Sistemi aperti

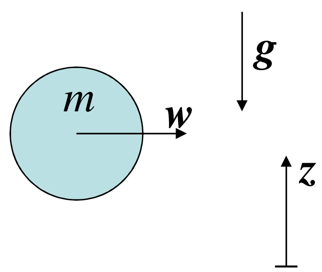
1) Concetti di base
2) Primo principio della termodinamica
3) Secondo principio della termodinamica
4) Stati di equilibrio stabile
5) Diagramma energia-entropia
6) Lavoro, non-lavoro e calore
7) Macchine termiche
8) Sistemi semplici
9) Proprietà di sostanze pure all'ES
10) **SISTEMI APERTI**
11) *Aria umida*

(?) Exergia e rendimento exergetico

Stato di flusso di massa

Si consideri un sistema semplice (ad es., un elemento di fluido) che trasli con velocità **w** in un campo gravitazionale, con accelerazione di gravità **g**.

Il sistema è in uno stato di non-equilibrio. Sono definite *E*, *S*, *V*, **n**, *m*, **w**, *z*, ...



Al valore di *E* contribuiscono l’energia cinetica e quella potenziale dell’elemento

$$E = \frac{1}{2} m\, w^2 + m\, \mathbf{g}\, z + \dots$$

Se vale

$$E - \left(\frac{1}{2} m\, w^2 + m\, \mathbf{g}\, z \right) = m\, u(s, v, \mathbf{y})$$

chiamiamo lo stato **stato di flusso di massa** (SFM).

Stato di flusso di massa

$$U = m\,u(s, v, \mathbf{y})$$

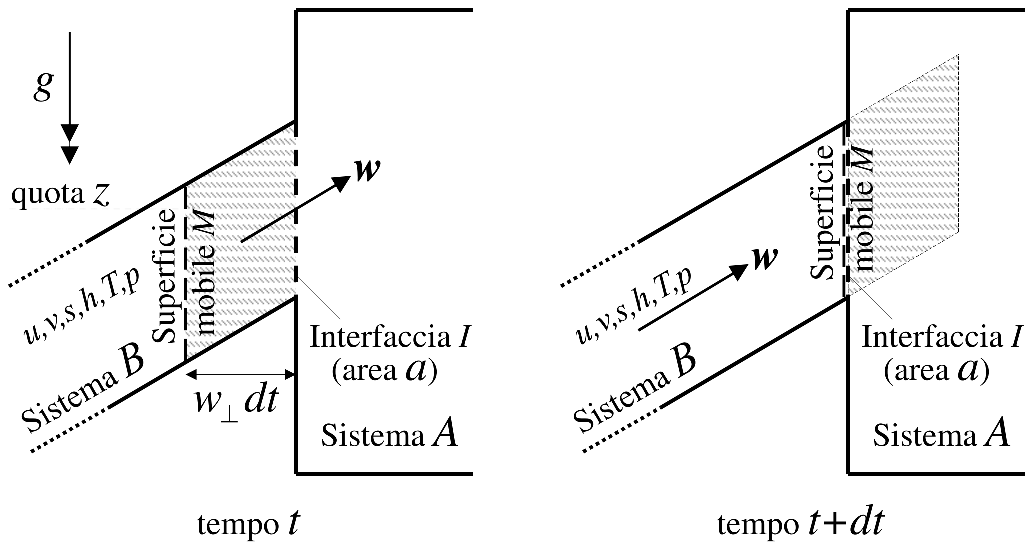
U è l'energia interna del sistema nello SES caratterizzato da (*S*, *V*, **n**), stato in cui il sistema è in quiete (**w** = 0), non soggetto a forze gravitazionali (**g** = 0).

In meccanica dei continui si postula l'esistenza di tali stati, la capacità descrittiva e di previsione dei fenomeni di questa disciplina costituisce una conferma a posteriori dell'esistenza degli SFM.

