Lezione 06 - Sistemi aperti

Corso di Fisica Tecnica
a.a. 2019-2020

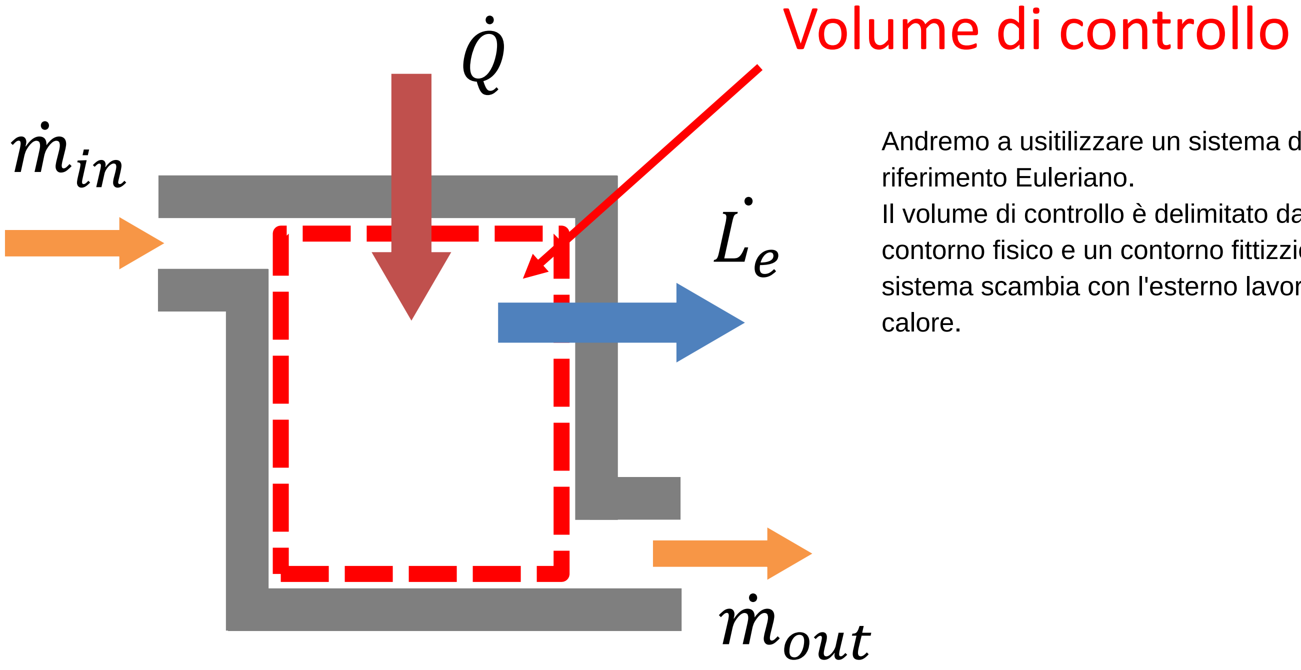
Prof. Gaël R. Guédon
Dipartimento di Energia, Politecnico di Milano

Obiettivi della lezione

- Definire un **sistema aperto**
- Ricavare le **equazioni di bilancio** nel ipotesi di **regime stazionario**
- Definire la **macchine aperta**, lo **scambiatore di calore**, il **diffusore** e la **valvola di laminazione**
- Definire il **rendimento isoentropico** di una macchina aperta

Un sistema aperto è un sistema in cui può uscire massa e entrare massa.

Il sistema aperto



Andremo a usitilizzare un sistema di riferimento Euleriano.
Il volume di controllo è delimitato da un contorno fisico e un contorno fittizzio, Il sistema scambia con l'esterno lavoro, massa e calore.

