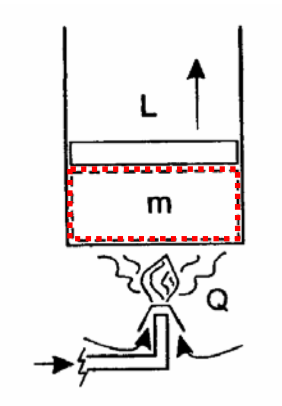
SISTEMI TERMODINAMICI

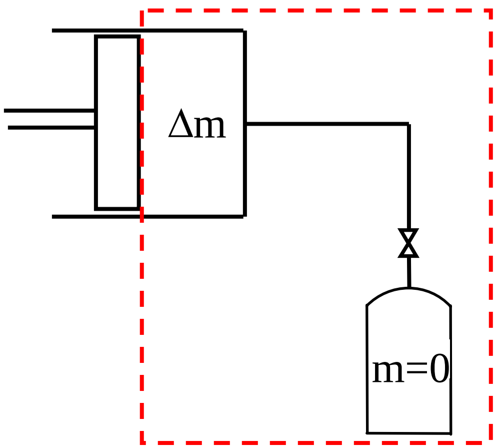
GENERALITÀ

- Studio delle grandezze che caratterizzano i sistemi termodinamici e delle trasformazioni che vi avvengono;
- Sistema termodinamico:
  - Quantità costante di materia – *sistemi chiusi*
  - Porzione definita di spazio, fissa o mobile (volume di controllo), separata dall'esterno per mezzo di confini reali od ideali – *sistemi aperti*.
- Tutti i sistemi termodinamici possono scambiare energia con l'esterno sotto forma di lavoro o calore ma solo i sistemi aperti possono scambiare anche materia e l'energia associata a tale materia;
- È opportuno osservare che, come sarà illustrato nel seguito, lo stesso problema può venire schematizzato indifferentemente come sistema chiuso o sistema aperto:
  - La scelta è spesso dettata dalla convenienza e semplicità di analisi.

