



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



Dipartimento
di Ingegneria Industriale

Richiami

Corso di Macchine 1

Agenda

▶ Sistemi e Ambiente

- ▶ Energia
- ▶ Sistema isolato, chiuso aperto
- ▶ Equazione di conservazione della massa
- ▶ Primo principio della termodinamica per sistemi chiusi e aperti

▶ Esercizi

- ▶ Macchina motrice vs operatrice e sua potenza
- ▶ Macchina idraulica e sua potenza
- ▶ Pompa vs Compressore: potenza assorbita dalla macchina



Sistemi e Ambiente

Sistema ed ambiente

Energia

- E' un concetto primitivo
- L'energia è postulata come qualcosa che tutti i sistemi posseggono
- Esprime la capacità di un sistema di eseguire lavoro

Energia Totale di un sistema

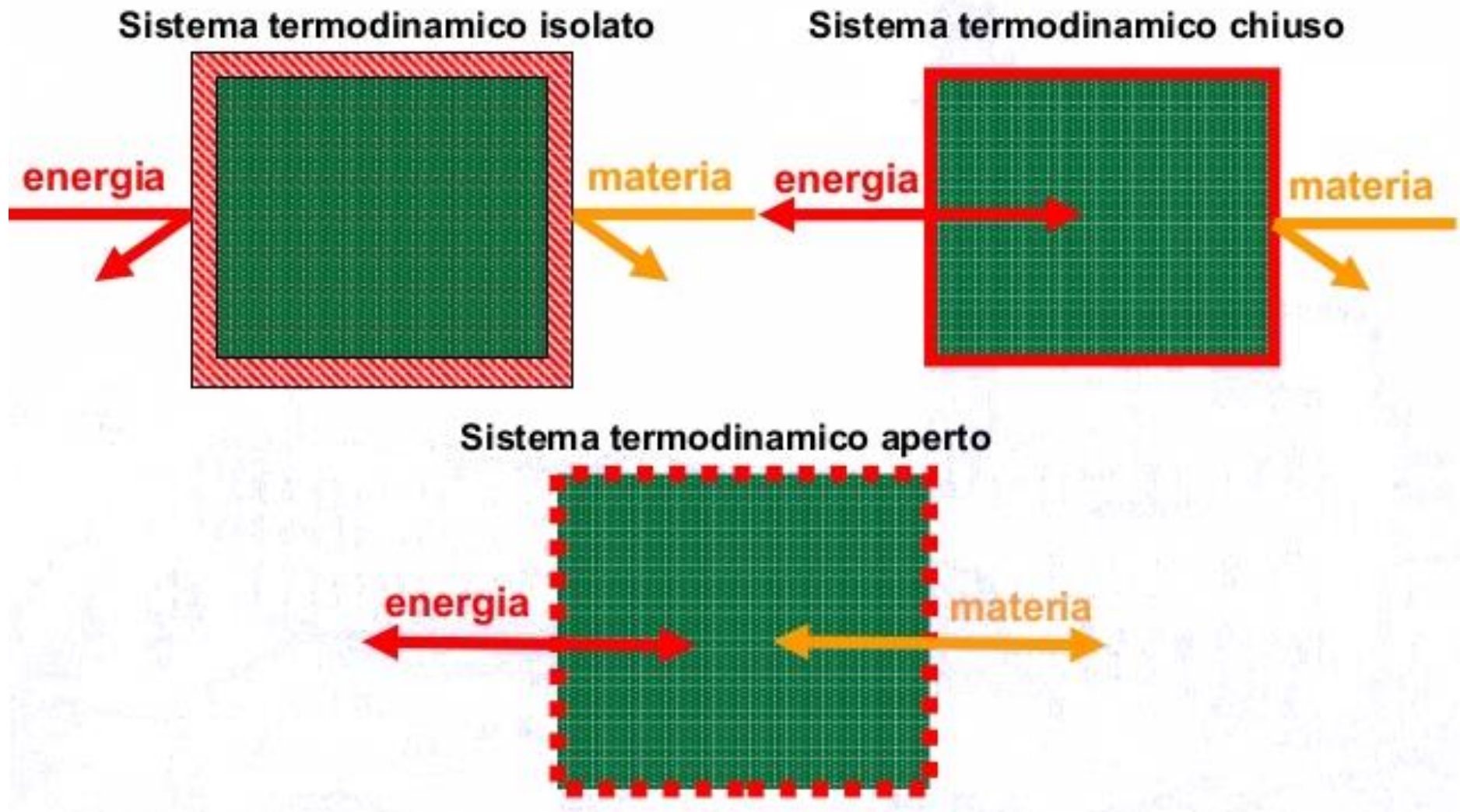
- E' così definita:

$$E_s = U + E_p + E_k \quad \left[\frac{J}{kg} \right]$$

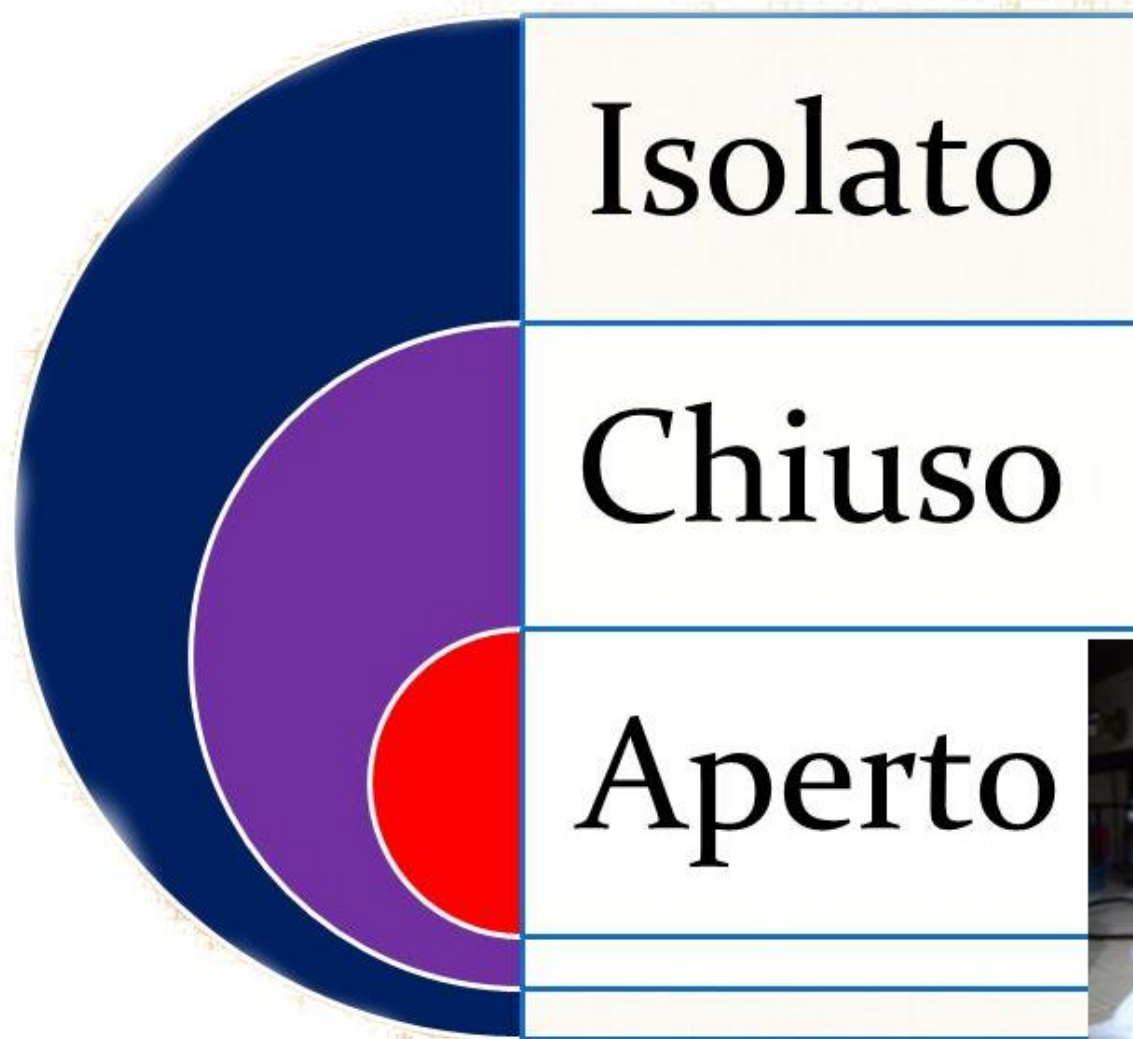
dove:

- U : energia interna, rappresentativa di tutte le energie a livello microscopico: traslazione, rotazione, vibrazione delle molecole, etc. → Dipende dalla sostanza (c_v) e dalla temperatura T (K)
- E_p : energia potenziale. In termodinamica si considera solo quella gravitazionale: gz
- E_k : energia cinetica $C^2/2$ riferita all'unità di massa

Sistema ed ambiente



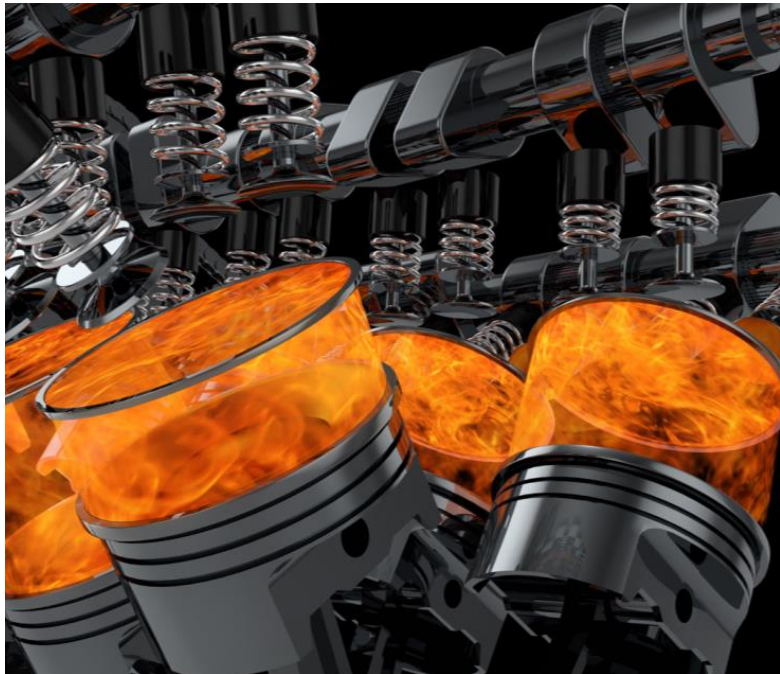
Sistema ed ambiente



Sistema ed ambiente

Sistema isolato, chiuso o aperto???