*Sistema di riferimento **Euleriano**: il volume di controllo è fisso rispetto ad un sistema di riferimento inerziale.*

Il sistema aperto

- Per semplicità considereremo una sola sezione di ingresso ed una sola sezione di uscita

(entra o esce)

- Il sistema è percorso da **flussi monodimensionali:**
  - sono presenti **condizioni di equilibrio** termodinamico sulle sezioni di **ingresso** e di **uscita** (solo e soltanto all'ingresso e all'uscita, tutto quello che succede all'interno no)
  - non viene fatta alcuna ipotesi in merito alla trasformazione termodinamica che il fluido subisce all'interno del sistema

- E' un **sistema fluente** e di conseguenza è necessario introdurre la **variabile tempo (t)** e di conseguenza i **flussi di massa, di energia, di entropia, ecc**

$$\dot{m} \quad \dot{E} \quad \dot{U} \quad \dot{H} \quad \dot{S} \quad \dot{Q} \quad \dot{L}$$

Vediamo ora i vari bilanci.

Bilancio di massa

Per il bilancio di massa andiamo ad analizzare il volume di controllo che ha una determinata massa che nel tempo può variare

$$\frac{dM}{dt} = \sum_k \dot{m}_k^{\leftarrow}$$

La somma delle k sessioni di passaggio (nei nostri casi sono sempre 2)

1 ingresso
1 uscita

$$\frac{dM}{dt} = \dot{m}_i - \dot{m}_u$$

portata di ingresso

portata di uscita

Esempio di sessione di passaggio (un tubo di ingresso)

ρ_i : densità

Equazione di continuità

$$\dot{m} = \rho w \Omega$$

portata = massa volumica per velocità media per area della sezione di passaggio

ρ: massa volumica

w: velocità media

Ω: area della sezione di passaggio

Abbiamo anche qui lo stesso concetto di variazione di quantità nel tempo.

Bilancio di energia

$$\frac{dE}{dt} = \dot{E}^{\leftarrow}$$

calore per unità di tempo

lavoro per unità di tempo

energia netta entrante nel sistema

$$\dot{E}^{\leftarrow} = \dot{Q}^{\leftarrow} - \dot{L}^{\rightarrow} + \sum_k \dot{E}^{\leftarrow}_{m,k} + \text{sorgenti}$$

fonte di energia dovute a sorgenti (es, radiazioni, reazioni chimiche...)

Scambio di energia dovuto allo scambio di massa per ogni sessione di passaggio.

- Calore scambiato
- Lavoro scambiato
- Energia associata al trasporto di massa
- Energia dovuta ad una sorgente

Andiamo adesso ad analizzare queste 4 forme di energia che compongono l'energia netta entrante nel sistema

Dobbiamo considerare due contorni, quello esterno che è rigido (reale) e impermeabile e quello fittizio (ideale) che è permeabile

Calore scambiato

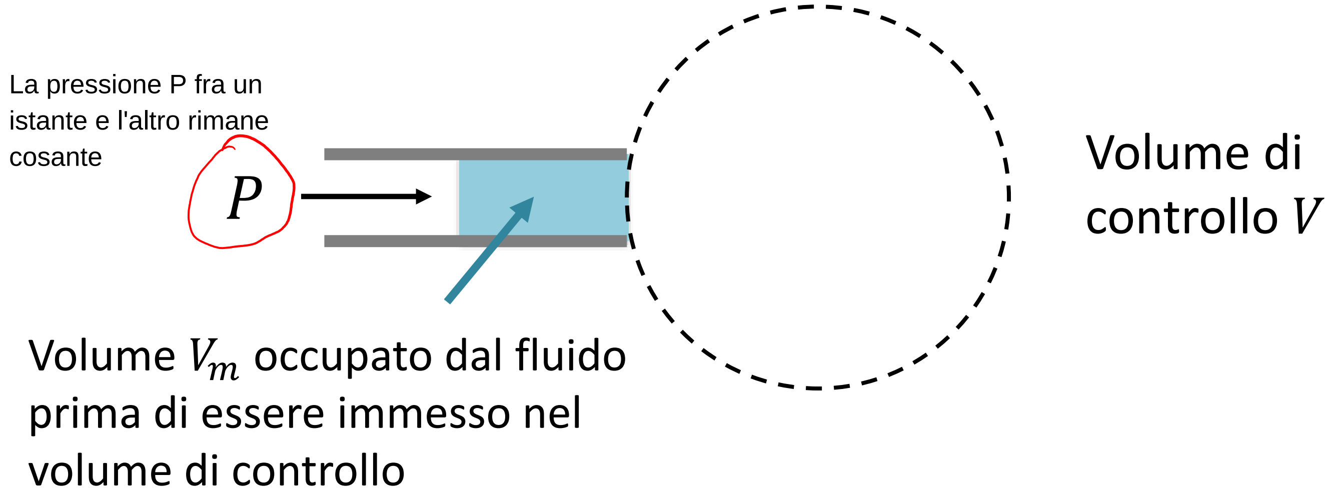
- Calore scambiato per unità di tempo attraverso le sezioni non attraversate dalla massa: $\dot{Q}^{\leftarrow}$
- Calore scambiato per unità di tempo attraverso le sezioni attraversate dalla massa (ingresso e uscita): **trascurabile**