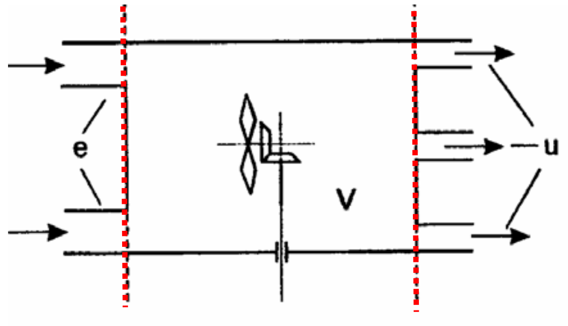
GRANDEZZE E TRASFORMAZIONI

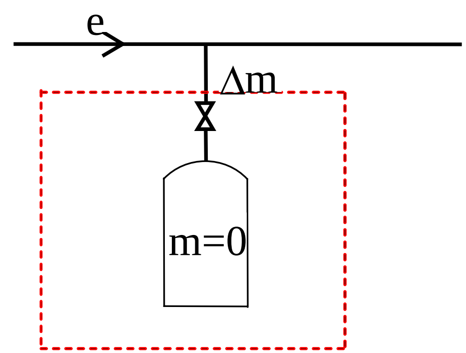
Sistemi chiusi

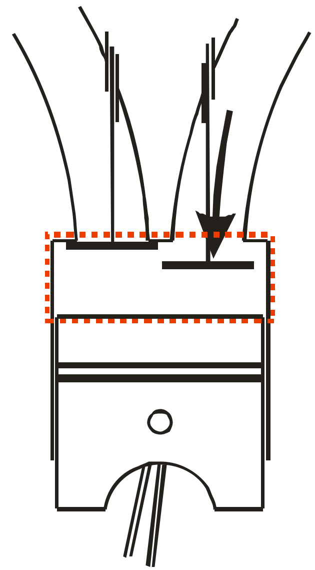


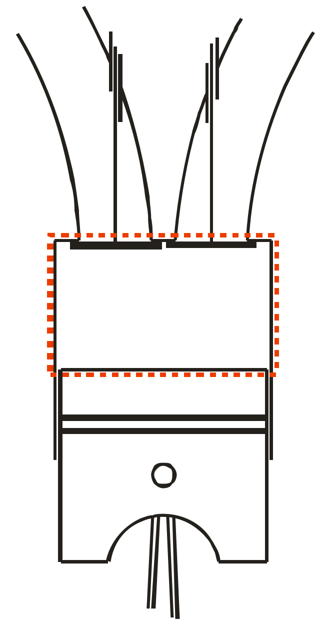


Sistemi aperti









GRANDEZZE E TRASFORMAZIONI

- *Sistemi in equilibrio*: sistemi che non sono sede di cambiamenti spontanei di tipo meccanico, chimico o termico.
- Grandezze che caratterizzano un sistema in equilibrio - *grandezze di stato*:
  - Tali grandezze possono essere indipendenti dalla massa del sistema, come la pressione p e la temperatura T, o risultare proporzionali alla massa, come il volume V.
  - La regola delle fasi ($n_v = n_c + 2 - n_f$) stabilisce che le grandezze di stato non sono indipendenti tra loro.
  - Le grandezze indipendenti dalla massa si dicono *intensive*, mentre quelle proporzionali alla massa si dicono *estensive*. E’ comunque possibile considerare i valori specifici delle grandezze estensive (ovvero i valori delle grandezze divise per la massa del sistema) ed arrivare così alle corrispondenti grandezze intensive: ad esempio dalla grandezza estensiva V (volume), dividendo per la massa m si ottiene la grandezza intensiva volume specifico $v = V/m$, che rappresenta il volume dell’unità di massa.
- Una grandezza fisica può usarsi come *grandezza di stato* se e solo se:
  1. È univocamente determinata dallo stato fisico del sistema;
  2. È funzione di altre grandezze di stato.

GRANDEZZE E TRASFORMAZIONI

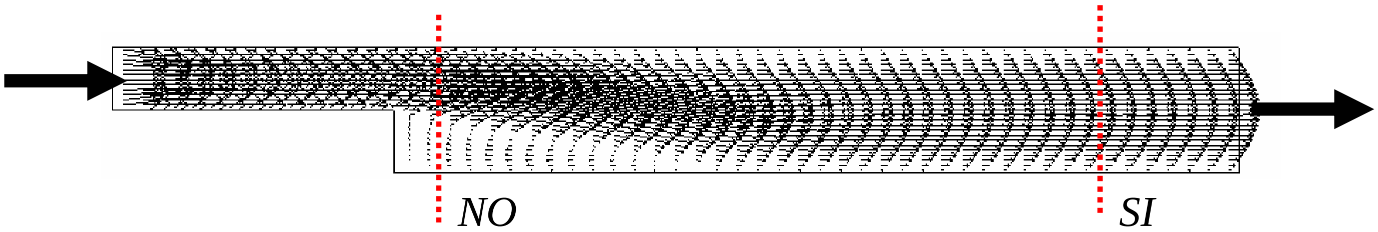
- A seguito delle interazioni con l'esterno, i sistemi subiscono delle *trasformazioni* durante le quali le grandezze di stato variano progressivamente:
  - Gli integrali delle variazioni di una grandezza di stato, durante una trasformazione, dipendono solo dai punti finale ed iniziale della trasformazione stessa - *Potenziali*.
  - Poiché lo stato termodinamico di un sistema può essere caratterizzato in maniera univoca solo se il sistema è in equilibrio, soltanto trasformazioni costituite da una successione di stati di equilibrio ammettono una rappresentazione analitica: *trasformazioni quasi statiche*.
  - Risultati ottenuti con l'analisi di trasformazioni quasi statiche sono spesso applicabili, con buona approssimazione, anche alle *trasformazioni reali*.

GRANDEZZE E TRASFORMAZIONI

- Grandezze che determinano l’evoluzione di un sistema:
  - Associate agli scambi di materia e di energia, tra un sistema e l’esterno, e vengono definite grandezze di scambio.
  - La massa di un sistema chiuso si conserva, e quella di un sistema aperto può variare solo per effetto degli scambi di materia con l’esterno.
- Le interazioni energetiche con l’esterno, oltre ad essere associate alle entrate od uscite di materia, possono anche aver luogo in corrispondenza ai confini del sistema:
  - Scambi di lavoro *L*, se comportano spostamenti macroscopici dei confini
  - Scambi di calore *Q*, se comportano solo scambi di energia cinetica tra le molecole.
- Secondo questo punto di vista, i termini “lavoro” e “calore” non indicano forme di energia, ma sono i nomi attribuiti a particolari meccanismi di scambio energetico tra il sistema e l’esterno.
- Per i segni attribuiti alle grandezze di scambio, si segue la convenzione seguente:
  - il lavoro è positivo $(L^+ > 0)$ quando viene fatto dal sistema mentre è negativo $(L^- < 0)$ quando viene fatto sul sistema;
  - il calore è positivo $(Q^+ > 0)$ quando viene fornito al sistema mentre è negativo $(Q^- < 0)$ quando viene ceduto dal sistema.

