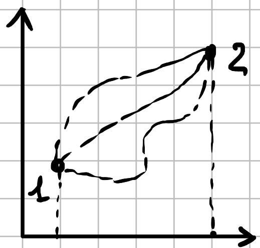
Termodinamica delle macchine

PRIMO PRINCIPIO PER SIST. CHIUSI



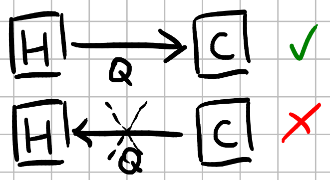
$$dU = \delta Q - \delta L$$

$$\int_1^2 dU = U_2 - U_1 = Q^{IN} - L^{OUT}$$

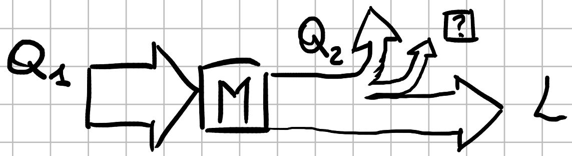
Se il ciclo è chiuso, $\Delta U = \varnothing$

SECONDO PRINCIPIO

Enunciato di Clausius:



Enunciato di Kelvin-Planck:



$Q_1 > L$, $\underline{Q_1 \neq L}$!

DEFINIZIONE: η "RENDIMENTO":

$$\eta = \frac{\text{UTILE}}{\text{SPESA}} = \frac{L}{Q} < 100\%$$

DEFINIZIONE: S "ENTROPIA":
(ESTENSIVA)

$$\boxed{\Delta S \geq 0}$$

VALE SEMPRE PER SIST. CHIUSI E ISOLATI!

NOTA: l'Universo nella sua integrità è un sistema chiuso e isolato.

PER TRASFORMAZ. REVERSIBILI (IDEALI):

$$dS = \frac{\delta Q}{T} \qquad \Delta S = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \longrightarrow \Delta S_{1-2-1} = \varnothing$$

In un sistema chiuso e isolato l'entropia aumenta sempre nel tempo (o idealmente rimane invariata), fermandosi solo una volta raggiunto l'equilibrio termodinamico (S è massima).

$$\Delta S_{1-2} = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} = \varnothing \longrightarrow \delta Q = \varnothing$$

DISUGUAGLIANZA DI CLAUSIUS

$$T dS \geq \delta Q \longrightarrow$$

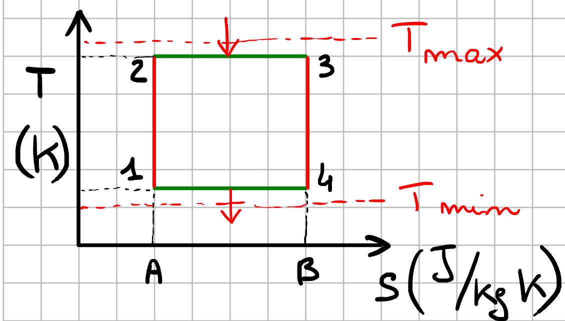
IDEALMENTE: $T dS = \delta Q_{EST}$

MA REALMENTE: $T dS = \delta Q_{EST} + \delta Q_{INT}$

DEFINIZIONE: dS_{gen}^{INT} "PRODUZ. ENTROPICA INTERNA"

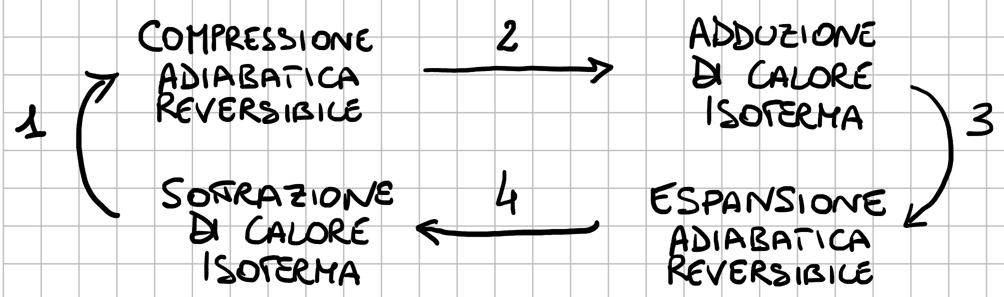
Se la produzione entropica esterna è dovuta agli scambi termici tra la macchina e gli ambienti esterni, quella interna è dovuta a fenomeni di dissipazione interni alla stessa o ai suoi componenti (come ad esempio l'attrito).

CICLO DI CARNOT



Il ciclo di Carnot è il processo teorico con la massima efficienza fisicamente raggiungibile, fissate le temperature di adduzione e sottrazione di calore dal fluido di lavoro.