Lo SES caratterizzato da (*S*, *V*, **n**) viene detto stato di ES associato allo SFM.
Lo SFM è uno stato di non equilibrio, perciò non sono definite temperatura, pressione e potenziali chimici; queste proprietà sono però definite per lo SES associato. Quando si parla di temperatura, pressione e potenziali chimici per gli SFM, si intende temperatura, pressione e potenziali chimici dello SES associato.

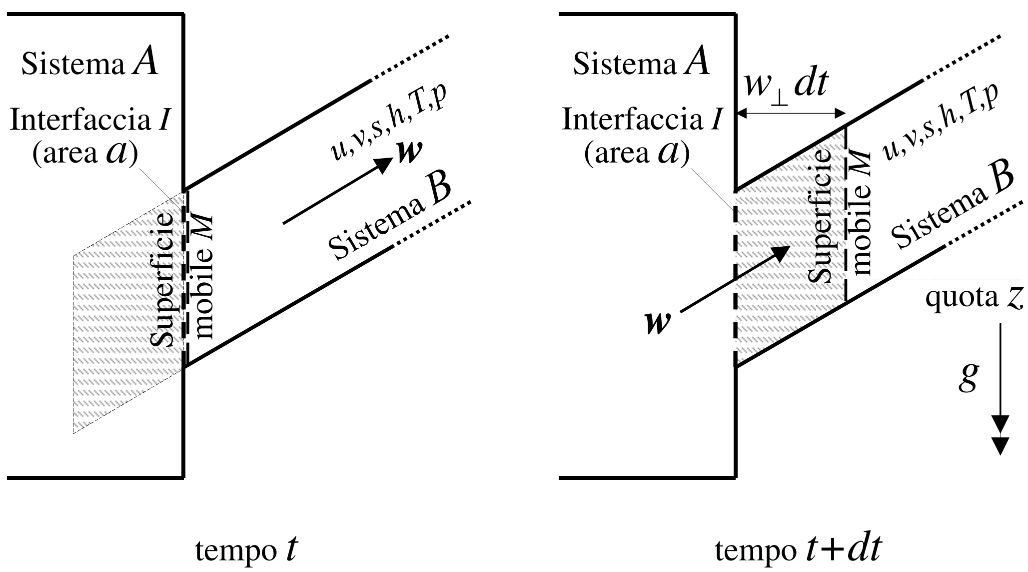
Interazione di tipo flusso di massa

Si consideri un sistema *A* con un tratto della superficie che ne delimita il volume in contatto con un sistema semplice *B,* i cui elementi di fluido siano tutti nello stesso stato di flusso di massa con velocità **w** diretta verso *A*. In questo caso si ha una *interazione di tipo flusso di massa in ingresso*: infatti elementi di fluido entrano nel sistema *A*.



Interazione di tipo flusso di massa

Se invece la velocità **w** è diretta verso l'esterno di *A*, elementi di fluido escono dal sistema *A*. Si ha quindi una *interazione di tipo flusso di massa in uscita*.



Interazione di tipo flusso di massa

In una interazione di tipo flusso di massa i sistemi *A* e *B* scambiano massa, energia ed entropia.

Per un'interazione di tipo flusso di massa in ingresso si ha

$$\delta m^{B\to A} = \rho\, w_{\perp\text{in}}\, a\, dt$$

$$\delta E^{B\to A} = \delta m^{B\to A}\left(h + w^2/2 + gz\right)$$

$$\delta S^{B\to A} = \delta m^{B\to A}\left(s\right)$$

dove $w_{\perp\text{in}}$ è la componente di ***w*** perpendicolare all'area di ingresso *a* e diretta verso l'interno del sistema *A.*

L'ingresso degli elementi fluidi nel sistema fa aumentare l'energia del sistema:

- a causa dell'energia posseduta dagli elementi fluidi stessi

$$\delta m^{B\to A}\left(u + w^2/2 + gz\right)$$

- a causa dell'azione meccanica necessaria per spingere gli elementi fluidi all'interno del sistema (**lavoro di pulsione**)

$$\delta m^{B\to A}\left(pv\right)$$

Interazione di tipo flusso di massa

Analogamente per un'interazione di tipo flusso di massa in uscita si ha

$$\begin{aligned}
\delta m^{A\to B} &= \rho\, w_{\perp\text{out}}\, a\, dt \\
\delta E^{A\to B} &= \delta m^{A\to B}\left(h + w^2/2 + gz\right) \\
\delta S^{A\to B} &= \delta m^{A\to B}(s)
\end{aligned}$$

dove $w_{\perp\text{out}}$ è la componente di **w** perpendicolare all'area di uscita *a* e diretta verso l'esterno del sistema *A.*

