

Strumenti di misura termoigrometrici

Argomenti:

- L'aria atmosferica
- Il vapore saturo
- Titolo
- Grandezze energetiche

Prima di addentrarci nella lezione è necessario dare alcune preliminari definizioni:

L'aria atmosferica

L'aria che comunemente respiriamo, che si trova all'interno degli ambienti di vita, è un miscuglio di gas di composizione quasi costante, è definita aria umida in presenza stabile d'acqua o umidità. È formata da aria secca (miscuglio di gas perfetti in proporzioni invariabili) e acqua. La composizione di aria secca è data al 99% da ossigeno e da azoto. Ma l'aria presenta anche un'altra caratteristica. In effetti di tutti i componenti in essa presenti, l'unico che può cambiare fase al mutare delle condizioni termofisiche della miscela, quali per prima la temperatura, è il vapor d'acqua. Il composto acqua può infatti essere presente allo stato gassoso (come vapore, invisibile), allo stato liquido (nebbia, nuvole e gocce di pioggia) e allo stato solido (come cristalli di ghiaccio, grandine e fiocchi di neve).

Vapore saturo

Il vapore è una sostanza allo stato aeriforme, che può essere liquefatta per compressione. Si distingue quindi da un gas propriamente detto, che, trovandosi ad una temperatura superiore alla propria temperatura critica, non può passare allo stato liquido per semplice compressione. Un vapore si dice saturo se è in equilibrio con il proprio liquido. Infatti il vapore emesso da una sostanza contenuta in un recipiente, esercita una pressione, chiamata tensione di vapore, che aumenta via via che procede l'evaporazione del liquido al crescere della temperatura. Quando il liquido raggiunge la temperatura alla quale la tensione di vapore eguaglia la pressione esercitata sul liquido, si verifica l'ebollizione e il vapore, in equilibrio con il liquido, viene detto vapore saturo.

Titolo

Nel caso del vapore saturo il titolo è una grandezza fondamentale che indica una frazione di vapore rispetto alla massa totale del sistema. Si indica con

$$X = \frac{M_{\text{vapore}}}{M_{\text{totale}}} = \frac{M_v}{M_l + M_v}$$

Nel caso della miscela di acqua e vapore il TITOLO è $X = \frac{M_v}{M_a}$

Dove M_v sta per massa di vapore, M_a sta per massa di aria secca e M_l per massa del liquido.

20/12/02 ore 8.30-10.30

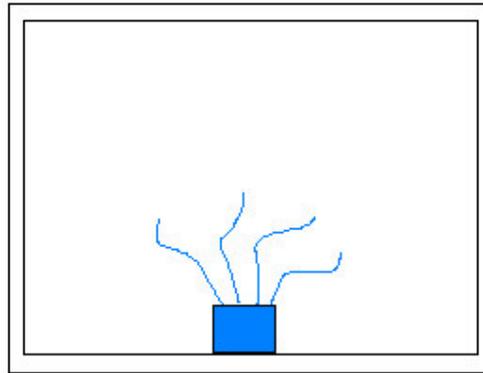
Nei processi di miscele di aria secca e vapore, l'aria secca rimane invariata, mentre l'acqua può cambiare di stato. Infatti le stesse grandezze specifiche sono riferite all'aria e non al vapore.

Generalmente $\frac{Mv}{ML+mv}$ è compreso tra 0 e 1

Invece $\frac{MV}{MA}$ va da 0 a + infinito

Esperimento sul comportamento di una miscela di aria secca e vapore

Si prenda in considerazione una stanza contenente solo aria secca (gas perfetto). Con all'interno un pentolino d'acqua. Dopo un po' di tempo, una parte d'acqua sarà evaporata, rendendo l'ambiente saturo d'acqua.



se nel pentolino c'è acqua in quantità insufficiente questa evaporerà tutta, ma nell'aria ci sarà una percentuale d'acqua minore della pressione di saturazione. La condizione normale degli ambienti di vita non è quella di saturazione, infatti solitamente $Pv < Psat$

Quando c'è la nebbia scende la temperatura, si giunge al limite della temperatura di saturazione, il vapore è in equilibrio col proprio liquido, ma se la temperatura diminuisse ancora cadrebbe la pioggia.

