Lezione 06 - Sistemi aperti

Corso di Fisica Tecnica
a.a. 2019-2020

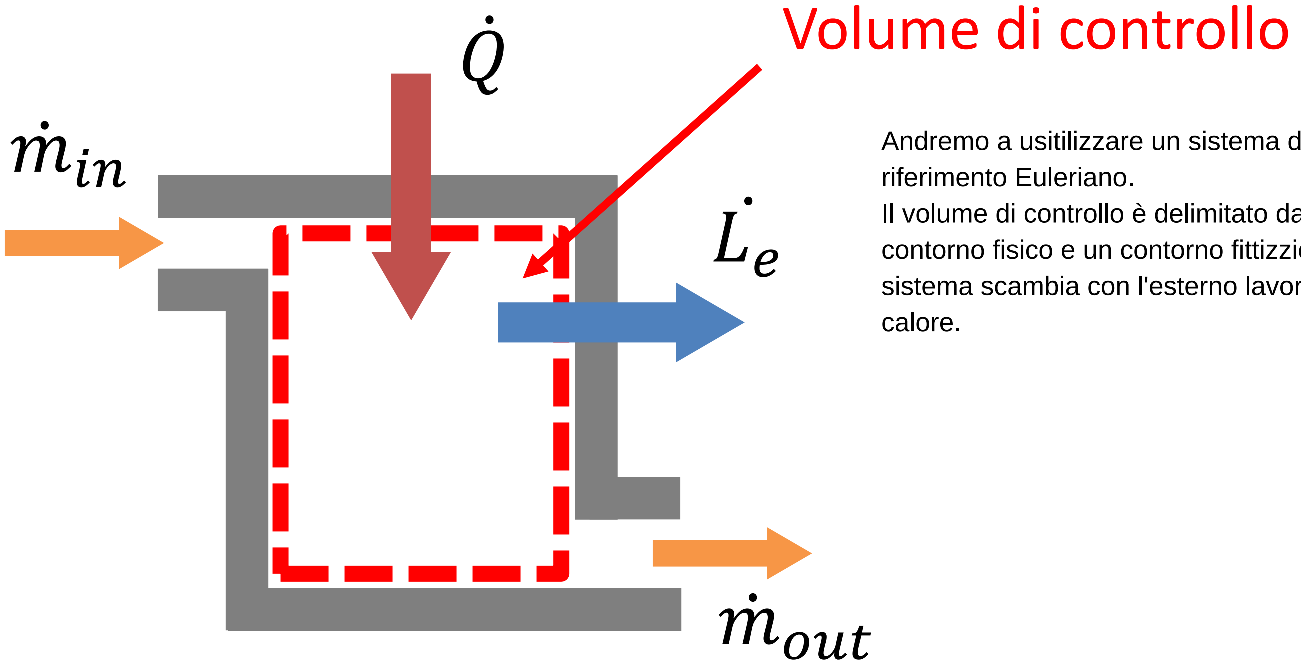
Prof. Gaël R. Guédon
Dipartimento di Energia, Politecnico di Milano

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.

*<u>Sistema di riferimento **Euleriano**:</u> 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

- Il sistema è percorso da **flussi monodimensionali:** (entra o esce)
  - 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**