Interazione di tipo flusso di massa

L'interazione di tipo flusso di massa si manifesta frequentemente con uno scambio di elementi di fluido fra il sistema B e il sistema A in modo continuo nel tempo. E' utile definire la **portata (massica)**, pari alla massa scambiata nell'unità di tempo.

Per un'interazione di tipo flusso di massa in ingresso, la portata vale

$$\dot{m}^{B\to A} = \frac{\delta m^{B\to A}}{dt} = \rho\, w_{\perp\text{in}}\, a$$

e l'energia e l'entropia scambiate per unità di tempo sono

$$\dot{E}^{B\to A} = \frac{\delta E^{B\to A}}{dt} = \dot{m}^{B\to A}\left(h + w^2/2 + gz\right)$$

$$\dot{S}^{B\to A} = \frac{\delta S^{B\to A}}{dt} = \dot{m}^{B\to A}(s)$$

Equazioni di bilancio per sistemi aperti

Sistema aperto: è un sistema soggetto a una o più interazioni di tipo flusso di massa.

I bilanci di massa, energia ed entropia per un sistema aperto soggetto a più interazioni di tipo flusso di massa, calore e lavoro sono

$$\frac{dm^A}{dt} = \sum_i \dot{m}_i^{A\leftarrow}$$

$$\frac{dE^A}{dt} = \sum_i \dot{m}_i^{A\leftarrow}\left(h_i + w_i^2/2 + g z_i\right) + \sum_k \dot{Q}_k^{A\leftarrow} - \sum_j \dot{W}_j^{A\rightarrow}$$

$$\frac{dS^A}{dt} = \sum_i \dot{m}_i^{A\leftarrow}\left(s_i\right) + \sum_k \frac{\dot{Q}_k^{A\leftarrow}}{T_k} + \dot{S}_{\mathrm{irr}}$$

N.B. = l'i-esima interazione di tipo flusso di massa può essere in ingresso o in uscita. Se è in ingresso $\dot{m}_i^{A\leftarrow}$ è positiva, se è in uscita è negativa e vale

$$\dot{m}_i^{A\leftarrow} = -\dot{m}_i^{A\rightarrow}$$

Componenti di sistemi energetici

Impianti di conversione energetica, per la trasformazione di forme di flusso di energia in altre forme.

Impianti di processo dei materiali, per la trasformazione di forme di flusso di massa in altre forme.

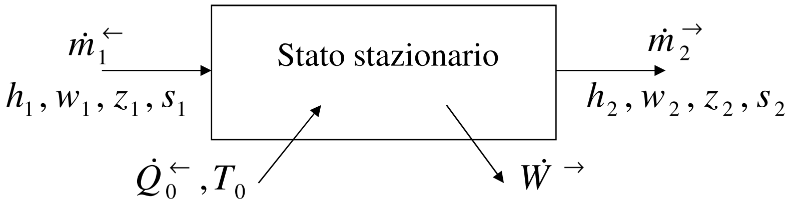
Impianto può essere descritto come una rete di componenti variamente connessi. Spesso la connessione è realizzata mediante uno o più fluidi (detti di processo) che passano in sequenza attraverso i componenti.

Ogni **componente** è progettato per realizzare una funzione mediante interazioni con altri sistemi.

Realizzare una **funzione**, in questo contesto, significa produrre degli specifici cambiamenti di stato del/dei fluido/i di processo.

