



Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino

Appunti universitari

Tesi di laurea

Cartoleria e cancelleria

Stampa file e fotocopie

Print on demand

Rilegature

NUMERO: 783

DATA: 04/12/2013

A P P U N T I

STUDENTE: Giai Pron

MATERIA: Termodinamica e Trasmissione del Calore + Eserc.

Prof. Torchio

Il presente lavoro nasce dall'impegno dell'autore ed è distribuito in accordo con il Centro Appunti.

Tutti i diritti sono riservati. È vietata qualsiasi riproduzione, copia totale o parziale, dei contenuti inseriti nel presente volume, ivi inclusa la memorizzazione, rielaborazione, diffusione o distribuzione dei contenuti stessi mediante qualunque supporto magnetico o cartaceo, piattaforma tecnologica o rete telematica, senza previa autorizzazione scritta dell'autore.

**ATTENZIONE: QUESTI APPUNTI SONO FATTI DA STUDENTIE NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE.
IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.**

TERMODINAMICA APPLICATA e TRASMISSIONE DEL CALORE.

SISTEMA TERMODINAMICO

= porzione di spazio che può contenere materia, e delimitata da un ben definito confine detto superficie di controllo.

AMBIENTE ESTERNO

= Ciò che circonda il sistema. Esso può interagire con il sistema.

UNIVERSO

= Somma di sistema e ambiente.

E TOTALE DEL SIST

= proprietà del sistema

= somma delle varie forme di energia immagazzinate nel sistema

N.B.

L'energia può essere scambiata:

- tramite scambi di calore
- tramite scambi di lavoro
- tramite scambi di massa

TIPI DI SISTEMI

- chiuso/aperto (quando può/non può scambiare massa, e può scambiare energia)
- adiabatico/diabatico (può/non può scambiare calore)
- rigido/deformabile (se è/non è possibile scambiare lavoro)
- isolato (che non può scambiare energia con l'ambiente esterno)

Es)

(sist chiuso) Vaso Dewar (thermos chiuso)

Caldiera serpentina (ruote fluidi e le riscalda. È adiabatica perché il fluido nello serpentina non deve riscaldarsi).

- Cilindro - pistone (consente scambi di calore [non è rigido] è aperto rispetto agli scambi di massa, grazie ai buchi nelle valvole. Ma sia adiabatico o diabatico perché diurna riscalda, raffreddamenti, altro no)

• Turbina (aperto, deformabile, sia adiabatico che non)

- Compressore (aperto, scambia lavoro, diabatico // adiabatico,

- Automobile (aperto, non adiabatico)

- corpo umano (

Ipotesi di base dello stato

Modello

= rapp. semplificate del fenomeno reale.

Modello dello Coesistenza classes

= modello zero-dimensionale che si basa su due ipotesi:

- Omogeneità dello stato termod. (a più dove il sistema un'unica proprietà spaziale)
- semplicità (numero di coordinate indipendenti. Se possono ottenere tutte le prop. da due grandezze indipendenti)

Le principali equazione di stato dei gas

Punto critico

= stato termod. allo max pressione e temp in cui possono coesistere la fase liquida e quella vapore.

che si verifica a

critico

Eq. di stato dei gas ideali (basse pressioni e alte T, più lontano possibile dal punto

- Volume delle molecole del gas trascurabile rispetto al volume del gas stesso.
- azioni intermolecolari sono trascurabili.

= $PV = nRT$

$R = 8314 \frac{J}{kmol \cdot K}$

$\sim \frac{pV}{DM} = MR^*T$ costante di elasticità di un gas

$1M = \frac{M}{n} \rightarrow m = \frac{M}{(NM)}$

costante di elasticità di un gas (tipica di ogni gas)

$\rightarrow pV = \frac{M}{(NM)} RT$

$\rightarrow pV = MR^*T$

$\int p \frac{V}{M} = R^*T \rightarrow pV = R^*T$

\hookrightarrow volume specifico (inverso densità) = $\frac{1}{\rho}$

Equazione di stato per i liquidi (e solidi)

Coefficiente di dilatazione cubica (β) ($1/K$)

$$\beta = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p$$

→ Volume

↙ Temperatura

= variazioni del V rispetto la T a pressione costante.

N.B = in percentuale da quanto varia ^{volume} un sistema per ogni variazione unitaria di 1 K

→ più è alto più si dilata il sistema

Coef. di compressibilità isoterma ($1/\text{bar}$)

- Quanto varia il volume rispetto la variazione di pressione, a T=cost.
- il segno meno indica che aumentando la pressione diminuisce il volume.

$$\kappa = - \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T$$

non abbiamo fatto nessuna ipotesi. Ci basano solo sulle prop. del materia

Equazione di stato generalizzata in forma differenziale

$$V = V(p, T)$$

$$\rightarrow dV = \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p dT + \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T dp = \beta \cdot V dT + (-\kappa V dp) = \beta \cdot TV - \kappa V dp$$

$$\rightarrow \frac{dV}{V} = \beta dT - \kappa dp$$

N.B

I coefficienti variano per ogni stato termodinamico

si variano poco con la pressione, ma tanto con la temperatura. (in alcuni casi di T, variano poco anche con la T) → per un primo ordine di approssimazione si considerano costanti.

Ordini di grandezza		β (K^{-1})	κ (bar^{-1})
gas		10^{-3}	$10^0 \div 10^2$
liquidi		$10^{-3} \div 10^{-4}$	$10^{-4} \div 10^{-6}$
solidi		$10^{-5} \div 10^{-6}$	$10^{-6} \div 10^{-1}$

→ a variazioni di p variano tanto il volume
 → variano molto poco
 → pochissimo comprimibili
 → si considera che $dV=0$
 → $\beta=0$

02/10/2012

Processo

= evoluzione nel tempo dello stato termodinamico del sistema.

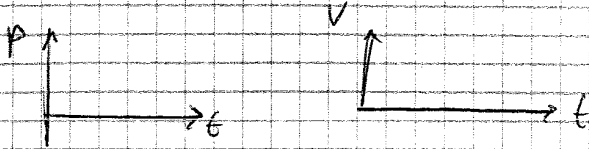
N.B

Bisogna conoscere le coordinate in funzione del tempo, l'intervallo di tempo.

~~Conc~~

N.B

Considero un sistema omogeneo semplice e necessario conoscere $p(t), v(t)$



TRASFORMAZIONI

= processo descritto da un diagramma che mette in relazione più coordinate termodinamiche. (es. piano di Clapeyron)

Processo composto

= processo ^{più esempi} attraverso un sottoprocesso diverso senso che compie l'effetto di tale processo.

Processo ciclo

= processo il cui stato termodinamico finale coincide con quello iniziale.

~~ES~~

Equilibrio termodinamico

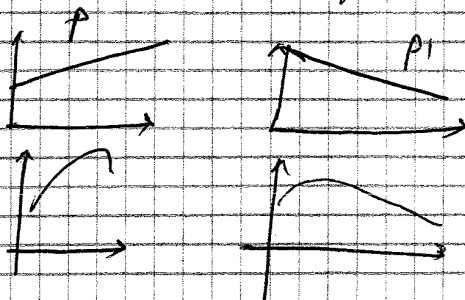
= st. in cui le coordinate non variano nel tempo, che nello spazio degli stati coincide con un punto

$$\begin{cases} x(t) = k \\ y(t) = k \\ z(t) = k \end{cases}$$

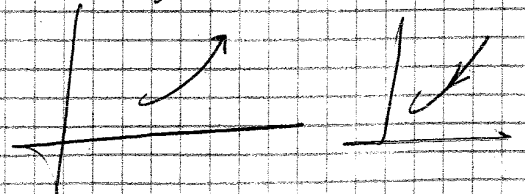
Processo inverso

- $t_f - t_i$ (durata del processo inverso o durata del processo diretto)
- lo stato iniziale del diretto coincide con quello finale dell'inverso e viceversa
- Ogni stato intermedio del processo P a partire dallo stato iniziale verso il finale, coincide con uno stato P' percorso dallo stato iniziale verso quello finale.

(E)



Nel diagramma degli stati si inverte solo il verso



REVERSIBILITÀ DI UN PROCESSO

PROCESSO REVERSIBILE

= processo per cui esiste un processo inverso ~~in cui per cui~~ tale che

$$L_{1\pi 2} = -L_{2\pi 1}$$

$$Q_{1\pi 2} = -Q_{2\pi 1}$$

= processo che può essere ripercorso in senso inverso riportando l'universo nelle stesse condizioni iniziali.

N.B

In natura non esistono processi reversibili.

Notazione

Le trasformazioni non reversibili vengono indicate con una linea tratteggiata, quelle reversibili con una linea continua.

FLUSSO TERMICO

Dato un processo $P[t_1, t_2]$ considero un suo sottoprocesso di durata Δt $P^* [t_1, t_2]$

Calcolo il calore scambiato su P^*

→ Flusso termico $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{Q(P^*)}{\Delta t} = \phi(t)$ che dipende dal tempo.

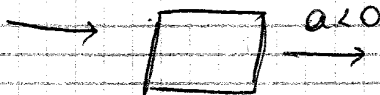
N.B

$$Q(P) = \int_{t_1}^{t_2} \phi(t) dt$$

$$Q(P) = \int_{1\pi 2} \delta Q \quad (\text{somma dei calori emessi e sottoprocessi che dividono un processo})$$

Convenzione sui segni:

$Q > 0$



Equazioni costitutive del calore per i fluidi omogenei:

= equazione che legano calore alle coordinate termodinamiche

1) $dQ = C_V dT + A_V dV$
 ↳ C_V : capacità termica a volume costante
 ↳ A_V : calore latente rispetto al volume

$$Q(P) = Q_{1\pi 2} = \int_{1\pi 2} C_V dT + A_V dV$$

N.B

I calori specifici a volume costante sono sempre positivi.
 // a pressione costante //

Andamento

$$c_p = c_p(T, p)$$

$$c_v = c_v(T, p)$$

effetto della pressione puo' essere trascurato

Legame fra i calori specifici

$$c_p - c_v = -T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p^2 \left(\frac{\partial p}{\partial v} \right)_T$$

$$c_p - c_v = -T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)^2 \left(\frac{\partial p}{\partial v} \right)$$

positivo positivo negativa

→ $c_p - c_v > 0$ → $c_p > c_v$ (il calore specifico a pressione costante)

N.B

$$\left(\frac{\partial p}{\partial v} \right)_T = \frac{d}{dv} \left(\frac{R^* T}{v} \right)_T$$

$$pv = R^* T$$

$$p = \frac{R^* T}{v}$$

$$= -R^* T \frac{1}{v^2} \quad (\rightarrow \text{e' negativo})$$

$$pv = R^* T \quad \frac{d}{dT} \left(\frac{R^* T}{p} \right)_p = \frac{R^*}{p}$$

$$\rightarrow c_p - c_v = -T \frac{R^{*2}}{p^2} \left(-\frac{R^* T}{v^2} \right) = \frac{R^* T^2}{p^2 v^2} = R^* = R^*$$

→ $c_p - c_v = R^*$ → costante di elostatica di gas

Considerazioni sulle sostanze incompressibili: (che non variano di volume)
 (es. solidi) liquidi

$$\rightarrow \frac{\partial v}{\partial T}_p = 0 \rightarrow c_p - c_v = 0 \rightarrow c_p = c_v$$

N.B

Calore latente

- per i fluidi omogenei semplici (reversibili) con l'eq. di stato del fluido.

$$\Delta U = T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_V \quad \Delta p = -T \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T$$

- per i gas ideali

1) $\Delta U = T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_V = p$

$$\frac{dU}{dV} = nRT \rightarrow p = \frac{nRT}{V} = \frac{MR^*T}{V} \Rightarrow T \frac{d}{dT} \left(\frac{MR^*T}{V} \right) = \frac{TR^*}{V} \frac{dT}{dT} = \frac{TR^*}{V} = p$$

2) $\Delta p = -T \left(\frac{\partial}{\partial T} \frac{MR^*T}{p} \right)_p = -T \frac{MR^*}{p} = -V$

$\rightarrow dp = -p$

$\Delta p = -\alpha \text{ specific}$

Lavoro e potenza meccanica

Def ~~Potenza~~ Lavoro

= forma di energia che nasce ad uno spostamento dovuto ad una f.