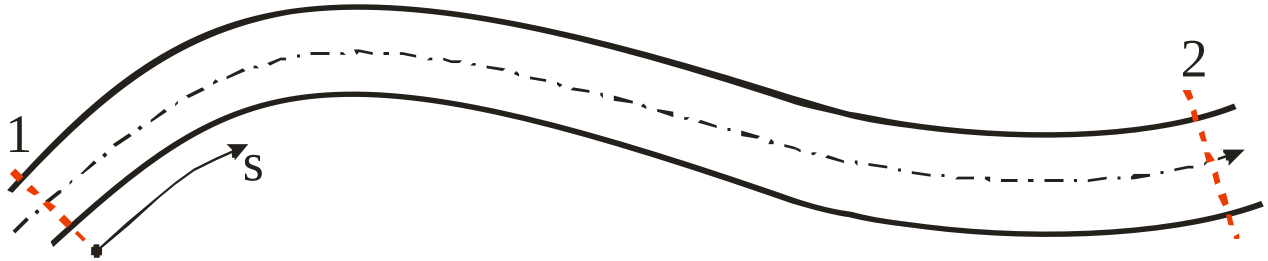
SISTEMI APERTI

- In generale nei sistemi aperti, com'è facile intuire, non si hanno condizioni di equilibrio termodinamico:
  - Le grandezze di stato e le proprietà meccaniche non si possono definire, o meglio si possono definire solo su base locale.
- Per i sistemi aperti, si assumerà che le grandezze di stato siano *uniformi* sulle sezioni di entrata e di uscita:
  - Le variazioni delle grandezze di stato nella direzione ortogonale all'asse dei condotti di entrata ed uscita sono, quasi sempre, trascurabili rispetto alle variazioni nella direzione del moto;
  - Le quote verticali (asse *z*) degli assi dei condotti costituiscono il riferimento naturale per la valutazione dell'energia potenziale.
- Maggiore cautela è richiesta nella valutazione delle velocità *w* rappresentative dell'energia cinetica:
  - La scelta della velocità media è corretta se le sezioni di entrata ed uscita non sono interessate da vortici e *ricircolazioni*, ed il regime di moto è turbolento.



SISTEMI APERTI

- Risultano particolarmente importanti (non solo in questo corso) i sistemi aperti in *regime stazionario*, con *una sola entrata* ed *una sola uscita*:



- Nell’analisi di questi sistemi faremo l’ipotesi che le proprietà termodinamiche e meccaniche assumano valori uniformi su ogni sezione trasversale, caratterizzata dal valore dell’ascissa curvilinea *s*, oltre che all’entrata ed all’uscita:
  – Tutte le grandezze caratteristiche vengono espresse in funzione di una sola coordinata spaziale e, perciò, si parla di deflusso monodimensionale;
  – In un deflusso monodimensionale stazionario l’elemento fluido in ogni punto cambia istante per istante, a causa del movimento, ma le proprietà termodinamiche e meccaniche locali non variano nel tempo;
  – L’ipotesi di deflusso monodimensionale, sebbene non stazionario, sta alla base di molti modelli utilizzati nell’ingegneria, ad esempio lo studio ed ottimizzazione dei condotti di aspirazione e scarico dei M.C.I.

