

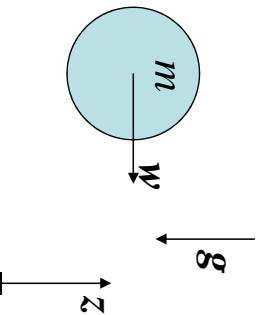
# Sistemi aperti

- 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) *Exergia e rendimento exergetico*
- 12) *Aria umida*

## Stato di flusso di massa

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

Il sistema è in uno stato di non-equilibrio. Sono definite  $E, S, V, \mathbf{n}, m, \mathbf{w}, z, \dots$



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

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

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

# Stato di flusso di massa

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

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

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  $(S, V, \mathbf{n})$  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.

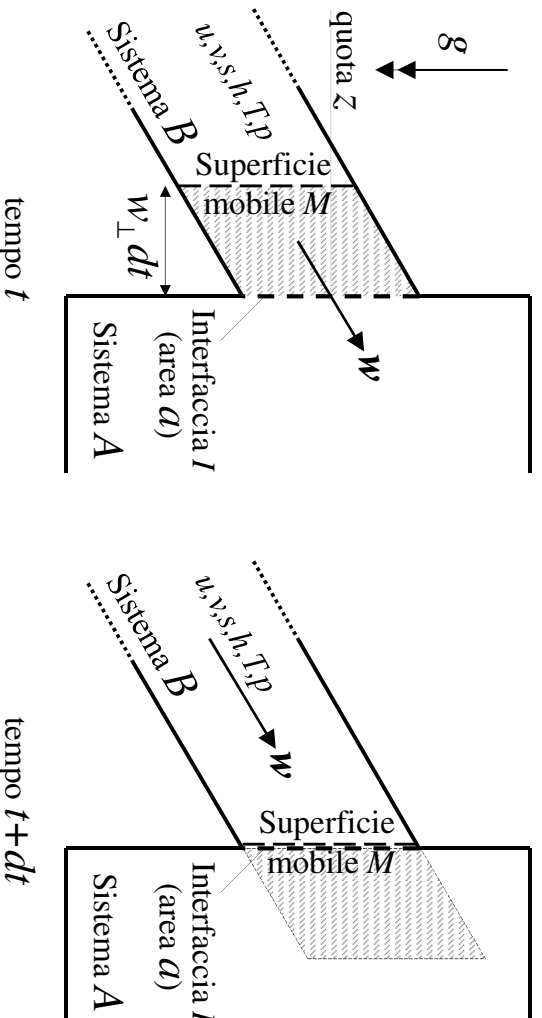
a.a. 12/13

SEI-EdTA - Sistemi aperti v. 1.1

3

## 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  $\mathbf{w}$  diretta verso  $A$ . In questo caso si ha una *interazione di tipo flusso di massa in ingresso*: infatti elementi di fluido entrano nel sistema  $A$ .