Potenza (P)

° Considero un processo $P[t_1, t_2]$, un suo sottoprocesso $P^*[t, t+\Delta t]$: $t_1 < t < t_2$

$\rightarrow W(P^*)$ può essere definito.

$\rightarrow \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{W(P^*)}{\Delta t} = P(t)$

= grandezza che dipende dal tempo.

$\rightarrow W = \int_{t_1}^{t_2} P(t) dt$

N.B

$W = \int_{t_1}^{t_2} dW$

Segno



N.B.

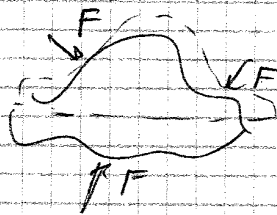
Se le forze esterne sono conservative

$$\rightarrow W_{se}^d(P) = \Delta E_p$$

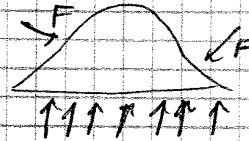
$$\underline{Es} \quad \Delta E_p = M|g|(z_2 - z_1) = W_{se}^d$$

Forze interne

• Considero un sol. generico su cui sono app. forze esterne.



• Considero solo una porzione di sistema



All'interno del corpo si hanno forze interne (per cui vale la legge delle azioni e reazioni) le risultanti

~~Le~~ ^{Le} forze interne possono essere scomposte

• Forze normali (di pressione) (o lineari)

• Forze tangenziali (che si danno origine a fenomeni di attrito) che risultano ≥ 0 .

$$\rightarrow W_{int}(P) = L_i(P) - L_{o1}(P)$$

↓
lavoro interno

↳ lavoro dissipato dagli attriti

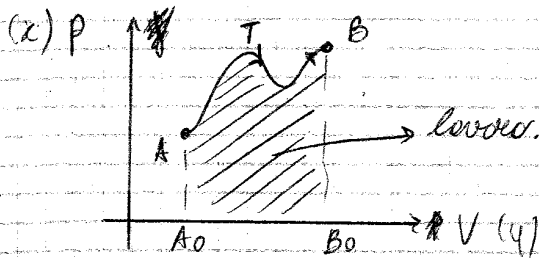
N.B.

~~L'attrito~~ I processi reversibili sono quelli in cui non sono presenti lavori di forze dissipative, perché l'attrito non è mai recuperabile.

N.B

Equazione dell'energia cinetica = equazione fondamentale (che può essere sempre applicata, non come quelle costitutive)

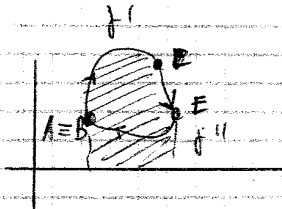
Diagrammi p.V (Clapron)



$$\int_{A \rightarrow B} p dx = \text{AREA} = \int p dV \quad (\text{lavoro interno di tipo lineare})$$

$$dx \geq 0 \rightarrow W > 0$$

$$dx \leq 0 \rightarrow W < 0$$



Cicloformazione ciclica,

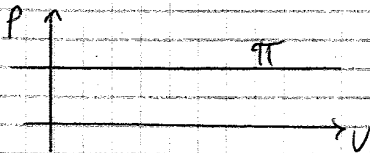
Area da A ad E lungo $dx' > 0$

Area da E ad A lungo $dx'' < 0$

Un ciclo percorso in senso orario il lavoro è > 0 , in senso antiorario è minore di 0 (lavoro interno lineare)

Cicloformazione isobara

= trasformazione a pressione costante



$$1 \quad W_i = \int p dV = p \Delta V = p(V_B - V_A)$$

$$2 \quad Q = \int_{A \rightarrow B} da = \int (c_p dT + \cancel{V dp}) = \int c_p dT \quad \boxed{Q = \int c_p dT}$$

de gas ideali $\boxed{W_i = p \Delta V = nR(T_B - T_A)}$
 $pV = nR^*T$

→ l'eq di stato $\frac{p}{T} = \text{costante}$

Trasformazione adiabatica reversibile $\phi = 0$

• $\phi = 0 \rightarrow a = 0$ (non vale viceversa)

Teorema di Laplace • Considera un fluido omogeneo:

$$\frac{dp}{dV} = \frac{c_p}{c_v} \left(\frac{dp}{dT} \right)_T$$

Nel gas ideale ... in una trasform. adiab. reversibile

$$\begin{cases} dQ = c_p dT + p dV = 0 & \text{(localmente il calore infinitesimo è nullo)} \\ dQ = c_v dT + p dV = 0 \end{cases}$$

$$\begin{aligned} c_p dT &= -p dV \rightarrow dT = \frac{-p dV}{c_p} \\ c_v dT &= -p dV \rightarrow dT = \frac{-p dV}{c_v} \end{aligned} \rightarrow \frac{V dp}{c_p} = - \frac{p dV}{c_v} \rightarrow \frac{dp}{p} = - \frac{c_p}{c_v} \frac{dV}{V}$$

$$\frac{V dp}{c_p} = - \frac{p dV}{c_v} \rightarrow \frac{dp}{p} = - \frac{c_p}{c_v} \frac{dV}{V}$$

$$\rightarrow \gamma = \frac{c_p}{c_v}$$

$$\rightarrow \int \frac{dp}{p} = -\gamma \int \frac{dV}{V} \rightarrow \ln p = -\gamma \ln V + C$$

$$\rightarrow \ln p + \gamma \ln V = C$$

$$\ln p + \ln V^\gamma = C$$

$$\rightarrow \ln (p \cdot V^\gamma) = \text{cost.}$$

$$\rightarrow \text{anche } p \cdot V^\gamma = \text{costante}$$

N.B

$$c_p - c_v = R \rightarrow \gamma > 1 \text{ (gamma)}$$

$$\begin{aligned} \rightarrow W_{lu} &= \int p dV = \int (p_A V_A^\gamma)^{1/\gamma} dV = \int p_A V_A^\gamma \frac{dV}{V^\gamma} = p_A V_A^\gamma \left[\frac{V^{1-\gamma}}{1-\gamma} \right]_A^B \\ p_A V_A^\gamma &= p_B V_B^\gamma = p V^\gamma \end{aligned}$$

$$\Rightarrow W_{lu} = \frac{p_A V_A^\gamma}{1-\gamma} [V_B^{1-\gamma} - V_A^{1-\gamma}] = \frac{p_A V_A^\gamma}{1-\gamma} \cdot V_A^{1-\gamma} \left[\left(\frac{V_B}{V_A} \right)^{1-\gamma} - 1 \right] = \frac{p_A V_A}{1-\gamma} \left[\left(\frac{V_B}{V_A} \right)^{1-\gamma} - 1 \right]$$

N.B

$$p V^\gamma = \text{cost}$$

$$p V^\gamma = K$$

$$T V^{\gamma-1} = \text{cost}$$

$$p V^\gamma = K$$

$$T p^{1/\gamma} = \text{cost}$$

$$\rightarrow n \frac{dN}{N} = - \frac{dp}{p} \rightarrow n \ln N = - \ln p + \text{cost}$$

$$\ln N^m + \ln p = \text{cost}$$

$$\ln p N^m = \text{cost} \rightarrow p N^m = \text{cost}$$

RICORDO

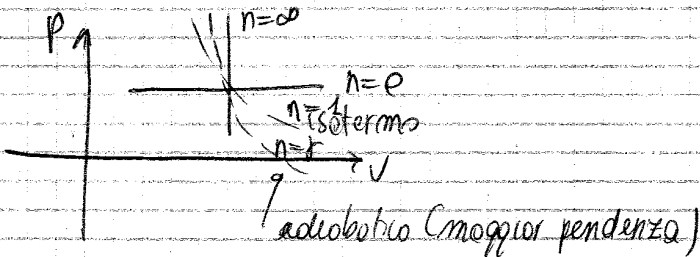
$$W_i \text{ len} = \int p dV =$$

$$W_i = \frac{p_A V_A}{1-n} \left[\left(\frac{V_B}{V_A} \right)^{1-n} - 1 \right]$$

(WB)

		n	e
ISOBARA	$p = \text{cost}$	0	c_p
ISOCORA	$V = \text{cost}$	∞	c_v
ISOTERMA	$pV^m = \text{cost}$	1 1	∞ ∞
ADIABATICA REV DI UN GAS IDEALE	$pV^n = \text{cost}$	$\gamma = \frac{c_p}{c_v}$	0

$$p^{1/n} V = \text{cost} \quad pV^n = \text{cost}$$



Primo principio della termodinamica per sistemi chiusi

Per i processi ciclici

$$Q(C) = W_{sc}(C)$$

$$\oint \delta Q = \oint \delta W_{sc}$$

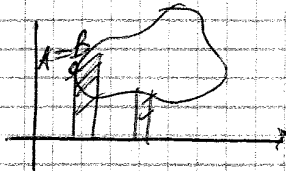
$$\rightarrow \oint \delta Q - \oint \delta W_{sc} = 0 \rightarrow \oint \delta Q - \delta W_{sc} = 0$$

N.B

o un integrale è chiuso nullo, il termine interno è un differenziale esatto

$$\rightarrow \oint \delta Q - \delta W_{sc} = dE_{int} \quad \text{che chiamo energia interna}$$

$$\rightarrow \oint \delta Q - \oint \delta W_{sc} - \oint dE_{int}$$



Per qualsiasi sottoprocesso infinitesimo si ha che

$$\int_{1 \rightarrow 2} \delta Q - \int_{1 \rightarrow 2} \delta W = \int_{1 \rightarrow 2} dE_{int}$$

$$\rightarrow Q(P) - W_{sc}(P) = \Delta E_{int}^{tot}$$

Conseguenze

- 1. E_{int}^{tot} è una proprietà ~~int~~ del sistema (e non funzione del processo)
- 2. E_{int}^{tot} è definito sempre a meno di una costante (perché deriva da una integrazione).

3. Può essere scomposto in due quote

• E_x (esterna) (perché fa ref. ad uno stato)

• E_p (interna) quello interno

$$\rightarrow E_{int}^{tot} = E_x + E_p \quad U$$

che fa ref. alle condizioni microscopiche del sistema

$$Q(P) - W_{sc}(P) = \Delta (E_x + U)$$

$$U = E_{tot} - E_x$$

fa ref. ad uno diff. estensivo \rightarrow è estensivo
e a meno di una costante (perché E_{tot})

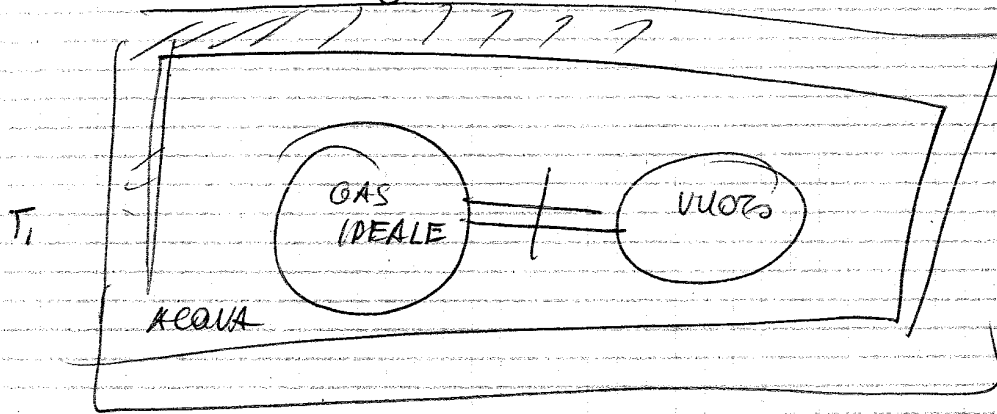
Per un gas ideale l'energia interna

Esperimento di Joule.