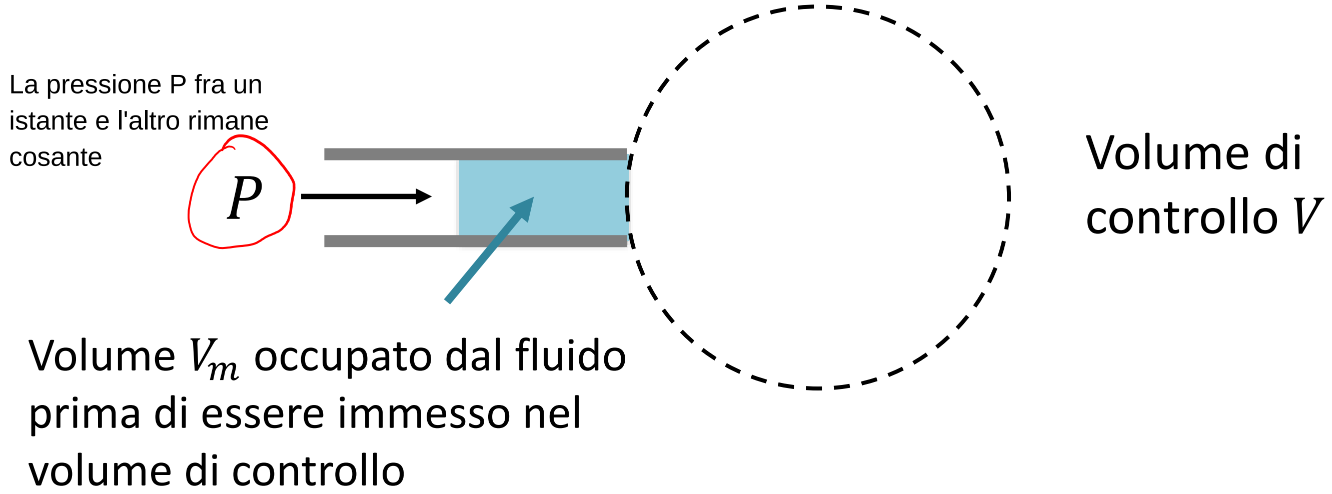
Lavoro scambiato

- 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):

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

w=velocità media

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:

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

C'è una semplificazione che possiamo fare molto spesso ai sistemi aperti,
ed è l'ipotesi di regime stazionario, cioè che le variazioni di massa, di energia, di entropia nel sistema sono nulle nel tempo. Quindi i tre bilanci che abbiamo visto precedentemente si riducono alle tre equazioni che vediamo in questa slide.

Regime stazionario

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

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

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

differenza di entalpia, di energia potenziale e di energia cinetica

$$\underbrace{\dot{m}\left[(h_i - h_u) + g(z_i - z_u) + \frac{w_i^2 - w_u^2}{2}\right]}_{\text{energia associata alla massa che fluisce nel sistema}} + \dot{Q}^{\leftarrow} - \dot{L}_e^{\rightarrow} = 0$$

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

anche il bilancio entropico si semplifica allo stesso modo del bilancio energetico

spesso energia potenziale e cinetica verranno trascurate nei nostri esercizi, quindi rimarremo solo col termine (h_i-h_u) che è il delta h.

Macchina aperta

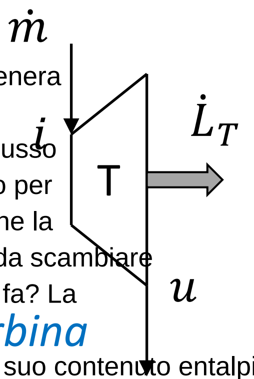
lo scopo delle macchine aperte è proprio quello di scambiare lavoro

(non scambia calore con l'ambiente esterno)

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.

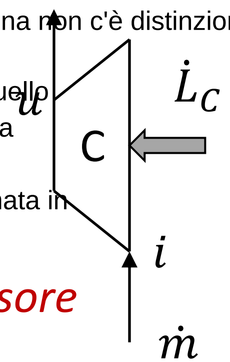
Se la macchina aperta assorbe lavoro dall'esterno, si parla di compressore o pompa a seconda del fluido di lavoro, (per la turbina non c'è distinzione del fluido di lavoro)

se la macchina aperta produce lavoro, cioè genera potenza meccanica.
Le turbine sfruttano il flusso di massa al loro interno per trasformare l'energia che la massa porta in lavoro da scambiare con l'esterno. Come lo fa? La Turbina ottiene il suo scopo riducendo il suo contenuto entalpico.