Componenti di sistemi energetici

Equazioni di bilancio per un componente stazionario



$$0 = \dot m_1^{\leftarrow} - \dot m_2^{\rightarrow}$$

$$0 = \dot m_1^{\leftarrow}\left(h_1 + w_1^2/2 + g z_1\right) - \dot m_2^{\rightarrow}\left(h_2 + w_2^2/2 + g z_2\right) + \dot Q_0^{\leftarrow} - \dot W^{\rightarrow}$$

$$0 = \dot m_1^{\leftarrow}(s_1) - \dot m_2^{\rightarrow}(s_2) + \frac{\dot Q_0^{\leftarrow}}{T_0} + \dot S_{\mathrm{irr}}$$

da cui

$$\dot m_1^{\leftarrow} = \dot m_2^{\rightarrow} = \dot m$$

$$0 = \dot m(h_1 - h_2) + \dot m\left(w_1^2/2 - w_2^2/2\right) + \dot m(g z_1 - g z_2) + \dot Q_0^{\leftarrow} - \dot W^{\rightarrow}$$

$$0 = \dot m(s_1 - s_2) + \frac{\dot Q_0^{\leftarrow}}{T_0} + \dot S_{\mathrm{irr}}$$

Componenti di sistemi energetici

Componenti meccanici: sono componenti “veloci”, che lavorano con i tempi caratteristici dei riequilibramenti dei gradienti di pressione. I tempi di permanenza del fluido di processo sono brevi, perciò si trascurano gli scambi di calore con l’esterno. (Es: pompa, compressore, turbina, valvola)

Componenti termici: sono componenti “lenti”, che lavorano con i tempi caratteristici dei riequilibramenti dei gradienti di temperatura. I tempi di permanenza del fluido di processo sono relativamente lunghi. Non ci sono interazioni di tipo lavoro. (Es: scambiatore di calore)

N.B. = in tutti i componenti che considereremo sarà possibile trascurare le variazioni di energia cinetica e di energia potenziale tra ingresso e uscita, in quanto le variazioni di entalpia sono predominanti. Inoltre li studieremo in uno stato stazionario. Le equazioni di bilancio diventano perciò

$$\dot m_1^{\leftarrow} = \dot m_2^{\rightarrow} = \dot m$$

$$0 = \dot m(h_1 - h_2) + \dot Q_0^{\leftarrow} - \dot W^{\rightarrow}$$

$$0 = \dot m(s_1 - s_2) + \frac{\dot Q_0^{\leftarrow}}{T_0} + \dot S_{\mathrm{irr}}$$

- Per i componenti meccanici

$$\dot Q_0^{\leftarrow} = 0$$

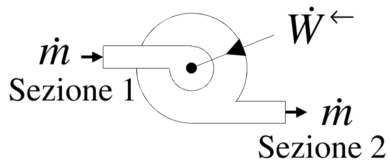
- Per i componenti termici

$$\dot W^{\rightarrow} = 0$$

Pompa

E' un componente a due bocche che utilizza lavoro per accrescere la pressione del flusso di un fluido incomprimibile

Simbolo



Equazioni di bilancio per una pompa

componente reale	componente reversibile
$\dot{W}^{\leftarrow} = \dot{m}(h_2 - h_1)$	$\dot{W}^{\leftarrow}_{\mathrm{rev}} = \dot{m}(h_{2\mathrm{rev}} - h_1)$
$\dot{S}_{\mathrm{irr}} = \dot{m}(s_2 - s_1)$	$s_{2\mathrm{rev}} = s_1$

Efficienza della pompa η_P: (rendimento idraulico)