Un'altro esempio simile e ben visibile è quello del nostro fiato nelle giornate invernali: noi esaliamo aria a 36°C circa, ricca di vapore d'acqua, quasi saturo. Se la temperatura esterna scende, si forma quella nota nuvoletta che esce dalla nostra bocca.

Come si quantifica la vicinanza alla pressione di saturazione?

Il grado igrometrico può essere definito anche come umidità relativa, (U.R), quando è espresso in percentuale, e si definisce come

$\phi = \frac{Pv}{Pv\ sat}$ dove Pv è la pressione del vapore nella miscela di aria e vapore considerata, Pv sat è la pressione di saturazione del vapore alla temperatura considerata.

In percentuale:

20/12/02 ore 8.30-10.30

$$\text{U.R.} = \frac{\text{P.v}}{\text{P.v sat}} * 100$$

(Ed è quella che si trova scritta sui giornali)

usiamo l'equazione del gas perfetto dell'aria per relazionare X con φ

$$\text{P A V} = \text{M A R A T}$$

equazione del vapore come gas perfetto

$$\text{P v V} = \text{M v R v T}$$

in cui P è la pressione, V è il volume, M la massa ed R è una costante universale dei gas.

La pressione atmosferica può essere vista come una pressione totale, espressa come la somma della pressione parziale dell'aria con la parziale del vapore.

È la cosiddetta **legge di Dalton**, che afferma appunto che la pressione totale di una miscela di gas è pari alla somma delle pressioni che ciascun gas eserciterebbe se da solo occupasse lo stesso volume della miscela.

$$\text{P tot} = \text{P A P v}$$

che equivale più o meno ad un BAR.

Con le funzioni X e φ posso ricavare un valore in funzione dell'altro.

$$\frac{\text{M v R v T}}{\text{M A R A T}} = \frac{\text{P v V}}{\text{P A V}}$$

Al primo membro riconosco la presenza di X = $\frac{\text{M v}}{\text{M A}}$

Allora

$$\text{X} = \frac{\text{M v}}{\text{M A}} = \frac{\text{R A P v}}{\text{R v P A}}$$

Al posto di Pa metto Ptot - Pv, in base alla legge di Dalton,

$$\text{X} = \frac{\text{R a P v}}{\text{R v P tot - P v}}$$

Ma so che $\text{P v} = \phi \text{ P sat}$

Allora

$$\text{X} = \frac{\text{R A } \phi \text{ P sat}}{\text{R v P tot - } \phi \text{ P sat}}$$

$\text{R} = \frac{\text{R}_0}{\mu}$ la massa dell'aria vale circa 29 kg/kmol = μ a
del vapore invece 18 kg/kmol = μ v

$$\frac{\text{R A}}{\text{R v}} = \frac{\mu \text{ v}}{\mu \text{ A}} = \frac{18}{29} = 0.622$$

$$X = 0.622 \frac{\varphi P_{\text{sat}}(T)}{P_{\text{tot}} - \varphi P_{\text{sat}}(T)}$$

Questa formula è utile se si conosce T e il grado idrometrico per ricavare il titolo

Dall'equazione posso ricavare φ al posto di X

$$(P_{\text{tot}} - \varphi P_{\text{sat}}) X = 0.622 \varphi P_{\text{sat}}$$

$$X P_{\text{tot}} = \varphi P_{\text{sat}} (0.622 + X)$$

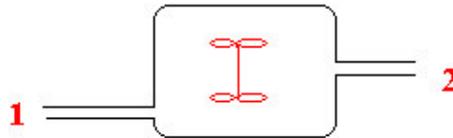
$$\varphi = \frac{X P_{\text{tot}}}{P_{\text{sat}} (0.622 + X)}$$

Il passaggio da X a φ è ESSENZIALE, lo si usa continuamente le persone infatti sono abituate a calcolare l'umidità in gradi igrometrici.

Grandezze energetiche

La termodinamica si applica solitamente in sistemi aperti ovvero qualsiasi sistema in cui la massa sia soggetta a variazioni, così come il calore Q ed il lavoro L. Ne rimane però invariato il volume.