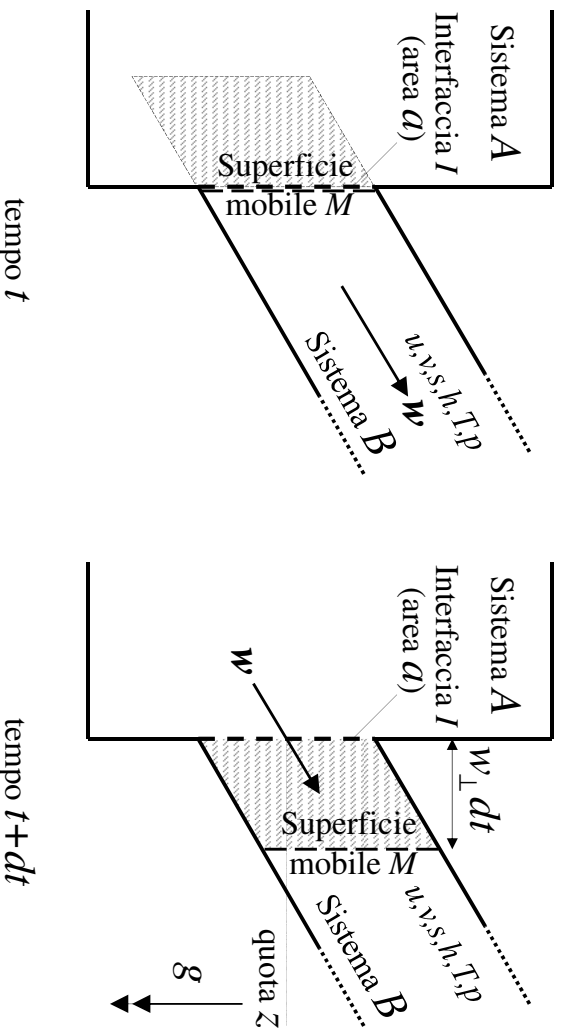
a.a. 12/13

SEI-EdTA - Sistemi aperti v. 1.1

4

# 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*.



a.a. 12/13

SEI-EdTA - Sistemi aperti v. 1.1

5

# 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

$$\delta m^{B \rightarrow A} = \rho w_{\text{lin}} a dt$$

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

$$\delta S^{B \rightarrow A} = \delta m^{B \rightarrow A} (s)$$

dove  $w_{\text{lin}}$  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

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

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

$$\delta m^{B \rightarrow A} (pv)$$

a.a. 12/13

SEI-EdTA - Sistemi aperti v. 1.1

6

# Interazione di tipo flusso di massa

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

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

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

a.a. 12/13

SEI-EdTA - Sistemi aperti v. 1.1

7

# 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

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

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

$$\begin{aligned}\dot{E}^{B \rightarrow A} &= \frac{\delta E^{B \rightarrow A}}{dt} = \dot{m}^{B \rightarrow A} \left( h + w^2/2 + gz \right) \\ \dot{S}^{B \rightarrow A} &= \frac{\delta S^{B \rightarrow A}}{dt} = \dot{m}^{B \rightarrow A} (s)\end{aligned}$$

a.a. 12/13

SEI-EdTA - Sistemi aperti v. 1.1

8

# 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

$$\begin{aligned}\frac{dm^A}{dt} &= \sum_i \dot{m}_i^{A\leftarrow} \\ \frac{dE^A}{dt} &= \sum_i \dot{m}_i^{A\leftarrow} (h_i + w_i^2/2 + gz_i) + \sum_k \dot{Q}_k^{A\leftarrow} - \sum_j \dot{W}_j^{A\rightarrow} \\ \frac{dS^A}{dt} &= \sum_i \dot{m}_i^{A\leftarrow} (s_i) + \sum_k \frac{\dot{Q}_k^{A\leftarrow}}{T_k} + \dot{S}_{\text{irr}}\end{aligned}$$

**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

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

a.a. 12/13

SEI-EdTA - Sistemi aperti v. 1.1

9

## 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.

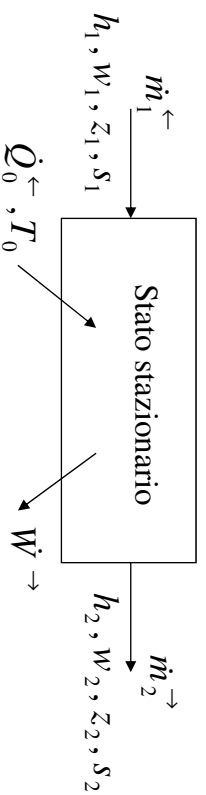
a.a. 12/13

SEI-EdTA - Sistemi aperti v. 1.1

10

# Componenti di sistemi energetici

Equazioni di bilancio per un componente stazionario



$$0 = \dot{m}_1^{\leftarrow} - \dot{m}_2^{\rightarrow}$$

$$0 = \dot{m}_1^{\leftarrow} \left( h_1 + w_1^2/2 + gz_1 \right) - \dot{m}_2^{\rightarrow} \left( h_2 + w_2^2/2 + gz_2 \right) + \dot{Q}_0^{\leftarrow} - \dot{W}^{\rightarrow}$$

$$0 = \dot{m}_1^{\leftarrow} (s_1) - \dot{m}_2^{\rightarrow} (s_2) + \frac{\dot{Q}_0^{\leftarrow}}{T_0} + \dot{S}_{\text{irr}}$$

da cui

$$\dot{m}_1^{\leftarrow} = \dot{m}_2^{\rightarrow} = \dot{m}$$

$$0 = \dot{m}(h_1 - h_2) + \dot{m} \left( w_1^2/2 - w_2^2/2 \right) + \dot{m} (gz_1 - gz_2) + \dot{Q}_0^{\leftarrow} - \dot{W}^{\rightarrow}$$

$$0 = \dot{m}(s_1 - s_2) + \frac{\dot{Q}_0^{\leftarrow}}{T_0} + \dot{S}_{\text{irr}}$$

a.a. 12/13

SEI-EdTA - Sistemi aperti v. 1.1

11

## 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

$$\dot{m}_1^{\leftarrow} = \dot{m}_2^{\rightarrow} = \dot{m}$$

$$0 = \dot{m}(h_1 - h_2) + \dot{Q}_0^{\leftarrow} - \dot{W}^{\rightarrow}$$

$$0 = \dot{m}(s_1 - s_2) + \frac{\dot{Q}_0^{\leftarrow}}{T_0} + \dot{S}_{\text{irr}}$$