Lavoro scambiato

- Lavoro scambiato per unità di tempo attraverso le sezioni non attraversate dalla massa: **lavoro di elica** $-\dot{L}_e^{\rightarrow}$ (è la potenza meccanica che possiamo sfruttare)
- Lavoro scambiato per unità di tempo attraverso le sezioni attraversate dalla massa (ingresso e uscita): **lavoro di pulsione** $\dot{L}_P^{\leftarrow}$

Lavoro di pulsione

- E’ il lavoro necessario per immettere nel sistema la massa che il sistema scambia con l’esterno



Si consideri un sistema $V + V_m$ occupato dalla massa $M + M_i$. Se si immette la massa M_i nel volume V il sistema complessivo subisce una variazione (riduzione) di volume mantenendo costante la massa.

Lavoro di pulsione

- Questo è un sistema chiuso che scambia con l’esterno un lavoro $L_P^{\leftarrow}$:

$$L_P^{\leftarrow} = -\int_{V+V_m}^{V} P dV = PV_m$$ (P è una costante)

$$L_P^{\leftarrow} = M_i P v_i$$

M_i= massa immessa nel sistema
P=pressione costante che agisce su M_i
v_i= volume specifico della sessione di ingresso.

(allo stesso modo possiamo calcolare per la sessione d'uscita)

- Questo termine di lavoro compare per ogni sezione di ingresso e di uscita della massa

Energia associata al trasporto di massa

è tutta l'energia che è associata a quella della massa che entra nel sistema. La massa che entra ha una sua energia interna, una sua energia potenziale e una energia cinetica.

- Nel valutare l'energia entrante nel sistema occorre tenere presente che la massa che attraversa la superficie di controllo trasporta con sé energia (E_m)

- Risulta somma delle energie associate ai flussi di massa (energia interna, energia potenziale ed energia cinetica):

w=velocità media

$$\dot{E}_m = \sum_k \underbrace{\dot{m}_k^{\leftarrow}}_{\text{portata}} \left(\overset{\text{e. interna}}{u} + \underbrace{gz}_{\text{e. potenziale}} + \frac{w^2}{2} \right)_\mathrm{k}$$

e. potenziale,
g= gravità,
z= altitudine della sessione di passaggio

(k è il solito indice che itera su tutte le sessioni di scambio con l'esterno, nel nostro corso sono sempre due, ingresso e uscita)

Termini sorgenti

Sono quei fenomeni fisici a cui è soggetto il nostro sistema aperto

- Effetto joule (es. fornello a induzione)
- Reazioni chimiche (es. combustione)
- Reazioni nucleari
- Radiazioni (es. microonde)
- Ecc

