

SISTEMI APERTI A REGIME COSTANTE

Si definisce **sistema aperto** un determinato volume dello spazio racchiuso da una superficie, detta confine del sistema, attraverso la quale può entrare o uscire una certa quantità di materia. Nel nostro studio considereremo dei sistemi aperti **semplici** che presentano una sola sezione d'ingresso e una sola sezione d'uscita a massa costante, cioè la stessa quantità di massa che entra deve anche uscire. Ciò che consideriamo è allora un sistema aperto **stazionario** nel quale in ogni istante di tempo la temperatura, la pressione, il volume e i flussi del sistema rimangono costanti.

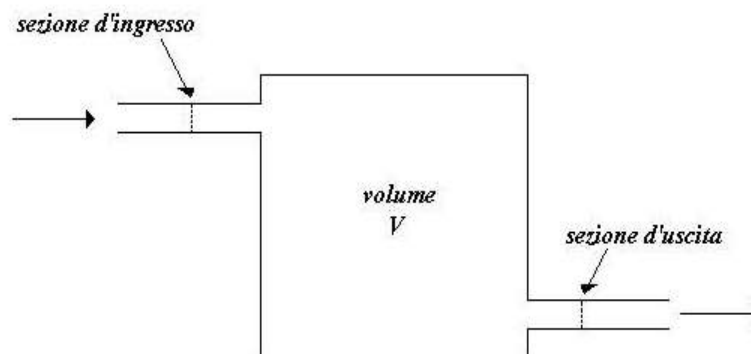


Figura 1 - Sistema aperto con una sola sezione d'ingresso e una sola sezione d'uscita.

Abbiamo una superficie che racchiude il volume V e una sola sezione d'ingresso S_1 e una sola sezione d'uscita S_2 .

Per affrontare lo studio di questo sistema aperto semplice si utilizza un sistema chiuso, detto sistema ausiliario, che si sposta nello spazio per un certo intervallo di tempo, questa regione di spazio costituisce il sistema aperto.

All'istante $t=t_0$ avremo:

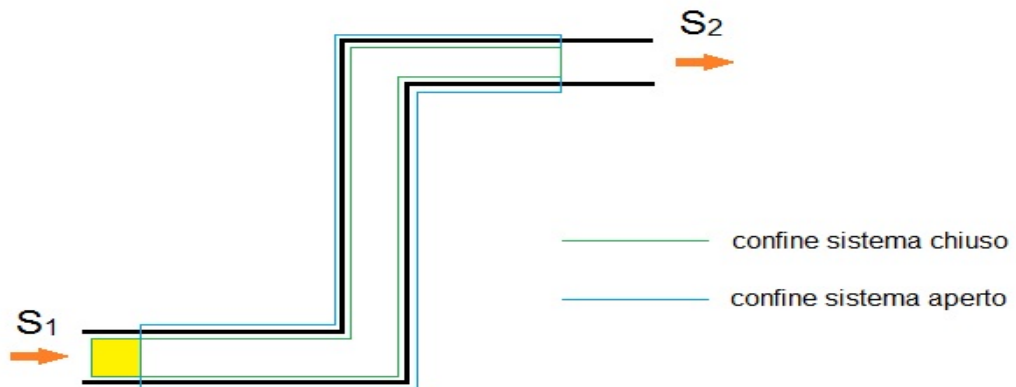


Figura 2 - Sistema aperto all'istante iniziale.

Dopo un istante Δt avremo:

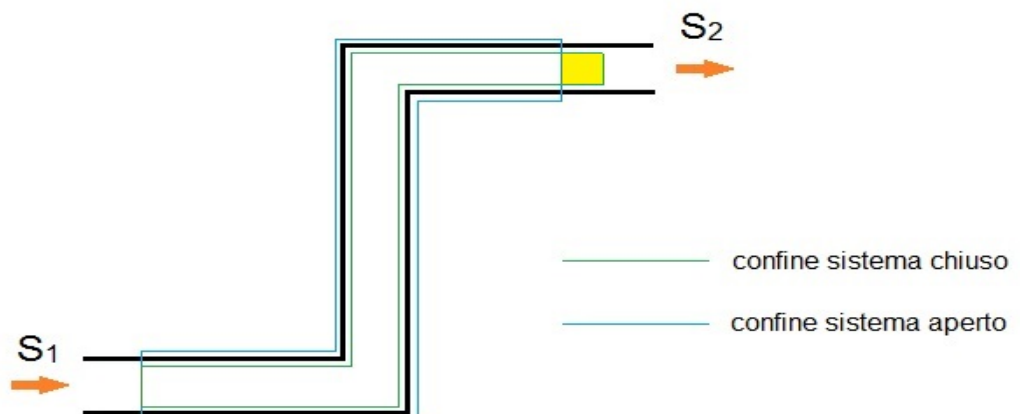


Figura 3 - sistema aperto all'istante finale.