• Per i componenti meccanici

$$\dot{Q}_0^{\leftarrow} = 0$$

• Per i componenti termici

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

a.a. 12/13

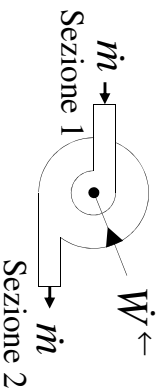
SEI-EdTA - Sistemi aperti v. 1.1

12

# Pompa

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

Simbolo



Equazioni di bilancio per una pompa

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

**Efficienza della pompa  $\eta_P$ :**  
(rendimento idraulico)

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

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

componente reale

$$\dot{W}^{\leftarrow} = m[c(T_2 - T_1) + v(p_2 - p_1)]$$

componente reversibile

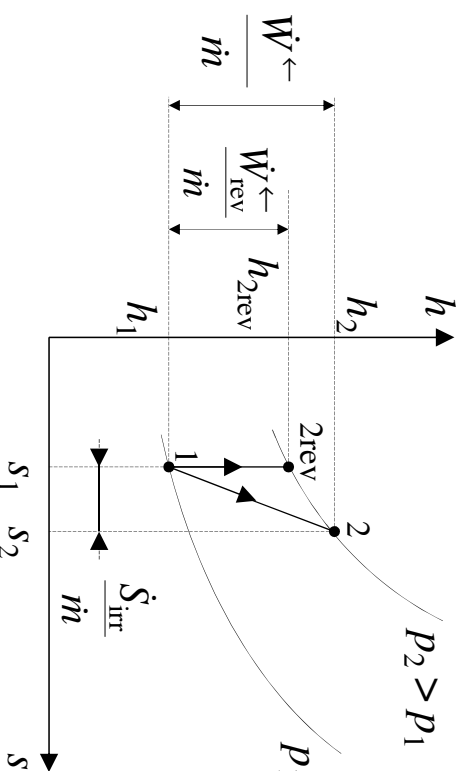
$$\dot{W}_{\text{rev}}^{\leftarrow} = mv(p_2 - p_1)$$

$$\dot{S}_{\text{irr}} = mc \ln \frac{T_2}{T_1}$$

$$T_{2\text{rev}} = T_1$$

# Pompa

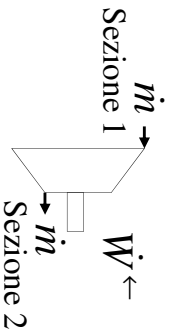
E' possibile rappresentare il processo su un diagramma  $h$ - $s$ . La regione rappresentata si trova a sinistra della curva di saturazione (monofase, liquido).