CONSERVAZIONE DELLA MASSA

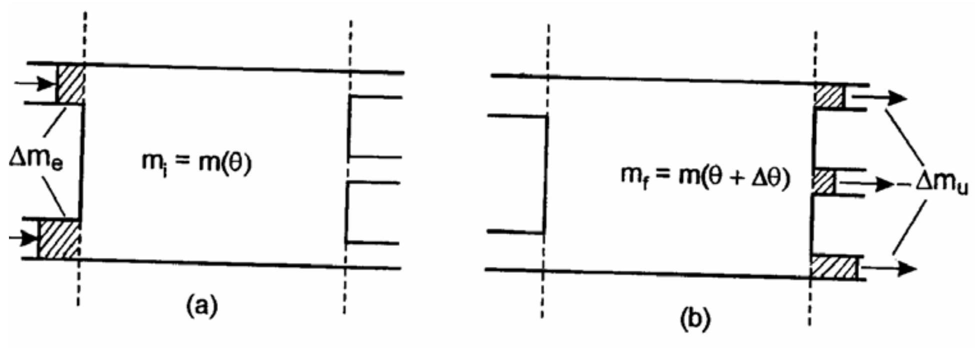
- La massa contenuta in un sistema chiuso resta costante durante tutte le trasformazioni.
- In un sistema aperto, invece, si hanno entrate ed uscite di massa che tendono, rispettivamente, a far aumentare e diminuire la massa totale contenuta nel volume di controllo:
  - Conservazione della massa per il *sistema chiuso ausiliario deformabile*:

$$m(\vartheta) + \sum \Delta m_e = m(\vartheta + \Delta\vartheta) + \sum \Delta m_u$$

$$m_f - m_i = m(\vartheta + \Delta\vartheta) - m(\vartheta) = \sum \Delta m_e - \sum \Delta m_u$$

$$\frac{dm}{d\vartheta} = \sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_u$$

$$m = \int_V \rho dV$$

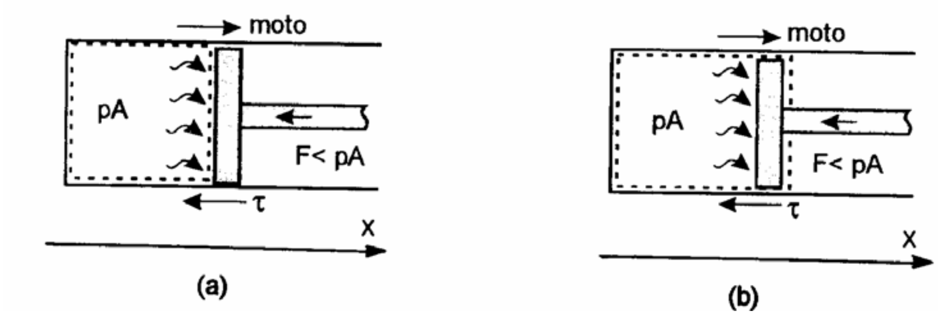


Regime stazionario:

$$\sum \dot{m}_e = \sum \dot{m}_u$$

LAVORO IN UN SISTEMA CHIUSO

- Il processo avviene a seguito di variazioni infinitesime della forza esterna di contrasto:
  - La trasformazione è quasi statica e le variazioni di energia cinetica risultano certamente trascurabili.
  - Si può ammettere che siano trascurabili anche le variazioni di energia potenziale.



$$d\hat{L} = F\,dx = (pA)dx = pdV \qquad\qquad dV = mdv$$

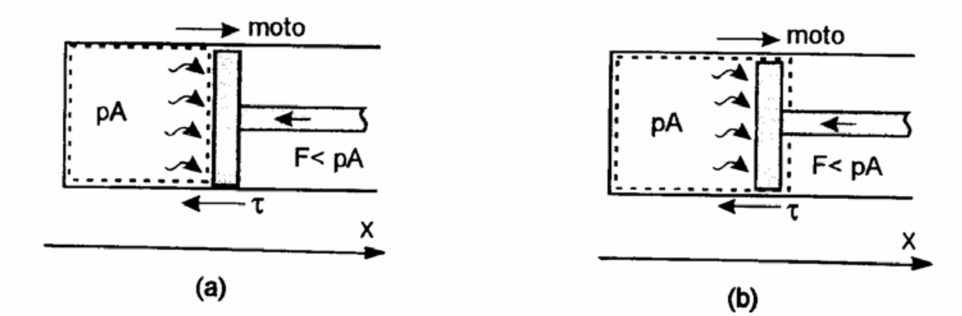
$$d\hat{L} = mpdv = mdL$$

Per uno spostamento finito ed una trasformazione quasi statica dallo stato iniziale *i* allo stato finale *f*, il lavoro interno totale si può quindi esprimere come

$$\hat{L}_{if} = \int_{V_i}^{V_f} pdV \quad = m\int_{v_i}^{v_f} pdv \quad = mL_{if} \qquad\qquad \text{dove:} \qquad\qquad L_{if} = \int_{v_i}^{v_f} pdv$$

LAVORO IN UN SISTEMA CHIUSO

- Le relazioni precedenti consentono il calcolo del lavoro, una volta nota la relazione che lega la pressione al volume specifico nelle diverse trasformazioni di un sistema chiuso.

