

PSICROMETRIA DELL'ARIA UMIDA

1. PROPRIETÀ TERMODINAMICHE DEI GAS PERFETTI

Un modello di comportamento interessante per la termodinamica è quello cosiddetto di **gas perfetto**. Il gas perfetto è naturalmente un'astrazione, tuttavia tutti i gas possono essere considerati tali con buona approssimazione per particolari condizioni di pressione e temperatura.

I gas perfetti (o ideali) soddisfano le leggi di Boyle e di Dalton. La legge sperimentale di Boyle afferma che per un gas perfetto il prodotto pressione per volume è costante se la temperatura è costante:

$$\text{Legge di Boyle} \quad p v = \text{costante} \quad \text{se } T = \text{costante}$$

L'equazione che ne deriva prende il nome di Equazione di Stato dei gas perfetti :

$$\text{Equazione di stato dei gas perfetti} \quad p v = R T$$

dove:

R = costante del gas in esame (J/kg K)

p = pressione cui si trova il sistema termodinamico (Pa)

v = volume specifico del sistema termodinamico (m³/kg)

T = temperatura termodinamica cui si trova il sistema termodinamico (K)

L'Equazione di Stato dei gas perfetti sostituendo al volume specifico il volume totale $V = m v$ diviene:

$$p V = m R T$$

La legge di Dalton afferma che se un certo volume V contiene un certo numero di gas perfetti, la pressione totale p_{TOT} esercitata da detti gas occupanti il volume V è data dalla somma delle pressioni parziali che ciascun gas eserciterebbe se occupasse da solo quello stesso volume V a parità di temperatura:

$$\text{Legge di Dalton} \quad p_{TOT} = \sum_i p_i$$

dove p_i = pressione parziale del gas i-esimo

2. TERMODINAMICA DELL'ARIA UMIDA

La sensazione di benessere che un individuo avverte all'interno di un ambiente confinato è legata all'ottenimento di un campo di valori per alcuni determinati parametri ambientali fra cui particolarmente rilevanti sono la temperatura e l'umidità relativa ambiente; tali grandezze sono legate alle rispettive proprietà fisiche dell'aria umida.

Al campo della psicrometria appartiene lo studio delle miscele di aria secca e vapor d'acqua e delle relative trasformazioni. Tale studio risulta fondamentale al fine di garantire condizioni di benessere in ambienti climatizzati.

L'**aria umida** è una miscela di due gas perfetti: un aeriforme, l'aria secca, e un componente condensabile, cioè il vapor d'acqua, il cui contenuto varia in funzione delle condizioni ambientali.

L'aria secca è a sua volta una miscela di altri gas che nelle trasformazioni del condizionamento ambientale mantengono un rapporto di concentrazione costante. L'aria secca risulta così mediamente composta: 78% azoto (N₂), 21% l'ossigeno (O₂), 1% anidride carbonica (CO₂) e altri gas fra cui l'Argo (Ar).

Per caratterizzare lo stato dell'aria umida si considerano varie grandezze, fra cui il titolo, il grado igrometrico, l'entalpia.

Nelle applicazioni pratiche, poiché il contenuto in peso del vapor d'acqua nell'aria è pari al massimo al 3%, risulta accettabile sostituire la massa dell'aria secca con quella totale del sistema.

Per sapere in che proporzione il vapor d'acqua è contenuto nella massa dell'aria secca si fa riferimento al **titolo della miscela** (o umidità assoluta) indicato generalmente con **x** :

$$\text{TITOLO } x = (\text{massa di vapore} / \text{massa di aria secca}) \quad x = m_v / m_a$$

Ricavando m_v ed m_a dalla Eq. di stato dei gas perfetti (si ricordi che sia aria secca che vapor d'acqua assumono nella miscela comportamento di gas perfetto)

$$pV = m R T$$

e sostituendo nella definizione del titolo ottengo

$$x = 0,622 (\varphi p_s) / (p - \varphi p_s)$$

dove:

- 0,622 è il rapporto fra le costanti dell'aria secca R_a ($R_a = 287 \text{ J/kgK}$) e del vapore R_v ($R_v = 462 \text{ J/kgK}$)
- φ è il grado igrometrico della miscela ($0 \leq \varphi \leq 1$)
- p_s è la pressione di saturazione corrispondente alla temperatura della miscela (Pa oppure bar)

Il titolo della miscela è riferito ad 1 m³ di miscela; di solito è espresso in grammi di vapore per kg di aria secca (g_v/kg_a), ma può anche essere espresso, come avviene nell'espressione dell'entalpia della miscela, in chilogrammi vapore per kg di aria secca (kg_v/kg_a).