Motore a combustione interna



Turbina idraulica

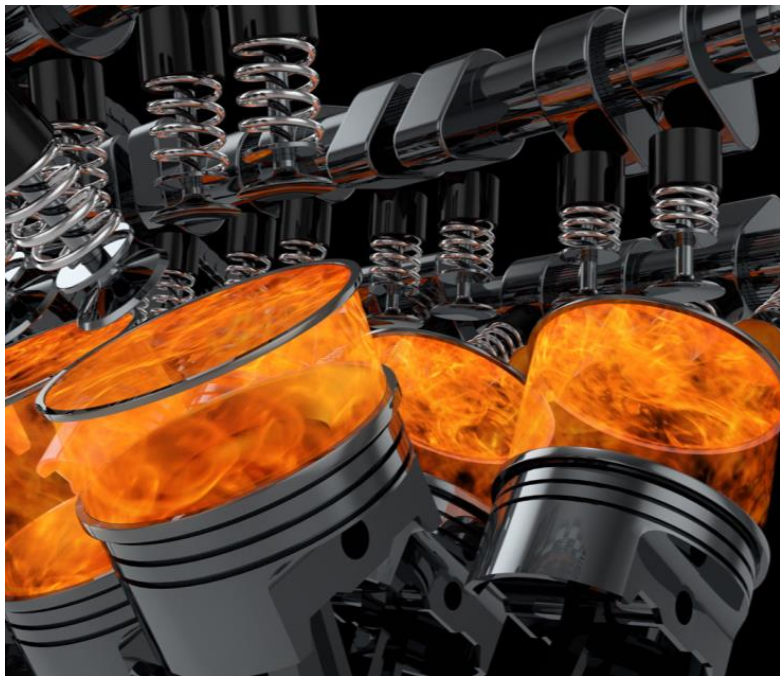
Turbina eolica



Sistema ed ambiente

Come valuto gli scambi di **massa** e di **energia** di queste macchine?

Motore a combustione interna



Turbina idraulica

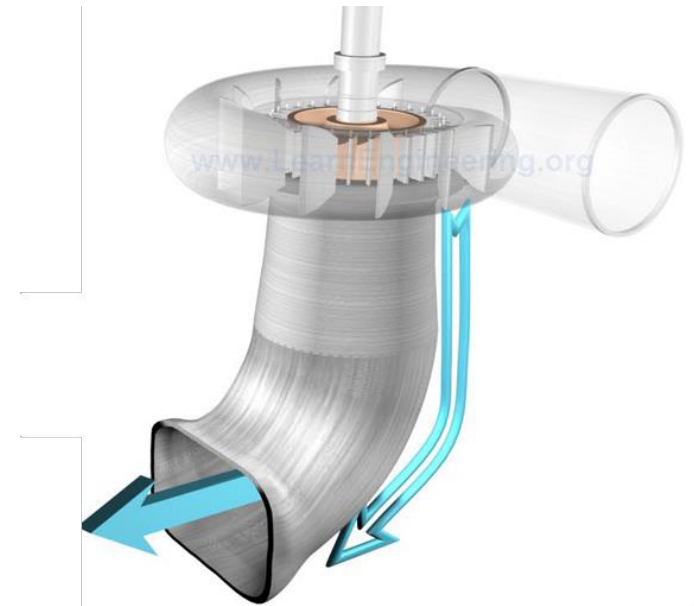
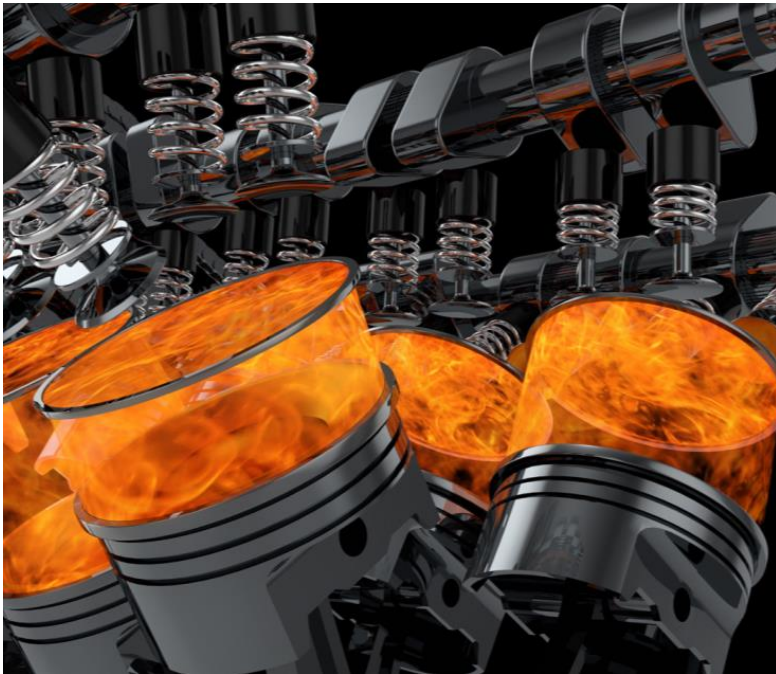
Turbina eolica



Sistema ed ambiente

Gli scambi di massa ed energia si valutano tramite:

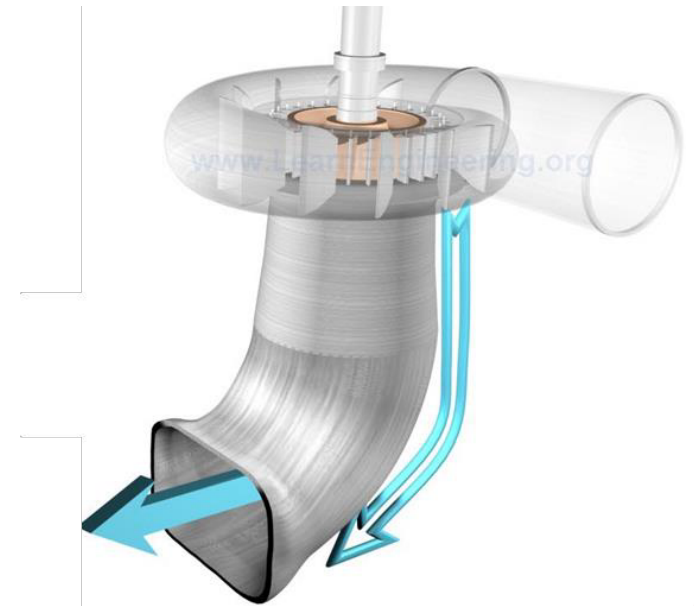
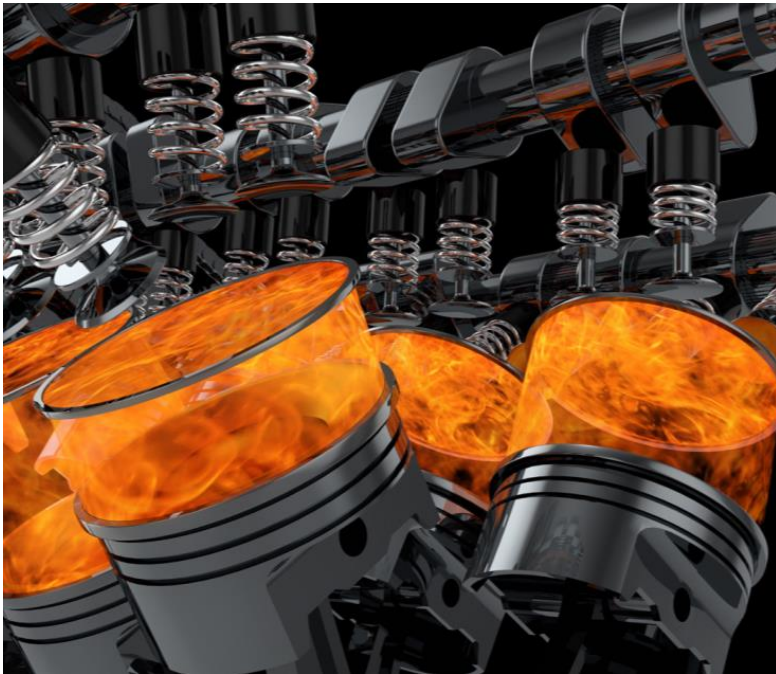
- Equazione di **conservazione della massa**
- **Primo principio** della termodinamica
- **Secondo principio** della termodinamica