Al trascorrere del tempo, al sistema aperto è associata sia una variazione di massa che una variazione di energia. Ma nel nostro caso abbiamo detto che la massa rimane costante, per cui la quantità di massa che entra dalla sezione d'ingresso S_1 è uguale alla quantità di massa che esce dalla sezione d'uscita S_2 : $\Delta M_1 = \Delta M_2$.

È diverso il discorso per il bilancio d'energia in quanto l'energia presente nella sezione d'entrata S_1 è diversa da quella nella sezione d'uscita S_2 : $\Delta E_1 \neq \Delta E_2$.

Per determinare il bilancio di energia di questo sistema dovremo considerare l'energia cinetica (E_c), l'energia potenziale (E_p) e l'energia interna (U). Le energie ΔE_1 e ΔE_2 associate alle masse ΔM_1 e ΔM_2 sono date dalle formule:

$$\Delta E_1 = \Delta M_1 \cdot (e_{c1} + e_{p1} + u_1) \quad (1)$$

$$\Delta E_2 = \Delta M_2 \cdot (e_{c2} + e_{p2} + u_2) \quad (2)$$

dove le varie forme di energia sono state espresse tramite i valori specifici, per cui:

$$e_c = \frac{\Delta E_c}{\Delta M} \text{ energia cinetica specifica} \quad (3)$$

$$e_p = \frac{\Delta E_p}{\Delta M} \text{ energia potenziale specifica} \quad (4)$$

$$u = \frac{\Delta U}{\Delta M} \text{ energia interna specifica} \quad (5)$$

Il bilancio dell'energia del sistema aperto può allora essere fatto appoggiandosi al sistema ausiliario chiuso per cui vale il primo Principio della termodinamica o Principio di conservazione dell'energia:

$$\Delta E = E_{t_0+\Delta t} - E_{t_0} = Q - L \quad (6)$$

che in forma specifica può essere scritta nel seguente modo:

$$(e_{c2} + e_{p2} + h_2) - (e_{c1} + e_{p1} + h_1) = q - l \quad (7)$$

dove l'entalpia (h) è:

$$h = u + p \cdot v \quad (8)$$

Nella formula specifica del bilancio dell'energia andiamo a sostituire le energie con le loro seguenti definizioni:

$$e_c = \frac{1}{2} w^2, \text{ dove } w \text{ è la velocità} \quad (9)$$

$$e_p = g \cdot z, \text{ dove } g \text{ è l'accelerazione di gravità e } z \text{ è l'altezza} \quad (10)$$

otteniamo:

$$\left(\frac{1}{2} w_2^2 + g \cdot z_2 + h_2\right) - \left(\frac{1}{2} w_1^2 + g \cdot z_1 + h_1\right) = q - l \quad (11)$$

che può essere riscritta come:

$$\frac{w_2^2 - w_1^2}{2} + g \cdot (z_2 - z_1) + h_2 - h_1 = q - l \quad (12)$$

Con questa formula siamo in grado di capire quali sono le caratteristiche della macchina per il nostro **sistema forzato**, che costringe il fluido a muoversi nella direzione che ci interessa.

Mentre nel caso in cui c'è bisogno di progettare un **sistema a tiraggio naturale**, dobbiamo fare in modo che nell'equazione di bilancio scompaia la voce del lavoro (I), così avremo un sistema che non ha bisogno dell'utilizzo dell'energia elettrica.

Il moto del fluido in un sistema aperto

La velocità, e quindi l'energia cinetica, di un fluido che scorre in un condotto non è costante in ogni punto, ma varia in funzione della sezione che sta considerando e in funzione della distanza dall'asse del condotto. I tipi di moto di un fluido all'interno di un condotto sono infiniti e variano tra le condizioni estreme di **moto laminare e moto turbolento**.



Figura 4 - moto laminare.



Figura 5 - moto turbolento.