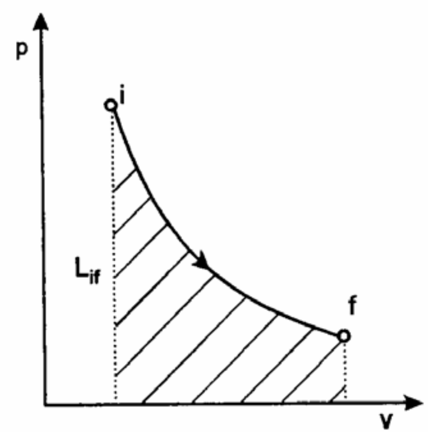


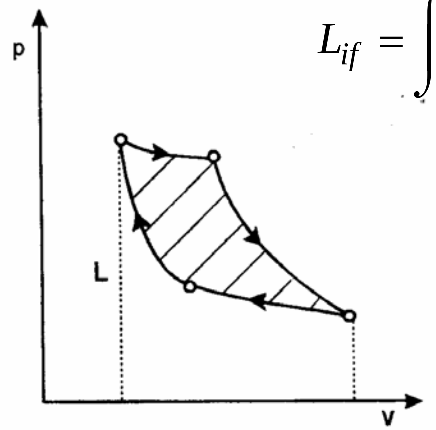
- In una trasformazione reale di un sistema chiuso non mancano gli effetti dissipativi:
  - In presenza di attriti meccanici, le relazioni precedenti esprimono sia il lavoro delle forze interne di pressione sia il lavoro scambiato con l’esterno se il sistema è definito come in (a);
  - Se il sistema è definito come in (b), le relazioni viste esprimono ancora il lavoro delle forze interne di pressione, ma non più il lavoro scambiato dal sistema con l’esterno, a meno che lo stantuffo non si muova senza attriti;

LAVORO IN UN SISTEMA CHIUSO

- Per una trasformazione quasi-statica, rappresentata sul diagramma *(p, v)*, il lavoro espresso dalla $L_{if} = \int_{v_i}^{v_f} p\,dv$ corrisponde all'area tratteggiata compresa tra la trasformazione e l'asse delle ascisse:
  - Positivo quando avviene con aumento di volume, negativo in caso contrario;
  - Per una trasformazione quasi-statica *ciclica*, si ha *i=f*, ed il lavoro è positivo quando il ciclo è precorso in senso orario, mentre è negativo quando il ciclo è percorso in senso antiorario.
  - Tutte le forze di attrito si oppongono al moto e quindi fanno sempre lavoro negativo, sia durante l'espansione che durante la compressione. Questo concetto si può esprimere analiticamente scrivendo:

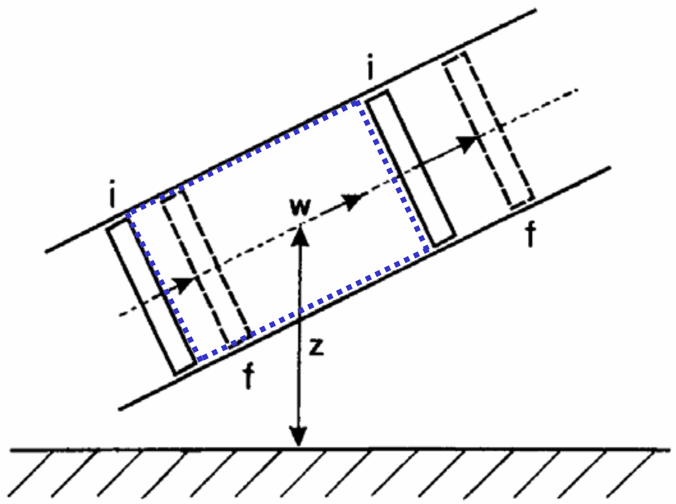
$$L_{if} = \int_{v_i}^{v_f} pdv + R_{if}^{-} = \int_{v_i}^{v_f} pdv - \left|R_{if}^{-}\right|$$