Sistema ed ambiente

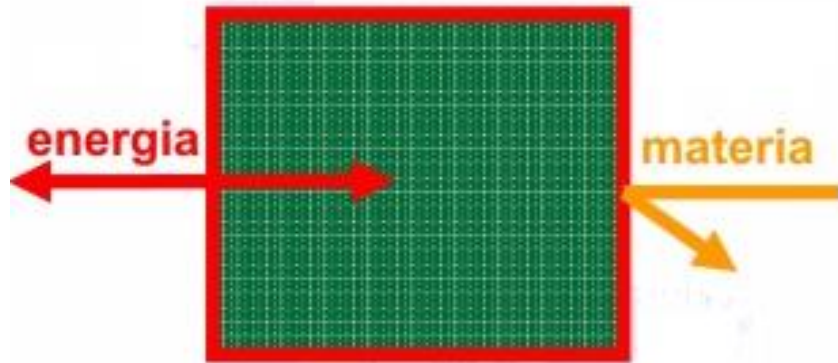
Gli scambi di massa ed energia si valutano tramite:

- Equazione di **conservazione della massa**
- Primo principio della termodinamica
- Secondo principio della termodinamica



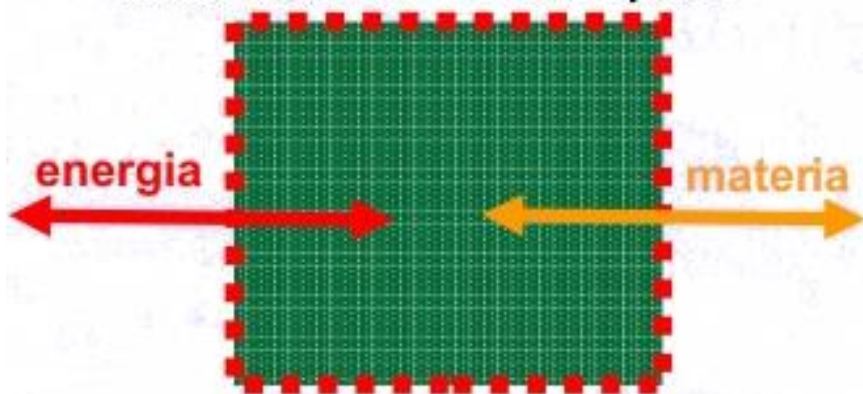
Equazione di conservazione della massa

Sistema termodinamico chiuso



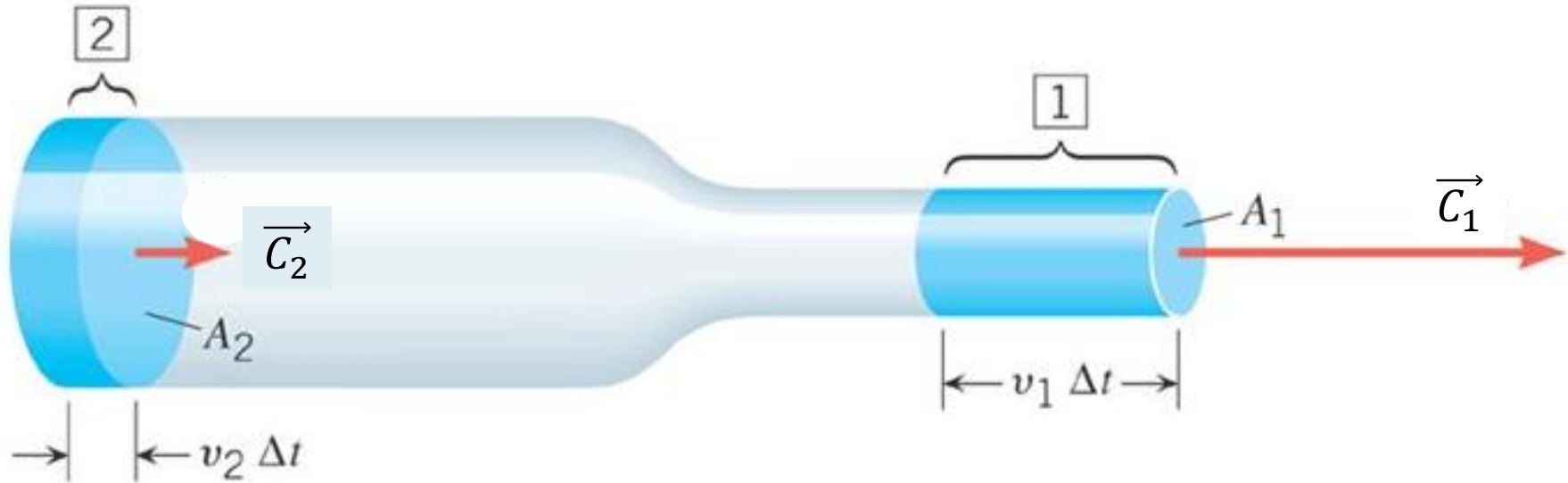
- In un sistema chiuso le pareti del sistema vengono considerate impermeabili al flusso di massa e pertanto **non vi sono contributi di massa in ingresso o in uscita** attraverso la superficie
- La massa contenuta all'interno del sistema **si conserva nel tempo**, anche in presenza di reazioni chimiche

Sistema termodinamico aperto



- In un sistema aperto, la superficie del volume di controllo è permeabile al flusso di massa e si possono avere contributi in ingresso ed in uscita

Portata volumetrica e di massa



$$Q_v = \vec{c} \cdot A \quad [m^3/s]$$

$$Q_m = \rho \cdot \vec{c} \cdot A \quad [kg/s]$$

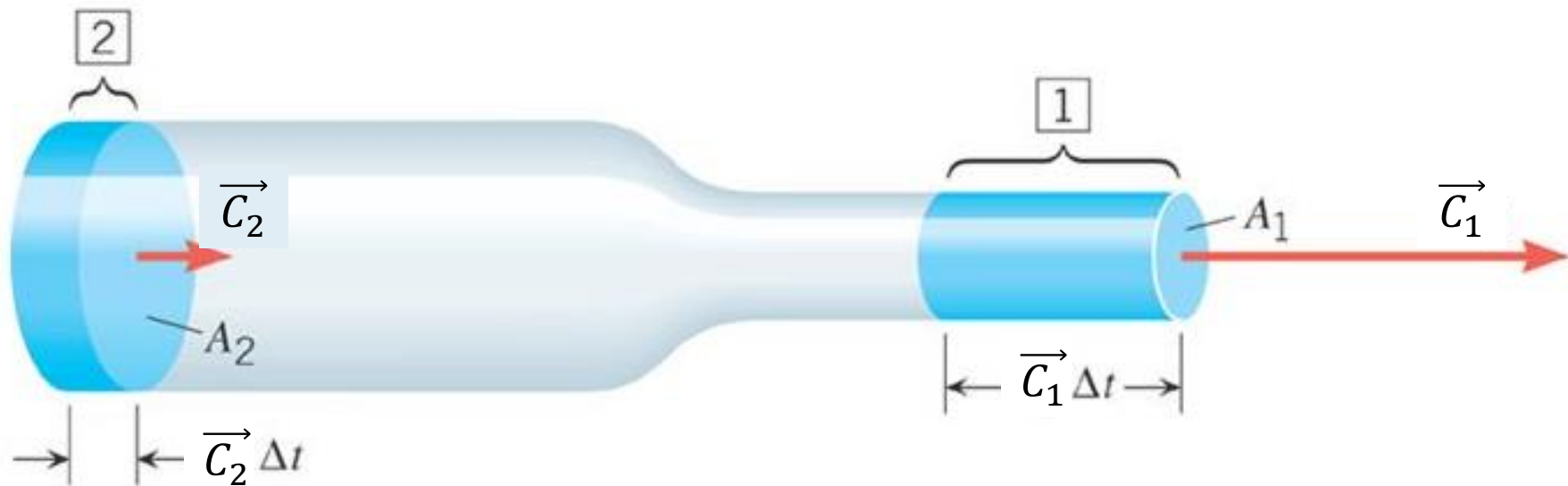
Equazione di conservazione della massa

- Se il regime è stazionario:

$$Q_{m,2} = \rho \vec{C}_2 A_2 = \rho \vec{C}_2 A_1 = Q_{m,1}$$

- Se il regime non è stazionario:

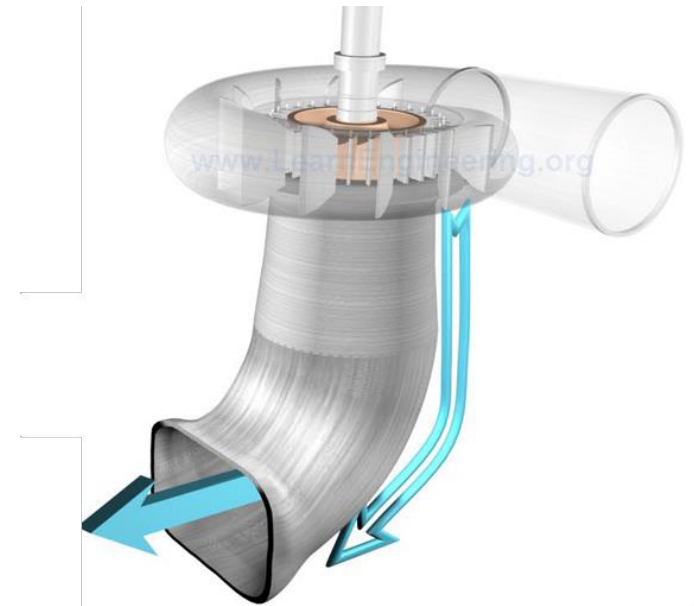
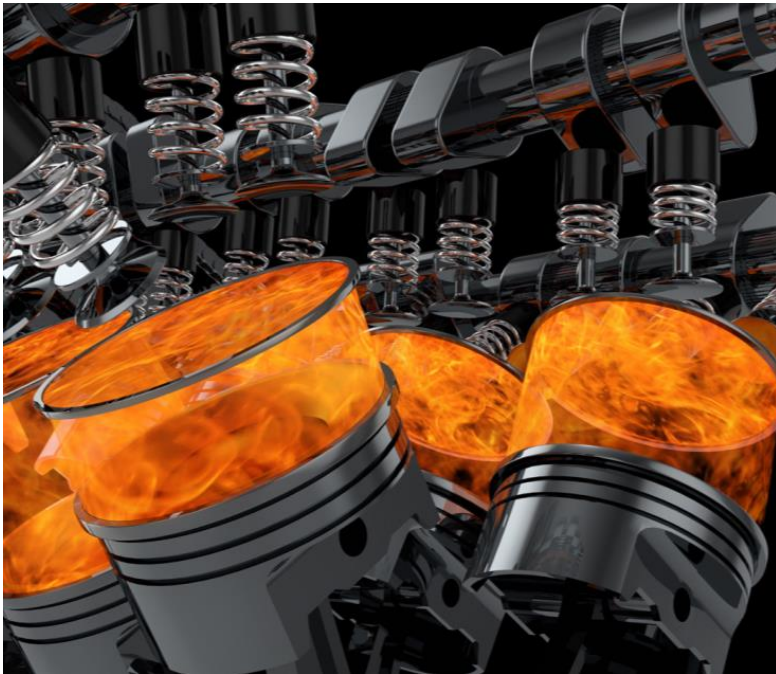
$$Q_{m,1} - Q_{m,2} = \frac{\partial m}{\partial t}$$



