



**Appunti universitari**

**Tesi di laurea**

**Cartoleria e cancelleria**

**Stampa file e fotocopie**

**Print on demand**

**Rilegature**

**NUMERO: 2158A**

**ANNO: 2017**

# **A P P U N T I**

**STUDENTE: Casari Silvia**

**MATERIA: Termodinamica applicata e trasmissione del calore -  
Prof Giaretto**

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.**

SE NON HO  
DIFFERENZE DI  
PRESSIONE IL  
FLUIDO NON  
SI MUOVE!

$$\bar{R} = 8314,3 \frac{J}{kmol K}$$

$$R_{aria} = 287 \frac{J}{kg K}$$

ARIA  $\rightarrow$  biatomica  $\rightarrow \gamma = 1,4$

$$c_{p,aria} = 1004,5 \frac{J}{kg K}$$

$$c_{v,aria} = 717,5 \frac{J}{kg K}$$

LAVORO INTERNO ( $L_i$ ):

- il gas compie  $L_i$  se forza  
contro qualcosa che si oppone  
alla sua espansione

ESPANSIONE  
VERSIL VUOTO  $\Rightarrow$  NO  $L_i$

- MESCOLAMENTO DI  
LIQUIDI

$$\Downarrow$$

$$L_i = 0 J$$

ADIABATICA REVERSIBILE

$\Downarrow$   
ISOENTROPICA

ADIABATICA NON REVERSIBILE

~~ISOENTROPICA~~  
NON ISOENTROPICA

PROCESSO LENTO

$\Downarrow$   
ISOTERMO  
REVERSIBILE

PROCESSO VELOCE

$\Downarrow$   
ADIABATICO

$$R_{O_2} = 259,83 \frac{J}{kg K}$$

$$R_{He} = 2077,04 \frac{J}{kg K}$$

$$G = \frac{G_v}{v}$$

Teorema dell'ENERGIA CINETICA

$$h_t + h_o + h_a + \Delta e_c + \Delta e_p + \int_p v dp = 0$$

Umberto.lucia @polito.it

venere

1° piano Ufficio 11

interno 4558

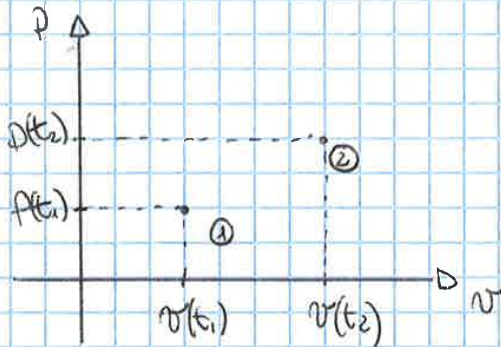
carlo.cima @polito.it

**Stato termodinamico** → insieme dei valori assunti in un certo istante di tempo dalle grandezze termodinamiche **INDIPENDENTI**

**SPAZIO DEGLI STATI** : rappresentazione geometriche

$p(t_1), p(t_2), \dots$

$v(t_1), v(t_2), \dots$



Grandezze di stato → base

Stato in  $t$  → punto

**EQUILIBRIO** → condizione di uno stato a mantenere **COSTANTI NEL TEMPO** i valori delle sue grandezze termodinamiche

meccanico

termico

chimico

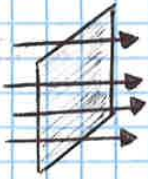
} invarianti  
rispetto al  
tempo

{  $p, F$   
 $T$   
 $n_i$  (numero di molecole)

**PROCESSO** → non consente l'equilibrio

- semplice
- composto
- ciclico → ritorno allo stato iniziale
- diretto → fornisco calore e ottengo lavoro
- inverso → facciamo noi lavoro e otteniamo calore
- reversibile → posso tornare al punto iniziale ripercorrendo le fasi
- irreversibile

**PORTATA** → variazione nel tempo della massa di fluido che attraversa una sezione



$$G = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{m}{\Delta t}$$

generalmente  $\dot{m}$  anziché  $G$

$m \rightarrow$  massa

$\Delta t \rightarrow$  tempo (variazione)

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot A \cdot l$$

$$G = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left( \frac{\rho \cdot A \cdot l}{\Delta t} \right) = \rho \cdot A \cdot \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left( \frac{l}{\Delta t} \right) = \rho \cdot A \cdot v$$

**PORTATA IN MASSA**

Se NON CAMBIA la densità:

$$G_v = \frac{G}{\rho} = A \cdot v$$

**PORTATA IN VOLUME**

**DENSITÀ**

↓  
distribuzione di massa su un volume

grandezze di 2 tipi:

