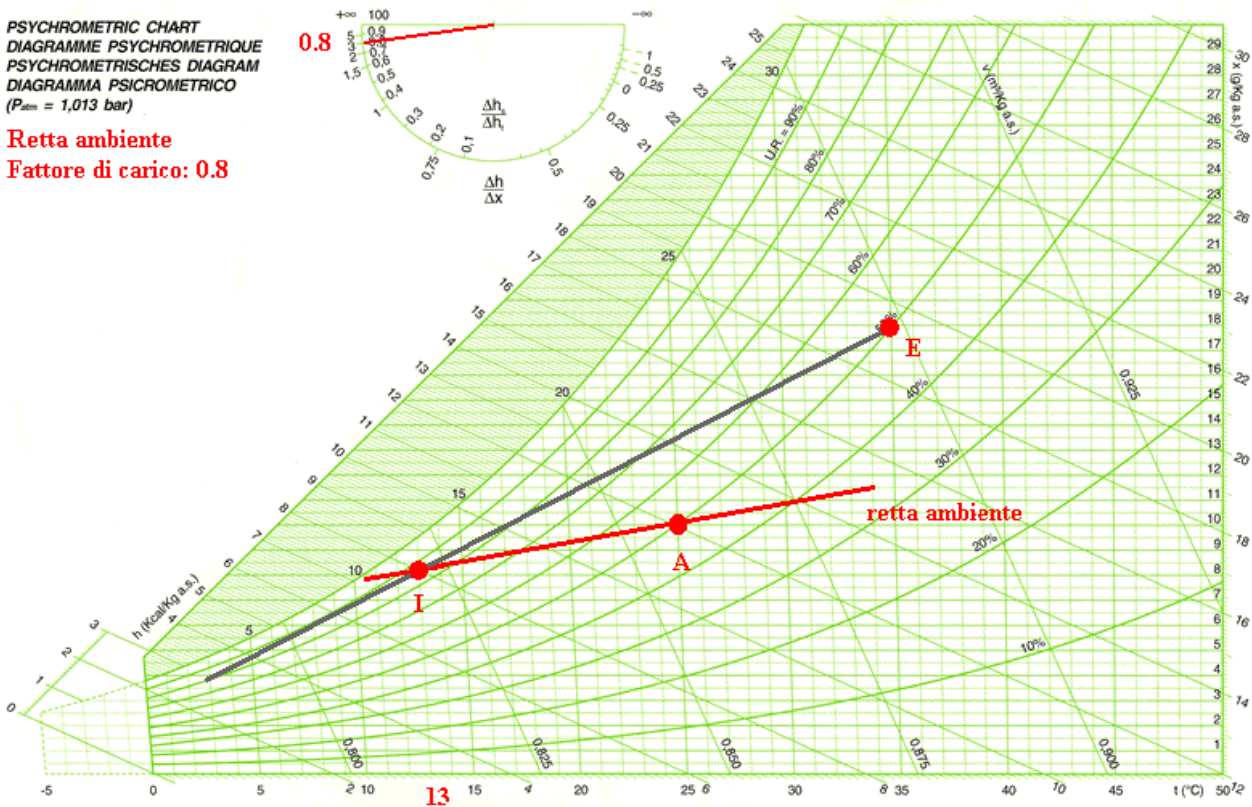
Retta ambiente
Fattore di carico: 0.8



Il punto di immissione è fissato una volta scelta la temperatura dell'aria da immettere: scelgo una temperatura di immissione di 13°C.
 La portata d'aria da immettere è data da:
 $M = 144 \text{ (kW)} / 1.2 \text{ (kJ/m}^3\text{°C)} (25-13) \text{ (°C)} \times 3600 \text{ (s/h)} = 36000 \text{ m}^3\text{/h.}$
 Notare (ved. figura seguente) che la retta per "E" e per "I" non tocca in nessun punto la curva di saturazione:

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

Retta ambiente
 Fattore di carico: 0.8



Questo significa che non è possibile ottenere le condizioni I a partire dalle condizioni E, semplicemente tramite batteria fredda (non esiste batteria fredda in grado di portare l'aria da E ad I). Sarà quindi necessario giungere ad I attraverso due passi successivi:

- Raffreddamento ER mediante batteria fredda;
- Post-riscaldamento RI mediante batteria calda;

Il raffreddamento ER deve essere realizzato mediante una batteria alettata la cui temperatura media delle alette è pari a 10°C ed il cui fattore di by-pass è:

$$bpf = FR/FE = (\text{misuro i segmenti sul diagramma della figura seguente}) = 0,5 \text{ cm}/11,5 \text{ cm} = 0,04$$