Bilancio energetico

$$\frac{dE}{dt} = \dot{E}_m + \dot{Q}^{\leftarrow} - \dot{L}_e^{\rightarrow} + \sum_k \left(\dot{L}_P^{\leftarrow}\right)_k$$ (equazione che abbiamo visto prima)

ovvero: (espandendo tutti i termini)

e. associata alla massa entrante

e. associata alla massa uscente

calore entrante dal contorno del sistema

Lavori di pulsione all'ingresso e all'uscita

$$\frac{dE}{dt} = \dot{m}_i\left(u + gz + \frac{w^2}{2}\right)_i - \dot{m}_u\left(u + gz + \frac{w^2}{2}\right)_u + \dot{Q}^{\leftarrow} - \dot{L}_e^{\rightarrow} + \dot{m}_i(Pv)_i - \dot{m}_u(Pv)_u$$

lavoro uscente dal contorno del sistema (di elica)

notiamo che l'entalpia di una determinata sessione k di scambio è $(u + Pv)_k = (h)_k$

$$\boxed{\frac{dE}{dt} = \sum_k \dot{m}_k^{\leftarrow}\left(h + gz + \frac{w^2}{2}\right)_k + \dot{Q}^{\leftarrow} - \dot{L}_e^{\rightarrow}}$$

differenza

Bilancio di entropia

In modo analogo è possibile ricavare l'equazione di bilancio entropico:

$$\boxed{\frac{dS}{dt} = \sum_k \dot{m}_k^{\leftarrow} s_k + \dot{S}_Q^{\leftarrow} + \dot{S}_{irr}}$$

Regime stazionario

Tra le situazioni che si presentano più frequentemente in ingegneria vi sono le cosiddette condizioni di stazionarietà o di regime permanente:

$$\frac{dM}{dt} = 0 \qquad \frac{dE}{dt} = 0 \qquad \frac{dS}{dt} = 0$$

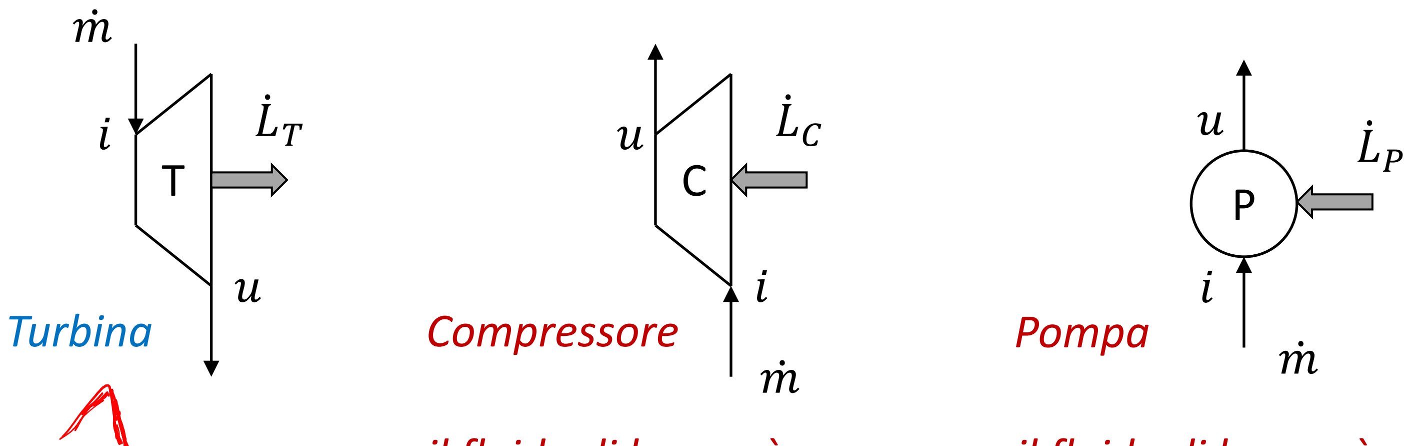
$$\dot{m}_i^{\leftarrow} = -\dot{m}_u^{\leftarrow} = \dot{m}$$

$$\dot{m}\left[(h_i - h_u) + g(z_i - z_u) + \frac{w_i^2 - w_u^2}{2}\right] + \dot{Q}^{\leftarrow} - \dot{L}_e^{\rightarrow} = 0$$

$$\dot{m}(s_i - s_u) + \dot{S}_Q^{\leftarrow} + \dot{S}_{irr} = 0$$

Macchina aperta

E' un **dispositivo adiabatico** destinato a **scambiare lavoro** per il quale si ipotizzano trascurabili le variazioni di energia potenziale e di energia cinetica tra le sezioni di ingresso e di uscita.