• Considero un gas ideale in un recipiente collegato con un altro recipiente in cui c'è il vuoto

montenuto isolato

isolato dall'ambiente esterno.



• se lo volume è chiuso

• se apro lo volume \rightarrow il gas si espande dove c'è il vuoto.

\rightarrow se si aspetta che il sist. torni in equilibrio

\rightarrow condizione finale

volume aperto, il gas è omogeneo dall'altro parte
la temperatura finale coincide con quella iniziale

\rightarrow lo spostamento del gas non ha det. modifiche di T .

$$Q - W_{ext} = \Delta E_C + \Delta U$$

andato termicamente

non è stato deformato

$$\rightarrow \Delta U = 0 \quad \Delta U_{GAS} = -\Delta U_{ACQUA}$$

$$\Delta U = \Delta U_{GAS} + \Delta U_{ACQUA} = 0$$

$$\rightarrow \Delta U_{GAS} = -\Delta U_{ACQUA}$$

perché non ho scambiato calore

$$\Delta T = 0$$

$$\rightarrow \text{per un gas ideale } U = U(T)$$

Esercitazioni 2

Esercizio 2.1

• $T = \text{cost} = 0^\circ\text{C}$

• $m = 5 \text{ kg}$

$\Delta p = \frac{4000 \text{ bar}}{999}$

$\kappa_T = 0,77 \cdot 10^{-4} \text{ bar}^{-1}$

$c_p = 384 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$

$\rho = 8,94 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

$$\frac{dV}{V} = \cancel{\beta dT} - \kappa dp \rightarrow \frac{dV}{V} = -\kappa dp \rightarrow dV = -\kappa dp V$$

$dL = p dV$

$W = \int p - \kappa dp V = \int -\frac{p^2}{2} \kappa V$

$W = -\left[\frac{p^2}{2} \right]_{p_0}^{p_f} \kappa \frac{M}{\rho}$

$W = -\left[\frac{p_f^2}{2} - \frac{p_0^2}{2} \right] \kappa \frac{M}{\rho}$

Svilgimento del prof

$W_i - W_{se} = \Delta E_c \rightarrow 0$

$W_i = W_{se} = \int_{1 \rightarrow 2} p dV$

$\frac{dV}{V} = \cancel{\beta dT} - \kappa dp \rightarrow dV = -\kappa dp V$
 $\cancel{L=0}$

$\rightarrow W = \int p (-\kappa V) dp = -\kappa \int V p dp =$

$\ln \frac{V_2}{V_1} = -\kappa_T (p_2 - p_1) \rightarrow V_2 = V_1 e^{-\kappa_T \Delta p} \rightarrow V_2 \approx V_1$ sono approssimabili

$\rightarrow W \approx -\kappa V_i \int p dp = -\kappa V_0 \left(\frac{p_f^2}{2} - \frac{p_0^2}{2} \right) = -\frac{\kappa V_0}{2} (p_f^2 - p_0^2) =$

$= -\frac{\kappa M}{2\rho} (p_f^2 - p_0^2) = -21,5 \text{ J}$

Involgimento del pvc

$m = 8 \text{ Kg}$ $N_1 = 35 \frac{\text{l}}{\text{m}^3} = 35 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{Kg}}$

$T_1 = 300 \text{ K}$
 $T_2 = 300 \text{ K}$ $N_2 = 20 \frac{\text{l}}{\text{m}^3} = 20 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{Kg}}$

~~W = M \int p dV~~ $W_1 = M W_1 = M \int p dV = M \int \frac{R^* T}{V} dV = M R^* T \int \frac{dV}{V} =$

$M R^* T (\ln N_2 - \ln N_1) = M R^* T \ln \frac{N_2}{N_1} = -2,789 \text{ J}$

~~Q = Mq = M \int dq = M \int c_p dT + \lambda w dV = -M \int \lambda v dV = M \int p dV = W = -2,789 \text{ J}~~

V.W : $W = M W = M \int p dV$

$p = \frac{R^* T}{V-b} - \frac{a}{V^2}$

$= M \left(\frac{R^* T}{V-b} - \frac{a}{V^2} \right) dV = M \left(\frac{R^* T}{V-b} dV - M \int \frac{a}{V^2} dV \right) = M R^* T \ln \left(\frac{V_2 - b}{V_1 - b} \right) - M a \left[\frac{1}{V_2} - \frac{1}{V_1} \right]$

$= -3,61 \text{ MJ}$

$Q = Mq = M \int_{T=b} c_p dT + \lambda w dV =$

$\lambda w = T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_V = T \left(\frac{d}{dT} \frac{R^* T}{V-b} - \frac{a}{V^2} \right) = T \left(\frac{R^*}{V-b} \right) = \frac{TR^*}{V-b}$

$\rightarrow Q = M \int \frac{TR^*}{V-b} dV = \int M R^* T \frac{dV}{V-b} = M R^* T \ln (V-b)_1^2 = M R^* T \ln \left(\frac{N_2 - b}{N_1 - b} \right) = -3,61 \text{ MJ}$

N.B.

Per un gas reale non vale il primo principio perché $\Delta U \neq 0 \rightarrow Q \neq W$.

15/10/2012

Premesse al 2° principio della termodinamica

Irreversibilità

Cause

1) presenza di squilibrio $\left\{ \begin{array}{l} \text{termico (differente temperatura} \rightarrow \text{irr.)} \\ \text{meccanico} \\ \text{chimico} \end{array} \right.$

2) fenomeni dissipativi (Es attrito)

Irreversibilità interne (quando le cause dell'irr sono interne)

Irreversibilità esterne (dovute allo scambio di calore con l'esterno) (Es diff. di temperatura tra il sistema e l'esterno)

Macchine termiche

= sistema in cui c'è un fluido operatore che percorre trasformazioni durante le quali può scambiare q o w con l'esterno. (Macchine motrici che scambiano completamente quantità di calore e lavoro positive operatrici "sfuggire")

Efficienza

= rapporto tra l'energia utile e l'energia spesa per far funzionare la macchina.

$$\eta = \frac{\text{energia utile}}{\text{energia spesa}}$$

Termostato ideale

= sist. o cui si può dare e togliere calore senza che esso vari temperatura \rightarrow senza irreversibilità interne (no dissipativi di suo interno)

È un dispositivo sorgente o serbatoio calore da esso posso se gli cedo calore

N.B

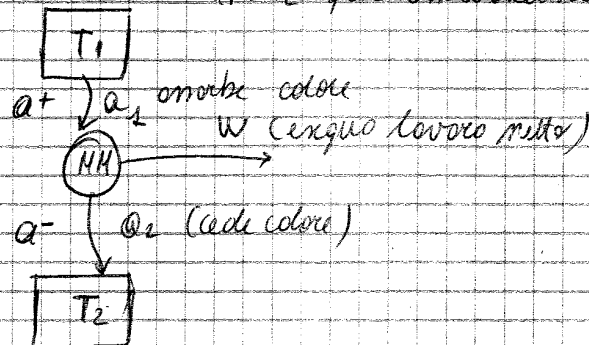
Nel disegno, più in alto ci sono quelli a T maggiore.

Conversioni

Macchine bitermiche = macchine che lavorano tra due livelli di T. (scambiano calore solo con due sistemi a T diverse)

= mod. rappresentabile

$T_1 > T_2$ (per osservazione price)



\rightarrow l'efficienza = rendimento = $\eta = \frac{W (>0)}{Q_1 \text{ (a } T_1 \text{ più alta)} (>0)} = \frac{|w|}{|Q_1|}$

Procedimento adottato per arrivare alla formulazione matematica del secondo principio

1° passo // per macchine bi-termiche [

Teorema di Carnot

Per una macchina bi-termica (A) il n. max si ottiene con un ciclo i cui processi sono reversibili)

(B) e il rendimento dipende solo dalle temperature dei due termostati ed è indipendente dallo scostamento che percorre il ciclo.

Un ciclo che rispetta

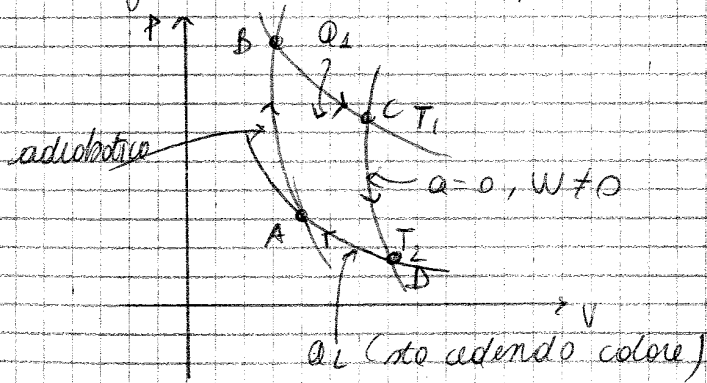
Il ciclo di Carnot è il ciclo che realizza il massimo rendimento in una macchina bi-termica

Gli scambi di calore in presenza di due termostati devono avvenire a T_{cost}

Condizioni per l'inversibilità

- rendere nullo lo scostamento di T durante uno scambio di calore (del fluido)
- l'unico caso in cui si può avere un ΔT , la trasformazione deve essere adiabatica

→ ciclo formato da due isop. ad. e due isoterme. Nel caso di un gas ideale la rappresentazione è



N.B

- Considero le domande precedenti
- risponde alla prima e alla terza domanda.

Rendimento del ciclo di Carnot

$$\eta = \frac{|W|}{|Q_1|} \quad |W| = |Q_1| - |Q_2| \quad \eta = \frac{|Q_1| - |Q_2|}{|Q_1|} = 1 - \frac{|Q_2|}{|Q_1|}$$

• Considero un ciclo reversibile ($W = W_{rev}$) → $W_{rev} = \int p dV$

• Considero un gas ideale

ISOTERMA

(T1) ⇒ $Q_1 = W_1 = \int_B^A p dV = \int_B^A nR^* T_1 \frac{dV}{V} = nR^* T_1 \ln \frac{V_A}{V_B}$

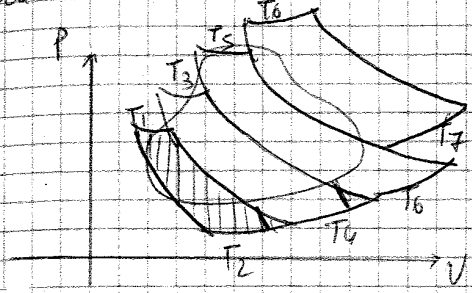
ISOTERMA (T2) → $Q_2 = W_2 = \int_D^C p dV = nR^* T_2 \ln \frac{V_C}{V_D}$

1° parte // per processi ciclici generici

Teorema di Clausius

Uguaglianza di Clausius

• Considero un ciclo reversibile



Lo divido in n cicli di Carnot

per il primo ciclo $N=1 - \frac{|Q_2|}{|Q_1|} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$

$\rightarrow \frac{-|Q_2|}{|Q_1|} = -\frac{T_2}{T_1} \rightarrow -\frac{|Q_1|}{T_1} = -\frac{|Q_2|}{T_2} \rightarrow \frac{|Q_1|}{T_1} - \frac{|Q_2|}{T_2} = 0$

\rightarrow senso valore assoluto $\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0$

Lo fanno lo stesso discorso per le altre n ho che Es per quello dopo

$\frac{Q_3}{T_3} + \frac{Q_4}{T_4} = 0$

$\frac{Q_9}{T_9} + \frac{Q_{10}}{T_{10}} = 0$

$\rightarrow \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} + \frac{Q_3}{T_3} + \dots + \frac{Q_{10}}{T_{10}} = 0 \quad \vee \quad \sum_{i=1}^{10} \frac{Q_i}{T_i} = 0$

Per migliorare l'approssimazione si dovrebbe prendere cicli infinitesimi

con che $\sum_{i=1}^N \dots \quad n \rightarrow +\infty \rightarrow \oint_{rev} \frac{dQ}{T} = 0$

\hookrightarrow considero che la reazione è rev.