I sistemi aperti hanno una sezione d'ingresso, un macchinario all'interno, e una sezione d'uscita.



$$U_2 - U_1 = Q - L \quad (\text{vale per il sistema chiuso, richiede variazione di } \Delta U)$$

$$H_2 - H_1 = Q - L \quad (\text{vale per i sistemi aperti, richiede variazione di entalpia})$$

Ricordo che $H = U + PV$ (a)

nelle equazioni di bilancio del sistema chiuso bisogna mettere in conto il lavoro di introduzione (nel disegno-1-) e il lavoro di espulsione (nel disegno-2-).

L'entalpia specifica si indica con $J = \frac{H}{MA}$ entalpia totale

MA massa aria secca

La formula (a) posso anche scriverla quindi come

$$H = MA h_a + Mv h_v$$

Sostituendo

$$J = \frac{MA h_a}{MA} + \frac{Mv h_v}{MA} = h_a + x h_v$$

$H_x = h_L + X h_d$ ovvero l'entalpia specifica è la somma di h_L e $X h_d$ in cui h_L sta per entalpia del liquido, h_d per entalpia differenziale. Può essere, quest'ultima sostituita con r , calore latente di vaporizzazione

20/12/02 ore 8.30-10.30

Tabelle di vapore saturo

Temperatura aria T (E°C)	Pressione di vapore dell'aria satura		Titolo di saturazione x g/Kg
	P (mbar)	P (mmHg)	
-20	1.02	0.756	0.63
-18	1.25	0.938	0.77
-16	1.5	1.125	0.93
-14	1.81	1.358	1.11
-12	2.17	1.628	1.34
-10	2.59	1.943	1.6
-8	3.09	2.318	1.91
-6	3.67	2.753	2.27
-4	4.36	3.270	2.69
-2	5.16	3.870	3.19
0	6.09	4.568	3.78
1	6.56	4.920	4.07
2	7.04	5.280	4.37
3	7.57	5.678	4.7
4	8.11	6.083	5.03
5	8.7	6.526	5.4
6	9.32	6.991	5.79
7	9.99	7.493	6.21
8	10.7	8.026	6.65
9	11.46	8.596	7.13
10	12.25	9.188	7.63
11	13.09	9.818	8.15
12	13.99	10.493	8.75
13	14.94	11.206	9.35
14	15.95	11.963	9.97
15	17.01	12.759	10.6
16	18.13	13.599	11.4
17	19.32	14.491	12.2
18	20.59	15.444	12.9

19	21.92	16.441	13.8
20	23.31	17.484	14.7
21	24.8	18.602	15.6
22	26.37	19.779	16.6
23	28.02	21.017	17.7
24	29.77	22.3	18.8
25	31.6	23.702	20
26	33.53	25.150	21.4
27	35.56	26.672	22.6
28	37.71	28.285	24
29	39.95	29.965	25.6
30	42.32	31.748	27.2
31	44.82	33.618	28.8
32	47.46	35.575	30.6
33	50.18	37.638	32.5
34	53.07	39.806	34.4
35	56.1	42.078	36.6
36	59.26	44.449	38.8
37	62.6	46.954	41.1
38	66.09	49.572	43.5
39	69.75	51.317	46
40	73.58	55.198	48.8
41	77.59	58.197	51.7
42	81.8	61.355	54.8
43	86.18	64.64	58
44	90.79	68.098	61.3
45	95.6	71.706	65
46	100.61	75.464	68.9
47	105.87	79.409	72.8
48	111.33	83.504	77
49	117.07	87.81	81.5
50	123.04	92.288	86.2
55	150.94	117.715	114
60	198.7	149.037	152

20/12/02 ore 8.30-10.30

La stessa tipologia di formula vale anche per l'entropia specifica quando si prende l'entalpia nulla a $T=0^{\circ}\text{C}$

$$\mathbf{S_x = S_L + X S_d}$$

$$\mathbf{J = C_{PA} t + X (r + C_{PV} t)}$$

Dove C_{pa} sta per il calore della pressione dell'aria, 1kJ/kgK , r corrisponde a 2500kJ/kgK , C_{pvc} sta per calore della pressione del vapore, e vale 1.9kJ/kgK .
La stessa può essere scritta anche così:

$$\mathbf{J = t + X (2500+1.9t)}$$

Ma l'espressione corretta è quella precedente!

Graficazione degli stati fisici su un diagramma psicrometrico

Sapendo che l'aria umida è un miscuglio di aria secca e vapore, e considerando un miscuglio omogeneo di questa, si può individuare lo stato termodinamico, assegnando 3 variabili intensive indipendenti.