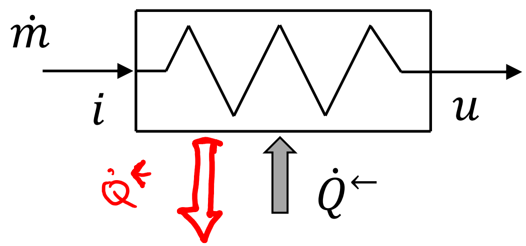


*il fluido di lavoro è un **gas***   *il fluido di lavoro è un **liquido***

$$\dot{m}(h_i - h_u) - \dot{L}_{\vec{e}} = 0 \qquad \dot{m}(s_i - s_u) + \dot{S}_{irr} = 0$$

Scambiatore di calore

E' un dispositivo destinato a **scambiare calore** e che **non scambia lavoro** per il quale si ipotizzano trascurabili le variazioni di energia potenziale e di energia cinetica tra le sezioni di ingresso e di uscita.

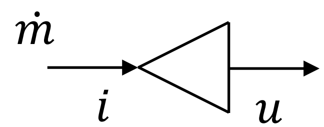


$$\dot{m}(h_i - h_u) + \dot{Q}^{\leftarrow} = 0$$

$$\dot{m}(s_i - s_u) + \dot{S}_Q^{\leftarrow} + \dot{S}_{irr} = 0$$

Diffusore (w ↓) e ugello (w ↑)

I diffusori e gli ugelli sono sistemi aperti stazionari che operano **senza scambio di lavoro né calore** per i quali si ipotizzano trascurabili le variazioni di energia potenziale tra le sezioni di ingresso e di uscita.

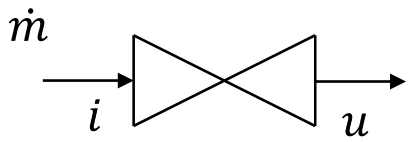


$$\left[(h_i - h_u) + \frac{w_i^2 - w_u^2}{2}\right] = 0$$

$$\dot{m}(s_i - s_u) + \dot{S}_{irr} = 0$$

Valvola di laminazione

E’ un **dispositivo adiabatico** che **non scambia lavoro** per il quale si ipotizzano trascurabili le variazioni di energia potenziale e di energia cinetica tra le sezioni di ingresso e di uscita. Si ottiene un processo detto di **laminazione isoentalpica**.



$$(h_i - h_u) = 0$$

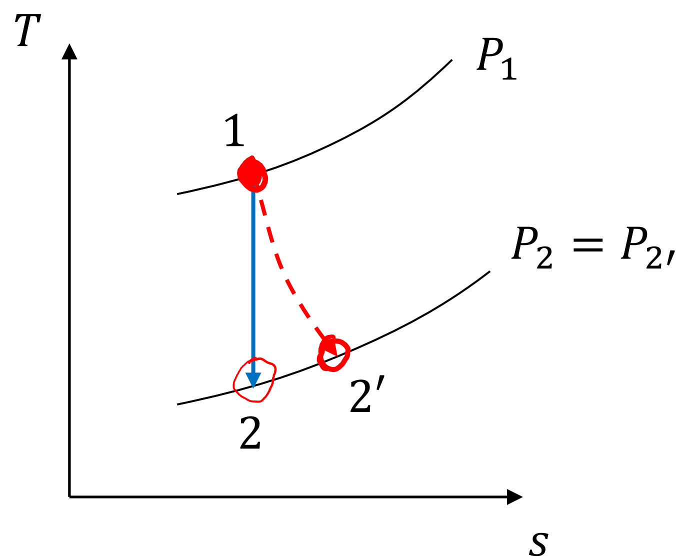
$$\dot{m}(s_i - s_u) + \dot{S}_{irr} = 0$$