$\rightarrow \frac{dQ}{T}$ è un differenziale esatto perché il contenuto dell'integrale è 0.

esso viene chiamato **ENTROPIA**

che è una funzione di stato

$\rightarrow \left(\frac{dQ_{rev}}{T} \right) = ds$

intensivo
indipendente
perché - la sua variazione non si può calcolare

Fatti a meno di uno \leftarrow costante \leftarrow ma non si può attribuire il valore

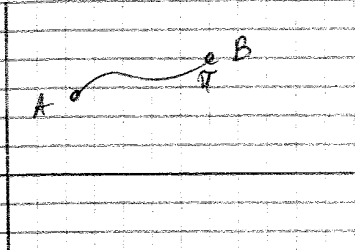
$$\int_{A \rightarrow B} \frac{dq}{T} + \int_{A \rightarrow B} dS_{irr} = \int_{A \rightarrow B} dS$$

dividendo in due il ciclo, la relazione vale su ogni pezzo

$$\int_A^B \frac{dq}{T} + S_{irr, A \rightarrow B} = S_B - S_A$$

= secondo principio della termodinamica per un ciclo irreversibile

→ Dato un generico processo



A → B pezzo di un ciclo.

Nel gono onhe

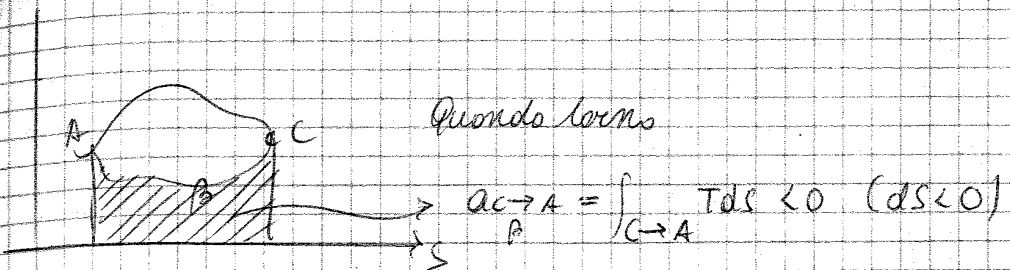
$$1) \frac{dq}{T} + dS_{irr} = dS$$

$$2) \int_{A \rightarrow B} \frac{dq}{T} + S_{irr} = S_B - S_A \quad \left[\frac{J}{K \cdot Kg} \right]$$

3) a lavoro nullo potenza e flusso

$$\frac{q}{T} + S_{irr} = \frac{dS}{dt} \quad \left[\frac{W}{K} \right]$$

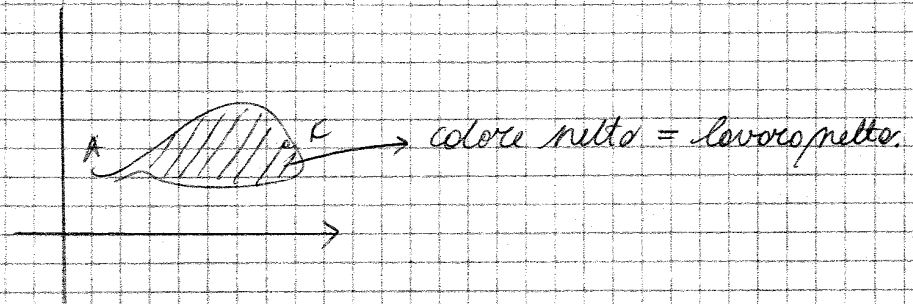
$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{S_{irr}}{\Delta t} \rightarrow \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta S}{\Delta t}$$



→ il colore netto del ciclo è > 0 se percorso in senso orario.

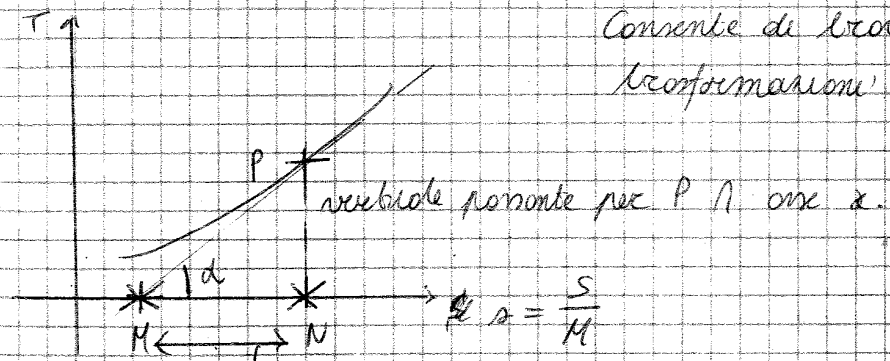
$$a(C) = W(C)$$

→ il diagramma coincide con lavoro e colore netto



Altro approfondimento sul diagramma di Gibbs

Consente di trovare colori specifici nelle trasformazioni



• Considero una generica transf.

• faccio passare la t_q per P

nell'obliqua

$$PN = MN \tan \alpha$$

$$T = MN \tan \alpha$$

$$\frac{dT}{dS}$$

$$\Rightarrow MN = \frac{T}{\tan \alpha} = \frac{T}{\frac{dT}{dS}} \rightarrow \overline{MN} = T \frac{dS}{dT} \quad \overline{MN} = \frac{T ds}{dT}$$

si sa che $\frac{dq}{T} = \tan \alpha = ds \rightarrow dq = T ds$

$$\rightarrow \overline{MN} = \frac{dq}{dT} = \text{colore specifico in quel punto della trasformazione}$$

Entropia e gas ideali

Em'orio abbiamo usato V, p, T, U, S ora anche S .

$$pV = R^* T$$

$$dU = c(T) dT$$

$$T dq = dW_i = dU$$

$$T p \frac{dq}{T} + ds_{\text{int}} = ds$$

Calcolo un percorso reversibile

$$\rightarrow \begin{cases} dq - dW_i = dU \\ \frac{dq}{T} = ds \end{cases}$$

$$\rightarrow \begin{cases} dq = p dV + c_v dT \\ dq = c_v dT + p dV \end{cases} \quad pV = R^* T \rightarrow p = \frac{R^* T}{V}$$

$$\rightarrow ds = \frac{c_v dT + p dV}{T} = \frac{c_v dT}{T} + \frac{R^*}{N} \frac{dV}{V}$$

$$\rightarrow s(V, T) : ds = \frac{c_v dT}{T} + \frac{R^*}{N} \frac{dV}{V}$$

$$ds = c_v(T) \frac{dT}{T} + R^* \frac{dV}{V}$$

N.B. In generale dipendono poco dalla T e allora possiamo

$$\rightarrow c_v = c_v(T)$$

$$\Delta S = c_v \ln \frac{T_B}{T_A} + R^* \ln \frac{V_B}{V_A}$$

$$\rightarrow \Delta S = c_v \ln \frac{T_B}{T_A} + R^* \ln \frac{N_B}{N_A}$$

$$\Delta S = \int c_v(T) \frac{dT}{T} + R^* \ln \frac{V_B}{V_A}$$

Revisione $s = k(p, T)$

$$pV = R^* T$$

$$\rightarrow d(p, V) = d(R, T) \rightarrow p dV + V dp = R^* dT \rightarrow \frac{p dV}{pV} + \frac{V dp}{pV} = \frac{R^* dT}{pV}$$

$$\frac{dV}{V} + \frac{dp}{p} = \frac{dT}{T}$$

$$ds = c_v \left(\frac{dV}{V} + \frac{dp}{p} \right) + R^* \frac{dT}{T} = \frac{dV}{V} (c_v + R^*) + \frac{dp}{p} c_v$$

$$= \frac{dV}{V} (c_v + c_p - c_v) + c_v \frac{dp}{p} = \frac{dV}{V} c_p + c_v \frac{dp}{p}$$

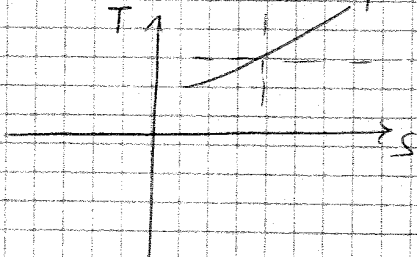
$$c_p \left(\frac{dV}{V} \right) + R^* \left(\frac{dT}{T} - \frac{dp}{p} \right) = (c_v + R^*) \frac{dT}{T} + c_v \frac{dp}{p}$$

$$c_p \frac{dT}{T} - R^* \frac{dp}{p} = ds$$

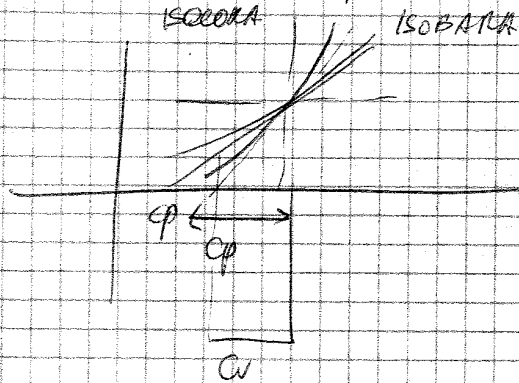
ISOCORA

$$\Delta S = \int c_v(T) \frac{dT}{T} = c_v \ln \frac{T_B}{T_A}$$

$$\Delta S = c_v \ln \frac{T_B}{T_A} \quad p = \text{costante}$$



meno dopo di compressione, ma $c_v \neq c_p$: $c_p > c_v$



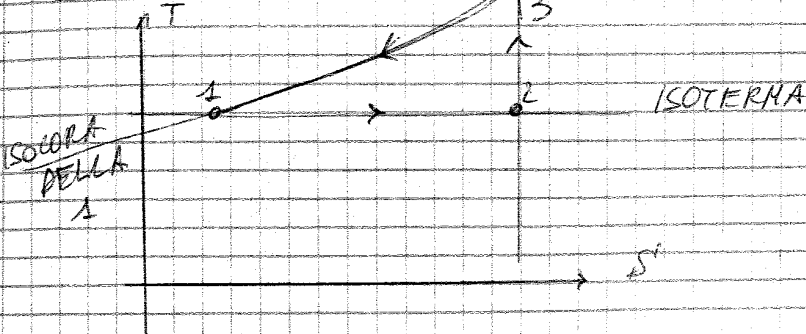
Valore numerici

$Q =$	0	7
	KJ	KJ
a	+2,18	2,18
b	0	-2,74
c	-2,74	0

$$Q_{TOT} = W_{TOT} = -2,74 + 2,18 = -0,56$$

percorso in senso
antiorario (adve
fornire lavoro)

Aggiunto domanda: Trovare il diagramma (T,s)



$$(a) \quad dS = C_V \frac{dT}{T} + R^* \frac{dV}{V} \rightarrow ds = C_V \frac{dT}{T} + R^* \frac{dV}{V}$$