Il riferimento all'aria secca è opportuno in quanto nelle consuete trasformazioni la composizione dell'aria secca rimane invariata e quindi con massa costante mentre varia il quantitativo corrispondente di vapor d'acqua, pertanto non solo la

composizione della miscela ma anche tutte le altre proprietà fisiche sono riferite alla unità di massa d'aria secca.

La massa totale m della miscela sarà:

$$m = m_v + m_a$$

Il titolo della miscela non viene però utilizzato per esprimere le condizioni di benessere di un ambiente, che vengono invece riferite all' **umidità relativa** (UR) o **grado igrometrico** ϕ definito dal rapporto:

$$UR = \phi = m_v / m_s$$

dove :

m_v = massa di vapor d'acqua

m_s = massa del vapor d'acqua che satura il volume alle stesse condizioni di pressione e temperatura

Applicando alla definizione di grado igrometrico l'equazione di stato dei gas perfetti si può anche scrivere:

$$\phi = m_v / m_s = p_v / p_s$$

da cui

$$p_v = p_s \phi$$

Nel caso di una miscela ideale di aria e vapor d'acqua l'entalpia specifica è data dalla somma delle entalpie parziali di aria secca e vapor d'acqua.

L'entalpia di 1 kg di aria secca alla temperatura t (h_a) è pari al calore necessario per portare 1 kg di aria secca da 0°C a t $^\circ\text{C}$:

$$h_a = c_{pa} t$$

dove $c_{pa} = 1,005$ kJ/kg K è il calore specifico a pressione costante dell'aria secca.

L'entalpia del vapore sarà la somma del calore necessario a vaporizzare una certa quantità di acqua alla temperatura di 0°C e del calore necessario a portare tale vapore alla temperatura t :

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

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

In definitiva l'entalpia della miscela h è espressa dalla seguente relazione:

$$h = h_a + h_v = c_{pa} t + x (c_{pv} t + r) \quad (\text{kJ/kg}_a)$$

Nel Sistema Internazionale di unità di misura si può scrivere con sufficiente approssimazione

$$h = 1 t + x (1,9 t + 2500) \quad (\text{kJ/kg}_a)$$

Ulteriori parametri molto importanti nella psicrometria sono:

- la **temperatura di rugiada**: per l'aria umida in un determinato stato fisico è definita come la temperatura alla quale si raggiunge la condizione di saturazione attraverso un processo di raffreddamento isobaro a titolo costante;
- e la **temperatura di bulbo bagnato** (o bulbo umido): definita come la temperatura cui si porta l'acqua in condizioni di equilibrio di scambio di calore convettivo e di massa con aria in moto fortemente turbolento. Si misura con

un termometro (schermato da ogni effetto radiante) il cui elemento sensibile è mantenuto bagnato da acqua (come avviene nello psicrometro).

3. MISURA DEL GRADO IGROMETRICO

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

Quest'ultimo strumento è fra i più impiegati ed è costituito da due termometri di cui uno misura la temperatura a bulbo secco o asciutto (b.s.) e l'altro la temperatura a bulbo umido o bagnato (b.u.), così denominata in quanto il bulbo del termometro è rivestito da una garza mantenuta umida con acqua durante la rilevazione.

Una ventolina richiama l'aria dell'ambiente e la forza a passare lungo i contenitori dei bulbi, che sono schermati all'irraggiamento. L'aria, lambendo la garza inumidita, fa evaporare l'acqua con un processo ad entalpia costante provocando il raffreddamento del bulbo a scapito quindi del solo calore latente di vaporizzazione.