Per descrivere graficamente le proprietà del suddetto miscuglio, è necessaria una rappresentazione a tre dimensioni.

Di solito, per rendere possibile un vasto insieme di applicazioni tecniche, si rinuncia alla possibilità di variare alla pressione, considerandola come costante, uguale alla pressione atmosferica standard, in questo modo è quindi possibile l'applicazione di un diagramma piano, chiamato diagramma psicrometrico.

Il diagramma psicrometrico permette di tracciare rette a confort o entalpia, costante, infatti ogni retta dell'entalpia mostra che, diminuendo il valore del titolo, cioè l'umidità relativa, ma aumentando la temperatura, il confort termoisometrico rimane costante.

L'area del grafico sottostante la curva può essere divisa in tre fasce: quella centrale, che identifica un ambiente relativamente sano e confortevole, e quelle laterali che indicano un ambiente spiacevole o inospitale, in cui non sono garantite le condizioni vitali e dove l'autoregolazione dell'organismo non sono sufficienti.

Linric Company

Desiccant System Engineering,
Engineering Software Development

Linric Company, Software Division

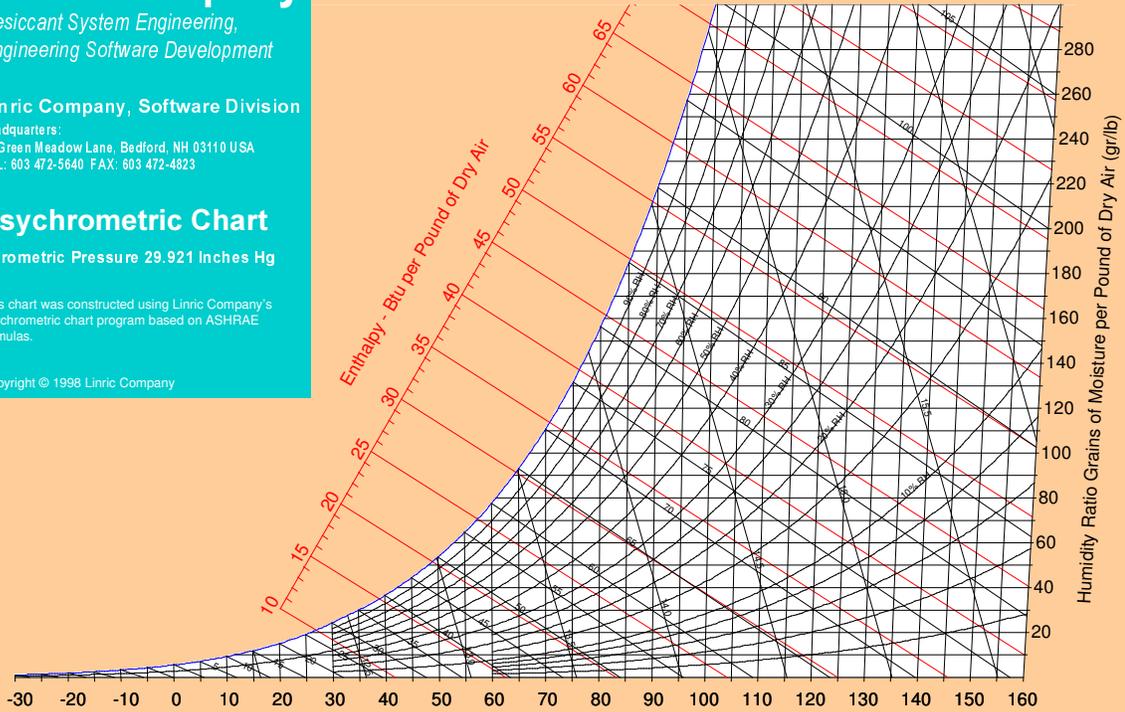
Headquarters:
44 Green Meadow Lane, Bedford, NH 03110 USA
TEL: 603 472-5640 FAX: 603 472-4823

Psychrometric Chart

Barometric Pressure 29.921 Inches Hg

This chart was constructed using Linric Company's
psychrometric chart program based on ASHRAE
formulas.

