Richiami di psicometrie

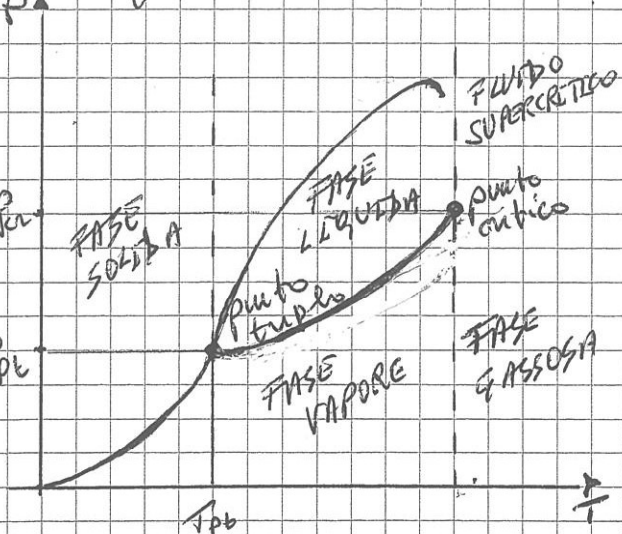
Lo studio dell'aria umida è importante in quanto influenza il benessere delle persone e lo scambio termico di un edificio.

ARIA UMIDA { ARIA SECCA + VAPORE D'ACQUA

Nelle applicazioni di condizionamento la temperatura dell'aria oscilla tra i -10°C e 50°C.

Sul diagramma (p-T), tale temperatura risulta più alta della temperatura critica dell'aria secca (-141°C) per cui l'aria è in fase gassosa.

Inoltre sia l'aria che il vapore si trovano a una pressione molto minore di quella critica ($P_{Sa,cr} = 37,7 \times 10^5$ Pa; $P_{v,cr} = 221 \times 10^5$ Pa).



L'aria atmosferica la si può quindi trattare come una miscela di gas perfetti applicare l'equazione di stato:

$$pV = n \cdot R \cdot T$$

con $p = p_{Sa} + p_v$

Proprietà caratteristiche aria umida

Il "titolo o umidità ASSOLUTA O SPECIFICA" è così definito:

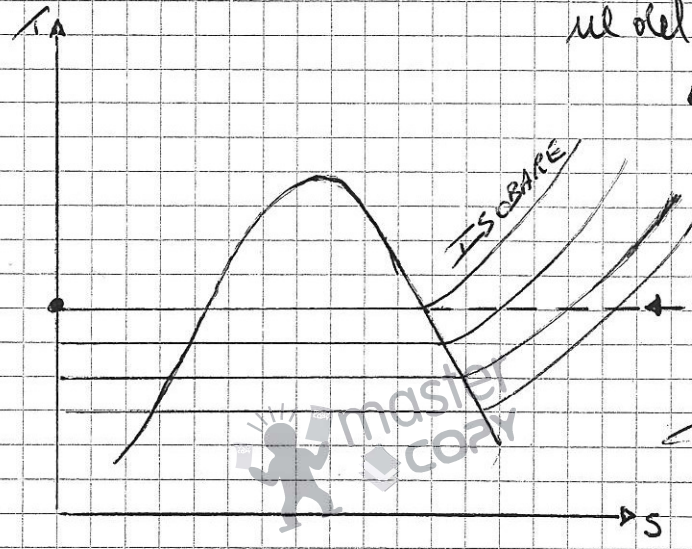
$$x = \frac{m_v}{m_{Sa}}$$

Applicando l'equazione di stato dei gas perfetti si ottiene $\begin{cases} p_{Sa} \cdot V = m_{Sa} \cdot R_{Sa} T \\ p_v \cdot V = m_v R_v T \end{cases}$ da cui dividendo membro a membro si ottiene:

$$x = \frac{R_{Sa}}{R_v} \cdot \frac{p_v}{p_{Sa}}$$ poiché $R_{Sa} = 287,6$ J/kg K, $R_v = 461,5$ J/kg K si ottiene che:

$$x = 0,622 \cdot \frac{p_v}{p_{Sa}} = 0,622 \frac{p_v}{p - p_v} \quad \begin{cases} p_{Sa} = \frac{0,622}{0,622 + x} \cdot p \\ p_v = \frac{x}{0,622 + x} \cdot p \end{cases}$$

Quando il diagramma (T-s), si osserva che se si aumenta la pressione del vapore (parziale) ci si avvicina alla zona del cambio di fase. Esiste, quindi, un valore max della pressione che determina un max dell'umidità assoluta e una data temperatura. Tale valore è detto "PRESSIONE DI SATURAZIONE":



$p_{SAT,v} = f(T) \Rightarrow H_{SAT} = f(T)$

$p_{SAT} = 610{,}5 \cdot e^{\left(\frac{17{,}2694\,t}{237{,}3+t}\right)}$ [Pa] con t in °C.