processo irreversibile

Turbina

Si chiama rendimento isoentropico di una **macchina motrice aperta** (turbina) il rapporto fra la potenza realmente ottenuta e la potenza massima ottenibile in condizioni ideali (trasformazione del fluido isoentropica e quindi adiabatica reversibile) a parità di condizioni in ingresso e a parità di pressione di fine espansione.

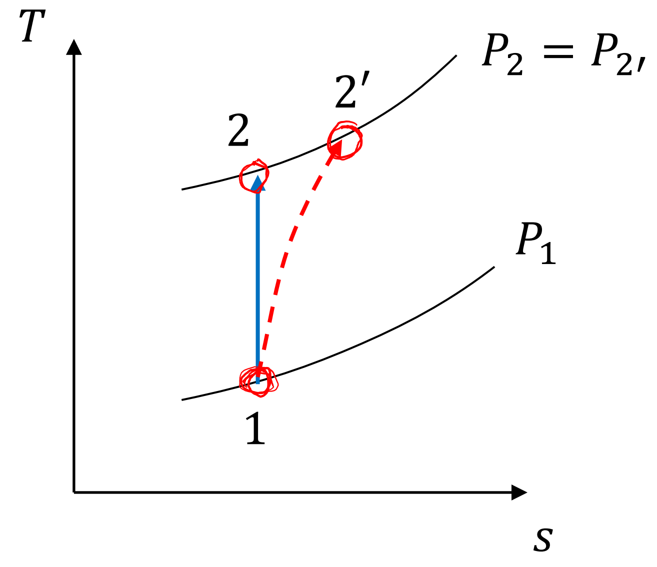
$$\eta_T = \frac{\dot{L}^{\rightarrow}_{reale}}{\dot{L}^{\rightarrow}_{ideale}} = \frac{(h_1 - h_{2'})}{(h_1 - h_2)}$$



Compressore e pompa

Si chiama rendimento isoentropico di una **macchina operatrice aperta** (compressore e pompa) il rapporto fra la potenza minima spesa in condizioni ideali (trasformazione del fluido isoentropica e quindi adiabatica reversibile) e la potenza realmente spesa a parità di condizioni in ingresso e a parità di pressione di fine espansione.

$$\eta_C = \frac{\dot{L}^{\rightarrow}_{ideale}}{\dot{L}^{\rightarrow}_{reale}} = \frac{(h_1 - h_2)}{(h_1 - h_{2'})}$$



L'irreversibilità interna associata al moto del fluido

Si consideri il moto stazionario di un fluido in un tratto di condotta infinitesimo con l'ipotesi che lo scambio di calore con l'esterno sia realizzato in modo reversibile. Dopo opportuni passaggi e trascurando le variazioni di energia cinetica e potenziale, il bilancio energetico ed entropico per unità di massa sono:

$$-dh + \delta q_{rev}^{\leftarrow} - \delta l_e^{\rightarrow} = 0$$

$$-ds + \frac{\delta q_{rev}^{\leftarrow}}{T} + ds_{irr} = 0$$

e quindi $$Tds = \delta q_{rev}^{\leftarrow} + Tds_{irr}$$

Ricordando che $dh = du + vdP + Pdv$ (definizione)

e $du = \delta q^{\leftarrow} - \delta l^{\rightarrow}$ (primo principio sistema chiuso)

Essendo u funzione di stato posso considerare una trasformazione reversibile e scrivere $du = Tds - Pdv$, da cui otteniamo $dh = Tds + vdP$