Bilancio dell'Energia Meccanica per un Sistema Chiuso

- Nei sistemi chiusi non si hanno, di solito, variazioni significative di energia cinetica o potenziale poiché, in generale, le velocità e gli spostamenti del baricentro sono molto piccoli.
- Tuttavia, per generalità, si può fare riferimento a schemi di appoggio del tipo rappresentato in figura, dove le variazioni di energia cinetica e potenziale possono risultare significative.
- Per un riferimento cartesiano inerziale ed un sistema a massa unitaria, con velocità e volumi specifici sufficientemente uniformi, il bilancio completo dell'energia meccanica fornisce:



$$L_{if} = \int_{v_i}^{v_f} p dv - \left| R_{if}^{-} \right| - \left(e_{wf} - e_{wi} \right) - \left(e_{zf} - e_{zi} \right)$$

$$e_w = \frac{w^2}{2} \qquad e_z = g z$$

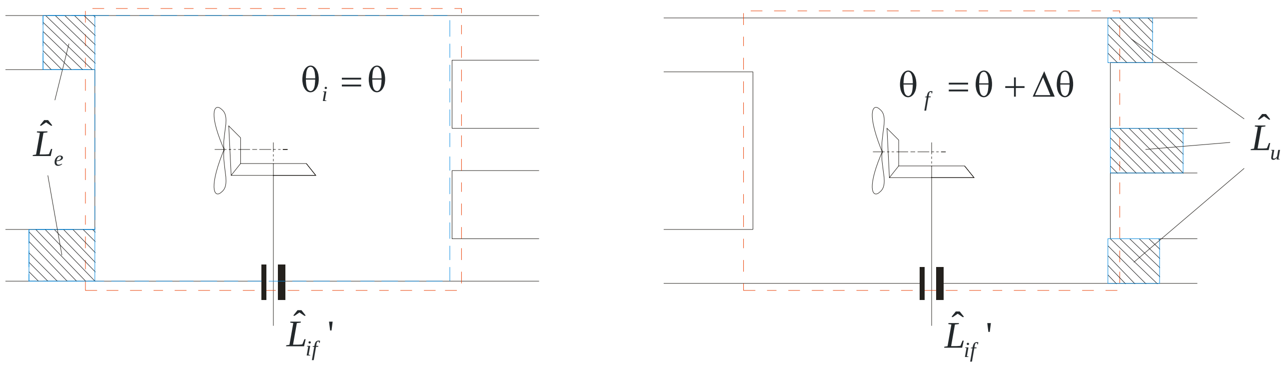
Bilancio dell'Energia Meccanica per un Sistema Chiuso

- È comune adottare ipotesi diverse in alcune applicazioni particolari:
  - Nello studio delle *turbomacchine* si utilizzano terne di riferimento rotanti – solidali con il rotore – e quindi le variazioni di energia potenziale sono associate anche al campo di forze centrifughe.
- Per il sistema ora visto, a differenza dei sistemi chiusi tradizionali, gli attriti non sono sempre trascurabili, date le elevate velocità in gioco:
  - Con lo schema di appoggio visto in precedenza, il lavoro delle forze d'attrito va attribuito interamente all'azione delle forze viscose.
- Per ricordare i segni che compaiono nell'equazione di bilancio dell'energia meccanica:
  - Sia il lavoro delle forze d'attrito sia gli aumenti di energia cinetica e potenziale fanno diminuire il lavoro positivo che si può ottenere dal sistema.
  - Tuttavia tali effetti non sono equivalenti sul piano fisico, poiché l'azione delle forze d'attrito rappresenta una pura *dissipazione* d'energia meccanica.

LAVORO IN UN SISTEMA APERTO

- Risulta conveniente distinguere tra *lavoro tecnico utile* $\hat{L}_{if}\,'$, che può essere effettivamente utilizzato nei processi tecnologici, e *lavoro totale* L_{if}, che comprende anche il lavoro scambiato in corrispondenza ai confini, dove hanno luogo le entrate e le uscite dei fluidi.
- Il *sistema chiuso ausiliario in movimento* (deformabile – in *blu*) scambia lavoro, non utilizzabile, in corrispondenza a tutte le sezioni d'entrata e d'uscita del fluido.

Lavoro Tecnico Utile in un Sistema Aperto



- Nell'ipotesi che l'intervallo di tempo sia piccolo e che le grandezze di stato siano uniformi nelle sezioni di entrata ed uscita, si ha:

$$\hat{L}_e = -p_e A_e \Delta x_e = -p_e \Delta V_e = -\Delta m_e\, p_e v_e = \Delta m_e L_e \qquad \hat{L}_u = p_u A_u \Delta x_u = p_u \Delta V_u = \Delta m_u\, p_u v_u = \Delta m_u L_u$$

$L_e = -p_e v_e \quad L_u = p_u v_u$ rappresentano i lavori specifici d'entrata e d'uscita.