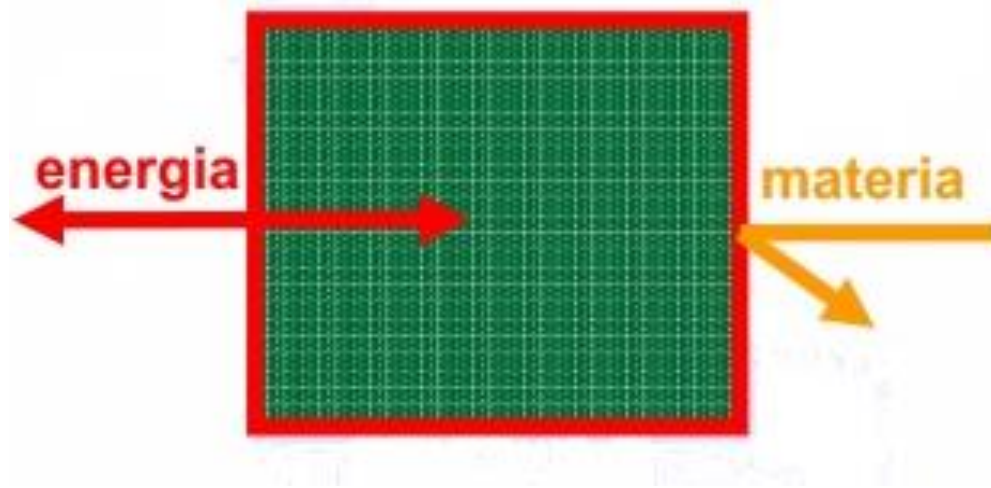
Sistema ed ambiente

Gli scambi di massa ed energia si valutano tramite:

- Equazione di conservazione della massa
- **Primo principio** della termodinamica
- Secondo principio della termodinamica



Primo principio della termodinamica: sistemi chiusi



$$E_{sistema} = U + E_k + E_p$$

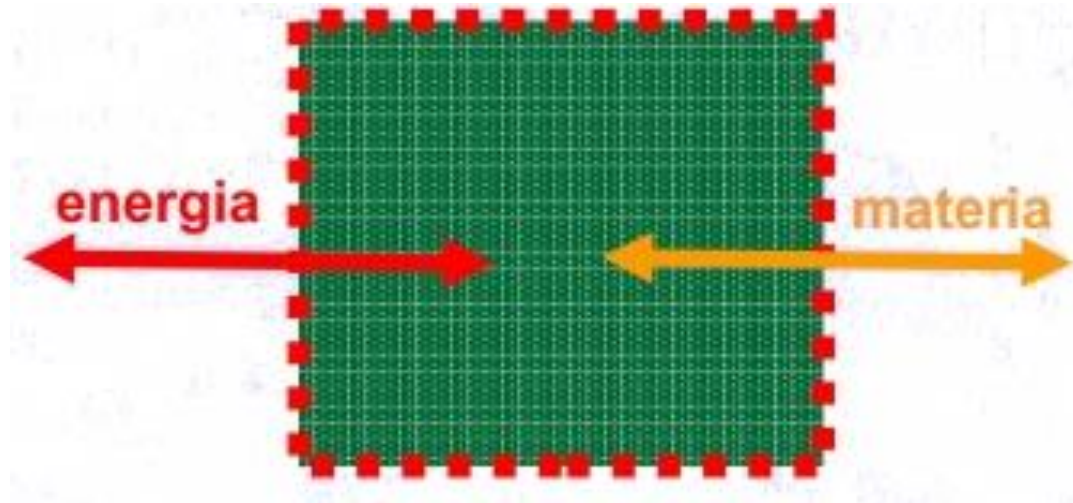
Primo principio della termodinamica per sistemi chiusi

$$E_{entrante} - E_{uscente} = \Delta E_{sistema} = \Delta(U + E_p + E_k)_{sistema}$$

...o più in generale:

$$\sum E_{entrante} - \sum E_{uscente} = \Delta E_{sistema} = \Delta(U + E_p + E_k)_{sistema}$$

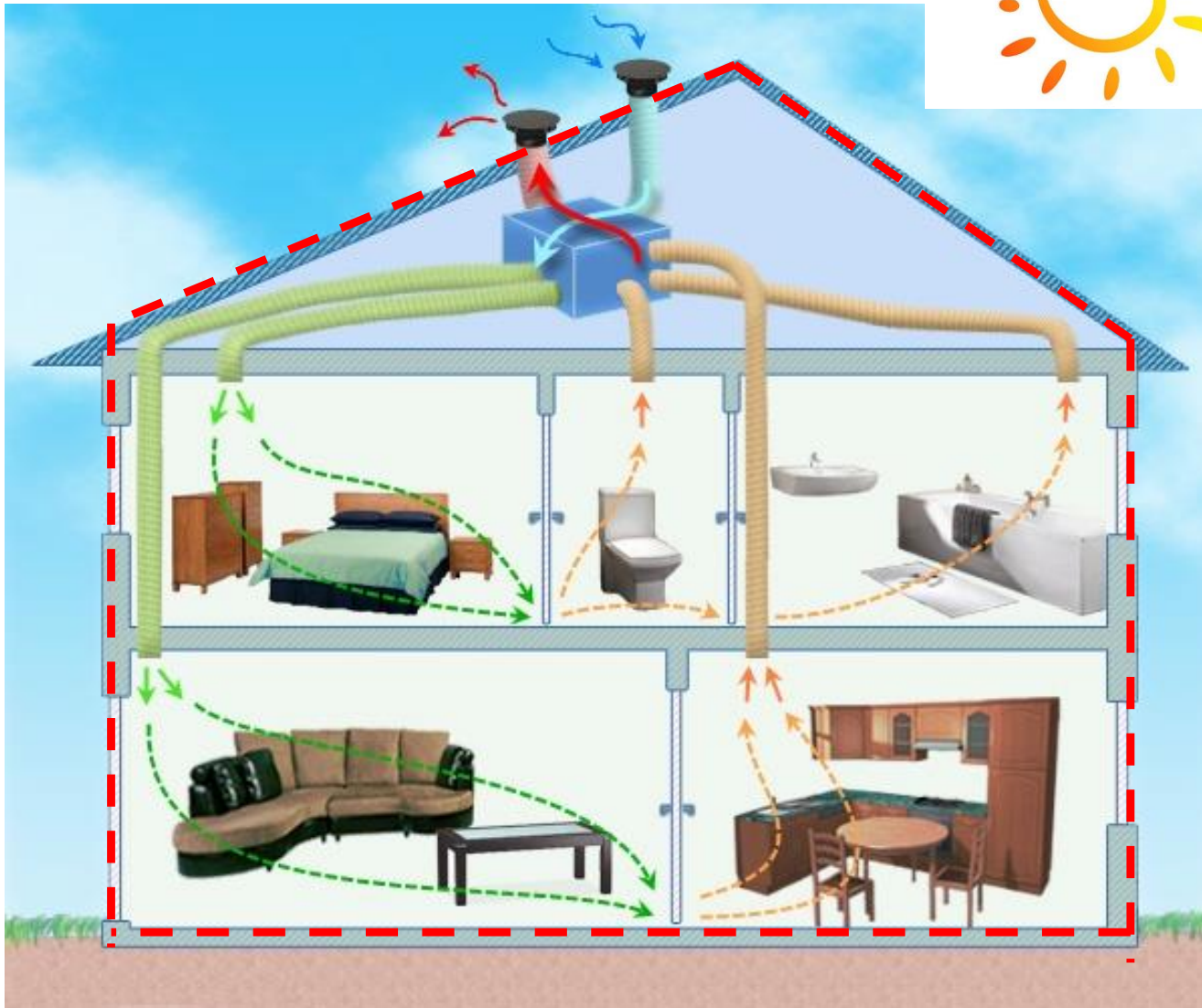
Primo principio della termodinamica: sistemi aperti