Per lo studio di questi due moti si consideri il fluido suddiviso in tanti "filetti". Nel caso di moto laminare che si sviluppa quando il fluido ha una velocità piuttosto bassa, questi filetti si muovono senza mai intrecciarsi e hanno la velocità al centro molto diversa di quella in periferia. Nel caso di moto turbolento, invece, i filetti si mescolano dando luogo a vortici e quindi la velocità varia continuamente e irregolarmente, ma rimane piuttosto invariata su tutta la sezione.

Per ricavare l'energia cinetica posseduta dal fluido, riducendo al minimo un possibile errore, bisogna introdurre un **coefficiente correttivo α** ottenendo così:

$$e_c = \frac{1}{2} \alpha \cdot w^2, \quad (13)$$

dove il fattore α può assumere tutti i valori compresi tra uno e due, in particolare abbiamo **$\alpha=2$** nel caso di moto completamente laminare, e

abbiamo $\alpha=1$ nel caso di moto così turbolento da poter considerare la velocità uniforme su tutta la sezione.

Dopo queste considerazioni il bilancio di energia di un sistema aperto può essere riscritto in questo modo:

$$\frac{\alpha}{2}(w_2^2 - w_1^2) + g \cdot (z_2 - z_1) + h_2 - h_1 = q - l \quad (14)$$

CONDIZIONATORE D'ARIA

Un condizionatore d'aria è un componente in grado di modificare i parametri di temperatura e grado igrometrico di una corrente d'aria calda e umida iniziale, in modo tale da produrre aria relativamente fredda e deumidificata o secca.

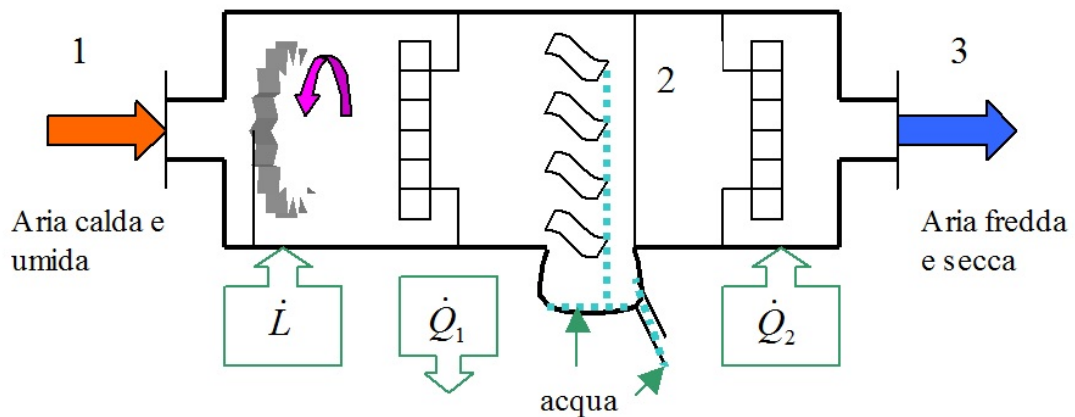


Figura 6 - schema di un condizionatore.

Un condizionatore (figura 6) in generale è composto da 4 elementi fondamentali. Innanzitutto una ventola, che facilita l'afflusso d'aria, e in figura è rappresentata da una potenza \dot{L} entrante. Immediatamente dopo l'aria incontra una serpentina di raffreddamento che le sottrae calore per unità di tempo \dot{Q}_1 , in modo da portarla alla saturazione. Le alette che si trovano subito dopo hanno il compito di raccogliere la condensa formatasi a causa del raffreddamento, formando acqua che viene incanalata in un tubicino (si tratta di acqua inquinata perchè ricca di sostanze tossiche che si trovano nell'aria). L'aria nel punto 2 è satura e troppo fredda per essere immessa in un ambiente, quindi passa attraverso l'ultima sezione del condizionatore, chiamata di post-riscaldamento, che fornendo il calore per unità di tempo \dot{Q}_2 scalda l'aria e la rende adatta ad essere immessa nell'ambiente, come nel punto 3.