Copyright © 1998 Linric Company



Temperatura di rugiada

L'aria umida, di solito non satura, presenta vapore d'acqua surriscaldato. se è raffreddata a temperatura costante, la massa M_v del suo vapore non varia. Quando l'aria raffredda segue una trasformazione ad umidità specifica, costante, e anche la pressione parziale P_v resta costante alla temperatura T_a nel punto R_a , l'isobara condotta per A interseca la linea di saturazione. Per sapere la temperatura di rugiada è necessario usare il diagramma. Si può ottenere anche con i calcoli ma è più difficoltoso e lungo.

$$X \text{ noto} = X_2 = 0.622 \frac{P_{\text{sat}}(t_{\text{rug}})}{P_{\text{tot}} - P_{\text{sat}}(t_{\text{rug}})}$$

Temperatura di bulbo bagnato

Se un corpo è bagnato, e non riceve calore, per il solo fatto di essere bagnato, si porta a condizione di equilibrio, in cui $T_b < T_a$, cioè la temperatura corporea è minore di quella dell'aria.

Il fenomeno è chiamato raffreddamento adiabatico. l'acqua evapora dal corpo, ma man mano che l'acqua evapora, ci vuole qualcosa che dia calore all'acqua affinché questa evapori. L'acqua deve essere più fredda per ricevere calore. Avvengono perciò due trasporti: uno diffusivo (dell'acqua che evapora) e uno di energia (trasporto di Q dall'aria)

Esercizio

Si ha una massa pari a 10kg di aria umida, (massa tot), che ha un grado idrometrico iniziale $\phi_1 = 0.70$ e una temperatura iniziale $t_1 = 30^\circ\text{C}$. è raffreddata ad una temperatura $t_3 = 10^\circ\text{C}$. il tutto avviene a pressione atmosferica (circa 1 BAR).

Si vuole sapere la quantità Q di energia tolta dal processo di raffreddamento.

Disegno

Dal punto di vista del bilancio energetico

$$H_3 - H_1 = Q - L$$

In assenza di altre indicazioni il processo sembra essere avvenuto senza lavoro.

$$H_3 - H_1 = Q$$

$$\text{Ma } Q = MA (J_3 - J_1)$$

Dove Q è la quantità di calore che devo sottrarre alla miscela per far avvenire la trasformazione.

$$X_1 = 0.622 \frac{\phi_1 P_{\text{sat } 1}}{P_{\text{tot}} - \phi_1 P_{\text{sat } 1}}$$

$$= 0.622 \frac{0.70 \cdot 0.04241}{1.013 - 0.7 \cdot 0.04241} = 0.019 \frac{\text{kg V}}{\text{kg A}}$$

$$X_3 = 0.622 \frac{\phi_3 P_{\text{sat } 3}}{P_{\text{tot}} - \phi_3 P_{\text{sat } 3}}$$

$$\frac{0.622 \cdot 0.01277}{1.013 - 0.01277} = 0.079 \frac{\text{kg V}}{\text{kg A}}$$

(più basso di quello di partenza)

Ora ricavo la massa d'acqua che è condensata.

$$M_{\text{cond.}} = MA (X_1 - X_3)$$

$M_{\text{tot}} = MA + MV$, ma per definizione di titolo

$$M_{\text{tot}} = MA + X MA = (1 + X_1) MA$$

$$\frac{M_{\text{tot}}}{1 + X_1} = MA = \frac{10}{1 + 0.019} = 9.81 \text{ kgA}$$

$$\mathbf{M_{cond} = 9.81 (0.019 - 0.0079) = 0.109 \text{ kg}}$$

$$\mathbf{J_1 = t_1 + X_1 (2500 + 1.9t_1) = 30 + 0.019(2500 + 1.9 \cdot 30) = 78.58 \text{ kJ/kgA}}$$

$$\mathbf{J_3 = t_3 + X_3(2500 + 1.9t_3) = 10 + 0.0079(2500 + 1.9 \cdot 10) = 42.17 \text{ kJ/kgA}}$$

Conoscendo le due entalpie posso ricavare Q

$\mathbf{Q = -9.81 (78.58 - 42.17) = -357.24 \text{ kJn}}$ il calore sottratto al sistema è negativo!!

$$\mathbf{Q = M C_p (t_1 - t_3) = 10 \cdot 1 (30 - 10) = 200 \text{ kJ/kg}}$$