LAVORO IN UN SISTEMA APERTO

- A seguito delle convenzioni sui segni, i lavori d'entrata sono negativi (spostamenti in senso opposto alle forze di pressione interne), mentre i lavori d'uscita sono positivi (spostamenti nello stesso senso delle forze di pressione interne).
- Il lavoro totale scambiato con l'esterno dal sistema chiuso ausiliario è esprimibile come:

$$\hat{L}_{if} = \hat{L}'_{if} + \left(\sum \hat{L}_e^- + \sum \hat{L}_u^+\right) = \hat{L}'_{if} - \sum \Delta m_e p_e v_e + \sum \Delta m_u p_u v_u$$

e quindi il lavoro tecnico utile è data da

$$\hat{L}'_{if} = \hat{L}_{if} + \sum \Delta m_e p_e v_e - \sum \Delta m_u p_u v_u$$

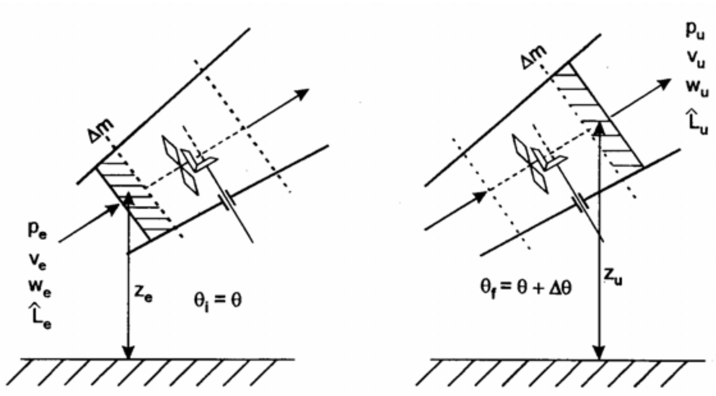
dividendo la precedente per $\Delta\theta$ e passando al limite per $\Delta\theta$ tendente a zero

$$P'_{if} = P_{if} + \sum \dot{m}_e p_e v_e - \sum \dot{m}_u p_u v_u$$

dove *P'* è la potenza tecnica utile, *P* è la potenza totale scambiata, $\dot{m}_e$ è la generica portata entrante ed $\dot{m}_u$ è la generica portata uscente.

Bilancio dell’Energia Meccanica per Sistemi a Deflusso Monodimensionale Stazionario

- Le equazioni viste in precedenza, che definiscono il lavoro e la potenza tecnica utili scambiati da un sistema aperto, non consentono il calcolo di tali quantità, per le quali è necessario ricorrere al bilancio di tutte le forme, meccaniche e termiche, d’energia (primo principio della termodinamica).
- Nel caso particolare di sistemi a deflusso monodimensionale stazionario, tuttavia, la valutazione analitica del lavoro tecnico utile risulta abbastanza agevole, anche nell’ambito del bilancio della sola energia meccanica:
- In questo caso, negli schemi di figura, si ha $\Delta m_e = \Delta m_u = \Delta m$ e l’equazione



$$\hat{L}_{if} = \hat{L}'_{if} + \left(\sum \hat{L}_e^- + \sum \hat{L}_u^+\right) = \hat{L}'_{if} - \sum \Delta m_e p_e v_e + \sum \Delta m_u p_u v_u$$

Può essere scritta nella forma

$$L_{if} = \frac{\hat{L}_{if}}{\Delta m} = \frac{1}{\Delta m}\left(\hat{L}'_{if} + \hat{L}_e^- + \hat{L}_u^+\right) = L'_{if} - p_e v_e + p_u v_u$$

Bilancio dell'Energia Meccanica per Sistemi a Deflusso Monodimensionale Stazionario