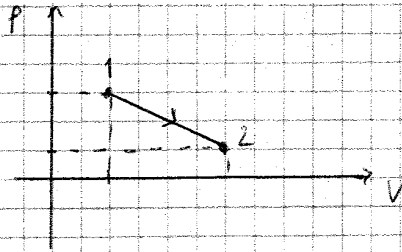
isolemmo

$$ds = R^* \frac{dV}{V} \rightarrow \Delta S = R^* \ln \frac{V_2}{V_1} = R^* \ln \frac{3V_1}{V_1}$$

$$\rightarrow \text{risposta via destra } (S) = R^* \ln 3$$

$$W_2 = W_1^{lu} - W_a$$

$$W_1^{lu} = \int p dV$$



$$\begin{cases} p = A + BV \\ p_1 = A + BV_1 \\ p_2 = A + BV_2 \end{cases}$$

$$\rightarrow p_1 - p_2 = B(V_1 - V_2) \rightarrow B = \frac{p_1 - p_2}{V_1 - V_2}$$

$$\rightarrow A = p_1 - \frac{p_1 - p_2}{V_1 - V_2} V_1$$

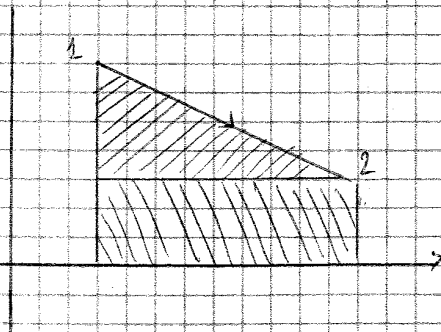
$$\rightarrow W = \int_1^2 A + BV = \int_1^2 A dV + \int_1^2 BV dV = A(V_2 - V_1) + \frac{B(V_2^2 - V_1^2)}{2}$$

$$= \left(p_1 - \frac{p_1 - p_2}{V_1 - V_2} \right) (V_2 - V_1) + \left(\frac{p_1 - p_2}{V_1 - V_2} \right) \frac{1}{2} (V_2^2 - V_1^2)$$

$$W_a = W_1^{lu} - W_1 = 996 \text{ kJ}$$

Osservazione

Dato che il lavoro è l'area sottesa, si calcola l'area



$$F_x = \int (p_{\text{atm}} \cdot A) = \int p_{\text{atm}} \Delta x = p_{\text{atm}} \Delta V$$

$$\Delta E_p = \underbrace{\Delta E_{p, \text{gas}}}_{= \text{a primo}} + \Delta E_{p, \text{pistone}} =$$

$\left[M_{\text{pistone}} g \Delta z_{\text{pistone}} = M g (z_2 + d - z_1 - d) = M g \Delta z = M g \Delta x = M g \frac{\Delta V}{A} \right]$

~~$\rightarrow \Delta E_p = \Delta W_{\text{pistone}} + \Delta W_{\text{gas}}$~~

$a = 10,93 \text{ J}$

portato in volume

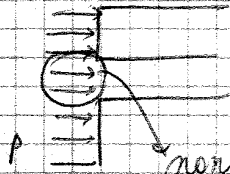
$$\rho = \frac{C_M}{C_V} \rightarrow C_M = \rho \cdot V$$

lavoro W_{Σ} in sistemi aperti:

$$W_{\Sigma} = W_t + W_o + W_{op} \rightarrow \text{lavoro di spostamento (lavoro per l'introduzione ed espulsione del fluido)}$$

(per di verso deformazioni del sistema chiuso)

• Considero un condotto che ha uscite e entrate di fluido



non è ferma, ma subisce uno spostamento legato ad un volume

Lavoro di spostamento

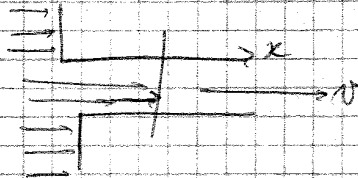
che ho portato in uscita

• considero un certo tempo Δt

in cui ho portato nel condotto

di uscite una certa quantità

→ il lavoro spostamento



$$W_{op} = (P_{\mu} A_{\mu}) \Delta x$$

↓

$$P_{\mu} = \rho \cdot A_{\mu} (V_e)$$

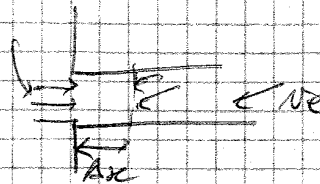
$$C = \rho \cdot A |v_e|$$

$$A |v_e| = \frac{C}{\rho} \rightarrow \rho = \frac{1}{N}$$

$$= P \cdot \frac{C}{\rho} = P_{\mu} N_{\mu} C_{\mu}$$

pressione interna della sostanza

• ho una portata in ingresso



$$W_{op_i} = -P_i \cdot A_i \cdot \Delta x < 0 \rightarrow W_{op} = -P_i A_e (V_e)$$

numero di condotti

$$= -P_i N_i C_e$$

portata che fluisce in quel condotto

$$\rightarrow W_{op} = \sum_{i=1}^N P_i \cdot N_i \cdot C_i$$

Legge di Conservazione della massa

La massa M conservata \rightarrow la variazione di massa è sempre nulla

$$\frac{d}{dt} M = 0 \quad (\text{la massa non si distrugge})$$

$$\rightarrow \frac{dM}{dt} = \left(\frac{dM}{dt} \right)_{vc} + \sum_{j=1}^{NC} \pm G_j \cdot \frac{M}{M} = 0$$

~~M~~
 ~~M~~

$$\rightarrow \left(\frac{dM}{dt} \right)_{vc} + \sum_{j=1}^{NC} \pm G_j = 0$$

N.B

Nel sistema chiuso $G=0 \rightarrow \left(\frac{dM}{dt} \right)_{vc} = 0$

N.B

• In condizione stazionaria

$$\rightarrow \sum_{j=1}^{CN} \pm G_j = 0 \quad (\text{lo somma di ciò che è entrato, e anche usato})$$

$$(\sum G_{in} = \sum G_{out})$$

N.B

Le portate in volume non si conservano (a parità di massa, le sostanze possono avere volumi diversi).

Teorema dell'energia cinetica per sistemi aperti

$$W_{in} + W_a + \Delta E_c + \Delta E_p - W_{out} = 0 \quad (\text{per sistemi chiusi})$$

$$P_{in} + W_a + \frac{dE_c}{dt} + \frac{dE_p}{dt} - P_{out} = 0 \rightarrow P_{in} + W_a + \frac{dE_c}{dt} + \frac{dE_p}{dt} - P \frac{dV}{dt} = 0$$

Per sistemi aperti

il corpo è rigido
non ci sono forze sul com.
rno
è molto piccolo lo spostamento

$$W_{in} = P_{in} = P_t + P_o + P_{op}$$

Studio dei sistemi ad involucro rigido ($P_t = 0$)

$$\rightarrow P_{in} = P_t + P_{op}$$

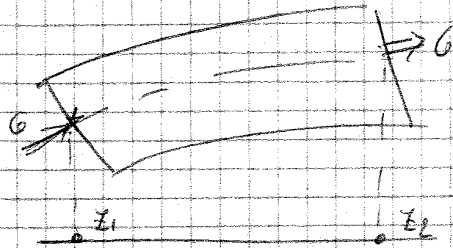
$$\rightarrow P_t + P_{op} + P_a + \frac{dE_c}{dt} + \frac{dE_p}{dt} - P \frac{dV}{dt} = 0$$

N.B

$$\frac{dE_c}{dt} = \left(\frac{dE_c}{dt} \right)_{vc} + \sum_{j=1}^N \pm G_{c,j} \quad \text{essendo } E \text{ una grandezza estensiva.}$$

Teorema di Bernoulli:

- Considero un generico condotto
- il fluido è in condizioni stazionarie
- trascuro gli attriti
- considero fluidi incompressibili ($\rho = \text{costante}$)
- $dt = 0$



$$\rightarrow \frac{dU}{dt} + \frac{dE_c}{dt} + \left(\frac{dE_p}{dt} \right)_{L=0} +$$

$$+ G (\Delta z + \Delta E_p) + V \frac{dP}{dt} = 0$$

→ integro e divido per Δt

$$\Delta E_c + \Delta E_p + \int \rho v dp = 0 \rightarrow \Delta E_c + \Delta E_p + \int \frac{dp}{\rho} = 0 \rightarrow \Delta E_c + \Delta E_p + \frac{\Delta p}{\rho} = 0$$

$$\frac{1}{2} (V_2^2 - V_1^2) + g(z_2 - z_1) + \frac{p_2 - p_1}{\rho} = 0 \quad \text{divido per } g$$

$$z_2 + z_1 + \frac{1}{2g} (V_2^2 - V_1^2) + \frac{p_2 - p_1}{\rho g} = 0$$

$$\rightarrow z + \frac{V^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} = \text{costante}$$

primo principio dello T. per sistemi aperti (e rigido)

$$\dot{\phi} - P_x^s = \frac{dU}{dt} + \frac{dE_c}{dt} + \frac{dE_p}{dt}$$

$$\cancel{\dot{W}_{in}} = \dot{W} \quad P_x^s = P_t + P_o + P_{pp} \quad \rightarrow \quad P_x^s = P_t + P_{pp}$$

| perché rigido

$$\rightarrow \dot{\phi} - P_t - P_{pp} = \frac{dU}{dt} + \frac{dE_c}{dt} + \frac{dE_p}{dt}$$

$$\frac{dU}{dt} = \left(\frac{dU}{dt} \right)_{Vc} + \sum_{s=1}^{Nc} \dot{E}_s = G_T (\mu_T)$$

$$\frac{dE_p}{dt} = \frac{dE_c}{dt} \quad \text{già viste prima}$$

Entalpia per un gas ideale.

$$N = \mu + pV$$

$$du = C_v dT$$

$$pV = R^* T$$

$$dh = C_v dT + dh = du + d(p \cdot v) = C_v dT + d(R^* T) = C_v dT + R^* dT = C_v dT + (C_p - C_v) dT = C_p dT$$

$$\rightarrow dh = C_p dT \rightarrow h = h(T) \text{ poiché } dh = C_p(T) dT$$

\rightarrow isotermico \rightarrow isentropico.

$$\rightarrow \int_1^2 dh = \int_1^2 C_p dT \rightarrow \Delta h = \int_1^2 C_p dT$$

• C_p - costante

$$\rightarrow \Delta h = C_p \Delta T$$

2° principio della termodinamica per sistemi aperti:

per sistemi chiusi

$$\frac{\phi}{T} + \sum_{irr} = \frac{dS}{dt}$$

$$\frac{dS}{dt} = \left(\frac{dS}{dt} \right)_{NC} + \sum_{S=1}^{NC} \pm G_S (S_S)$$

$$\rightarrow \frac{\phi}{T} + \sum_{irr} = \left(\frac{dS}{dt} \right)_{NC} + \sum_{S=1}^{NC} \pm G_S (S_S)$$

• in condizioni stazionarie

$$\frac{\phi}{T} + \sum_{irr} = \sum_{S=1}^{NC} \pm G_S \Delta S$$

• un ingresso e un uscolo

$$\frac{\phi}{T} + \sum_{irr} = G^* \Delta S \quad \text{integrando e dividendo per } \dot{m} \quad \int \frac{\dot{q}}{T} + D_{irr} = \Delta S$$