Si rileverà che tanto più l'aria è secca tanto maggiore è la differenza tra le temperature di bulbo secco e umido essendo maggiore l'evaporazione e quindi l'abbassamento di temperatura al b.u.

Viceversa tale differenza si ridurrà all'aumentare dell'umidità dell'aria.

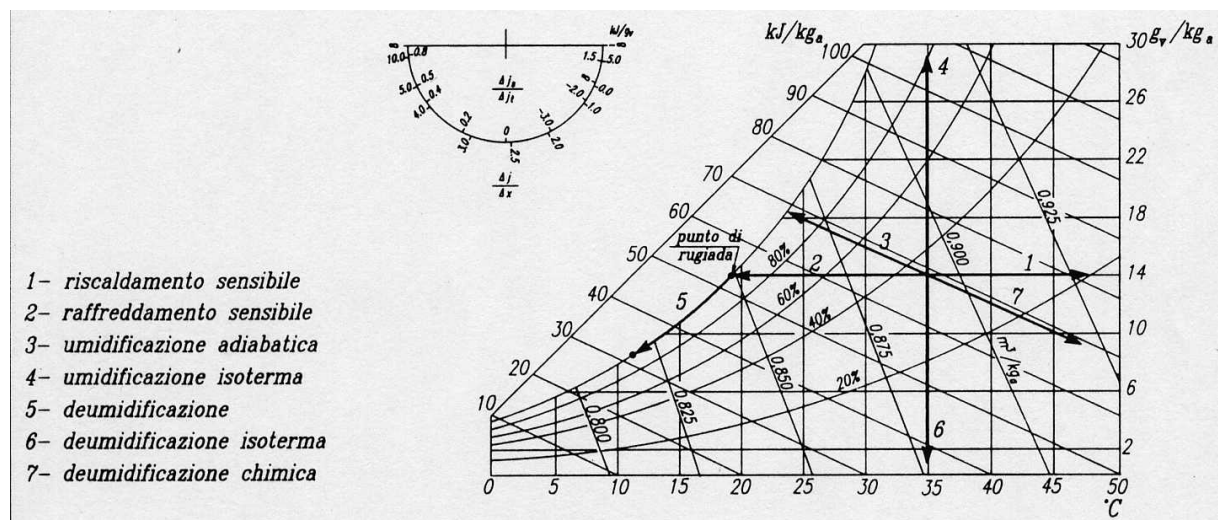
L'umidità relativa della miscela si individua sul diagramma psicrometrico a partire dal valore della temperatura a b.u. con la seguente procedura:

- si riportano sul diagramma psicrometrico i valori di b.s. e b.u. letti dallo psicrometro;
- si porta il valore di b.u. fino alla curva di saturazione;
- a partire da tale punto si traccia la retta ad entalpia costante fino ad incontrare il valore della retta a temperatura costante di b.s.;
- in corrispondenza dell'intersezione è possibile leggere il valore dell'umidità relativa della miscela; tale punto nel diagramma rappresenta quindi lo stato fisico della miscela.

4. IL DIAGRAMMA PSICROMETRICO

Il diagramma psicrometrico viene utilizzato ai fini del calcolo delle trasformazioni subite dalle miscele d'aria e vapor d'acqua ed è riferito alla pressione atmosferica standard (circa 1,013 bar).

Lo stato fisico di una miscela (temperatura, umidità, entalpia) viene rilevato sul diagramma noti due qualsiasi parametri.



5. TRASFORMAZIONI DELL'ARIA UMIDA

Le trasformazioni dell'aria umida sono processi termodinamici che interessano le miscele di aria e vapor d'acqua e che avvengono nelle sezioni delle unità di trattamento aria di un sistema di climatizzazione.