Teorizza l'assoluta reversibilità di tutte e 4 le trasformazioni consecutive che lo costituiscono: parliamo di...



NOTA:
"reversibile" = s costante
"isoterma" = T costante

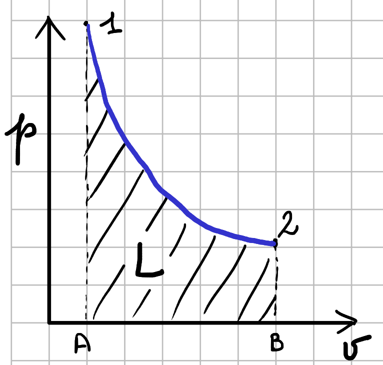
In concordanza con l'enunciato di Kelvin-Planck, nemmeno questo processo teorico - di per sé irrealizzabile perché presuppone la perfezione dei componenti della macchina - può avere un rendimento del 100%. Il rendimento del ciclo di Carnot è il massimo effettivamente raggiungibile da una macchina date T_{max}, T_{min}.

$$\text{I}: Q_1 - Q_2 - L = 0$$

$$\text{II}: \begin{cases} \delta Q_1 = T_{max}\, ds \\ \delta Q_2 = T_{min}\, ds \end{cases} \rightarrow \eta = \frac{L}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} =$$

$$= 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}} \cdot \frac{\cancel{\Delta s}}{\cancel{\Delta s}} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}}$$

LAVORO MECCANICO SUL PIANO p-V



$$L = \int p\, dV = \text{area}\,(A12B)$$

$\hookrightarrow$ $L > 0$ ESPANSIONE

$L < 0$ COMPRESSIONE

Se il fluido si espande dopo l'aumento di pressione (A1), parliamo di CICLO DIRETTO, se all'aumento di pressione segue una compressione, ad esempio ad opera di una pompa o di un compressore, parliamo di CICLO INVERSO.

IN SOLDONI:

CICLO DIRETTO: recuperiamo energia dal fluido.

CICLO INVERSO: spendiamo energia nel fluido.

RELAZIONI PRINCIPALI DEI GAS PERFETTI

EQUAZ. DI STATO: $pV = m \frac{R_0}{m_m} T = mRT \rightarrow pv = RT$

con $R_0 = 8,313\ kJ\,(Kmol\,K)^{-1}$ "COST. UNIVERSALE DEI GAS"

$R \doteq$ COST. SPECIFICA DEL GAS (ES. $R_{ARIA} = 287\ J/kg\,K$)

m_m è la MASSA MOLARE $[g/mol]$

LEGGE DI MAYER:

$$\exists k = \frac{c_p}{c_v}, \quad R = c_p - c_v \rightarrow c_v = \frac{kR}{k-1} \rightarrow \frac{R}{c_v} = k-1$$

TRASFORMAZ. POLITROPICHE: $p \cdot v^m = cost$

OSSIA: $p_1 v_1^m = p_2 v_2^m \rightarrow \frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^m$ •1

DA CUI: $\frac{RT}{v} v^m = cost \rightarrow T v^{(m-1)} = cost^*$

$$\hookrightarrow \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{(m-1)}$$ •2

MA ANCHE:

$$p\left(\frac{RT}{p}\right)^m = cost \rightarrow \frac{T^m}{p^{(m-1)}} = cost^*$$

$$\hookrightarrow \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\left(\frac{m-1}{m}\right)}$$ •3

CASO PER CASO:

$m = 0 \longrightarrow p = cost$ (da •1), ISOBARA

$m = 1 \longrightarrow pv = RT = cost$, $T = cost$ (da •2, •3) ISOTERMA

$m \rightarrow \infty \longrightarrow (p\,v^m)^{1/m} = cost^{1/m} = cost^*$ (da •1)

$\cancel{p^{1/\infty}} \cdot v = cost^*$

$v = cost$ ISOCORA

Se $m = k \longrightarrow \dfrac{T_1}{T_2} = \left(\dfrac{v_2}{v_1}\right)^{(k-1)}$ (da •2) ISOENTROPICA ?