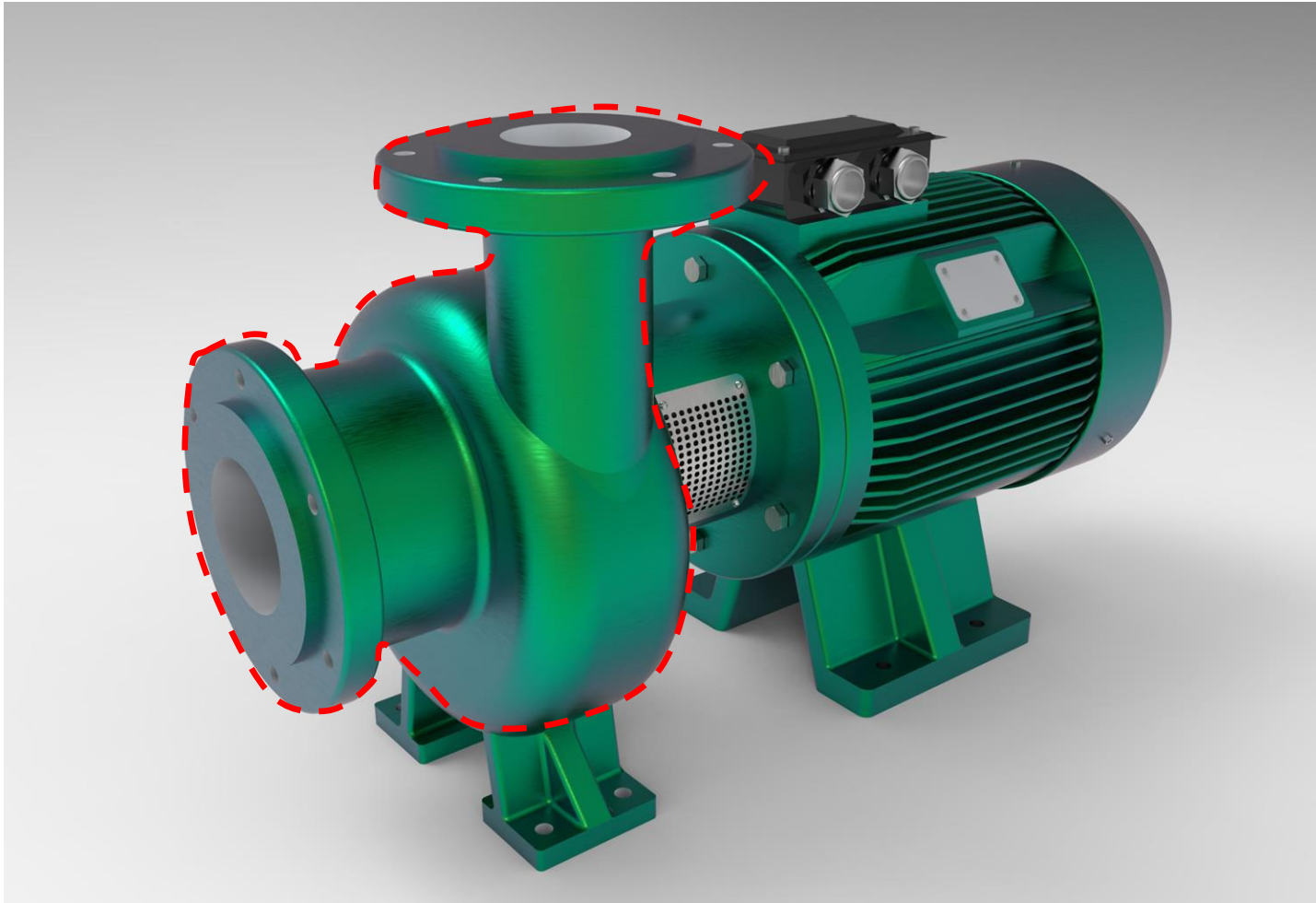
- La stessa formulazione può, infine, essere estesa con facilità **anche ai sistemi aperti**

Cosa si deve conteggiare??

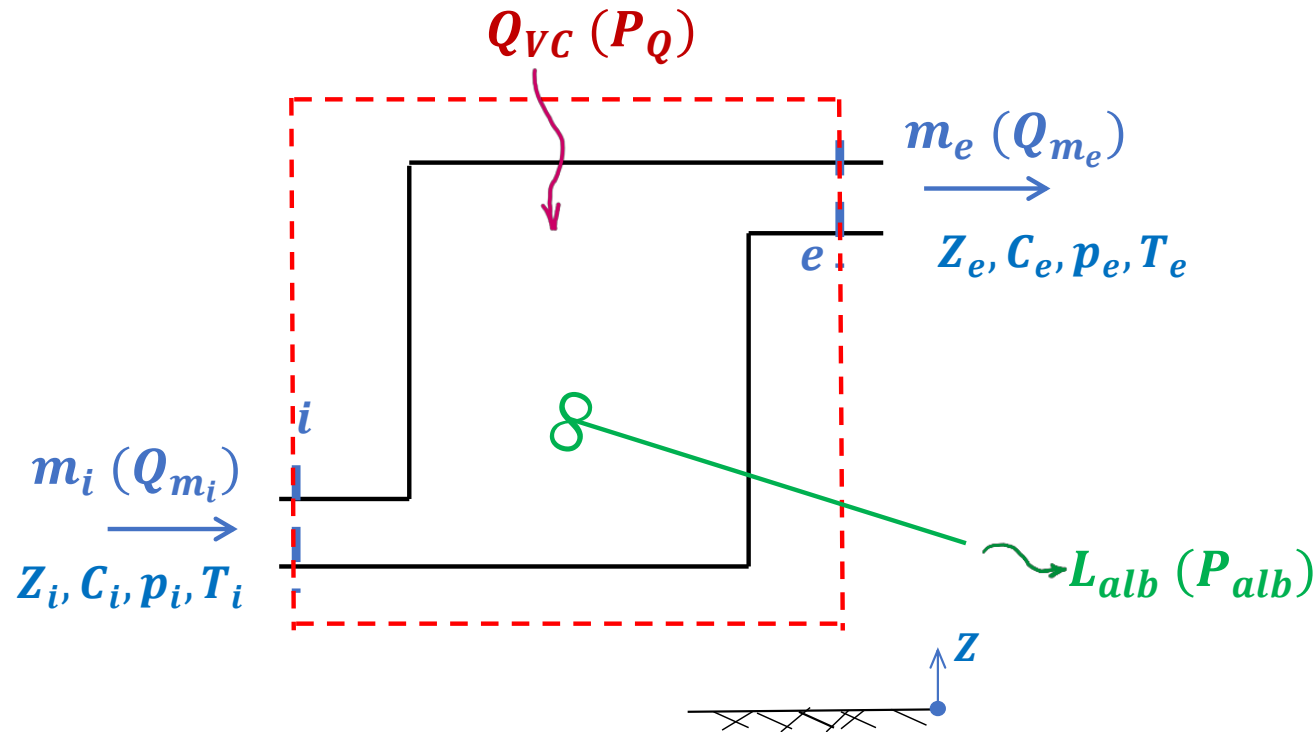
Esempio (1)



Esempio (2)



Primo principio della termodinamica: sistemi aperti



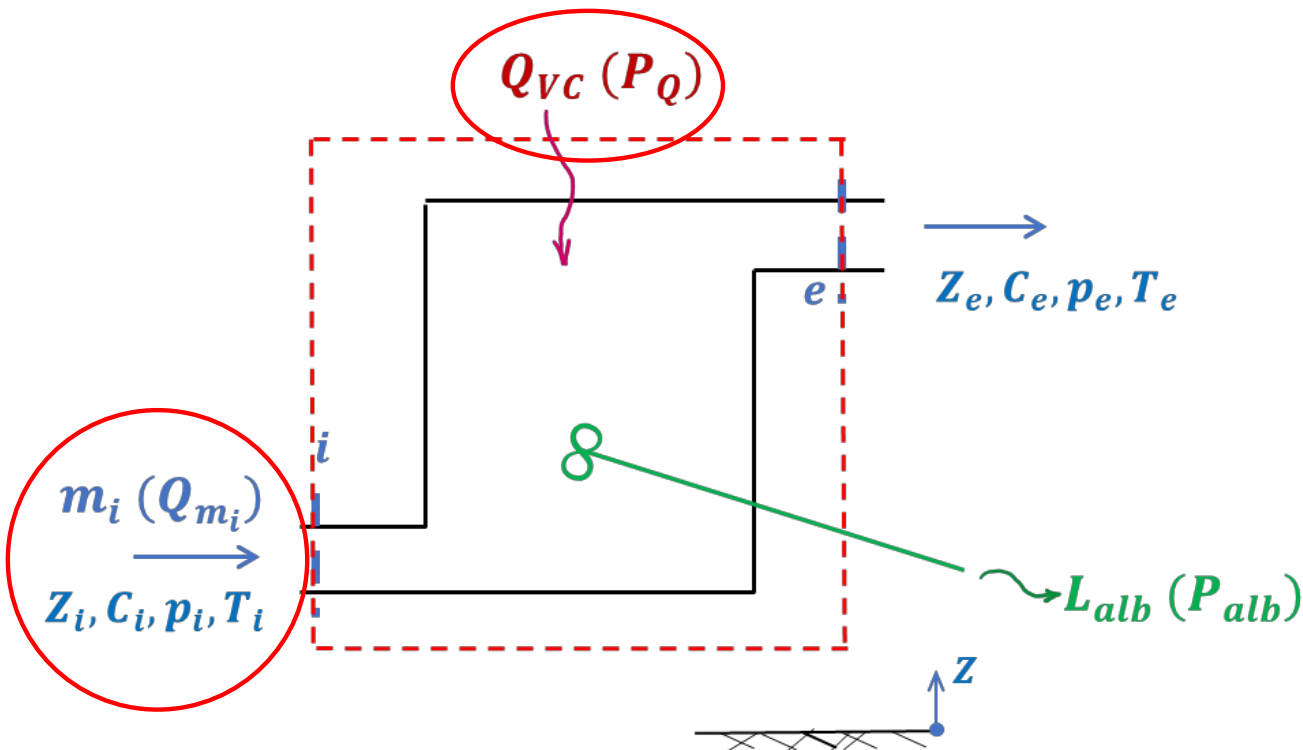
- Gli scambi di energia e i trasferimenti di materia sono riferiti a un **volume di controllo VC**, ossia a una regione dello spazio che include interamente il sistema
- C'è **trasferimento di massa** attraverso la superficie