I processi più comuni sono:

1. miscelazione adiabatica di più correnti di aria umida
2. riscaldamento e raffreddamento sensibile (a titolo costante)
3. umidificazione adiabatica
4. raffreddamento con deumidificazione

Allo studio delle trasformazioni psicrometriche si applicano:

- il Principio di conservazione della materia (conservazione della massa di aria secca e di vapore):

$$m_a \text{ ENTR.} = m_a \text{ USC.}$$

$$m_v \text{ ENTR.} = m_v \text{ USC.}$$

- il Principio di conservazione dell'energia:

$$Q = h_M \text{ USC} - h_M \text{ ENTR}$$

dove

Q è la quantità di calore scambiata nella trasformazione mentre

$h_M = h_a + h_v$ è l'entalpia totale della miscela ($h_{\text{aria secca}} + h_{\text{vapore}}$).

5.1 Miscelazione adiabatica di più correnti di aria umida

Supponiamo di avere due portate d'aria (identificate con le lettere A e B) che si miscelano all'interno di una Unità di Trattamento Aria (UTA) di un sistema di climatizzazione; il processo è considerato adiabatico perché non vi è scambio di calore fra l'apparecchiatura nella quale avviene il processo e l'esterno.

Due miscele di aria umida (identificate dalla lettere A e B) hanno determinate caratteristiche fisiche, quali per esempio:

- portata d'aria in massa (kg/s) o in volume (m^3/s)
- temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
- grado igrometrico (%)

Analiticamente o tramite il diagramma psicrometrico per lettura diretta si possono ottenere gli altri parametri, quali:

- volume specifico della miscela (m^3/kg)
- titolo della miscela (g_v/kg_a)
- entalpia specifica della miscela (kJ/kg_a)

Il punto di miscela (C) fra i due stati fisici si trova sulla retta che unisce A e B, denominata retta di lavoro, e si troverà più vicino al punto corrispondente alla portata maggiore.

Il punto di miscela C dovrà rispettare le seguenti equazioni derivanti rispettivamente dal principio di conservazione della massa di aria secca, dal principio di conservazione della massa di vapore e dal principio di conservazione dell'energia:

$$M_A + M_B = M_C$$

$$M_A x_A + M_B x_B = M_C x_C$$

$$h_A M_A + h_B M_B = h_C M_C$$

dove M = portata in massa (kg/s)

5.2 Riscaldamento / raffreddamento sensibile

Questo processo avviene facendo passare la miscela da una batteria di scambio termico collegata con un generatore di calore o un gruppo frigorifero.

In questo modo si aumenta o diminuisce la temperatura della miscela senza vararne il contenuto di umidità assoluta. Un processo durante il quale il titolo si mantiene costante è appunto indicato come riscaldamento o raffreddamento "sensibile".

Il flusso termico scambiato si calcola con la relazione

$$Q_{12} = M (h_2 - h_1)$$
$$Q_{12} = M (c_{pa} + x c_{pv}) (t_2 - t_1)$$

Dove i pedici rappresentano rispettivamente:

- pedice "1": condizioni di inizio del processo
- pedice "2": condizioni di fine del processo

Nei calcoli tecnici si introducono alcune semplificazioni: infatti si può considerare trascurabile il prodotto ($x c_{pv}$) e quindi la relazione per il calcolo di Q_{12} diventa:

$$Q_{12} = M c_{pa} (t_2 - t_1) \quad (W)$$

dove c_{pa} è il calore specifico a pressione costante dell'aria secca pari a 1 kJ/kgK.

Quando Q_{12} assume valore positivo, in conformità alla convenzione termodinamica (riscaldamento), il calore è ceduto al sistema (corrente d'aria umida) viceversa è sottratto alla corrente (raffreddamento).

Sul diagramma psicrometrico queste trasformazioni sono rappresentate con un segmento parallelo all'asse delle temperature.

Nel caso di raffreddamento sensibile, la superficie della batteria di raffreddamento lambita dal fluido deve essere superiore alla temperatura di rugiada dell'aria stessa, in caso contrario sia avrebbe raffreddamento con deumidificazione. In tal caso si avrebbe la condensazione di parte del vapore contenuto nella miscela e l'aria subirebbe un contemporaneo processo di raffreddamento con deumidificazione; la quantità di acqua formatasi per condensazione sarà uguale a $(x_2 - x_1)$.