L'irreversibilità interna associata al moto del fluido

Si ottiene quindi:

$$dh = \delta q_{rev}^{\leftarrow} - \delta l_e^{\rightarrow}$$

$$dh = \delta q_{rev}^{\leftarrow} + T ds_{irr} + v dP$$

E quindi:

$$\delta l_e^{\rightarrow} = -v dP - T ds_{irr}$$

Integrando fra la sezione di ingresso e quella di uscita:

$$l_e^{\rightarrow} = \underbrace{-\int_i^u v dP}_{l_{rev}^{\rightarrow}} \underbrace{- \int_i^u T ds_{irr}}_{\text{Energia dissipata per irreversibilità interna (in generale porta a un incremento di } T)}$$

L'irreversibilità interna associata al moto del fluido

In generale l'irreversibilità interna associata al moto si traduce in una spesa energetica per movimentare il fluido che può essere espressa come

$$\dot{L} = \dot{V}\Delta \mathrm{P}$$

$\dot{L}$	Potenza meccanica necessaria a movimentare il fluido (W)
$\dot{V} = w\Omega$	Portata volumetrica (m^3/s)
ΔP	Perdite di carico (Pa)

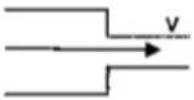
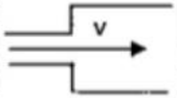
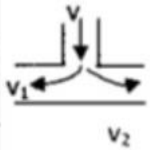
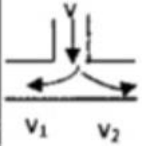
Le perdite di carico possono avere diverse origine: attrito, cambi di direzione, cambi di sezione, ostacoli, ecc

L’irreversibilità interna associata al moto del fluido

Nel caso di perdite di carico concentrate:

$$\Delta P = K\rho\frac{w^2}{2}$$

con la costante di proporzionalità K che dipende dalla singolarità geometrica e che è determinata sperimentalmente. Qualche esempio nella seguente tabella:

	Restringimento brusco	Allargamento brusco	Gomito a 40°	Gomito a 60°	Gomito a 90°	Curva a 90°	Diramaz. a T (per entrambi i flussi)	Diramaz. a gomito	Tratto che segue la diramaz.
									
K	0,5	1	0,14	0,36	1	0,5	3	1,5	1

L'irreversibilità interna associata al moto del fluido

Nel caso di perdite distribuite:

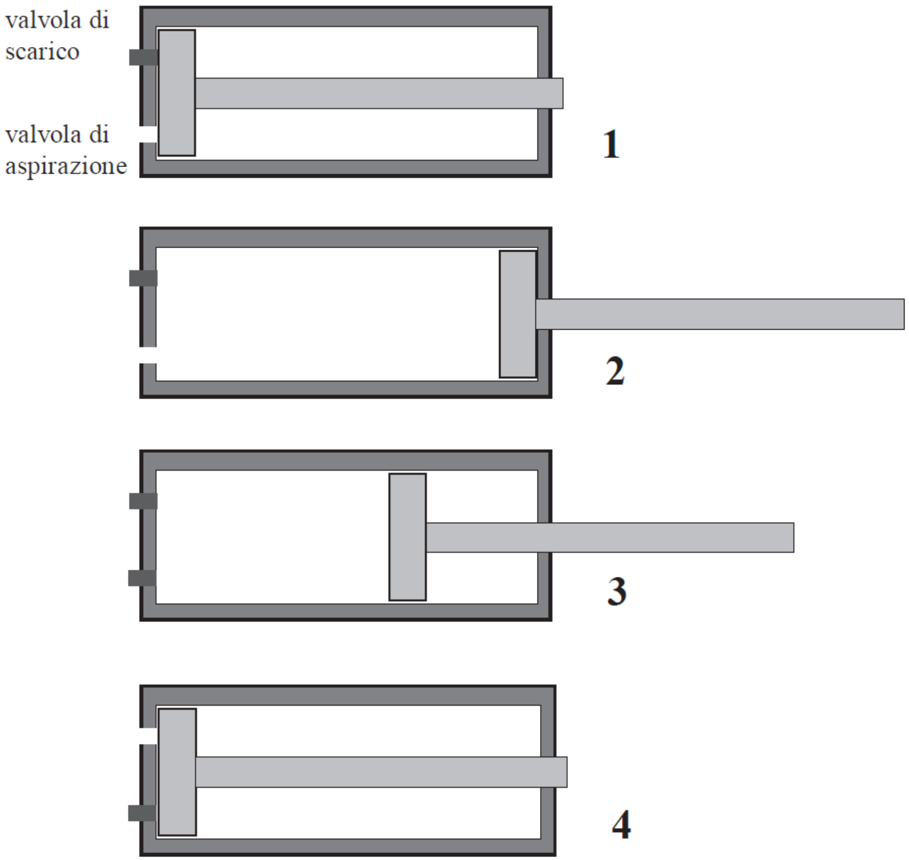
$$\Delta P = f \frac{L}{D} \underbrace{\rho \frac{w^2}{2}}$$