Turbina

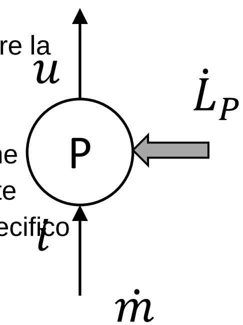
Situazione opposta a quello della turbina: La potenza meccanica inserita nel compressore è trasformata in entalpia.



Compressore

*il fluido di lavoro è un **gas***

La pompa cerca di aumentare la pressione del liquido al suo interno, la differenza col compressore sta nel fatto che essendo il liquido solitamente incomprimibile, il volume specifico del liquido non varia



Pompa

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

Se parliamo di un gas in una turbina, quest'ultimo si espande, riduce la sua pressione e temperatura, e così aumenta il suo volume specifico. Da notare che nel disegno il lato di ingresso è quello corto, poi il gas si espande ed esce dal lato più lungo (a simboleggiare che si è espanso.

$$\dot{m}(h_i - h_u) - \dot{L}_e^{\rightarrow} = 0$$

Bilancio energetico

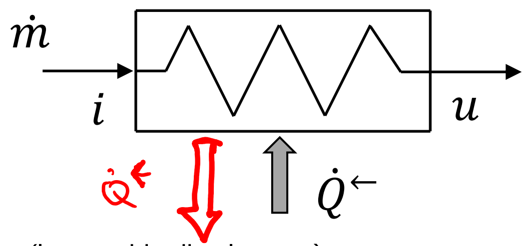
$$\dot{m}(s_i - s_u) + \dot{S}_{irr} = 0$$

nel caso della turbina il lavoro di elica uscente è positivo, quindi l'entalpia in ingresso è maggiore dell'entalpia in uscita.

Scambiatore di calore

é l'opposto delle macchine aperte: non scambia lavoro, e il suo unico obbiettivo è scambiare 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.



(lo scambio di calore può essere entrante o uscente)

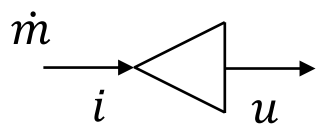
$$\dot{m}(h_i - h_u) + \dot{Q}^{\leftarrow} = 0$$

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

Diffusore (w ↘) e ugello (w ↗)

Differenza fra diffusore e ugello dipende se lo stato di ingresso si trova a una velocità di ingresso maggiore (diffusore) rispetto a quella d'uscita o viceversa (ugello)

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.



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

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

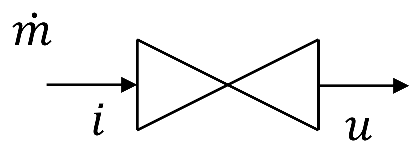
Valvola di laminazione

L'unica cosa che succede in questo sistema è che la pressione scende fra ingresso e uscita, è come uno strozzamento.

(non scambia calore)

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**.

(entalpia in ingresso e in uscita sono identiche)