5.3 Umidificazione adiabatica

L'umidificazione di una miscela avviene facendo passare la corrente d'aria attraverso una apparecchiatura entro la quale una serie di ugelli nebulizzano acqua o iniettano vapore sulla miscela. E' buona regola utilizzare questo secondo trattamento in ambienti quali ospedali, scuole e tutti gli edifici dove è fondamentale evitare la contaminazione microbica dell'ambiente ad opera dei microrganismi presenti nell'acqua.

Il processo è dunque interpretabile come un miscelamento di tipo adiabatico fra la corrente d'aria e il vapor d'acqua iniettato.

Il punto identificativo dello stato finale del processo di umidificazione si trova su una retta passante per il punto rappresentativo delle condizioni iniziali 1 e di inclinazione determinata dal valore dell'entalpia specifica del vapore iniettato o dell'acqua nebulizzata (h_v).

I valori di h_v del vapore si leggono da tabelle termodinamiche del vapor d'acqua in corrispondenza della temperatura.

Se l'umidificazione è effettuata utilizzando acqua nebulizzata, il valore dell'entalpia del liquido saturo è molto bassa per cui tale processo si considera pressoché ad entalpia costante: $h_1 = h_2$; ciò è dimostrato dal fatto che l'entalpia dell'acqua alla pressione atmosferica nell'intervallo $0^\circ\text{C} - 100^\circ\text{C}$ varia da 0 kJ/g a 0,419 kJ/g, per cui nelle applicazioni tecniche la trasformazione può essere ritenuta isoentalpica.

Nel caso di umidificazione adiabatica deve essere introdotta l'efficienza di umidificazione ε che risulta essere compresa fra zero ed uno. Il valore massimo dell'efficienza di umidificazione è pari a circa l'85%.

Esempio: miscelazione adiabatica

Due portate d'aria in volume, V_A e V_B , hanno le seguenti caratteristiche fisiche:

$$\begin{aligned}V_A &= 1000 \text{ m}^3 / \text{h} \\t_A &= 10 \text{ }^\circ\text{C} \\ \varphi_A &= 0,4 \text{ (40\%)}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}V_B &= 1500 \text{ m}^3 / \text{h} \\t_b &= 25 \text{ }^\circ\text{C} \\ \varphi_B &= 0,6 \text{ (60\%)}\end{aligned}$$

Tramite il diagramma psicrometrico possiamo ottenere i seguenti parametri:

$$\begin{aligned}v_A &= 0,805 \text{ m}^3 / \text{kg} & v_B &= 0,860 \text{ m}^3 / \text{kg} \\x_A &= 3,1 \text{ g/kg} & x_B &= 11,8 \text{ g/kg}\end{aligned}$$

Il punto di miscela (C) fra i due stati fisici si trova sulla retta che unisce A e B, denominata retta di lavoro. Poiché conosciamo le portate in volume di A e B ed anche i rispettivi volumi specifici, siamo in grado di ricavare le portate d'aria in massa M_A e M_B .

Dalla relazione $v = V/m$ si ottiene così:

$$\begin{aligned}M_A &= 1000 \text{ m}^3 / \text{h} / 0,805 \text{ m}^3 / \text{kg} = 1242 \text{ kg} / \text{h} \\M_B &= 1500 \text{ m}^3 / \text{h} / 0,860 \text{ m}^3 / \text{kg} = 1744 \text{ kg} / \text{h}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Per il principio di conservazione della massa } M_A + M_B &= M_C \\M_C &= 1242 \text{ kg} / \text{h} + 1744 \text{ kg} / \text{h} = 2986 \text{ kg} / \text{h}\end{aligned}$$

Il titolo del punto di miscela (x_C) è dato dalla seguente relazione:

$$M_A x_A + M_B x_B = M_C x_C$$

$$x_C = (M_A x_A + M_B x_B) / M_C = 8,2 \text{ g/kg}_a$$

Individuato sul diagramma il valore di x_C , tracciando la parallela alle ascisse, nel punto di intersezione con la retta di lavoro sarà individuato il punto di miscela (C) la cui temperatura è di circa $19 \text{ }^\circ\text{C}$.