Primo principio della termodinamica: sistemi aperti

Il primo principio nella sua formulazione generale richiede:

$$\sum E_{entrante} - \sum E_{uscente} = (E_{s2} - E_{s1})_{VC}$$

variazione di energia totale
all'interno del volume di
controllo



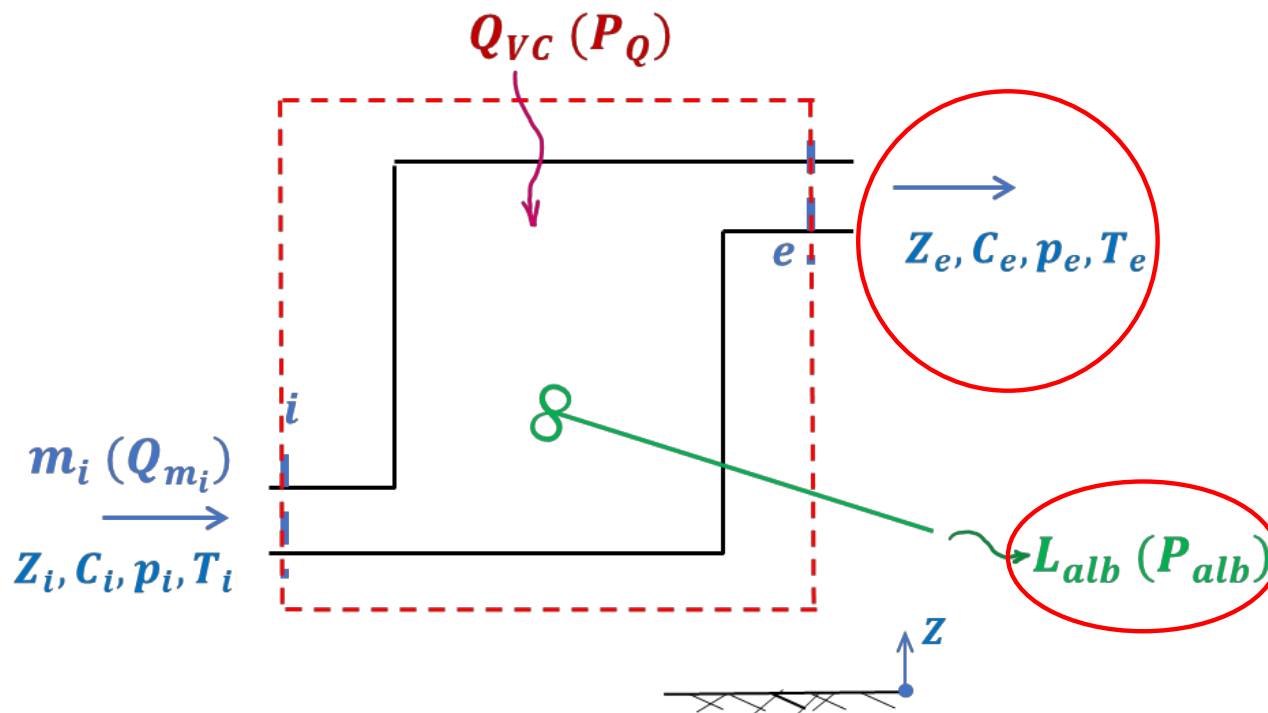
$E_{entrante}$

- E_i è l'energia entrante nel volume di controllo dovuta alla massa entrante m_i
- Q_{VC} è il calore trasferito attraverso la superficie del volume di controllo

Primo principio della termodinamica: sistemi aperti

Il primo principio nella sua formulazione generale richiede:

$$\sum E_{entrante} - \sum E_{uscente} = (E_{s2} - E_{s1})_{VC}$$



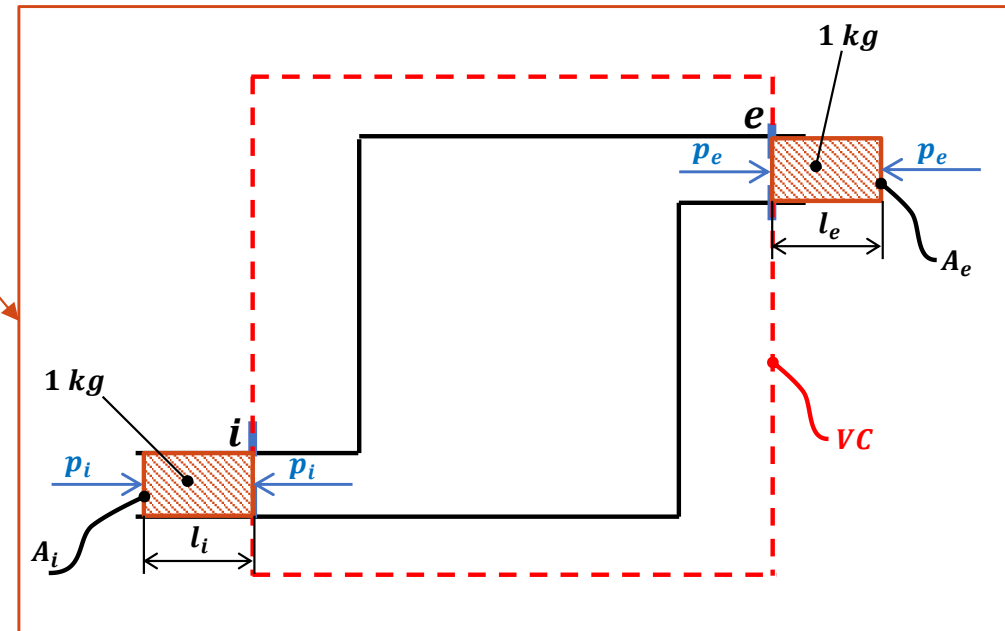
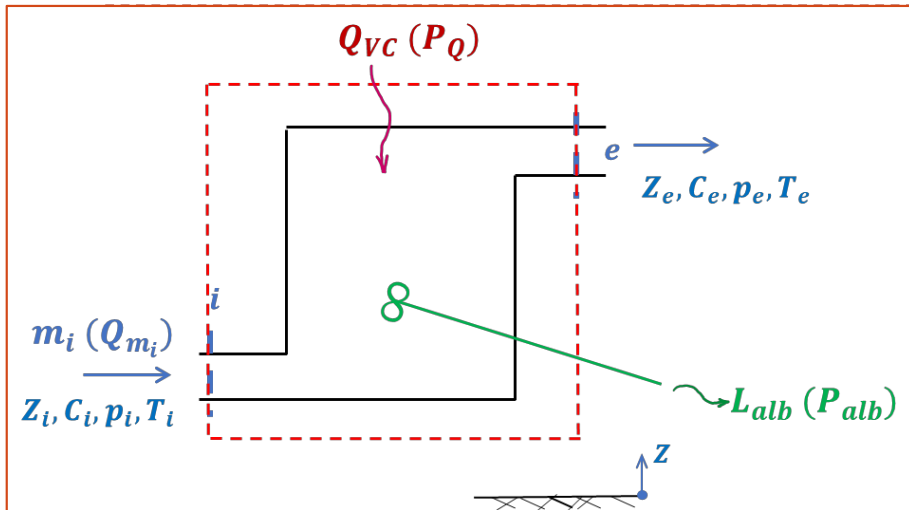
$E_{uscente}$

- E_e è l'energia entrante nel volume di controllo dovuta alla massa uscente m_e
- L_{alb} è il lavoro meccanico ottenuto all'albero della macchina

E' TUTTO??

- Si deve considerare anche il lavoro eseguito dall'ambiente esterno per immettere la massa m_i all'interno del volume di controllo e il lavoro fatto dal sistema per espellere la massa m_e dal volume di controllo

Primo principio della termodinamica: sistemi aperti



- Per immettere 1 kg di massa attraverso la sezione di ingresso A_i è necessario che l'ambiente esterno esegua il lavoro L_i dato dal prodotto della forza $F_i = p_i A_i$ per lo spostamento l_i che definisce con A_i il volume $V_i = A_i l_i$ occupato dall'unità di massa

$$L_i = F_i \cdot l_i = p_i A_i l_i = p_i V_i$$

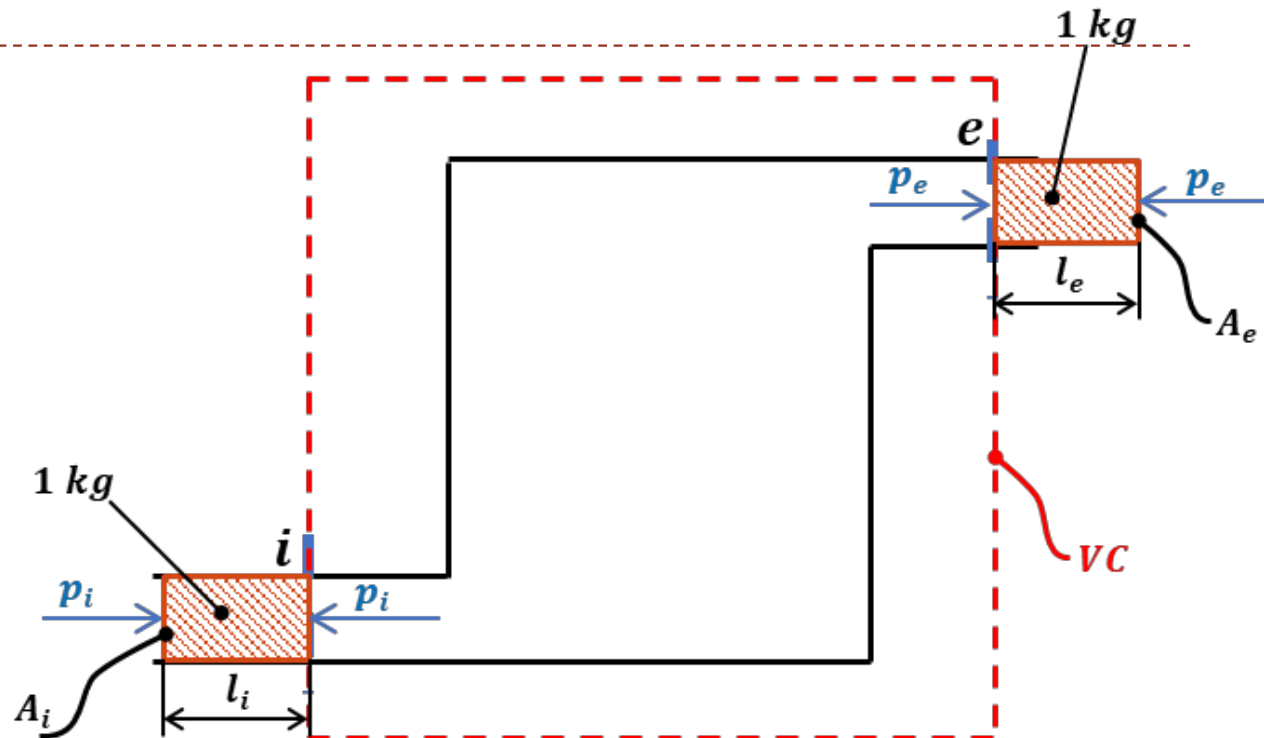
Primo principio della termodinamica: sistemi aperti