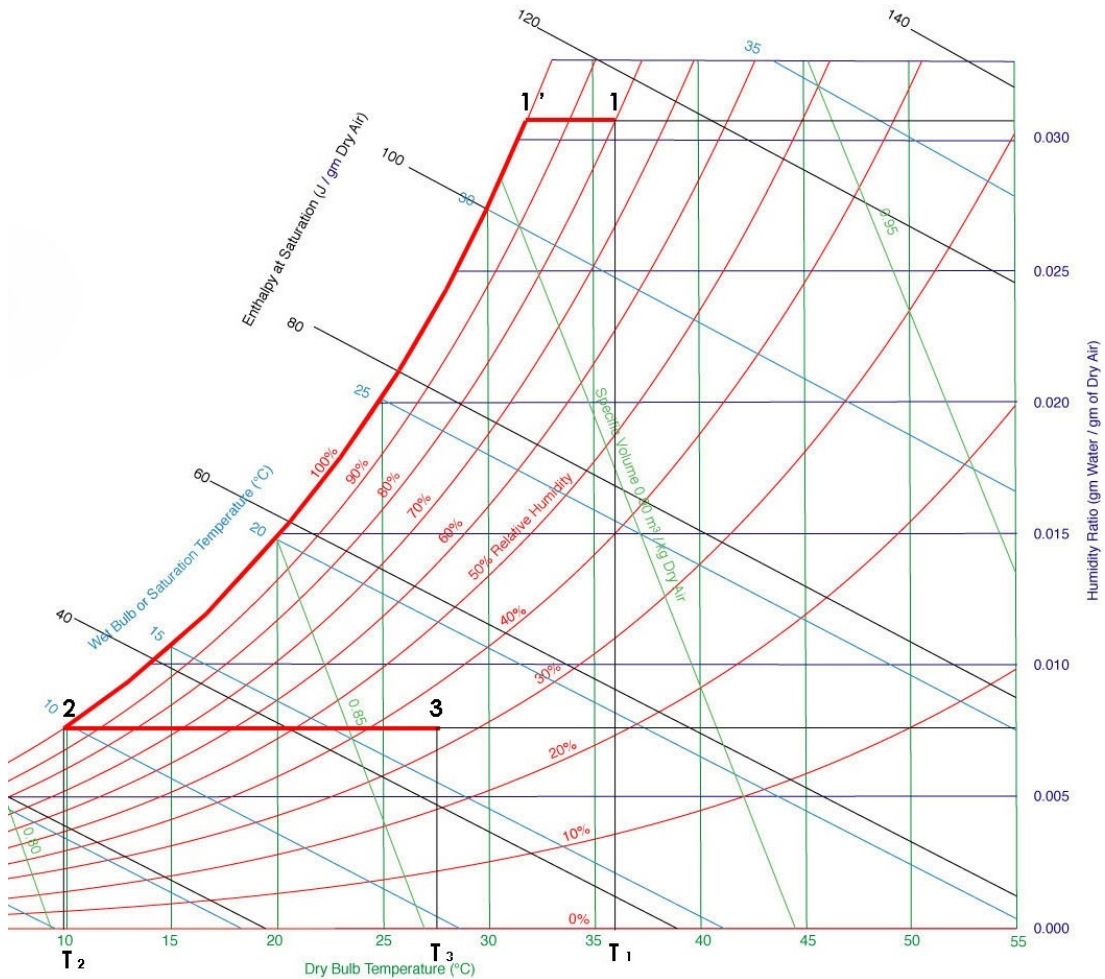


Figura 7 - l'andamento dell'aria in un condizionatore.

All'ingresso del condizionatore (punto **1**) l'aria è calda (temperatura T_1) e umida. A contatto con la griglia di raffreddamento le viene sottratto il calore Q_1 , quindi raffredda fino al punto **1'** (il titolo x_1 rimane costante perchè le masse di aria secca e vapore restano costanti), poi comincia la condensazione accompagnata da un notevole raffreddamento fino al punto **2**, con temperatura T_2 e titolo x_2 . A questo punto l'aria viene post-riscaldata fornendole un calore Q_2 e portandola a una temperatura T_3 superiore, mantenendo il titolo x_2 costante, ma diminuendo l'umidità relativa.

Esercizio

Supponiamo di avere:

la portata in volume dell'aria in ingresso $\dot{V}_1 = 470 \frac{m^3}{h}$,

le caratteristiche dell'aria in entrata $T_1 = 32^\circ C$ e $\phi_1 = 0,8$,

le caratteristiche dell'aria in uscita $T_2 = 20^\circ C$ e $\phi_2 = 0,5$,

la potenza della ventola $\dot{L} = 450W$,

determinare i calori per unità di tempo \dot{Q}_1 e \dot{Q}_2 .