L'"UMIDITÀ RELATIVA" φ è così definita:

$$\varphi = \frac{m_v}{m_{vSAT}} = \frac{p_v}{p_{SAT}(T)}$$

Possiamo ricavare empiricamente:

$H = \dot{m}_a \cdot h_a + \dot{m}_v \cdot h_v$ poiché $h = \frac{H}{\dot{m}_a}$ sostituendo $H = h \cdot \dot{m}_a$

$h \cdot \dot{m}_a = \dot{m}_a \cdot h_a + \dot{m}_v \cdot h_v$ e dividendo per $\dot{m}_a$ ambo i membri:

$$h = h_a + \frac{\dot{m}_v}{\dot{m}_a} h_v = h_a + H \cdot h_v$$

Per l'intervallo di T considerato (-10°C; 50°C) valgono le approssimazioni:

$c_{p\,aria} = 1{,}005\ KJ/KgK \cong 1\ KJ/KgK$

$h_v = R + c_v dT \cong R \qquad c_{v\,vap} = 1{,}82\ KJ/KgK$

$h = c_{pa} \cdot T + H \cdot R$

Esercizio

Assegnati $V = 75\ m^3$

$T = 25°C$

$\varphi = 75\%$ Calcolare x, P_v, h

$$P_{SAT} = 610{,}5 \cdot e^{\left(\frac{17{,}269 \cdot t}{237{,}3+t}\right)} = 3166\ Pa$$

$$P_v = P_{SAT} \cdot \varphi = 3166 \times 75\% = 2374{,}5\ Pa \qquad \text{poiché } P_{atm} = 101325\ Pa \cong 10^5\ Pa$$

$$x = 0{,}622 \cdot \frac{P_v}{P - P_v} = 0{,}622 \cdot \frac{2374{,}5}{10^5 - 2374{,}5} = 0{,}015\ [Kg/Kg]$$

"x può anche essere espresso in $[g/Kg]$ $\Rightarrow$ 15 infatti:

$$x = 0{,}015\ \frac{Kg}{Kg} = 0{,}015 \cdot 10^3\ \frac{g}{Kg} = 15\ [g/Kg]$$

$$h = c_{p_s} \cdot T + x \cdot R = 1{,}005 \cdot 25 + 0{,}015 \cdot 2501 = 62{,}5\ KJ/Kg$$

Osservazione importante:

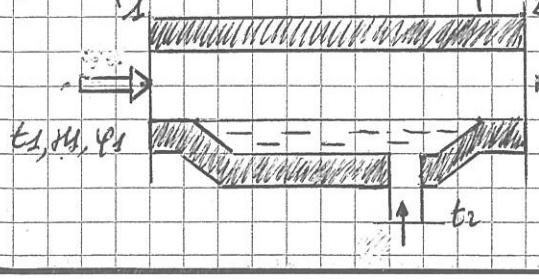
$$v = \frac{V}{m_s} = \frac{R_s \cdot T}{P_s} = \frac{R_s \cdot T}{P - P_v} = \frac{R_a \cdot T}{0{,}622 P} \cdot (0{,}622 + x)$$

$$\rho = \frac{m_s + m_v}{V} = \frac{m_s}{V} + \frac{m_v}{V} = \frac{1}{v} + \frac{m_v}{m_s \cdot V} = \frac{1}{v} + x \cdot \frac{1}{v} = \frac{1}{v}(1 + x) =$$

$$= \frac{0{,}622 \cdot P}{R_a \cdot T} \cdot \left(\frac{1 + x}{0{,}622 + x}\right)$$ Questa formula non è stata utilizzata in questo caso - essa è la densità dell'aria umida, alla base del funzionamento delle bocce evaporative.

La "TEMPERATURA DI RUGIADA" è quella in corrispondenza della quale una determinata miscela di aria umida inizia a condensare.

La "TEMPERATURA DI SATURAZIONE ADIABATICA" è la temperatura a cui si fa un flusso d'aria che passa per un "saturatore adiabatico".



L'aria entra nel saturatore allo stato (1) ed esce allo stato (2) dopo aver subito una trasformazione di "SATURAZIONE ADIABATICA". Possiamo fare il bilancio di massa ed energia.

$\dot{m}_{a,1} - \dot{m}_{a,2} = 0$ (bilancio in massa dell'aria secca)

$\dot{m}_{a,1} \cdot x_1 + \dot{m}_{H_2O} - \dot{m}_{a,2} \cdot x_2 = 0$ (bilancio in massa dell'acqua)

$\dot{m}_{a,1} \cdot h_1 + \dot{m}_{H_2O} \cdot h_{H_2O} - \dot{m}_{a,2} h_2 = 0$ (bilancio di energia dell'aria umida)

Da cui segue che:

$\dot{m}_{a,1} = \dot{m}_{a,2} = \dot{m}_a$

$\dot{m}_{H_2O} = \dot{m}_a x_2 - \dot{m}_a x_1 = \dot{m}_a (x_2 - x_1)$

$\dot{m}_a h_2 - \dot{m}_a h_1 = \dot{m}_{H_2O} h_{l_2} \Rightarrow \dot{m}_a (h_2 - h_1) = \dot{m}_a (x_2 - x_1) \cdot h_{l_2} \Rightarrow$