DIMOSTRAZ.:

$$T ds = du + p dv \longrightarrow ds = \frac{du}{T} + \frac{p}{T} dv = c_v \frac{dT}{T} + R \frac{dv}{v}$$

RISOLVO L'EQUAZ. DIFF.:

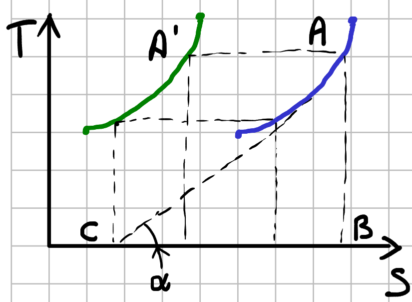
$$\Delta s = c_v \ln(T_2/T_1) + R \ln(v_2/v_1)$$

ISOENTR. $\rightarrow \Delta s = \emptyset$, $\ln(T_1/T_2) = \ln(v_2/v_1)^{R/c_v}$

DA CUI: $\dfrac{T_1}{T_2} = \left(\dfrac{v_2}{v_1}\right)^{R/c_v} = \left(\dfrac{v_2}{v_1}\right)^{k-1}$ c.v.d.

PIANO T-s: CALORE SPECIFICO E TRASLABILITÁ DELLE TRASFORM.

DEFINIZIONE: c, "CALORE SPECIFICO": $c = \dfrac{\delta q}{dT}$

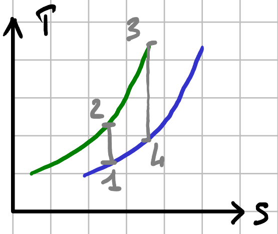


ma: $\begin{cases} \delta q = T ds \\ \tan(\alpha) = \dfrac{dT}{ds} = \dfrac{1}{c} \dfrac{\delta q}{ds} = \dfrac{T}{c} \end{cases}$

DA CUI: $c = \dfrac{T}{\tan(\alpha)} = \dfrac{\overline{AB}}{\tan(\alpha)} = \overline{BC}$

Come appena dimostrato, al crescere della temperatura cresce anche la pendenza del grafico, e di conseguenza la distanza verticale tra due determinate isobare (a parità di entropia, con un salto termico maggiore tra un'isobara e l'altra).

Per questo motivo, nel Ciclo Joule (impianti a gas) il lavoro ideale di espansione è maggiore del lavoro ideale di compressione. Dall'espansione del gas otteniamo lavoro, e nella compressione si perde lavoro, quindi dalla differenza dei due lavori otteniamo il lavoro utile (ideale).

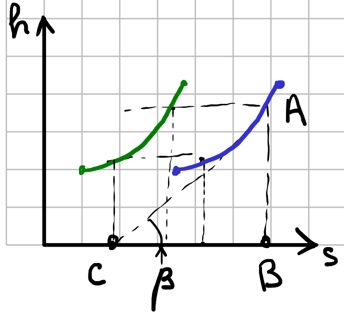


E PER QUANTO RIGUARDA IL PIANO h-s?

$\tan(\beta) = \dfrac{dh}{ds} = \dfrac{dh}{\delta q} T$

CASO ISOBARA: $\delta q = dh$, $\tan(\beta) = T$

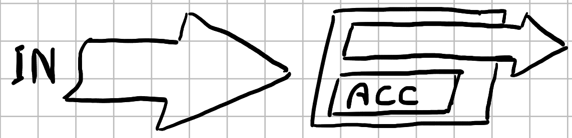
$\hookrightarrow \tan(\beta) = \dfrac{c_p dT}{\delta q} T = \dfrac{c_p T}{c} = \dfrac{h}{c} = \dfrac{\overline{AB}}{\overline{CB}}$



poichè $c = \overline{CB} = \Delta s$ come dimostrato

PRIMO PRINCIPIO PER SIST. APERTI

BILANCI



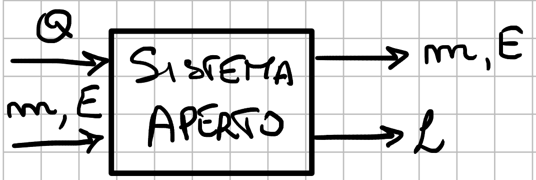
IN = OUT + ~~ACC~~

ACC = 0 $\longleftrightarrow$ "IPOTESI DI STAZIONARIETÀ"

INGRESSO + GENERAZIONE = USCITA + DISTRUZIONE
(sorgente) (pozzo)

È possibile generare massa a spese di energia (acceleratori di particelle) e viceversa (fissione e fusione nucleare).
Einstein formulò l'equazione che regola la conversione tra l'una e l'altra, la celebre E=mc^2.
Il deficit di massa delle reazioni esotermiche è trascurabile, mentre vale circa lo 0.05% per le reazioni di fissione nucleare e lo 0.7% per le reazioni di fusione. Per quello che ci interessa nello studio delle macchine non-nucleari, si applicano le ipotesi di conservazione della massa e dell'energia. In pratica, «Nulla si crea e nulla si distrugge» (Lavoisier).

L'entropia è generata a seguito di qualsiasi trasformazione non interamente reversibile, e non può quindi essere distrutta.