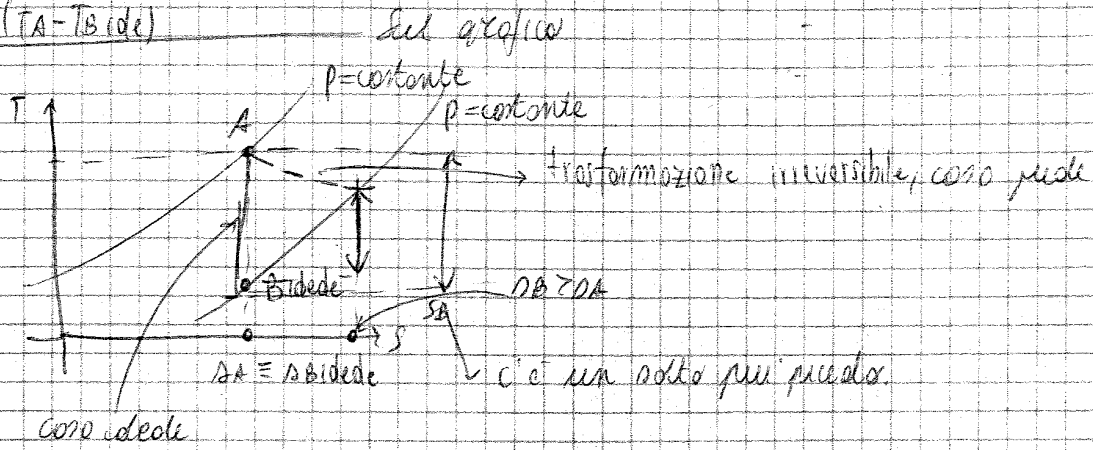
TURBINA A GAS PERFETTO (IDEALE)

$$dh = cpdT$$

• cp = costante

$$\rightarrow \Delta h = \int cpdT = cp\Delta T = cp(T_B - T_A)$$

$$\eta_{IS} = \frac{cp(T_A - T_{Br})}{cp(T_A - T_{B,ide})}$$



Compressore

(Scopo opposto alla turbina)

= sistema quello che prende un fluido con portata in ingresso e lo comprime



• Considera che adiabatico, processo Sec. Sec
 → do

$$\phi - \psi_{12} = \int_{12} \frac{1}{T} ds = 0 + \sum_{j=1}^{Nc} \pm G(\Delta h_j)$$

$$\Rightarrow +\psi_{12} = G(h_1 - h_2)$$

$$\Rightarrow W_t = h_1 - h_2$$

• si può avere un compressore senza attrito (→ tutto il lavoro comprime il fluido) e reversibile $\eta = 1$ $W_t = W_{12} - W_{12, ideale}$

si ha $\Delta h > \Delta s_i \rightarrow \Delta R > \Delta R_i$
 → $W_t = W_{12} - W_{12, ir}$

$$\eta_{IS, COMPRESSIONE} = \frac{|W_{t, IDEALE}|}{|W_{t, REALE}|} = \frac{h_{2, ideale} - h_1}{h_{2, ir} - h_1}$$

↑ 1° principio
 ↓ quello che richiede più lavoro

Entalpia, entropia, T : Calcolo approssimato nei fluidi e nei liquidi

Considerazioni generali:

- I liquidi e solidi sono poco comprimibili \rightarrow possono essere approssimati a sistemi con densità costante, e $dn=0$ (poiché $\rho = \frac{1}{v} = \text{costante}$)

N.B

$$c_p - c_v = -T \left(\frac{dv}{dT} \right)_p \left(\frac{dp}{dn} \right)_T \rightarrow c_p = c_v = c = f(T)$$

Calore

$$c_{\bar{x}} \frac{dq}{dT} \rightarrow dq = c_{\bar{x}} dT = c dT$$

Lavoro interno

$$d\bar{w} = dl_{int} = p dn = 0$$

Primo principio per un processo reversibile

$$dq - dl_{int} = du \rightarrow c dT \stackrel{\hat{=}}{=} du$$

Entalpia

$$h = u + p v$$

$$\rightarrow dh = du + d(p \cdot v) = du + p dn + v dp$$

$\stackrel{dn=0}{=} c dT$

$$\rightarrow dh = c dT + v dp$$

Entropia per un processo reversibile

$$\frac{dq}{T} + dl_{int} = ds \rightarrow ds = c \frac{dT}{T}$$

Esercizio

$$\frac{\phi_0}{T_0} = \sum_{j=1}^{NC} \dot{Q}_j \Delta T_j - \dot{Q}_{irr} - \sum_{k=1}^{NF} \frac{\phi_k}{T_k}$$

$$\phi_0 = \sum_{j=1}^{NF} \dot{Q}_j \Delta T_j T_0 - T_0 \dot{Q}_{irr} - \sum_{k=1}^{NF} \frac{\phi_k \cdot T_0}{T_k}$$

Portandolo nel primo

$$\sum_{k=1}^{NF} \phi_k + \sum_{j=1}^{NC} \dot{Q}_j T_0 \Delta T_j - T_0 \dot{Q}_{irr} - \sum_{k=1}^{NF} \phi_k \frac{T_0}{T_k} - W_t = \sum_{j=1}^{NC} \dot{Q}_j (h + e_c + e_p)_j$$

$$\sum_{k=1}^{NF} \left[\phi_k \left(1 - \frac{T_0}{T_k} \right) \right] - W_t = \sum_{j=1}^{NC} \left[\dot{Q}_j (-T_0 \Delta T_j + h + e_c + e_p)_j \right] + T_0 \dot{Q}_{irr}$$

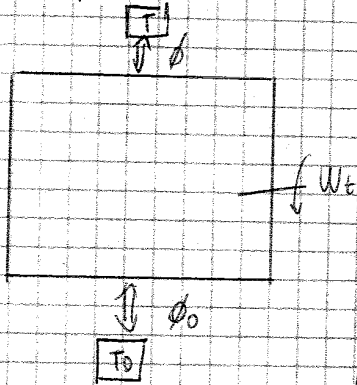
= equazione dell'energia utilizzabile

= equazione dell'exergia operativa

Exergia

= nuova grandezza che indica la quantità di energia disponibile come lavoro (che può essere trasformata in lavoro)

N.B



Considero un sistema che scambia con q con un solo flusso oltre alla biosfera.

È un sistema chiuso (non scambio m)

$$\phi_k \left(1 - \frac{T_0}{T_k} \right) - W_t = T_0 \dot{Q}_{irr}$$

$$W_t = \phi_k \left(1 - \frac{T_0}{T_k} \right) - T_0 \dot{Q}_{irr}$$

potenza termica ottenibile dal flusso

flusso di exergia

$$W_{MAX} \text{ se } \dot{Q}_{irr} = 0$$

$$\psi_a = W_{MAX} = \phi_k \left(1 - \frac{T_0}{T_k} \right) = \text{EXERGIA associata ad un solo flusso termico disponibile allo } T > T_0$$

$$Q_a = \phi_k \left(1 - \frac{T_0}{T_k} \right) \text{ energia associata al calore } \phi_k \text{ disponibile allo } T_k$$

Energia utilizzabile con nessuna esigenza

considero un sistema in cui α hanno entrate e uscite energetiche



$$\sum \Psi_e - \sum \Psi_u = T_0 \Sigma irr$$

B

l'exergia non α conservata

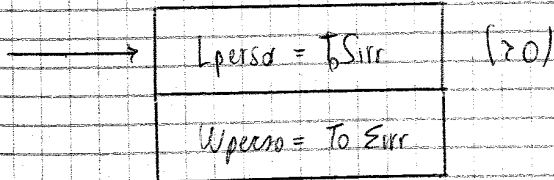
$$T_0 \Sigma irr = \sum_e B_e - \sum_u B_u$$

N.B

Energetici	exergetici
W_t	W_t
ϕ	$\phi \left(1 - \frac{T_e}{T_k} \right)$
$G(\Delta h)$	$G \times \Delta E_k$
$GJ \text{ Sec}$	$GJ \text{ Sec}$
$GJ \text{ Sep}$	$GJ \text{ Sep}$

Il lavoro perso: T_0 di $G_{irr} = \text{Stodola}$ perdita di lavoro

Le perdite di exergia ν perdite di possibilità di ottenere lavoro = $T_0 \Sigma irr$



EB Rendimento exergetico (o di secondo principio)

N.B

I rendimenti sono convenzionali

→ Non sono uniche le leggi che determinano il calcolo del rendimento

Definizione

$R_{ex} = \frac{Ex \text{ uscente}}{Ex \text{ entrante}}$	Lavoro	perché E_s escono di fatto $\rightarrow E >$, però sono inutili perché non vengono utilizzati $\rightarrow E <$
	$\neq \frac{Ex \text{ utile}}{Ex \text{ inutile}}$	

con semplificazioni nei casi di riferimento (384)

trasformazioni di tipo reversibili

condizioni stazionarie (a regime costante)

trascurabili 1) variazioni $\Delta c, \Delta p$

il fluido considerato ha il comportamento di un gas (ideale)

Consideriamo un solo gas "Aria Standard", come un fluido stabile e costante.

In questo gas i calori specifici sono costanti (li consideriamo tali)

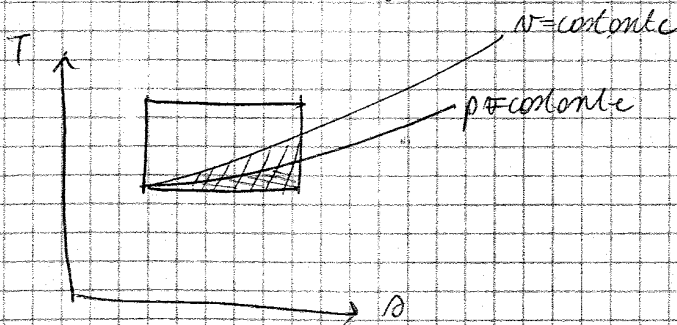
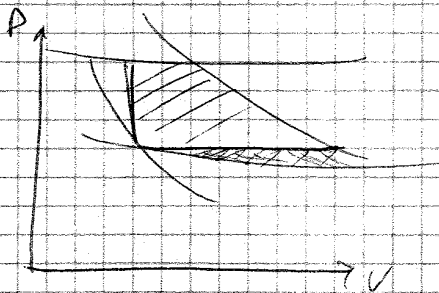
variazioni sul ciclo di Carnot a gas

irreversibili

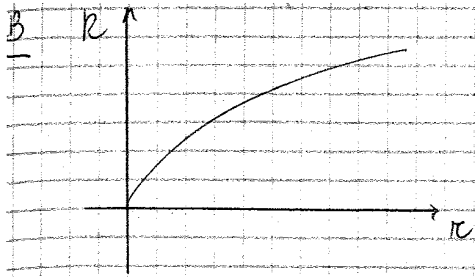
tipo tecnologico (le isoterme sono delle compressioni o espansioni. Ma i defetti di queste compr o esp. a T costante con una velocità elevata)

allo compressione isoterma, se si considerano volumi molto grossi, si presentano difetti che riguardano gli attriti.

Per evitare le cose, con la diminuzione degli attriti si considero un isotermo o isotermo al posto della compressione isoterma) perdendo una certa quantità di calore (parte tratteggiata)



il ciclo di Carnot a gas non viene perfezionato.



Maggiore ϵ , maggiore η

motore di natura tecnica

adatto per macchine che lavorano in situazioni monocombustibili.
 lavorano tutti per combustione interna (\rightarrow deve avere delle valvole) (attivato da un sistema di candela)

riduzione di rapporto di compressione nei motori di due a otto.

con aumento ϵ , aumento anche lo T_{MAX} (T_3) potendo provocare l'autocombustione della candela.