$$L_i = p_i V_i$$

... ma V_i è il volume occupato
da 1 kg di massa $\Rightarrow$ Quindi

$$V_i = v_i$$

Volume specifico del fluido
nelle condizioni di pressione
 p_i e temperatura T_i
presenti nella sezione di
ingresso i

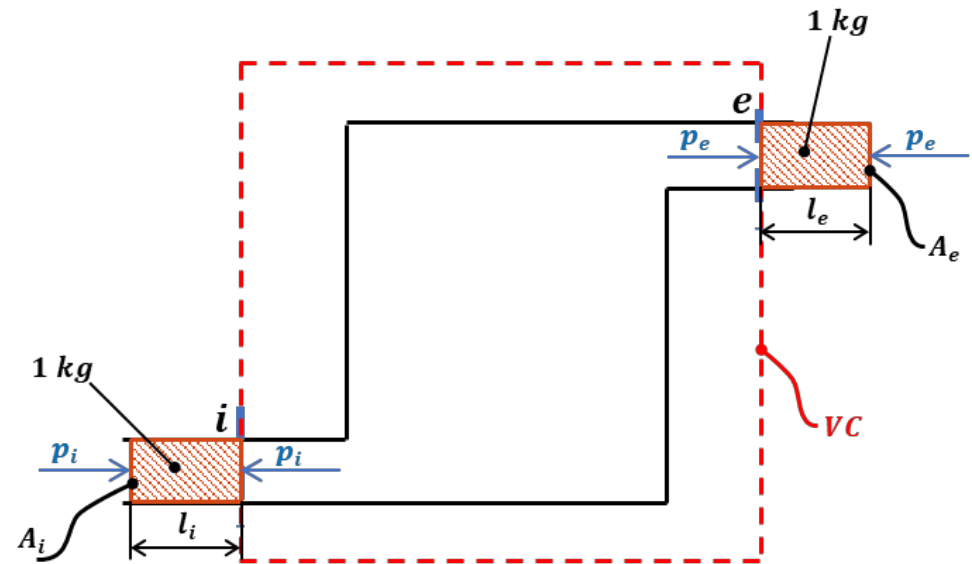


$$L_i = p_i V_i = p_i v_i = \frac{p_i}{\rho_i} \left[\frac{J}{kg} \right]$$

Primo principio della termodinamica: sistemi aperti

In maniera analoga, si ricava il lavoro

$$L_e = \left(\frac{p}{\rho} \right)_e$$



fatto dal sistema verso l'esterno per espellere l'unità di massa dall'esterno contro la pressione p_e agente sulla corrispondente sezione di scarico A_e

$$E_i + Q_{VC} = (E_{s2} - E_{s1})_{VC} + L_{VC} + E_e$$

$$L_i = p_i v_i = \left(\frac{p}{\rho} \right)_i$$

$$L_e = p_e v_e = \left(\frac{p}{\rho} \right)_e$$

$$L_{alb}$$

Primo principio della termodinamica: sistemi aperti

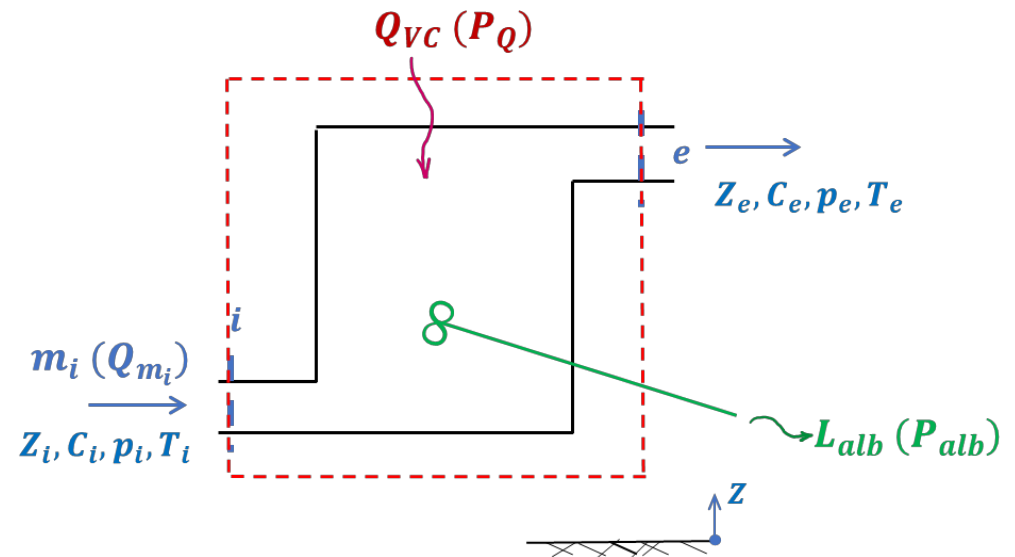
Nell'ipotesi di più **masse entranti** ed **uscanti** dal sistema, si ottiene:

$$\boxed{\sum_i E_i} + Q_{VC} + \sum_i m_i \left(\frac{p}{\rho} \right)_i - \boxed{\sum_e E_e} - \sum_e m_e \left(\frac{p}{\rho} \right)_e - L_{alb} = (E_{s2} - E_{s1})_{VC}$$

dove le energie totali E_i e E_e trasportate dalle masse m_i e m_e entranti ed uscenti sono date, in coerenza con quanto formulato per l'energia propria di un sistema, dalle relazioni seguenti:

$$E_i = m_i \left(u + \frac{c^2}{2} + gz \right)_i$$

$$E_e = m_e \left(u + \frac{c^2}{2} + gz \right)_e$$



dove u è l'energia interna riferita all'unità di massa

Primo principio della termodinamica: sistemi aperti

$$\sum_i E_i + \sum_i m_i \left(\frac{p}{\rho} \right)_i + Q_{VC} - \sum_e E_e + \sum_e m_e \left(\frac{p}{\rho} \right)_e - L_{alb} = (E_{s2} - E_{s1})_{VC}$$

$$E_i = m_i \left(u + \frac{c^2}{2} + gz \right)_i$$

$$E_e = m_e \left(u + \frac{c^2}{2} + gz \right)_e$$



$$\sum_i m_i \left(u + \frac{c^2}{2} + gz \right)_i + \sum_i m_i \left(\frac{p}{\rho} \right)_i + Q_{VC} - \sum_e m_e \left(u + \frac{c^2}{2} + gz \right)_e + \sum_e m_e \left(\frac{p}{\rho} \right)_e - L_{alb} = (E_{s2} - E_{s1})_{VC}$$

$$H = u + \frac{p}{\rho}$$

$$H^0 = u + \frac{p}{\rho} + \frac{c^2}{2} + gz = H + \frac{c^2}{2} + gz$$

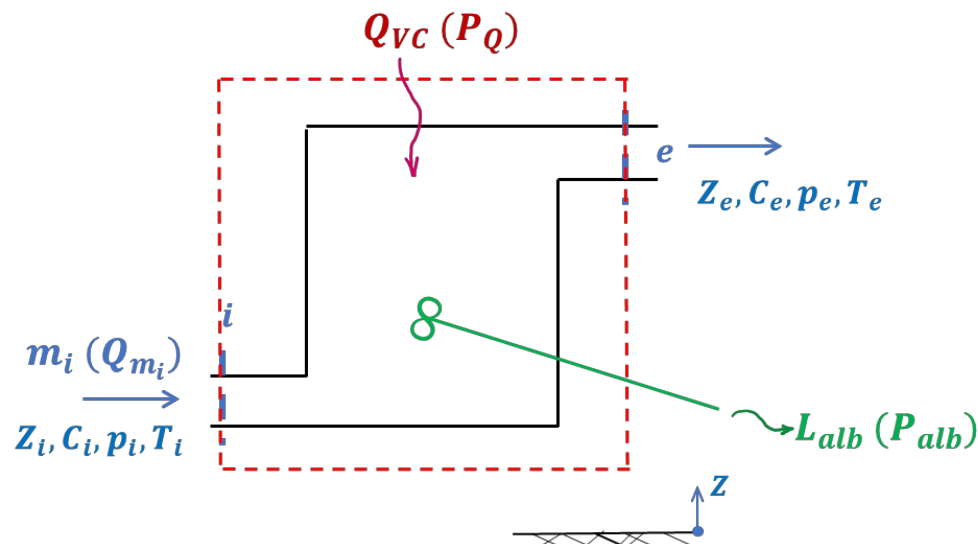
$$\sum_i m_i H_i^0 - \sum_e m_e H_e^0 + Q_{VC} - L_{alb} = (E_{s2} - E_{s1})_{VC}$$