Dalla temperatura media della batteria si può risalire alle temperature di ingresso e di uscita dell'acqua di alimentazione della batteria:

$$T_{\text{batteria}} = (T_{\text{ingresso acqua}} + T_{\text{uscita acqua}})/2 + 1^\circ\text{C} = 10^\circ\text{C} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow (T_{\text{ingresso acqua}} + T_{\text{uscita acqua}})/2 = 9^\circ\text{C} \Rightarrow (T_{\text{ingresso acqua}} + T_{\text{uscita acqua}}) = 18^\circ\text{C} \Rightarrow$$

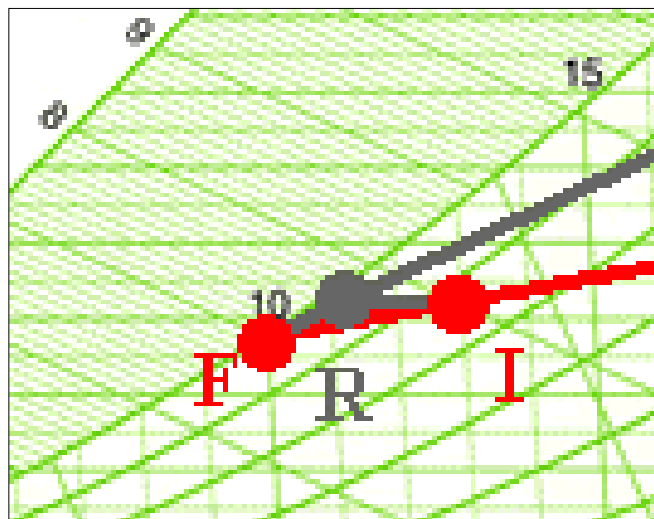
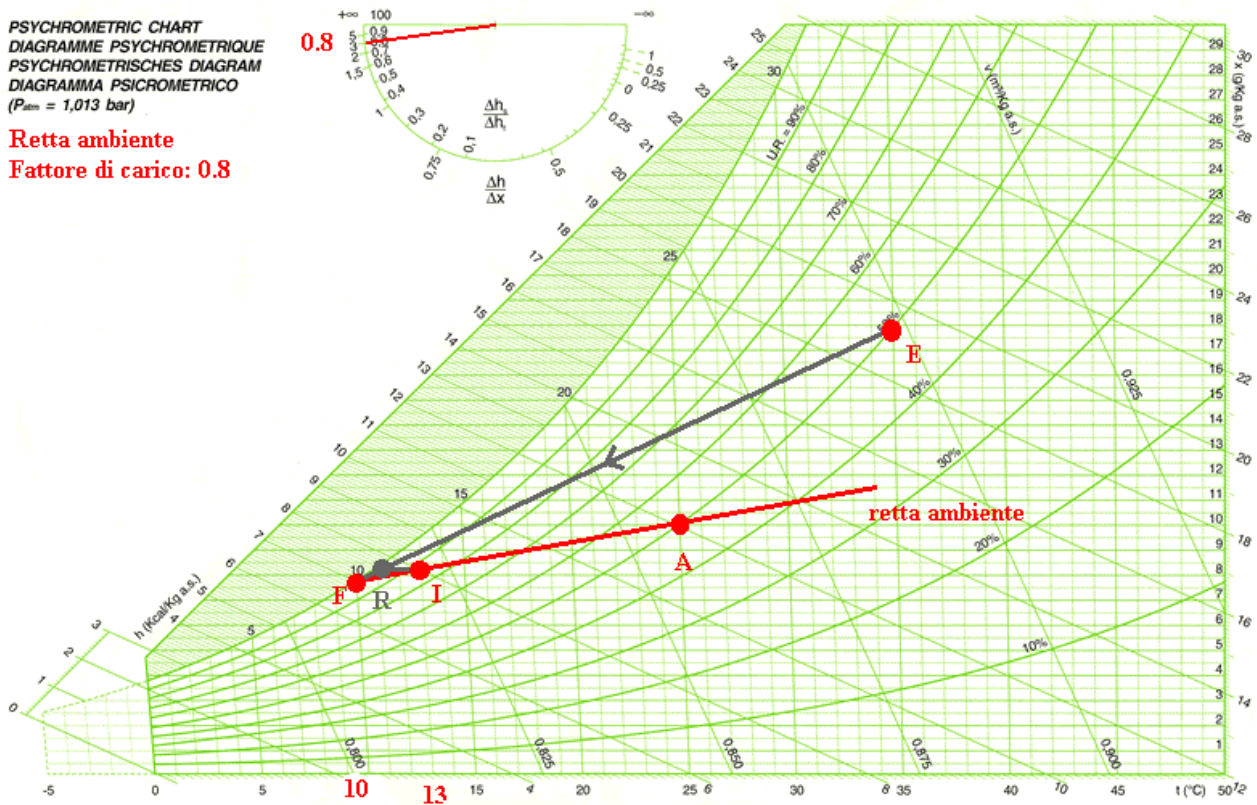
$$\Rightarrow \text{Se pongo: } T_{\text{ingresso acqua}} = 6^\circ\text{C}$$