$E \doteq$ energia del fluido

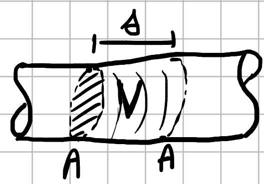
$$E_i = u_i + g z_i + \frac{c_i^2}{2}$$

BILANCIO: $u_1 + g z_1 + \frac{c_1^2}{2} + q = u_2 + g z_2 + \frac{c_2^2}{2} + \ell$

$L = L_e + L_p$ dove $L_e \doteq$ LAVORO D'ELICA
$L_p \doteq$ LAVORO DI PULSIONE

L_e: lavoro tecnico dovuto alla macchina
L_p: lavoro di variaz. del volume

$\hookrightarrow L_p = F \cdot s = (p \cdot A)\left(\frac{V}{A}\right)$
$= pV = mpv$



EQUAZ. DELL'ENERGIA IN FORMA TERMODINAMICA

$$\boxed{m\left((h_1 - h_2) + g(z_1 - z_2) + \left(\frac{c_1^2}{2} - \frac{c_2^2}{2}\right)\right) = L_e - Q}$$

TURBINE, POMPE E COMPRESSORI

$Q = \varnothing, \quad z_1 = z_2, \quad c_1 = c_2$

$$L = m(h_1 - h_2) \qquad \begin{cases} L > 0 & \text{TURBINE} \\ L < 0 & \text{POMPE E COMPR.} \end{cases}$$

CALDAIE

$L = \varnothing, \quad z_1 = z_2, \quad c_1 = c_2$

$$Q = m(h_2 - h_1) > 0$$ (il calore va dal sistema al fluido)

CONDOTTI ACCELERANTI O DECELERANTI

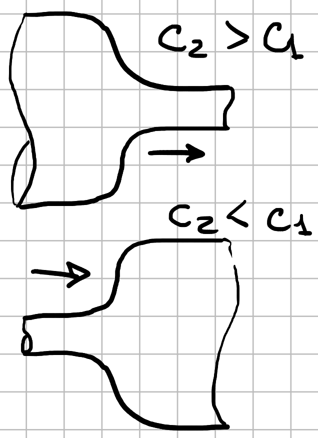
$Q = \varnothing$

$L = \varnothing$

$z_1 = z_2$

$$(h_1 - h_2) + \left(\frac{c_1^2 - c_2^2}{2}\right) = 0$$

$$h_1 - h_2 = \frac{c_2^2 - c_1^2}{2}$$



L'entalpia diminuisce se aumenta la velocità, e viceversa.

VALVOLA DI LAMINAZIONE

$Q = \varnothing$

$L = \varnothing$

$c_1 = c_2$

$z_1 = z_2$

$$(h_1 - h_2) = 0 \longrightarrow h_1 = h_2$$

Malgrado l'entalpia non aumenti né diminuisca tra l'ingresso e l'uscita del fluido dalla valvola, la trasformazione è tutto meno che isoentalpica: durante il passaggio attraverso la valvola, la pressione del fluido cala grazie agli attriti interni, e il valore dell'entalpia varia nel tempo fino a tornare eventualmente al proprio valore iniziale (con buona approx.).

Proprio a causa di questi attriti, l'entropia del fluido nella valvola aumenta sempre.

Seguiamo ora un "APPROCCIO MECCANICO"

Abbiamo detto che: $U = f(S, V)$

DUNQUE:

$$dU = \left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_V dS + \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_S dV = TdS - pdV$$

$$\hookrightarrow du = Tds - pdv$$

Abbiamo detto anche che: $h = u + pv$

DUNQUE:

$$dh = Tds - \cancel{pdv} + \cancel{pdv} + vdp = Tds + vdp$$

DUNQUE $\Delta h = h_2 - h_1 = \int_1^2 T\,dS + \int_1^2 v\,dp$

$$= Q + L_{ATTR.} + \int_1^2 v\,dp$$

Ma siccome: $h_2 - h_1 = Q - L + \frac{1}{2}(c_1^2 - c_2^2) + g(z_1 - z_2)$

allora...

EQUAZ. DELL'ENERGIA IN FORMA MECCANICA

$$\boxed{L = -\int_1^2 v\,dp - L_{ATTR.} + \frac{1}{2}(c_1^2 - c_2^2) + g(z_1 - z_2)}$$

PER SIST. CHIUSI: $du = T\,ds - p\,dv$

PER SIST. APERTI: $dh = T\,ds + v\,dp$

ENERGIA DI PRIMA SPECIE (MODO LAVORO)

ENERGIA DI SECONDA SPECIE (MODO CALORE)