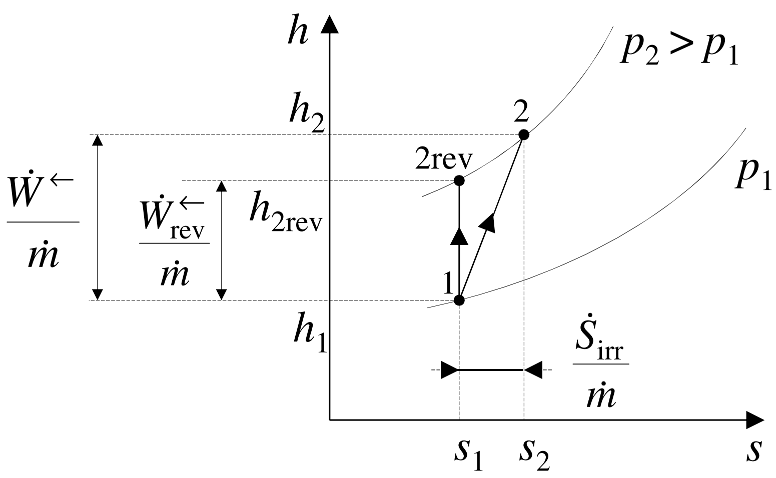
$$\eta_P = \frac{\dot{W}^{\leftarrow}_{\mathrm{rev}}}{\dot{W}^{\leftarrow}} = \frac{h_{2\mathrm{rev}} - h_1}{h_2 - h_1}$$

- Per una pompa che elabora in liquido incomprimibile perfetto si ha

componente reale	componente reversibile
$\dot{W}^{\leftarrow} = \dot{m}[c(T_2 - T_1) + v(p_2 - p_1)]$	$\dot{W}^{\leftarrow}_{\mathrm{rev}} = \dot{m}v(p_2 - p_1)$
$\dot{S}_{\mathrm{irr}} = \dot{m}c \ln \frac{T_2}{T_1}$	$T_{2\mathrm{rev}} = T_1$

Pompa

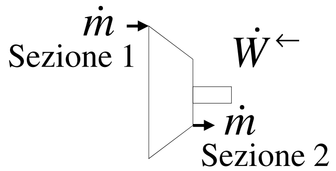
E' possibile rappresentare il processo su un diagramma *h-s*. La regione rappresentata si trova a sinistra della curva di saturazione (monofase, liquido).



Compressore

E' un componente a due bocche che utilizza lavoro per accrescere la pressione del flusso di un fluido comprimibile

Simbolo



Equazioni di bilancio per un compressore

componente reale

$$\dot{W}^{\leftarrow} = \dot{m}(h_2 - h_1)$$

$$\dot{S}_{irr} = \dot{m}(s_2 - s_1)$$

componente reversibile

$$\dot{W}^{\leftarrow}_{rev} = \dot{m}(h_{2rev} - h_1)$$

$$s_{2rev} = s_1$$

Efficienza del compressore η_C:
(rendimento adiabatico)

$$\eta_C = \frac{\dot{W}^{\leftarrow}_{rev}}{\dot{W}^{\leftarrow}} = \frac{h_{2rev} - h_1}{h_2 - h_1}$$

- Per un compressore che elabora un gas perfetto si ha

componente reale

$$\dot{W}^{\leftarrow} = \dot{m} c_p (T_2 - T_1)$$

$$\dot{S}_{irr} = \dot{m}\left(c_p \ln\frac{T_2}{T_1} - R^* \ln\frac{p_2}{p_1} \right)$$

componente reversibile

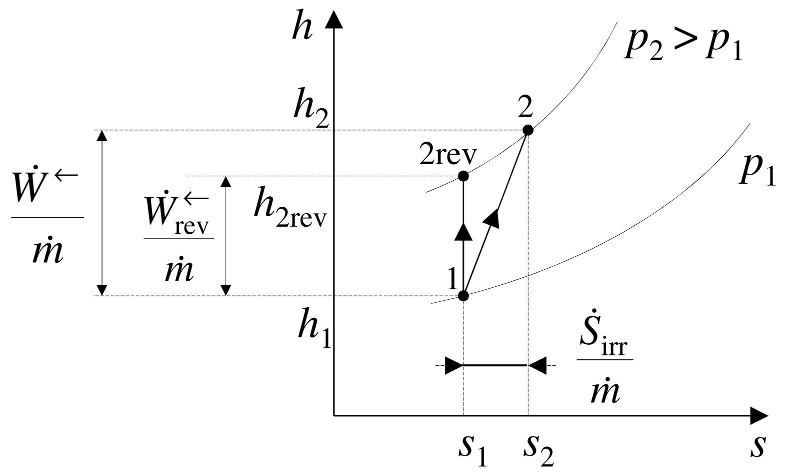
$$\dot{W}^{\leftarrow}_{rev} = \dot{m} c_p (T_{2rev} - T_1)$$

$$T_{2rev} = T_1 (p_2/p_1)^{(\gamma-1)/\gamma}$$

- Per un compressore che elabora un fluido bifase o un vapore si utilizzano le tabelle per determinare le proprietà