$$\text{Sarà: } T_{\text{uscita acqua}} = 12^\circ\text{C}$$

Alimenteremo, dunque, la batteria fredda con acqua a 6°C e con un ΔT pari a 6K.

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

Retta ambiente
 Fattore di carico: 0.8



La potenza della batteria fredda sarà:

$$P = M \Delta h = 36000 \text{ (m}^3\text{/h)} \times 1.2 \text{ (kg/m}^3\text{)} \times (19 - 7.6) \text{ (kcal/kg)} = 492480 \text{ kcal/h (S.T)}$$

$$P = 492480 / 860 = 573 \text{ kW (S.I.)}$$

Una batteria fredda dimensionata per un $\Delta T = 6\text{K}$ (acqua $6^\circ\text{C} - 12^\circ\text{C}$) dovrà essere attraversata da una portata d'acqua pari a:

$$M = P/c\Delta T = 573 \text{ kW} / (4.186 \text{ kJ/kgK} \times 6\text{K}) = 22,8 \text{ l/s}$$

La portata di 36000 m³/h dovrà essere post-riscaldata dal punto R(11°C; 7.5 g/kg) al punto I(13°C; 7.5 g/kg).

La potenza termica di riscaldamento sarà pari a:

$$P = 36000 \text{ (m}^3\text{/h)} \times 1.2 \text{ (kJ/m}^3\text{°C)} \times (13-11) \text{ (°C)} \times (1/3600) \text{ (s/h)} = 24 \text{ kW}$$

Una batteria calda dimensionata per un $\Delta T=10\text{K}$ (acqua 80°C-70°C) dovrà essere attraversata da una portata d'acqua pari a:

$$M = P/c\Delta T = 24 \text{ kW} / (4.186 \text{ kJ/kgK} \times 10\text{K}) = 0.573 \text{ l/s}$$

Climatizzazione estiva con ricircolo

L'aria di rinnovo sarà limitata a quella necessaria a garantire in ambiente una buona qualità dell'aria.

Non è quindi necessario lavorare con tutta aria esterna: l'aria immessa in ambiente sarà in parte aria di rinnovo ed in parte aria di ricircolo (aria che viene ripresa dall'ambiente climatizzato e trattata dal condizionatore).

La quantità dell'aria di rinnovo dipende dal tipo di locale e dal numero di persone presenti.

La norma UNI 10339 prevede le seguenti portate d'aria di rinnovo (m³/h persona):

Sale conferenze: 36

Uffici: 40

Teatri: 20

Negozi: 36

Aule scolastiche: 22

Camere d'ospedale: 40

Discoteche: 40

È comunque necessario assicurare sempre almeno un ricambio pari ad un volume/ora (ogni ora deve esserci il completo rinnovo dell'aria del locale).

Inoltre, al fine di uniformare la temperatura all'interno del locale, è necessario che il condizionatore tratti una portata complessiva (rinnovo + ricircolo) pari a 5 volumi/ora.

Mettendo insieme tutte queste considerazioni, si può ricavare la portata d'aria totale e di rinnovo che il condizionatore deve trattare.

Sarà tutto più chiaro dopo il seguente esempio:

Esempio19

Si vogliono mantenere le condizioni A(25°C, 50%) in un locale sul quale agisce un carico termico così composto:

$$Q_{\text{sensibile}} = 144\text{kW}$$

$$Q_{\text{latente}} = 36\text{kW}$$

L'aria esterna si trova alle condizioni E(35°C; 50%).

Il locale sia una sala congressi da 5000 m³, che a piena occupazione può contenere 500 persone.