Calcolo del titolo dell'aria in ingresso (x_1) e in uscita (x_2):

$$x_1 = 0,622 \frac{\varphi_1 p_s(32^\circ C)}{1 - \varphi_1 p_s(32^\circ C)} = 0,622 \frac{0,8 \cdot 0,04753}{1 - 0,8 \cdot 0,04753} = 0,0246 \frac{kg_v}{kg_A} \quad (15)$$

$$x_2 = x_3 = 0,622 \frac{\varphi_2 p_s(20^\circ C)}{1 - \varphi_2 p_s(20^\circ C)} = 0,622 \frac{0,5 \cdot 0,02336}{1 - 0,5 \cdot 0,02336} = 0,0074 \frac{kg_v}{kg_A} \quad (16)$$

A questo punto ci serve la portata in massa di aria secca \dot{M}_A che è la stessa sia in entrata che in uscita, d'altra parte l'aria secca è un gas perfetto, quindi:

$$p_{A_3} V_3 = M_A R_A T_3 \quad (17)$$

$$p_{A_3} = p_{tot} - p_{V_3} = p_{tot} - \varphi_3 \cdot p_s(20^\circ C) = 1 - 0,5 \cdot 0,02336 = 0,988 \text{ BAR} = 98,8 \text{ kPa} \quad (18)$$

Quindi:

$$\dot{M}_A = \frac{p_{A_3} \dot{V}_3}{R_A T_3} = \frac{0,988 \cdot 10^5 \cdot 470}{287 \cdot 293} = 552 \frac{kg}{h} \quad (19)$$

Possiamo quindi facilmente trovare la portata in massa dell'acqua condensata:

$$\dot{M}_{cond} = M_{V_1} - M_{V_3} = M_A x_1 - M_A x_3 = M_A (x_1 - x_3) = 552 \cdot (0,0246 - 0,0074) = 9,5 \frac{kg}{h} \quad (20)$$

A questo punto facciamo il bilancio energetico della prima parte del condizionatore (comprendente i punti **1** e **2**), ottenendo:

$$\dot{M}_A J_1 - \dot{M}_A J_2 - \dot{M}_{cond} h_l = \dot{Q}_1 - \dot{L} \quad (21)$$

dove h_l rappresenta l'entalpia specifica del liquido di condensazione. La temperatura di quest'ultima può essere estrapolata dal diagramma psicrometrico oppure dalle tabelle dell'aria satura, ottenendo:

$$T_2 \approx 10^\circ C$$

(in realtà dalle tabelle si otterrebbe un valore del titolo, per aria satura alla temperatura di $10^\circ C$, pari a $0,00762 \text{ kg}_v/\text{kg}_A$ contro i $0,0074 \text{ kg}_v/\text{kg}_A$ del nostro caso, quindi con un errore ancora accettabile).

A questo punto calcoliamo le entalpie specifiche dell'aria nei punti **1**, **2** e **3**, ottenendo:

$$J_1 = t_1 + x_1 \cdot (2500 + 1,9 \cdot t_1) = 32 + 0,0246 \cdot (2500 + 1,9 \cdot 32) = 95 \frac{kJ}{kg_A} \quad (22)$$

$$J_2 = t_2 + x_2 \cdot (2500 + 1,9 \cdot t_2) = 10 + 0,0074 \cdot (2500 + 1,9 \cdot 10) = 28 \frac{kJ}{kg_A} \quad (23)$$

$$J_3 = t_3 + x_3 \cdot (2500 + 1,9 \cdot t_3) = 20 + 0,0074 \cdot (2500 + 1,9 \cdot 20) = 39 \frac{kJ}{kg_A} \quad (24)$$

mentre l'entalpia specifica dell'acqua liquida condensata

$$h_l = c_l \cdot t_2 = 4,187 \cdot 10 = 41,87 \frac{kJ}{kg} \quad (25)$$

di conseguenza sostituendo nell'equazione di bilancio energetico otteniamo:

$$\dot{Q}_1 = \dot{M}_A J_1 - \dot{M}_A J_2 - M_{cond} h_l + \dot{L} = -\frac{552}{3600}(95 - 28) + \frac{9,5 \cdot 41,87}{3600} - 0,450 = -10,6 kW \quad (26)$$

dove il segno meno sta ad indicare che è un calore uscente dal sistema (sottratto dall'aria) mentre il lavoro è negativo perchè effettuato sul sistema. Infine, scrivendo l'equazione di bilancio energetico per la seconda parte del condizionatore (punti **2-3**) otteniamo:

$$\dot{Q}_2 = \dot{M}_A J_3 - \dot{M}_A J_2 = \frac{552}{3600}(39 - 28) = 1,8 kW \quad (27)$$

che rappresenta il calore che deve essere fornito alla batteria di post-riscaldamento.