- Il punto di vista su cui si basa l'equazione ora vista è quello Euleriano, cioè di un osservatore esterno al sistema e solidale ad una terna di assi Cartesiani fissi.
- L'ipotesi di deflusso monodimensionale stazionario consente di esprimere le grandezze in funzione di una sola coordinata assiale, anche all'interno del volume di controllo.
- Ciò suggerisce la possibilità di adottare un punto di vista Lagrangiano, proprio di un osservatore solidale alla massa Δm che si sposta dall'entrata all'uscita.
- Ciò consente di uguagliare l'espressione ora vista con il bilancio dell'energia meccanica per un sistema chiuso in movimento, costituito proprio dalla massa Δm:

$$L_{eu} = L_{if} = L_{if}' - p_e v_e + p_u v_u = L_{eu}' - p_e v_e + p_u v_u = L_{eu} = \int_{v_e}^{v_u} p dv - \left|R_{eu}^{-}\right| - \left(E_{cu} - E_{ce}\right) - \left(E_{pu} - E_{pe}\right)$$

in quanto ciò che accade è come se, nell'intervallo di tempo dall'istante iniziale *i* all'istante finale *f*, la massa unitaria si spostasse dalla sezione d'entrata *e* alla sezione d'uscita *u*.

- Integrando per parti e tenendo conto delle definizioni delle energie specifiche cinetica e potenziale:

$$\int_{v_e}^{v_u} p dv = p_u v_u - p_e v_e - \int_{p_e}^{p_u} v dp \qquad\qquad L_{eu}' = -\int_{p_e}^{p_u} v\, dp - \left|R_{eu}^{-}\right| - \frac{w_u^2 - w_e^2}{2} - g\left(z_u - z_e\right)$$

Bilancio dell'Energia Meccanica per Sistemi a Deflusso Monodimensionale Stazionario

- Il termine corrispondente al lavoro tecnico utile compiuto dalle forze interne di pressione può, a sua volta, essere scritto ponendo:

$$-\int_{p_e}^{p} v\,dp = \int_{v_e}^{v_u} p\,dv + p_e v_e - p_u v_u = \int_{v_e}^{v_u} p\,dv - \left(L_e^- + L_u^+\right)$$

CASI PARTICOLARI

- Deflusso monodimensionale stazionario senza lavoro utile e senza attrito:

$$-\int_{p_e}^{p_u} v dp + \frac{w_e^2 - w_u^2}{2} + g\left(z_e - z_u\right) = 0$$

che, per un fluido incomprimibile, si trasforma nell'equazione di Bernoulli:

$$v\left(p_e - p_u\right) + \frac{w_e^2 - w_u^2}{2} + g\left(z_e - z_u\right) = 0$$

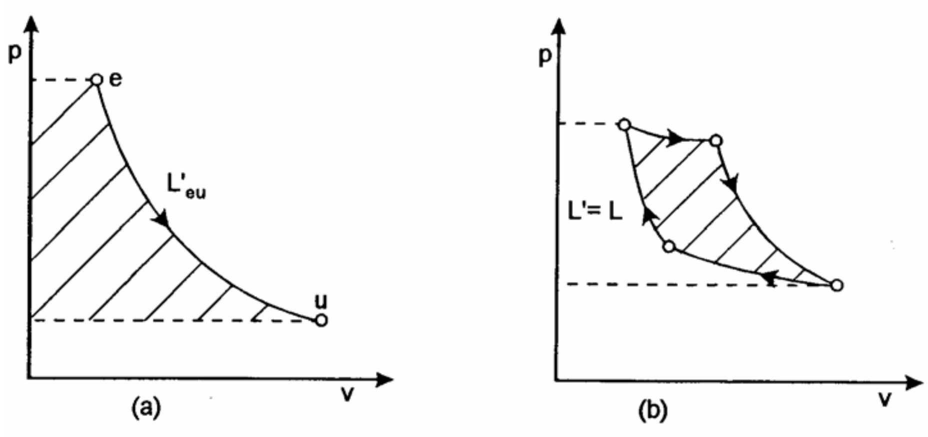
Bilancio dell'Energia Meccanica per Sistemi a Deflusso Monodimensionale Stazionario

- Assenza di variazioni di energia cinetica e potenziale:

$$L'_{eu} = -\int_{p_e}^{p_u} v dp - \left|R^{-}_{eu}\right|$$

ed in assenza anche di attriti:

$$L'_{eu} = -\int_{p_e}^{p_u} v dp$$



$$P' = \dot{m}\, L'_{eu}$$

$$P' = -\dot{m}\int_{p_e}^{p_u} v dp = \dot{m} v\left(p_e - p_u\right) = \dot{V}\left(p_e - p_u\right)$$