Peraltro il punto C può essere trovato graficamente dal rapporto M_A / M_C o M_B / M_C moltiplicati per il segmento AB a partire rispettivamente da A o da B:

$$BC = M_A / M_C \text{ AB}$$

$$AC = M_B / M_C \text{ AB}$$

Il punto C si troverà più vicino al punto corrispondente ad una portata maggiore; è evidente che qualora $M_A = M_B$ si avrebbe $AC = BC$.

Inoltre per il principio di conservazione dell'energia si ha:

$$\begin{aligned}h_A M_A + h_B M_B &= h_C M_C \\h_C &= (h_A M_A + h_B M_B) / M_C\end{aligned}$$

Si calcolano h_A e h_B .

$$h_A = (1 \text{ kJ/kgK})(10^\circ\text{C}) + (3,1 \times 10^{-3} \text{ kg}_v / \text{kg}_a)(1,9 \text{ kJ/kgK} \bullet 10^\circ\text{C} + 2500 \text{ kJ/kg}) = 17,80 \text{ kJ/kg}_a$$

$$h_B = (1 \text{ kJ/kgK})(25^\circ\text{C}) + (11,8 \times 10^{-3} \text{ kg}_v / \text{kg}_a)(1,9 \text{ kJ/kgK} \bullet 25^\circ\text{C} + 2500 \text{ kJ/kg}) = 55,06 \text{ kJ/kg}_a$$

Si calcola poi h_C .

$$h_C = [(17,80 \bullet 1242) + (55,06 \bullet 1744)] / 2986 = 39,6 \text{ kJ/kg}_a$$

Esempio: riscaldamento sensibile

Una corrente di aria umida avente una portata in volume di 4000 m³/h ha le seguenti caratteristiche fisiche:

$$t = 2^{\circ}\text{C}$$

$$\text{UR} = 80\%$$

$$v = 0,784 \text{ m}^3/\text{kg}$$

La corrente d'aria passa attraverso una batteria di riscaldamento e viene riscaldata fino ad una temperatura finale di 20°C.

Il flusso termico scambiato si calcola con la relazione

$$Q_{12} = M c_{pa} (t_2 - t_1)$$

Una volta determinato M si procede al calcolo della potenza termica scambiata.

Per determinare M si divide la portata in volume per il volume specifico, poi, se necessario come in questo caso, si trasformano kg/h in kg/s (quest'ultima trasformazione si ottiene dividendo per 3600, essendo 1h = 3600s).

$$M = (4000 \text{ m}^3/\text{h}) / [(0,784 \text{ m}^3/\text{kg}) 3600] = 1,42 \text{ kg/s}$$

$$Q_{12} = M c_{pa} (t_2 - t_1) = (1,42 \text{ kg/s}) (1 \text{ kJ/kgK}) (20-2) \text{ K} = \mathbf{25,56 \text{ kW}}$$

Esempio: raffreddamento sensibile

Una corrente di aria umida avente una portata in volume di 10000 m³/h ha le seguenti caratteristiche fisiche:

$$t = 34^{\circ}\text{C}$$

$$\text{UR} = 50\%$$

$$v = 0,89 \text{ m}^3/\text{kg}$$

La corrente d'aria passa attraverso una batteria di raffreddamento e viene raffreddata fino ad una temperatura finale di 26°C.

Il flusso termico scambiato si calcola con la relazione

$$Q_{12} = M c_{pa} (t_2 - t_1)$$

Una volta determinato M si procede al calcolo della potenza termica scambiata.

Per determinare M si divide la portata in volume per il volume specifico, poi, se necessario come in questo caso, si trasformano kg/h in kg/s (quest'ultima trasformazione si ottiene dividendo per 3600, essendo 1h = 3600s).

$$M = (10000 \text{ m}^3/\text{h}) / [(0,89 \text{ m}^3/\text{kg}) 3600] = 3,12 \text{ kg/s}$$

$$Q_{12} = M c_{pa} (t_2 - t_1) = (3,12 \text{ kg/s}) (1 \text{ kJ/kgK}) (26-34) \text{ K} = \mathbf{-24,96 \text{ kW}}$$