Ciclo Diesel ideale

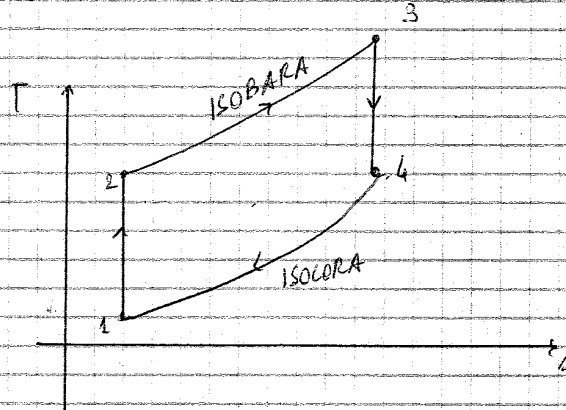
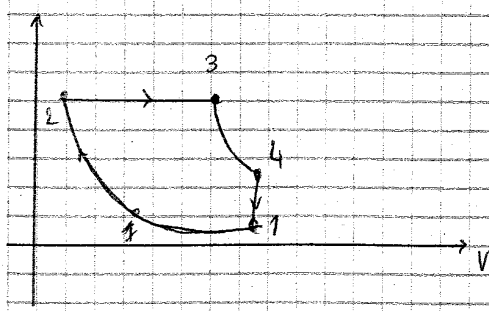
ciclo formato da 4 trasformazioni:

due adiabatiche

1 isocora

1 isobara

representazione



rendimento

$$\eta = \frac{|Q_2|}{|Q_{23}|} = \frac{|Q_{23}| - |Q_{41}|}{|Q_{23}|} = 1 - \frac{|Q_{41}|}{|Q_{23}|} = 1 - \frac{c_v(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{(T_4 - T_1)}{(T_3 - T_2)}$$

$$= \frac{1}{\gamma} \frac{T_1 \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{T_2 \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)}$$

DIM

$$\eta = 1 - \frac{1}{\gamma} \frac{T_1}{T_2} \frac{\left(\frac{T_4}{T_1} - 1\right)}{\left(\frac{T_3}{T_2} - 1\right)}$$

1 → 2 *adiabatico* → $T_1 N_1^{\gamma-1} = T_2 N_2^{\gamma-1}$

$$\rightarrow \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^{\gamma-1} = \frac{1}{rV^{\gamma-1}}$$

N.B

$$\frac{T_3}{T_2} = rV_1$$

N.B2

$$\frac{T_4}{T_1} = \left(\frac{T_4}{T_3}\right) \cdot \frac{T_3}{T_2} \cdot \left(\frac{T_2}{T_1}\right)$$

B → U *ADIABATICA*

$$T_3 N_3^{\gamma-1} = T_u N_u^{\gamma-1}$$

$$\frac{T_u}{T_3} = \left(\frac{N_3}{N_u}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{N_3}{N_1}\right)^{\gamma-1}$$

$$\rightarrow \frac{T_4}{T_1} = \left(\frac{N_3}{N_1}\right)^{\gamma-1} \cdot \frac{N_3}{N_2} \cdot \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{N_3}{N_2}\right)^{\gamma} = rV_1^{\gamma}$$

Esercizio 1.1

$p = 1 \text{ atm}$

$T(^{\circ}\text{C}) = 100^{\circ}\text{C}$

$\rightarrow T(\text{K}) = 373 \text{ K}$

$\rightarrow T(^{\circ}\text{F}) = 373 \cdot 1.8 = 671.4$

$\rightarrow \left[\frac{T(^{\circ}\text{F}) + 459.67}{1.8} \right] = T(\text{K}) \rightarrow T(^{\circ}\text{F}) = 211.73^{\circ}\text{F}$

$p = 3.5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} = ~~3.5 \cdot 10^5 \text{ Pa}~~ 3.43 \cdot 10^5 \text{ Pa} = 3.5 \frac{98066 \text{ N}}{10^{-4} \text{ m}^2} = 3.43 \text{ bar}$

$R = 0.082057 \frac{\text{atm} \cdot \text{l}}{\text{mol} \cdot \text{K}} = 8366.6033 \frac{\text{Pa} \cdot \text{l}}{\text{mol} \cdot \text{K}} = 8.316 \frac{\text{Pa} \cdot \text{m}^3}{\text{mol} \cdot \text{K}}$

Regola generale

Passare dal $L \rightarrow m^3$:

1) passare da dm a m ($\cdot 10$)

2) Dato che è tutto il cubo se divide per 10^3

- sostituire all'unità di misura, l'unità nell'altra forma.

es. $1 \frac{\text{Pa} \cdot \text{dm}^3}{\text{mol}} = 1 \cdot \frac{101325 \text{ Pa}}{\text{mol}}$

Esercizio 1.2

$\Delta V = -0.04 \%$

$\Delta p = 1.5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$

$T = \text{costante}$

$\frac{dV}{V} = \beta dT - \kappa dp$

$\frac{dV}{V} = \beta dT - \kappa dp$

$\frac{\Delta V}{V} = -\kappa \Delta p \rightarrow$

$\kappa = \frac{-\Delta V}{V \Delta p} = \frac{0.04V - V}{V \Delta p} = \frac{V(0.04 - 1)}{V \Delta p} = -0.04 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$

$\kappa = -\left(\frac{dV}{dp} \right) / p$

$\ln \frac{V}{V_0} = e^{-\kappa \Delta p}$

$\ln \frac{V_0 - 0.04V_0}{V_0} = e^{-\kappa \Delta p}$

$\ln \frac{1 - 0.04}{1} = e^{-\kappa \Delta p}$
 $-0.04 = e^{-\kappa \Delta p}$

$\ln -0.04 = -\kappa \Delta p$

Exercice 1.4

$$1. (0^\circ\text{C}, 0,01 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}})$$

$$2. (0^\circ\text{C}, 0,6 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}})$$

$$M = 28,013 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

$$T_c = 126,2\text{K}$$

$$p_c = 33,9 \text{ bar}$$

$$J = (W) = (F \cdot s) = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{m}^2 = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$$

$$PV = nRT \rightarrow PV = \frac{M}{M} RT \rightarrow P \cdot V = \frac{R}{M} T \rightarrow P = \frac{R T}{M} = \frac{8,314 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}}{0,01 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \cdot 28,013} = 29,6$$

$$\frac{\text{kg} \cdot \text{m}^3}{\text{s} \cdot \text{m}^3} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} = \frac{\text{kg}^2 \cdot \text{kmol}}{\text{K}}$$

$$1 \text{ bar} \quad 2$$

GAS IDEALI 81,07 1,351

W

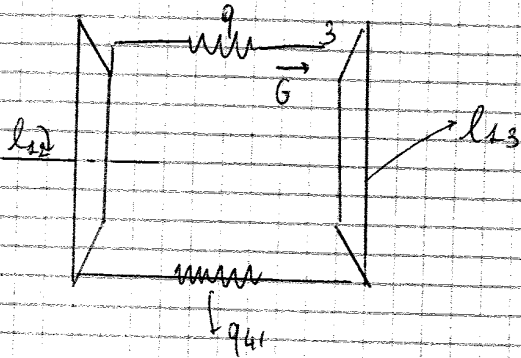
WAN DER VAALS 76,60 1,349

BEATTLE-BRI 79,55 1,350

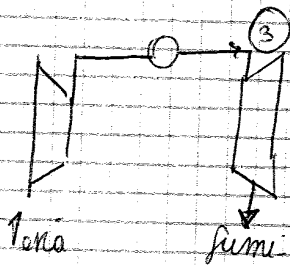
30/10/2012

Si realizzano in impianti multicomponenti.

La prima compressione avviene attraverso un compressore, il calore viene scambiato tramite uno scambiatore di calore. L'espansione avviene tramite una turbina. Infine si cede calore all'esterno, così da poter ripercorrere il ciclo.



Nella realtà può essere rotto da una turbina e da un compressore, mentre il calore viene ceduto in una camera di combustione.



Non si può chiudere il ciclo perché l'aria viene bruciata sotto forma di fumi.

fumi nell'ambiente esterno.

dall'ambiente esterno

minimo del T_{max} del ciclo

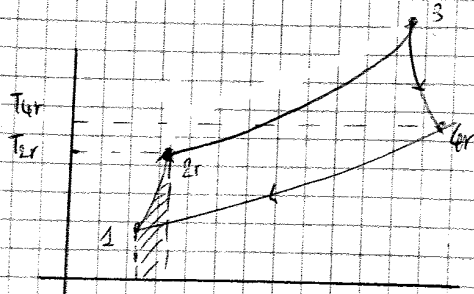
materiali che fanno maggiore sforzo sono quelli che realizzano l'entrata dell'aria in quanto perché sottoposti ad alte T .

esempi di Impugnatura

Impugnatura Aeronautica (potenze elevate per pesi ridotti)

riduzione dell'energia elettrica

Ciclo Joule, S

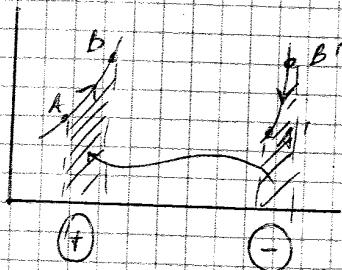


Si sfruttano i gas caldi per preriscaldare lo T del compressione

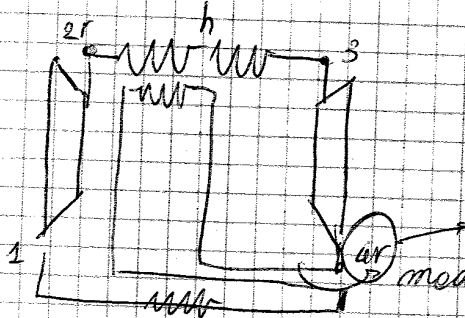
Regenerazione

Effettore disponibilità termiche per dei preriscaldamenti

N.B

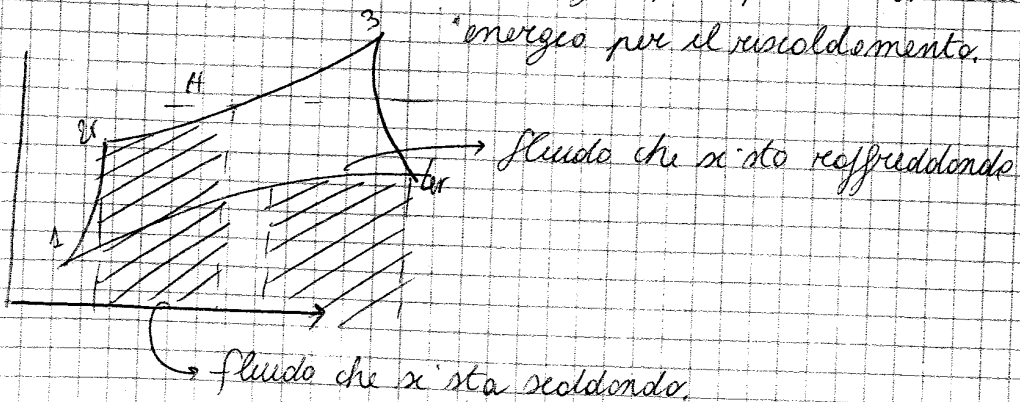


Quando si lavora con delle endore, localmente, si prendo due infinitesimi, dovei fore si che mentre uno si raffredda l'altro si riscalda. Non si deve spendere altro calore.



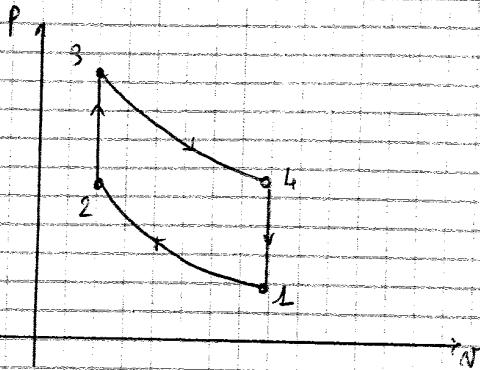
Portando da 4r cede il calore per un raffreddamento, l'altro per poi portarlo nello scambiatore tradizionale.

non modifica il lavoro netto, ma riduce l'energia spesa perché non viene spesa l'energia per il riscaldamento.