# 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

componente reversibile

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

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

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

$$s_{2\text{rev}} = s_1$$

**Efficienza del compressore  $\eta_c$ :**  
(rendimento adiabatico)

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

- Per un compressore che elabora un gas perfetto si ha

componente reale

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

componente reversibile

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

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

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

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

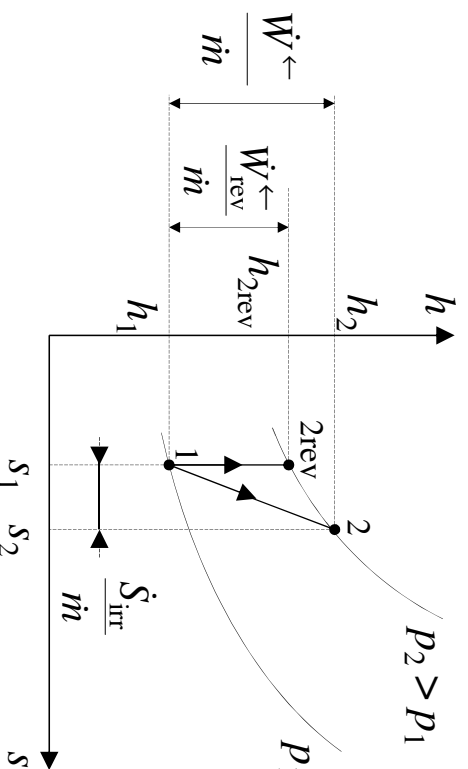
a.a. 12/13

SEI-EdTA - Sistemi aperti v. 1.1

15

# 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).



a.a. 12/13

SEI-EdTA - Sistemi aperti v. 1.1

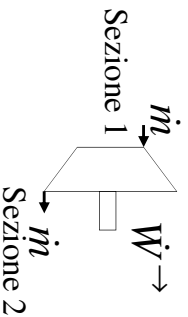
16



# 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

$$\dot{W}^{\rightarrow} = m(h_1 - h_2) \quad \dot{W}_{\text{rev}}^{\rightarrow} = m(h_1 - h_{2\text{rev}})$$