Compressore

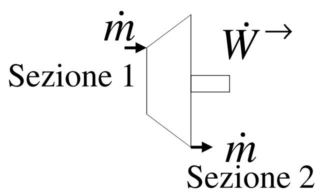
Compressore (di gas): è possibile rappresentare il processo su un diagramma *h-s*. La regione rappresentata si trova lontano dalla curva di saturazione (monofase, gas).



Turbina

Turbina (a gas o a vapore): è un componente a due bocche che produce lavoro sottraendo entalpia al flusso del fluido di lavoro

Simbolo



Equazioni di bilancio per una turbina

componente reale	componente reversibile
$\dot{W}^{\rightarrow} = \dot{m}(h_1 - h_2)$	$\dot{W}^{\rightarrow}_{\text{rev}} = \dot{m}(h_1 - h_{2\text{rev}})$
$\dot{S}_{\text{irr}} = \dot{m}(s_2 - s_1)$	$s_{2\text{rev}} = s_1$

Efficienza della turbina η_T: (rendimento adiabatico)

$$\eta_T = \frac{\dot{W}^{\rightarrow}}{\dot{W}^{\rightarrow}_{\text{rev}}} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2\text{rev}}}$$

- Per una turbina a gas che elabora un gas perfetto si ha

componente reale

$$\dot{W}^{\rightarrow} = \dot{m} c_p (T_1 - T_2)$$

$$\dot{S}_{\text{irr}} = \dot{m}\left(c_p \ln\frac{T_2}{T_1} - R^* \ln\frac{p_2}{p_1} \right)$$

componente reversibile

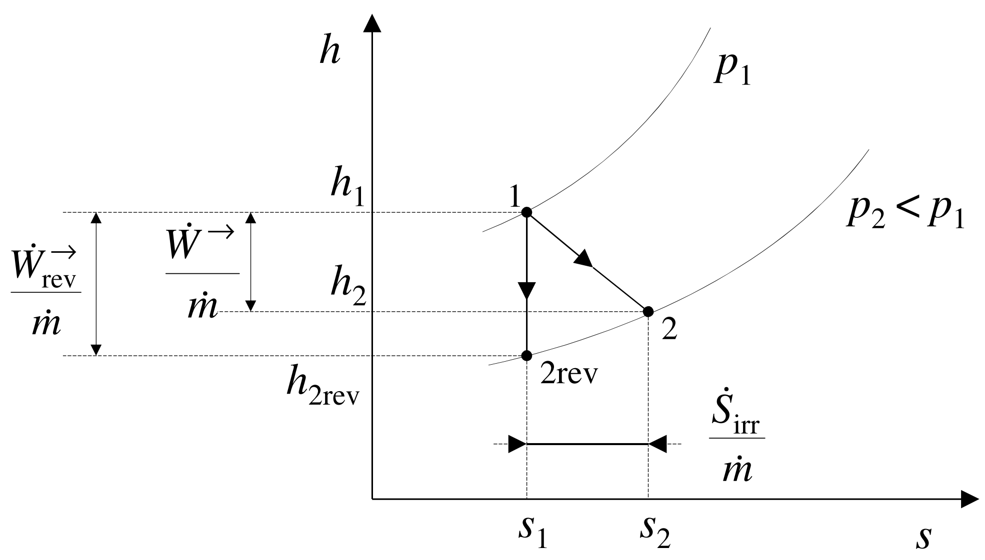
$$\dot{W}^{\rightarrow}_{\text{rev}} = \dot{m} c_p (T_1 - T_{2\text{rev}})$$