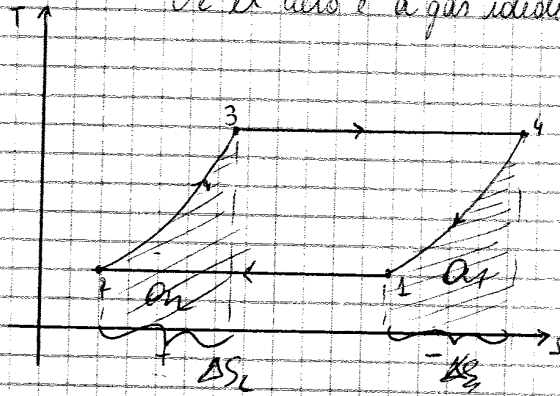


Ciclo Stirling

- = ciclo a gas ideale caratterizzato da
- due isoterme
- due isocore



Se il ciclo è a gas ideale $\alpha_1 = \alpha_2$



N.B.

- A - Gli scambi di calore avvengono in tutte e quattro le trasformazioni.
- B - Δ calori $|q_{23}| = -|q_{41}|$
- C - Fa il ciclo se si che il calore necessario per riscaldare q_{12} sia quello ottenuto nella seconda isocora (per questo è un ciclo regenerativo)

Rendimento

$$\eta_S = \frac{|q_{34}| - |q_{12}|}{|q_{34}|} = 1 - \frac{|q_{12}|}{|q_{34}|} =$$

$$\frac{dq}{T} = ds \rightarrow dq = T ds \rightarrow q = \int T ds$$

$$= 1 - \frac{T_1 \Delta S_{12}}{T_3 \Delta S_{34}} = 1 - \frac{T_{MIN}}{T_{MAX}}$$

$$\eta_S = 1 - \frac{T_{MIN}}{T_{MAX}}$$

pauci sono semplicemente trionfate.

N.B.

Il suo rendimento è uguale a quello di Carnot

N.B. Un apparecchio regenerativo assorbe un calore Q_1 nella fase $4 \rightarrow 1$ e lo restituisce nella fase $2 \rightarrow 3$.

$$\rightarrow \Delta S_1 = \Delta S_2 \text{ e } Q_1 = Q_2$$

~~Esercizio 3.3~~ Esercizio 4

Esercizio 3.3

• $PV = \text{costante}$

P_1
 V_1

P_2

ΔU

$$Q - dW = \Delta U + \Delta E_{\text{cin}}$$

$= 0$

$Q = ?$

$$Q = \Delta U + dW = \Delta U +$$

$$dW = d_1^{lu} = \Delta E_c$$

$$d_1^{lu} = dW = \int p dV$$

$$\rightarrow \int_{V_1}^{V_2} p dV = \int_{V_1}^{V_2} p_1 V_1 \frac{dV}{V} = p_1 V_1 \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = p_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}$$

$$d_1^{lu} = p_1 V_1 \ln \frac{p_2}{p_1}$$

$$Q = \Delta U + p_1 V_1 \ln \frac{p_2}{p_1}$$

reversibile

$$T_1 = 850 \text{ K}$$

$$T_2 = 300 \text{ K}$$

$$W = 150 \text{ Btu}$$

Q_{MIN} da T superiore

Svolgimento mio

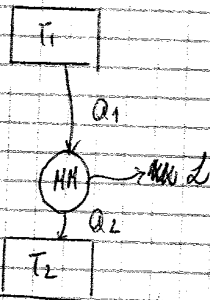
$$Q - W = 0$$

$$\rightarrow Q = W$$

$$Q = |W| = -|Q_1| + |Q_2|$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0 &\rightarrow \frac{|Q_2|}{T_2} - \frac{|Q_1|}{T_1} = 0 \\ |W| = |Q_2| - |Q_1| \end{aligned} \right.$$

Svolgimento prof.



$$\eta = \frac{|L|}{|Q_1|}$$

$\eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$. Il minimo lavoro si ottiene con le condizioni migliori (Ciclo di Carnot)

$$\frac{|L|}{|Q_1|} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \rightarrow |Q_1|_{\text{MIN}} = \frac{|L|}{1 - \frac{T_2}{T_1}}$$

$$|Q_2| = |Q_1|_{\text{MIN}} - |L|$$

prove

$$\Delta S = \int_{T=0}^{\frac{Q}{T}} \frac{Q}{T} + S_{\text{irr}} \Big|_{T=0}$$

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 + \Delta S_{\text{HH}} = 0$$

4.3

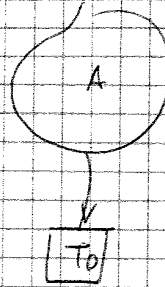
$$\Delta S^{\text{TOT}} = \Delta S_A + \Delta S^{\text{HARE}}$$

$$\Delta S = M \Delta S$$

$$dS = c \frac{dT}{T} \rightarrow \Delta S = c \ln \frac{T_{\text{fin}}}{T_{\text{in}}}$$

$$\Delta S = M c \ln \frac{T_0}{T_A} = c \ln \frac{T_0}{T_A}$$

$$\Delta S^{\text{HARE}} = \frac{|Q|}{T_0} + \int_{L=0}^L \frac{dQ}{T}$$



$$Q - \int_{L=0}^L \mu dx = \Delta U + \int_{L=0}^L \mu dx$$

$$Q = \Delta U \oplus$$

$$d\mu = c dT$$

$$\Delta \mu = c \Delta T$$

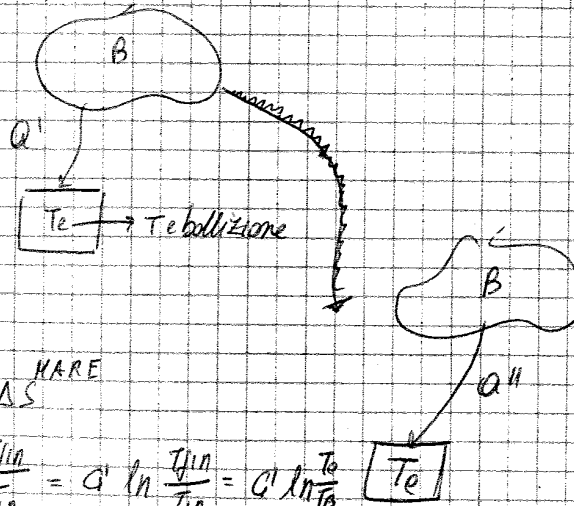
$$\oplus \underbrace{M c (T_0 - T_{\text{in}})}_Q$$

$$\Delta S^{\text{TOT}} = 89,7 \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

$$\Delta S^A = -272,4 \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

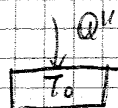
$$\Delta S^{\text{HARE}} = 362,1 \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

CASO B



$$\Delta S^{\text{TOT}} = \Delta S^B + \Delta S^{\text{VASCIA}} + \Delta S^{\text{HARE}}$$

$$\Delta S^B = M \Delta \tilde{S} = M c \ln \frac{T_{\text{fin}}}{T_{\text{in}}} = Q' \ln \frac{T_{\text{fin}}}{T_{\text{in}}} = Q' \ln \frac{T_0}{T_e}$$



Esercizio 5.1

$T_0 = 600 K$

$p_0 = 10 \text{ bar}$

$\sum_{\text{turb}} \xi = 89\%$

Condizioni stazionarie

$p_{\text{sub}} = 1 \text{ bar}$

$\frac{W}{H} = ?$

$T_f = ?$

$W_{10} = ?$

SVOLGIMENTO N10

$\sum_{\text{turb}} \xi = \frac{|h_{\text{REALE}}|}{|h_{\text{IDEALE}}|} =$

$$\phi - W_{\text{te}} = \frac{d}{dt} \left(\frac{E_c + E_p + h}{L=0} \right) + \sum_{i=1}^{NC} G_i (e_c + e_p + h)$$

$$\phi - W_{\text{te}} = G_i (e_c + e_p + h)$$

$$\phi - W_{\text{te}} = Q - \dot{L} = H (\dot{m}_{\text{entrate}} - \dot{m}_{\text{uscita}})$$

$$\phi - W_{\text{te}} = (\dot{m}_{\text{entrate}} - \dot{m}_{\text{uscita}})$$

$$W_{\text{te}} = \dot{m}_{\text{uscita}} - \dot{m}_{\text{entrate}}$$

$$pN = R^A T \rightarrow N = \frac{R^A T}{P}$$

$$N_{\text{uscita}} = \frac{R^A T_f}{P_f}$$

$$P_A N_A = P_B N_B$$

$$P_A N_A = R^A T_A$$

$$R^A T_A = P_B N_B \rightarrow \text{risultato}$$

$$pN^r = \text{cost}$$

$$\rightarrow P_A N_A^r = P_B N_B^r \rightarrow \frac{P_A}{P_B} = \left(\frac{N_B}{N_A} \right)^r =$$

$$pN^s = T V^{r-1} \rightarrow T_p$$

Esercizio 5.2

$$G = 0,02 \frac{kg}{s}$$

$$p_0 = 2 \text{ bar} \quad T_0 = 50^\circ C$$

$$p_f = 20 \text{ bar}$$

$$Z_s = 83\%$$

$$\Delta t = 1 \text{ h}$$

$$l_E = ?$$

$$l_{sp} = ?$$

$$\Delta S = ?$$

Svolgimento mio

$$\begin{cases} p \cdot v^r = \text{cost} \\ p \cdot v = R \cdot T \end{cases} \rightarrow v = \frac{R \cdot T}{p}$$

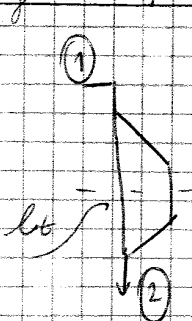
$$\rightarrow p \left(\frac{R \cdot T}{p} \right)^r = \text{cost} \rightarrow T \cdot p^{\frac{1-r}{r}} = \text{cost}$$

$$T_0 p_0^{\frac{1-r}{r}} = T_f p_f^{\frac{1-r}{r}}$$

$$\rightarrow T_{fi} = T_0 \left(\frac{p_0}{p_f} \right)^{\frac{1-r}{r}}$$

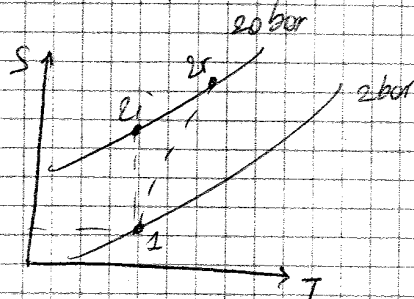
$$\int_0^L -w_t = G_i (\Delta h) \rightarrow w_t = -G (\Delta h)$$

Svolgimento prof



- ① P
- T
- ② P

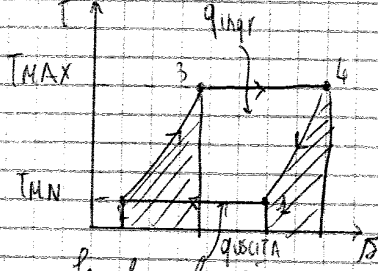
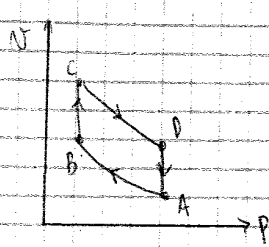
$$Z_{s, \text{COM}} =$$



$$|l_E| = c_p (T_2 - T_1)$$

$$Z_s = \frac{l_{OE}}{l_{RE}} \Rightarrow l_R = \frac{l_{IO}}{Z_{s, \text{COMP}}} \rightarrow l_R = \frac{c_p (T_2 - T_1)}{Z_s}$$

comparazione ciclo di Stirling



Se il ciclo è a gas ideale, i due colori coincidono.

Rendimento

$$\eta = 1 - \frac{T_{MIN}}{T_{MAX}}$$