$$\dot{S}_{\text{irr}} = m(s_2 - s_1) \quad S_{2\text{rev}} = s_1$$

**Efficienza della turbina  $\eta_T$ :**  
(rendimento adiabatico)

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

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

componente reale

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

componente reversibile

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

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

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

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

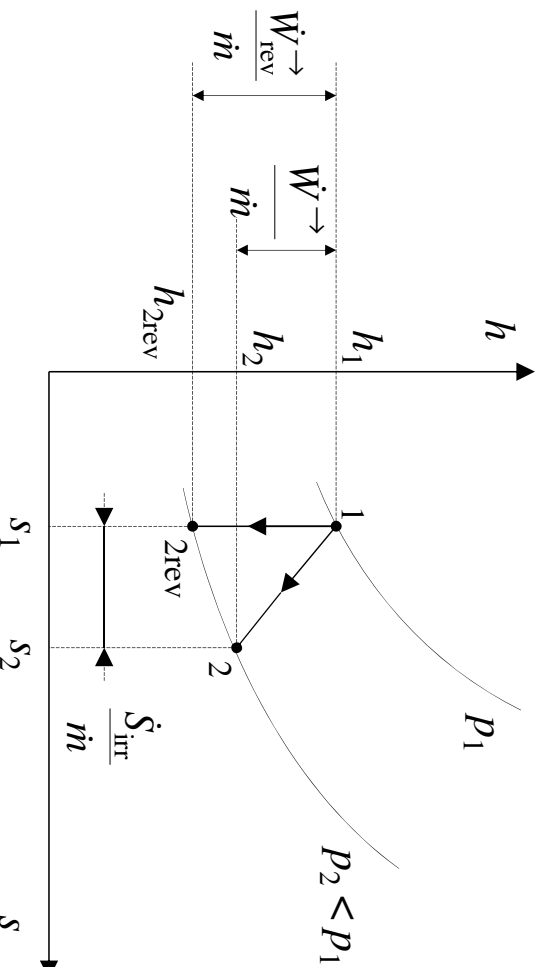
a.a. 12/13

SEI-EdTA - Sistemi aperti v. 1.1

17

# 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).



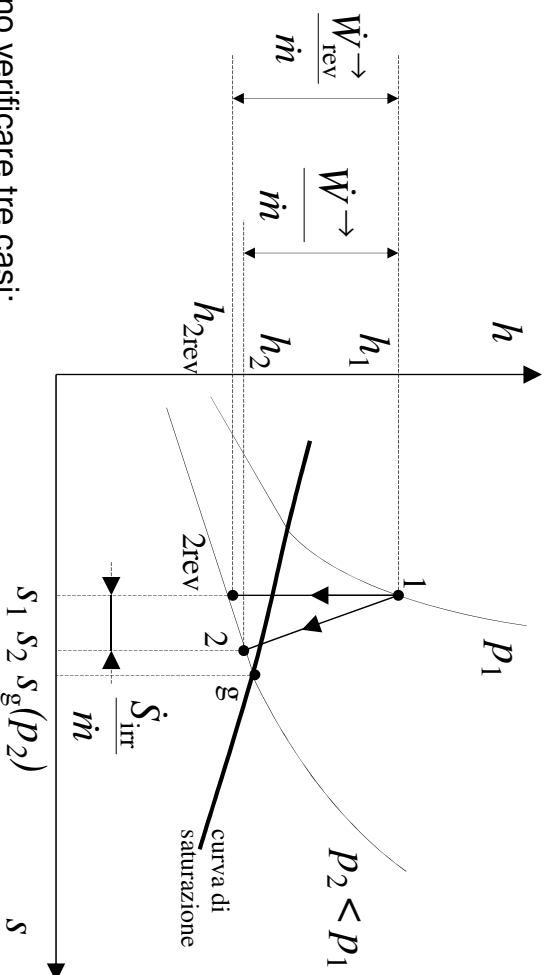
a.a. 12/13

SEI-EdTA - Sistemi aperti v. 1.1

18

# 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

a.a. 12/13

SEI-EdTA - Sistemi aperti v. 1.1

19

# 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

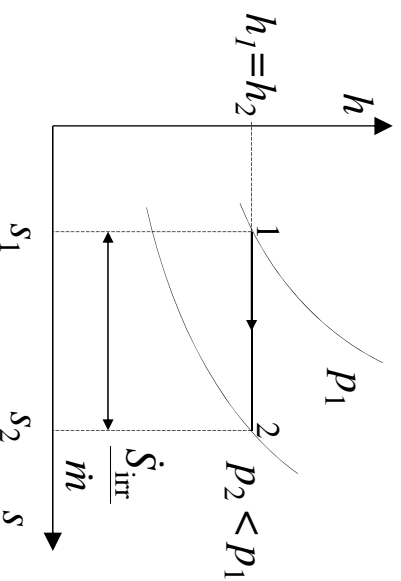


Equazioni di bilancio per una valvola

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

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

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



a.a. 12/13

SEI-EdTA - Sistemi aperti v. 1.1

20

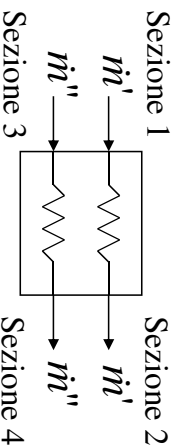
# Scambiatore di calore

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.

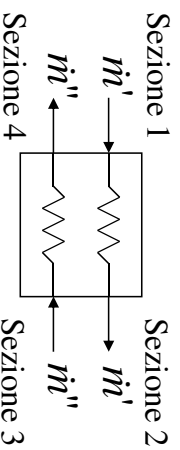
**Scambiatore equicorrente:** i due fluidi scorrono nella stessa direzione

**Scambiatore controcorrente:** i due fluidi scorrono in direzioni opposte

Simbolo



Simbolo



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

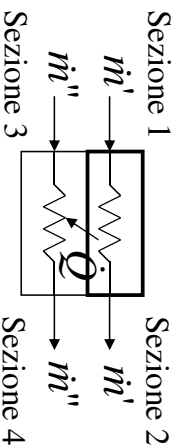
$$0 = \dot{m}'(h_1 - h_2) + \dot{m}''(h_3 - h_4)$$

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

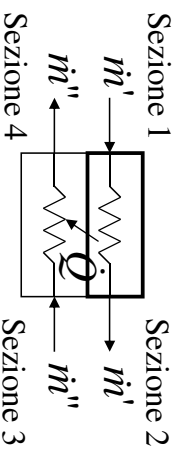
# Scambiatore di calore

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

Scambiatore equicorrente



Scambiatore controcorrente



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

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

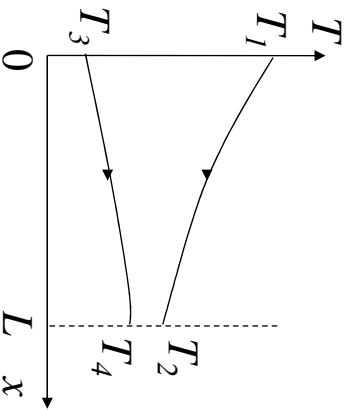
Si può quindi riscrivere l'equazione di bilancio dell'entropia per lo scambiatore nel modo seguente

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

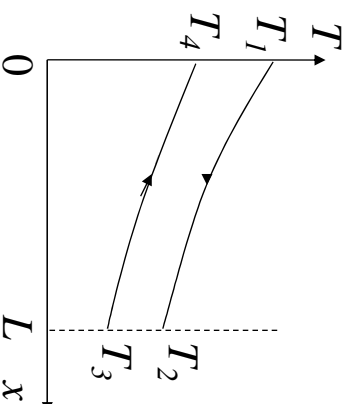
# Scambiatore di calore

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



Scambiatore controcorrente



$T_2$  deve essere maggiore di  $T_4$ , perciò:

- $\Delta T$  in ingresso elevato
- elevata produzione di entropia per irreversibilità

$T_2$  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:  $\Delta T \approx 10-15^\circ\text{C}$