$$T_{2\text{rev}} = T_1 (p_2 / p_1)^{(\gamma-1)/\gamma}$$

- Per una turbina a vapore si utilizzano le tabelle per determinare le proprietà

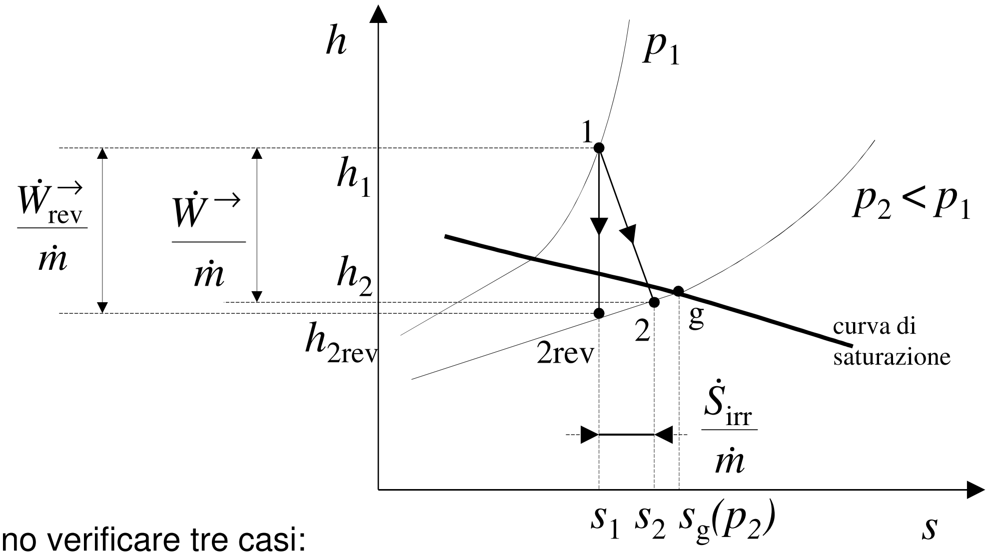
Turbina a gas

E' possibile rappresentare il processo su un diagramma *h-s*. La regione rappresentata si trova lontano dalla curva di saturazione (monofase, gas).



Turbina a vapore

E' possibile rappresentare il processo su un diagramma *h-s*. La regione rappresentata si trova a cavallo della curva di saturazione (monofase vapore e bifase).



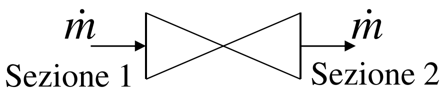
Si possono verificare tre casi:

- 2rev bifase, 2 bifase (rappresentato in figura)
- 2rev bifase, 2 monofase vapore
- 2rev monofase vapore, 2 monofase vapore

Valvola

Valvola di laminazione (isoentalpica): è un componente a due bocche che riduce la pressione di un fluido facendolo passare attraverso un brusco restringimento

Simbolo

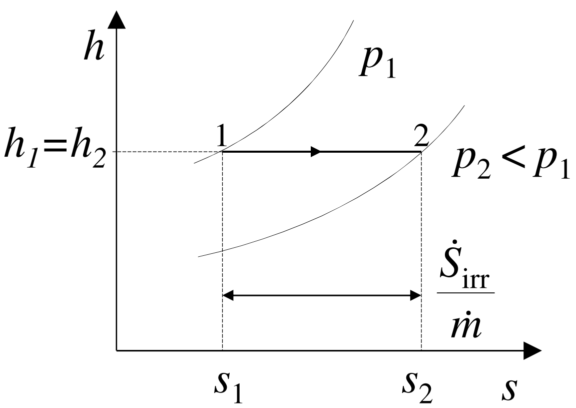


Equazioni di bilancio per una valvola

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

$$\dot{S}_{\text{irr}} = \dot{m}(s_2 - s_1)$$

Su un diagramma *h-s* (caso in cui il fluido di processo è un liquido o un gas):

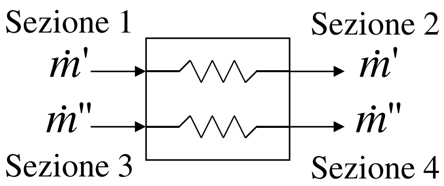


Scambiatore di calore

E' un componente a quattro bocche che trasferisce energia ed entropia da un flusso ad un altro. Il meccanismo elementare è riconducibile a un insieme di interazioni di tipo calore a diverse temperature. Il fluido che scorre nel *ramo primario* cede calore al fluido che scorre nel *ramo secondario* mediante trasmissione di calore attraverso la parete che separa i due fluidi.