$$(h_i - h_u) = 0$$

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

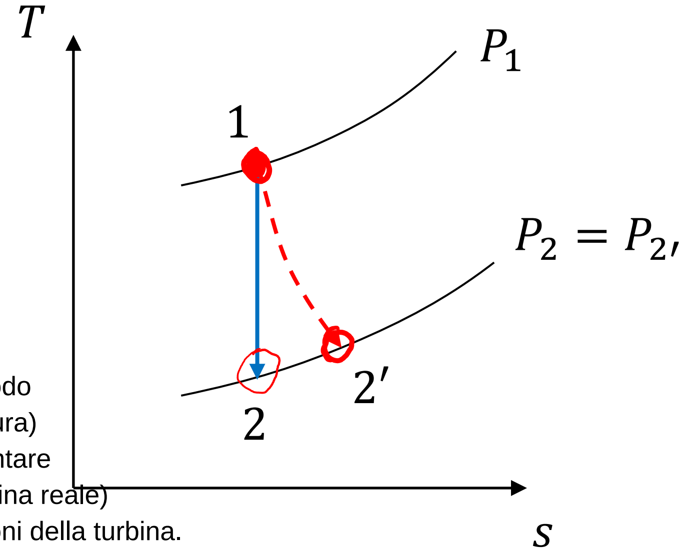
processo irreversibile

Fin'ora abbiamo visto i vari componenti che possiamo trovare all'interno di un impianto. Delle macchine aperte abbiamo detto che ci sono Turbina, compressore e pompa. Avevamo detto che nel sistema aperto era importante sapere lo stato di ingresso e lo stato di uscita e non ci interessava la trasformazione interna al sistema (tipo sapere se è irreversibile o reversibile). Un parametro che ci sarà molto comodo è il rendimento isoentropico.

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.

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



Per esempio un produttore di turbine, calcola quale sarebbe la potenza meccanica prodotta in modo ideale con una certa pressione (e temperatura) di ingresso (1) e una certa pressione (e temperatura) di uscita (2), poi nella realtà si va a misurare i valori effettivamente trovati (2') . Andando a confrontare i due valori delle due potenze meccaniche calcolate (quella della turbina ideale e quella della turbina reale) possiamo trovare il parametro del rendimento isoentropico. Questo parametro mostra le prestazioni della turbina.

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.

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

[discorso simile alla slide precedente]

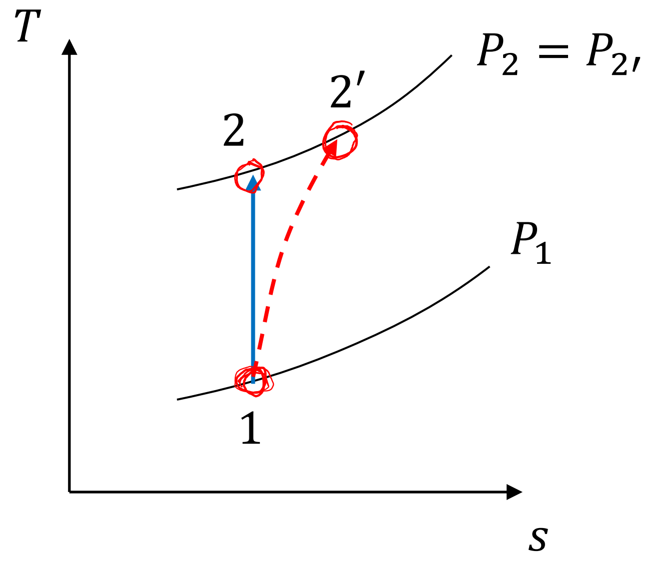


Illustrazione del legame fra le irreversibilità che possono accadere all'interno di un sistema aperto e altre grandezze (in questo caso la temperatura), vediamo una dimostrazione:

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:

passaggi...

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

passaggi... bilancio entropico:

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

e quindi $Tds = \delta q_{rev}^{\leftarrow} + Tds_{irr}$ (dedotto dal bilancio entropico)

passaggi...

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

passaggi...

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 $dh = Tds + vdP$

passaggi...

Non ho capito molto di questa slide.

L'irreversibilità interna associata al moto del fluido

Si ottiene quindi:

passaggi...

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

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

E quindi:

passaggi...

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

conclusione:

Integrando fra la sezione di ingresso e quella di uscita:

Cosa ne deduciamo?

Per esempio in una turbina il lavoro d'elica è positivo ed essendo la temperatura e s_irr positivi, ottengo che se ho irreversibilità il mio lavoro è minore rispetto al lavoro reversibile, perché una parte della mia energia viene dissipata per via delle irreversibilità interne (es. gli attriti), in generale questo comporta un aumento della temperatura.

Nell'esempio del compressore invece il lavoro d'elica è negativo (spendiamo energia per far funzionare il compressore) e quando ci sono irreversibilità ho una spesa maggiore rispetto al caso ideale, perchè una parte dell'energia viene dissipata dalle irreversibilità interne, quindi anche qua c'è spesso un incremento di temperatura.

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

lavoro reversibile di elica.