L'aria di rinnovo deve essere, a piena occupazione, pari a (ved. UNI 10339):

$$M_{\text{rinnovo}} = 500 \times 36 = 18000 \text{ m}^3\text{/h} \text{ (notare che è più che garantito il ricambio minimo di un volume/h).}$$

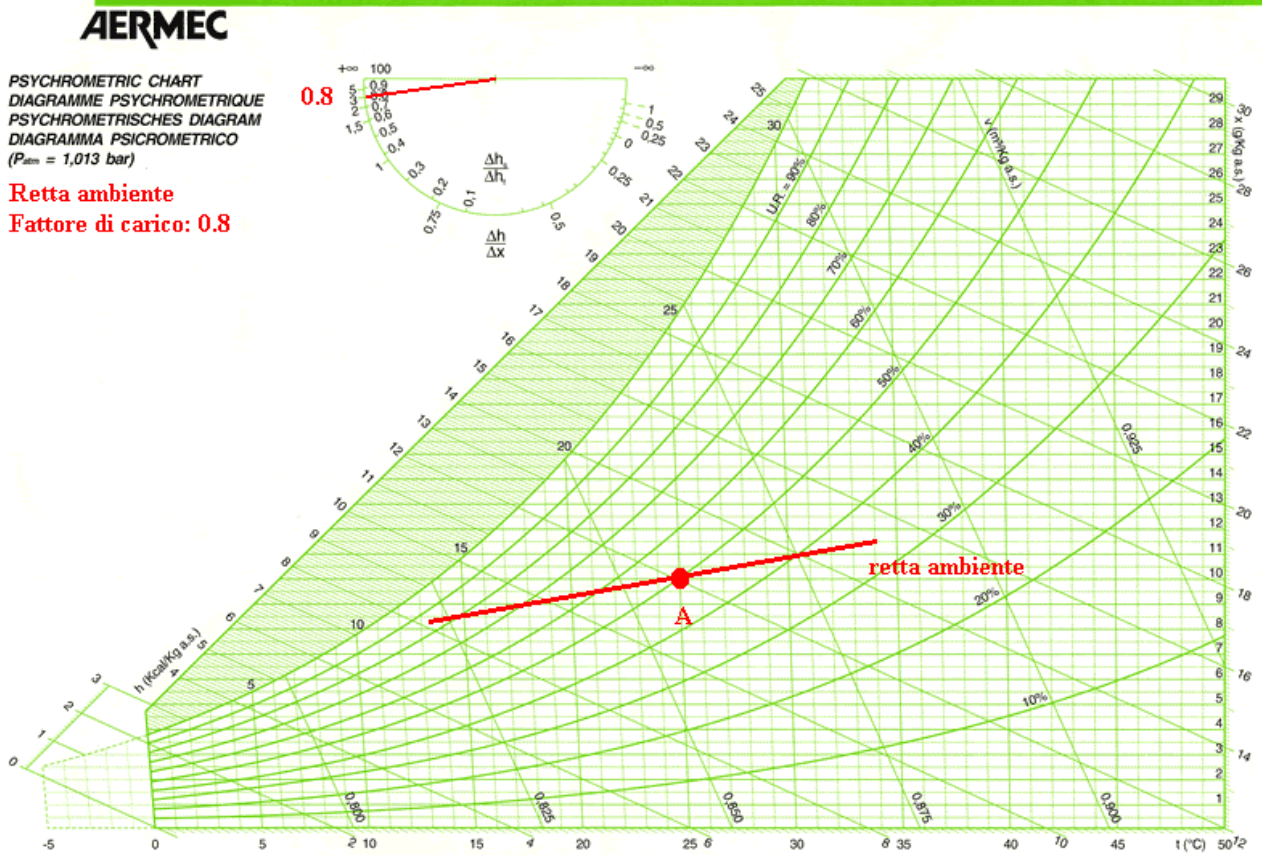
L'aria totale trattata deve essere almeno pari a $5 \times 5000 = 25000 \text{ m}^3\text{/h}$ (per garantire l'uniformità della temperatura in locale).

Individuo innanzitutto la retta ambiente.

Il fattore di carico è:

$$F_c = Q_s / Q_t = 144 / (144 + 36) = 0,80.$$

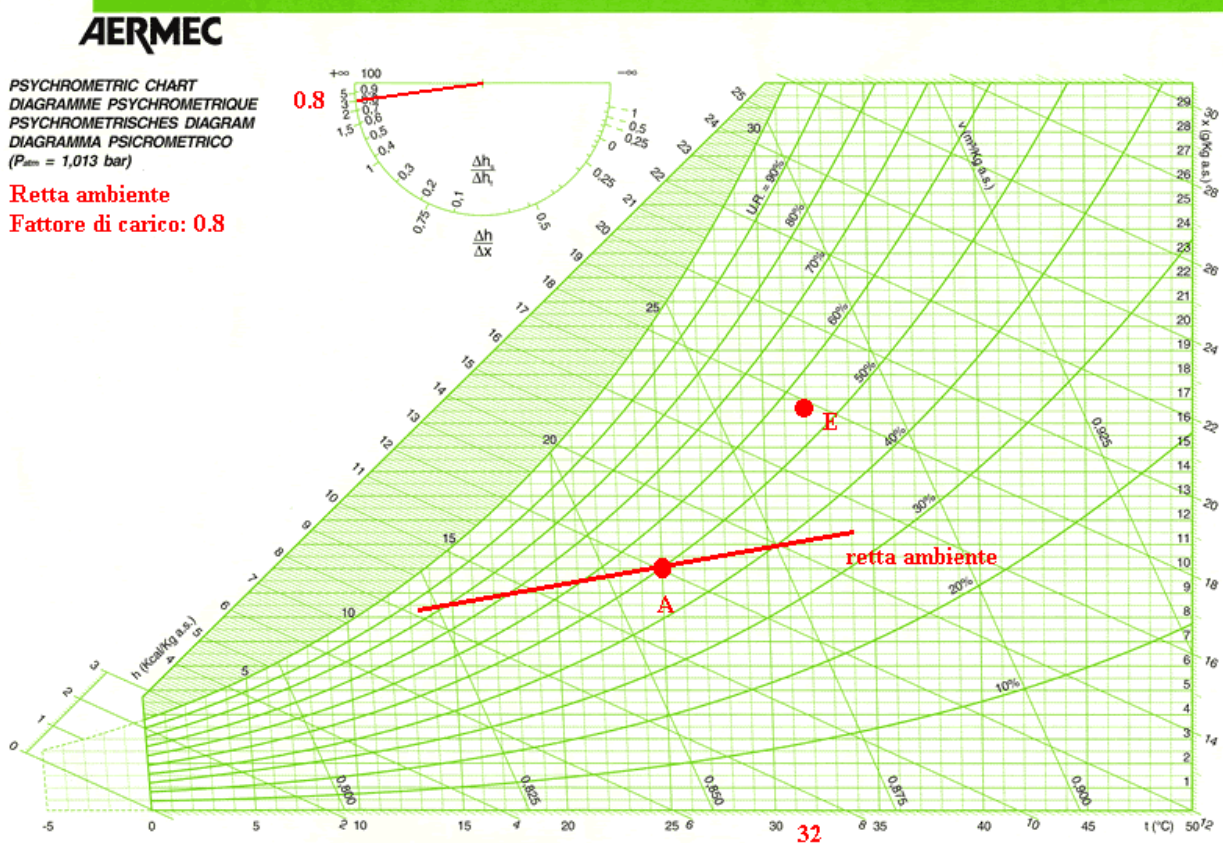
La retta ambiente è quindi la retta che passa per il punto A(25°C, 50%) ed avente pendenza pari al fattore di carico:



L'aria esterna sarà alle condizioni di progetto relative al luogo in cui ci troviamo:

Verona (32°C; 55%)

Posso quindi tracciare il punto E(32°C; 55%) rappresentativo delle condizioni dell'aria esterna:



$$P = 302400/860 = 351 \text{ kW (S.I.)}$$

Dalla temperatura media delle alette della batteria possiamo risalire alle temperature di ingresso e di uscita dell'acqua refrigerata:

$$T_{\text{batteria}} = (T_{\text{ingresso acqua}} + T_{\text{uscita acqua}})/2 + 1^\circ\text{C} = 7.5^\circ\text{C} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow (T_{\text{ingresso acqua}} + T_{\text{uscita acqua}})/2 = 6.5^\circ\text{C} \Rightarrow (T_{\text{ingresso acqua}} + T_{\text{uscita acqua}}) = 13^\circ\text{C} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \text{Se pongo: } T_{\text{ingresso acqua}} = 4^\circ\text{C}$$

$$\text{Sarà: } T_{\text{uscita acqua}} = 9^\circ\text{C}$$

Alimenteremo, dunque, la batteria fredda con acqua a 4°C e con un ΔT pari a 5K .

La batteria fredda dimensionata per un $\Delta T = 5\text{K}$ (acqua $4^\circ\text{C} - 9^\circ\text{C}$) dovrà essere attraversata da una portata d'acqua pari a:

$$M = P/c\Delta T = 351 \text{ kW} / (4.186 \text{ kJ/kgK} \times 5\text{K}) = 16,8 \text{ l/s}$$