Primo principio della termodinamica: sistemi aperti

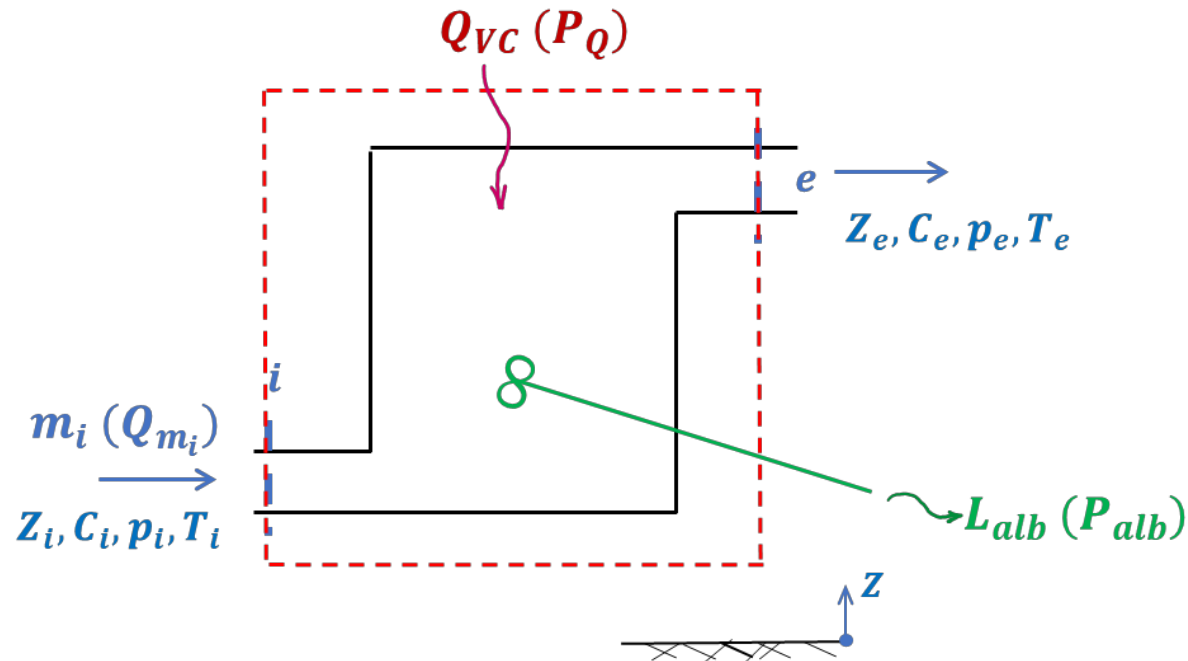
$$\sum_i m_i H_i^0 - \sum_e m_e H_e^0 + Q_{VC} - L_{alb} = (E_{s2} - E_{s1})_{VC}$$

Riferendo le masse e le energie a una variazione di **tempo infinitesimo** dt , l'equazione del PRIMO principio diventa:

$$\sum_i Q_{m_i} H_i^0 - \sum_e Q_{m_e} H_e^0 + P_Q - P_{alb} = \frac{dE_{sVC}}{d\tau}$$



Primo principio della termodinamica: sistemi aperti



In **condizioni di regime permanente**, ovvero quando tutti i contributi sono costanti nel tempo $\Rightarrow \frac{dE_{sVC}}{d\tau} = 0$

$$\sum_i Q_{m_i} H_i^0 - \sum_e Q_{m_e} H_e^0 + P_Q - P_{alb} = \frac{dE_{sVC}}{d\tau} = 0$$



Esercizio 1

Esercizio 1

Una macchina disposta su un asse orizzontale elabora una portata di 10 kg/s di aria ($R=287 \text{ J/kg}$ e $c_p=1004 \text{ J/kgK}$) alla pressione $p_1=10 \text{ bar}$ e alla temperatura $T_1=100^\circ\text{C}$, mediante un condotto circolare di diametro $D_1=100\text{mm}$.

All'uscita della macchina la stessa portata di aria è nelle condizioni $p_2=2 \text{ bar}$ e $T_2=20^\circ\text{C}$ ed è scaricata da un condotto di diametro $D_2=300\text{mm}$.

Attraverso le parti non adiabatiche della macchina si rileva una fuga termica verso l'esterno pari a 500 kW .

Si verifichi se la macchina è motrice o operatrice e a quanto ammonta la potenza meccanica scambiata con l'esterno.

Esercizio 1

Nota:

- Macchina motrice $\Rightarrow$ Produce Potenza
- Macchina operatrice $\Rightarrow$ Assorbe Potenza

Convenzione:

- $Q > 0 \Rightarrow$ se entrante
- $L > 0 \Rightarrow$ se uscente

$$\dot{Q}_{m1} = 10 \text{ kg/s} = \dot{Q}_{m2}$$

$$p_1 = 10 \text{ bar}$$

$$T_1 = 100^\circ\text{C}$$

$$D_1 = 100 \text{ mm}$$

$$p_2 = 2 \text{ bar}$$

$$T_2 = 20^\circ\text{C}$$

$$D_2 = 300 \text{ mm}$$

$$P_Q = 500 \text{ kW}$$

ARIA

↓
gas ideale

$$R = 287 \text{ J/kg}$$

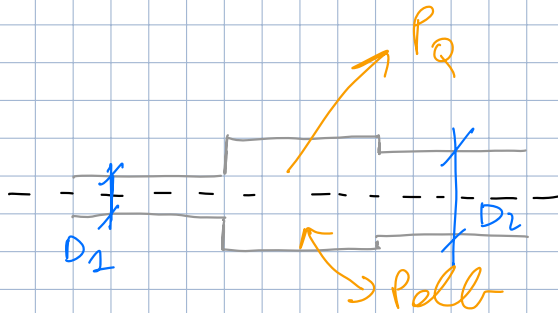
$$C_p = 1004 \text{ J/kg K}$$

- MACCHINA MOTTRICE o OPERATRICE?
- POT MECCANICA (P_{mech})?

RISOLUZIONE

$Q > 0$ SE ENTRA NEL SISTEMA o NEGLIO VC

$P > 0$ SE ESCE DALL' " " " VC



- EQ. DI CONS. DELLA MASSA

$$\dot{Q}_{m1} = \dot{Q}_{m2} \Rightarrow \dot{Q}_m = 10 \text{ kg/s}$$

- I° P.D.T

$$\dot{Q}_m \left(u + \frac{p}{\rho} + \frac{c^2}{2} + yz \right)_1 - \dot{Q}_m \left(u + \frac{p}{\rho} + \frac{c^2}{2} + yz \right)_2 - P_Q - P_{\text{mech}} = 0$$

$\downarrow$ H $\downarrow$ H
 $z_1 = z_2$

$$Q_m \left(H_1 + \frac{C_1^2}{2} \right) - Q_m \left(H_2 + \frac{C_2^2}{2} \right) - P_Q - P_{\text{oller}} = 0$$

↑ LA SO!
↑ ?

MI MANCA $H, C \rightarrow$ DA TROVARE SOLO

$$Q_v = \frac{m^3}{s} = C \cdot A \quad Q_m = Q_v \cdot \rho = \frac{u_y}{s}$$

$$C = \frac{Q_m}{\rho A} \quad \text{me } A \rightarrow \text{LA SO} \rightarrow D$$

$Q_m \rightarrow \text{LA SO} \rightarrow 10 \text{ kg/s}$
 non conosco ρ !

IL PROBLEMA MI DICEVA $\Rightarrow$ ARIA, GAS IDEALE,
 κ, C_p qmoli

eq. del gas ideale $p v = R T \Rightarrow \frac{p}{\rho} = R T$

ALLORA MI POSIZIONO IN ①

$$\rho_1 = \frac{p_1}{R T_1} = \frac{10 \cdot 100000}{287 \cdot (100 + 273,15)} = 9,34 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$A_1 = \frac{\pi D_1^2}{4} = \frac{\pi \cdot (100 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 7,85 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$C_1 = 136,38 \text{ m/s}$$

STESSO PROCEDIMENTO PER ② $\Rightarrow C_2 = 59,48 \text{ m/s}$

MI MANCA H ! $H = C_p \cdot T$ OVVERO

$$H_1 = C_p \cdot T_1$$

$$H_2 = C_p \cdot T_2$$

$$Q_m \cdot \left(C_p T_1 + \frac{C_1^2}{2} - C_p T_2 - \frac{C_2^2}{2} \right) - P_Q - P_{\text{oller}} = 0$$

$$P_{\text{elw}} = \dot{Q}_m \cdot \left(c_p T_1 - c_p T_2 + \frac{c_1^2}{2} - \frac{c_2^2}{2} \right) - P_Q$$

$\stackrel{!}{=} 378,4 \text{ kW}$

$P_{\text{elw}} > 0$ QUINDI LA MACCHINA È MOTRICE!

Domande, Curiosità, Dubbi, Perplessità?

PROF. ING. ALBERTO BENATO, PH.D.

ASSOCIATE PROFESSOR

TURBOMACHINERY & ENERGY SYSTEMS GROUP

DEPARTMENT OF INDUSTRIAL ENGINEERING - UNIVERSITY OF PADOVA
VIA VENEZIA 1 - 35131 - PADOVA
BLDG. EX DIM - 5TH FLOOR - ROOM 19

TEL. 049 827 6752

MAIL: ALBERTO.BENATO@UNIPD.IT

WEBSITE: RESEARCH.DII.UNIPD.IT/TES/