Da notare che nel sistema chiuso questo era uguale all'integrale di Pdv, e qua è l'integrale di vdP!

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

$$\dot{L} = \dot{V}\Delta \text{P}$$ (si ha una variazione di pressione)

$\dot{L}$	Potenza meccanica necessaria a movimentare il fluido (W)
$\dot{V} = w\Omega$	Portata volumetrica (m^3/s)
ΔP	Perdite di carico (Pa) Questa variazione di pressione dipende dal fluido, dalle condizioni della macchina e da molti fattori. Le perdite di carico sono la differenza che c'è fra il comportamento ideale e quello reale, le perdite di carico sono la componente legata alle irreversibilità del sistema.

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

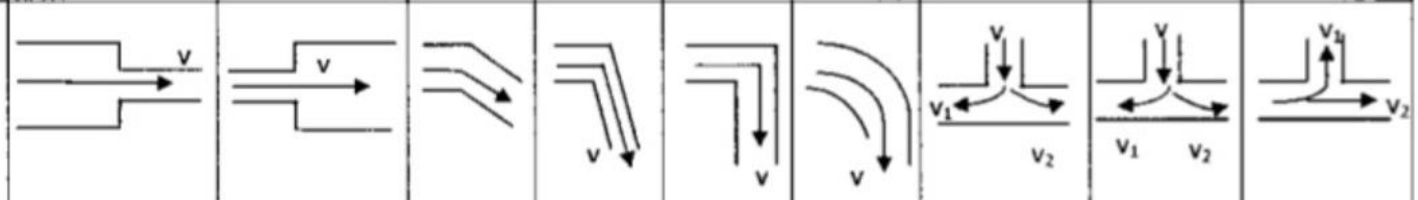
Vediamo come calcolare le perdite di carico in vari casi, iniziamo con le perdite di carico concentrate

L'irreversibilità interna associata al moto del fluido

Nel caso di perdite di carico concentrate:

$$\Delta P = K\underbrace{\rho\frac{w^2}{2}}_{\text{(chiamata pressione dinamica)}}$$

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: (è l'energia dissipata per via dell'attrito)

$$\Delta P = f\,\frac{L}{D}\,\underbrace{\rho\,\frac{w^2}{2}}_{\text{(ancora la pressione dinamica)}}$$

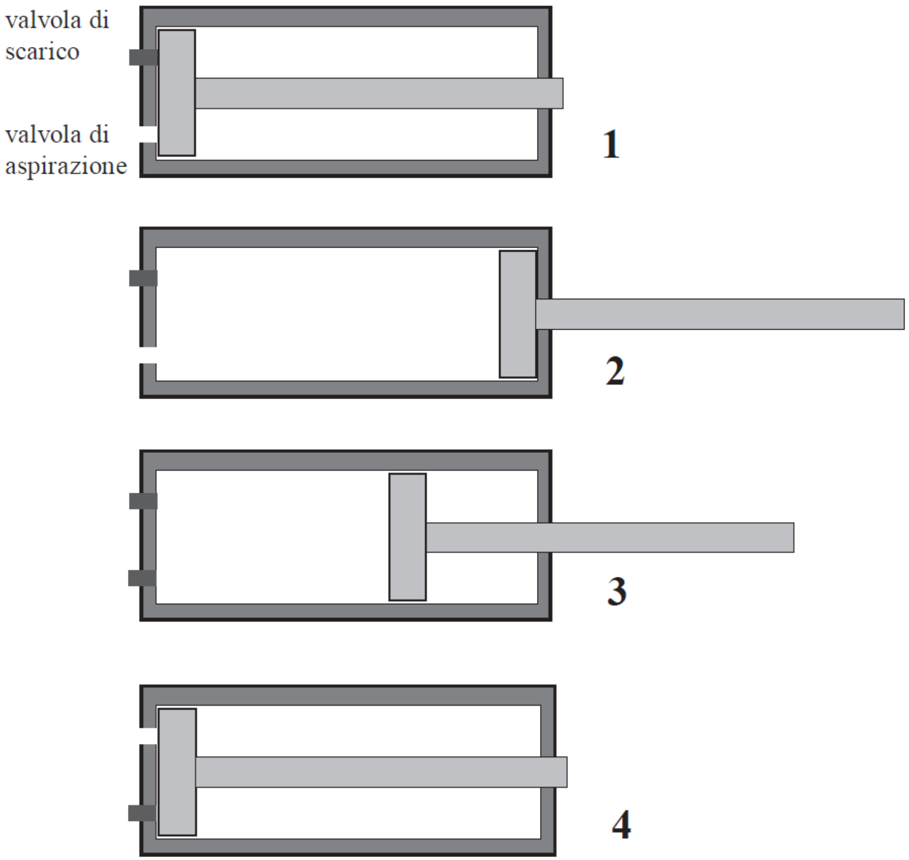
ove L e D rappresentano rispettivamente la lunghezza ed il diametro del condotto. Il coefficiente adimensionale f è detto fattore di attrito (di Darcy) ed è funzione delle caratteristiche di moto del fluido, in particolare del numero di Reynolds ($Re = \rho w D/\mu$).