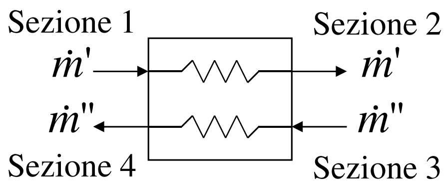
Scambiatore equicorrente: i due fluidi scorrono nella stessa direzione

Simbolo



Scambiatore controcorrente: i due fluidi scorrono in direzioni opposte

Simbolo



Equazioni di bilancio per lo scambiatore (equicorrente o controcorrente), trascurando gli scambi di calore verso l'esterno

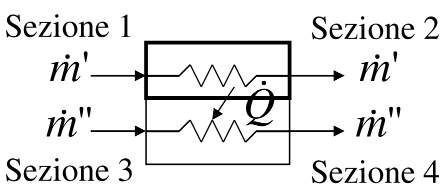
$$0 = \dot{m}'(h_1 - h_2) + \dot{m}''(h_3 - h_4)$$

$$\dot{S}_{\text{irr}} = \dot{m}'(s_2 - s_1) + \dot{m}''(s_4 - s_3)$$

Scambiatore di calore

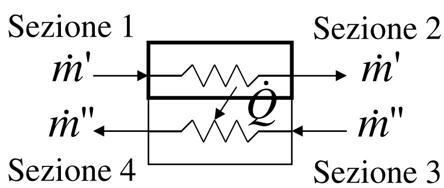
Equazioni di bilancio di energia per il ramo primario e per il ramo secondario

Scambiatore equicorrente



$$\dot{Q} = \dot{m}'(h_1 - h_2)$$

Scambiatore controcorrente



$$\dot{Q} = \dot{m}''(h_4 - h_3)$$

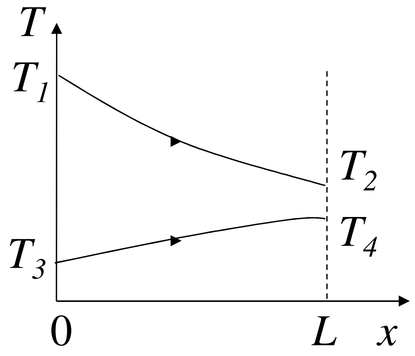
Si può quindi riscrivere l'equazione di bilancio dell'entropia per lo scambiatore nel modo seguente

$$\dot{S}_{\text{irr}} = \dot{Q}\left(\frac{s_4 - s_3}{h_4 - h_3} - \frac{s_2 - s_1}{h_2 - h_1}\right)$$

Scambiatore di calore

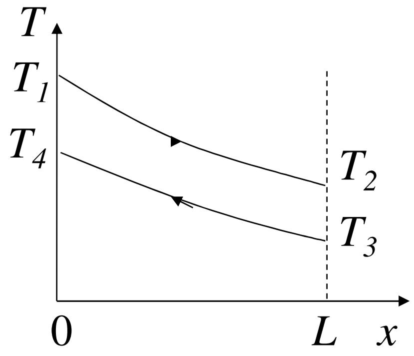
Si può rappresentare qualitativamente l'andamento della temperatura T nei rami primario e secondario lungo la coordinata curvilinea x che segue la parete di scambio

Scambiatore equicorrente



T_2 deve essere maggiore di T_4, perciò:
- ΔT in ingresso elevato
- elevata produzione di entropia per irreversibilità

Scambiatore controcorrente



T_2 può essere minore di T_4, perciò:
- se $L \rightarrow \infty$, $S_{irr} \rightarrow 0$, però aumentano il peso e il costo del componente. Compromesso: $\Delta T \approx$10-15°C