$\Rightarrow (h_2 - h_1) = h_{l_2} (x_2 - x_1) \Rightarrow x_2 = x_1 + \frac{h_2 - h_1}{h_{l_2}}$

In definitiva:

$$\begin{cases} h_1 = c_{p_{a,1}} \cdot T_1 + x_1 \cdot r \\ h_2 = c_{p_{a,2}} \cdot T_2 + x_2 \cdot r \\ x_2 = x_1 + \frac{h_2 - h_1}{h_{l_2}} \end{cases}$$

Ipotizzando che l'aria in uscita sia satura ($\varphi = 100\%$) e che l'acqua di reintegro si trovi alla temperatura T_{in}, l'unica incognita nell'equazione precedente è $x_{1,u}$ (h_1 lega già scritta in funzione di $x_{1,u}$).

L'umidità assoluta e quella relativa (per lo stato 1) possono essere quindi calcolate in modo indiretto misurando la pressione e la temperatura dell'aria in ingresso e in uscita da un sistema che realizza una trasformazione di saturazione adiabatica.

La temperatura di uscita dal saturatore è detta "temperatura di saturazione adiabatica" e rappresenta una proprietà termodinamica dell'aria umida nello stato di ingresso. Essa è compresa tra la temperatura di bulbo secco e quella di rugiada (grafico).

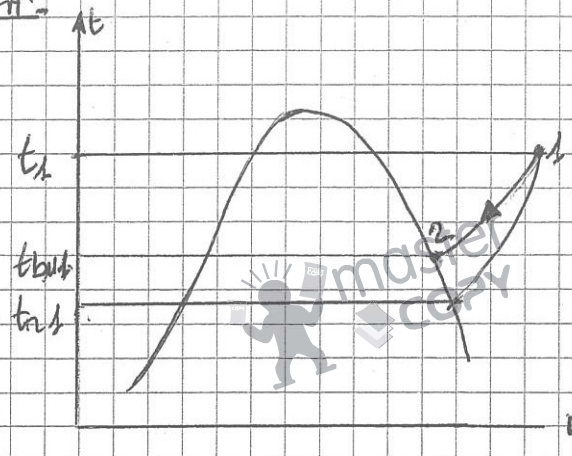
Per le miscele aria vapore a pressione atmosferica, la temperatura di saturazione adiabatica è molto vicina alla temperatura di bulbo umido. Teoricamente sono due concetti differenti, ma nella pratica i loro valori coincidono.

Considerando il primo valore di $h_{1,u}$ si ottiene che:

$\dot{m}_{a_2}(h_2 - h_1) = \dot{m}_{H_2O} \cdot h_{l_2}$ e per $h_{l_2} \neq 0$

$\dot{m}_{a_2}(h_2 - h_1) = 0 \Rightarrow h_2 = h_1$

Una trasformazione di saturazione adiabatica è fuorviante "ISOENTALPICA".

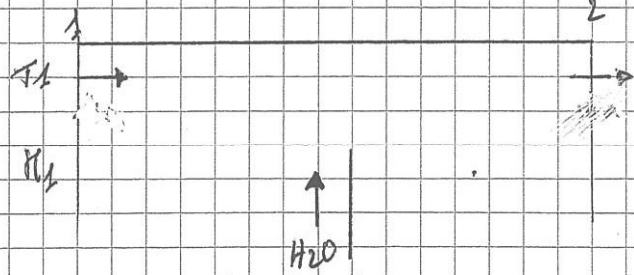


La "TEMPERATURA DI BULBO UMIDO" è la temperatura misurata con un termometro il cui bulbo è stato ricoperto con una garza bagnata con acqua pura ed esposto ad una corrente d'aria. Si ha:

$$T_2 \leq T_{bu} \leq T$$

Per l'aria satura, risulta: $T_{bu} = T_2 = T$

Esempio



Dati
$T_1 = 25°C$
$T_2 = 15°C$

Effettuiamo il bilancio di massa dell'acqua:

$\dot{m}_a H_1 + \dot{m}_{H_2O} = \dot{m}_a H_2 \Rightarrow \dot{m}_{H_2O} = \dot{m}_a (H_2 - H_1)$

Poiché $H_2 = H_{SAT}(T_2) = 0,01$

$$H_{SAT} = 0,622 \frac{p_{V_2 SAT}}{p - p_{V_2 SAT}} = 0,01 \left[kg/kg\right]$$

$p_{V_2 SAT} = f(T_2) = 1700\ Pa$

$h_2 = c_p \cdot T_2 + H_2 \cdot R = 40,5\ KJ/Kg$ $\left\{ \begin{array}{l} c_p = 1\ KJ/Kg°C \\ R = 2501\ KJ/Kg \end{array} \right.$