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

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

Esempi di casi particolari... Questa rappresenta il classico compressore che si ha in garage, o la pompa della bicicletta... (non ha detto nulla a riguardo)

Compressore alternativo ideale



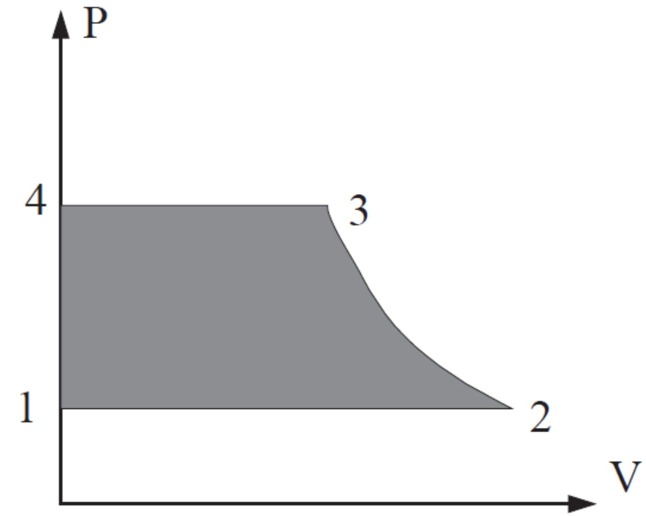
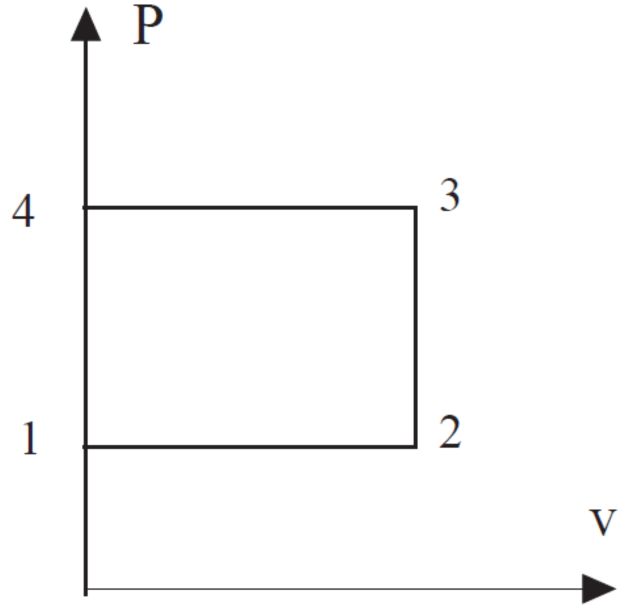


Diagramma della macchina ideale

$$l_{ca}^{\rightarrow} = -\int_{2}^{3} v dP$$

(non ha detto nulla a riguardo)

Pompa ideale



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