ove L e D rappresentano rispettivamente la lunghezza ed il diametro del condotto. Il coefficiente adimensionale f è detto fattore di attrito (di Darcy) ed è funzione delle caratteristiche di moto del fluido, in particolare del numero di Reynolds ($Re = \rho w D / \mu$).

Per un moto laminare ($Re < 2000$) $$f = \frac{64}{Re}$$

Per un moto turbolento (Blausius) $$f = \frac{0.3164}{Re^{0.25}}$$

Compressore alternativo ideale



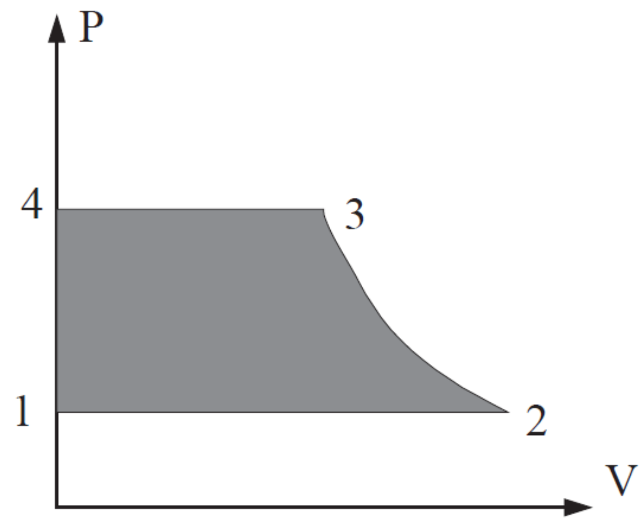
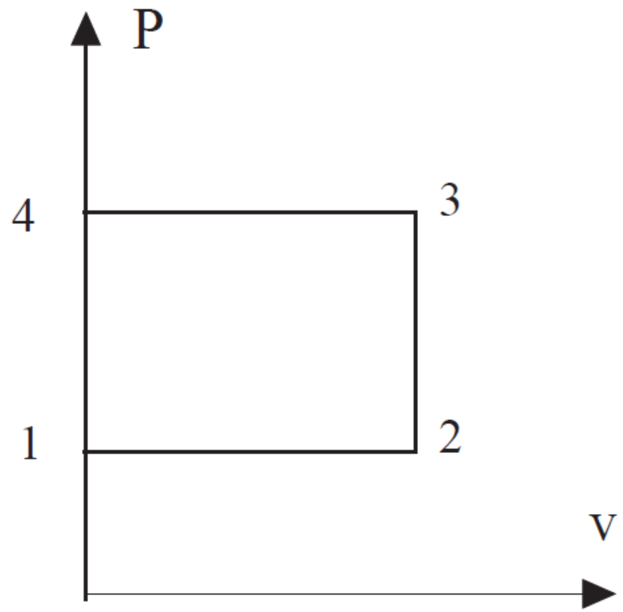


Diagramma della macchina ideale

$$l_{ca}^{\rightarrow} = -\int_2^3 v dP$$

Pompa ideale



$$l_P^{\leftarrow} = v(P_4 - P_1)$$