**INTENSIVE**

↓  
NON dipendono dalla massa

**ESTENSIVE**

↓  
dipendono dalla massa



$$\frac{dz}{dt} = \left( \frac{\partial z}{\partial t} \right)_{vc} + \sum_i \pm G_i z_i$$

$$z = m \cdot \bar{z}$$

**DERIVATA MASSICA SOSTANZIALE**

STAZIONARIETÀ:  $\left( \frac{\partial z}{\partial t} \right)_{vc} = 0$

In caso di STAZIONARIETÀ tutto ciò che cambia DIPENDE SOLO DAL BORDO

# LAVORO E POTENZA

$$L = \vec{F} \cdot \vec{x} = \Delta E$$

effetto di un processo [J] SCAMBIO ENERGETICO

$$P = \frac{L}{t} = \vec{F} \cdot \frac{\vec{x}}{t} = \vec{F} \cdot \vec{v}$$

efficacia di un processo [W]

CHILOGRAMMO FORZA  $kgf = 1 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ ms}^{-2} = 9,81 \text{ J}$   
 $kcal = 4,187 \text{ kJ}$

$$E = \int_0^t P dt$$

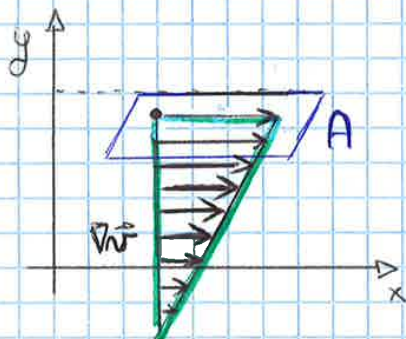
→ nei sistemi chiusi ⇒ energia

nei sistemi aperti ⇒ dimensiono in potenza

$$P = G \cdot e$$

e → energia per unità di massa  
 G → portata

## TENSIONE SUPERFICIALE →



$$\tau = \frac{F_{||}}{A} = \mu \frac{dv}{dy}$$

VISCOSITÀ DINAMICA  
 (dipende dal fluido)

- GRADIENTE DI VELOCITÀ ALE DIVERSE PROFONDITÀ DEL FLUIDO

7 ottobre 2016

**SISTEMA ISOLATO** → NON interagisce con l'esterno

La risultante delle forze agenti sul sistema è nulla.

**SISTEMA NON ISOLATO** → La risultante delle forze agenti sul sistema NON è nulla

Forze interne

$F_i$

Lavoro delle forze interne

$L_i$

**SISTEMA OMOGENEO**

$$\delta L_i = F \cdot dx = \frac{F}{A} \cdot A \cdot dx = p \, dV$$

$$L_i^{id} = \int p(T, V) \, dV$$

$$W_i^{id} = p \frac{dV}{dt}$$

$$\Rightarrow L_i^{id} = \int p \frac{dV}{dt} \, dt$$

**SISTEMA CON DISSIPAZIONI e IRREVERSIBILITÀ**

$$L_i = L_i^{id} - L_{ai}$$

$$\begin{cases} L_{ai} > 0 \text{ SEMPRE} \\ L_{ai} = 0 \text{ sistemi IDEALI} \end{cases}$$

$$W_i = W_i^{id} - W_{ai}$$

$$W_{ai} > 0 \text{ SEMPRE}$$

**IDEALE** → NON c'è ATTRITO, il sistema non perde energia



• Considerando la superficie di separazione

$$\left. \begin{aligned} W_i + \underbrace{W_{es}^s + W_{es}^d}_{W_{es}} &= \frac{dE_c}{dt} \\ L_i + L_{es} &= \Delta E_c \end{aligned} \right\} \rightarrow \begin{cases} W_i - W_{se} = \frac{dE_c}{dt} \\ L_i - L_{se} = \frac{dE_c}{dt} \end{cases}$$

ma

$$W_i = p \frac{dV}{dt} - W_{ai}$$

$$L_i = \int p dV - L_{ai}$$

$$W_{se} = W_{se}^s + W_{ae}$$

$$L_{se} = L_{se}^s + L_{ae}$$

$$W_{se}^d = \frac{dE_p}{dt}$$

$$L_{se}^d = \Delta E_p$$

$$\underbrace{p \frac{dV}{dt}}_{W_i} - \underbrace{W_{ai} - W_{se}^s - W_{ae}}_{-W_{se}^s} - \underbrace{\frac{dE_p}{dt}}_{-W_{se}^d} = \frac{dE_c}{dt}$$

$L_i \rightarrow$  CAMBIA VOLUME  
 $L_t \rightarrow$  HO UN ORGANO MECCANICO

$$\int p dV - L_{ai} - L_{se}^s - L_{ae} - \Delta E_p = \Delta E_c$$

$$W_{se}^s = W_t + p_0 \frac{dV}{dt}$$

$\rightarrow$  POTENZA TECNICA

$$L_{se}^s = L_t + p_0 \Delta V$$

$\rightarrow$  LAVORO TECNICO

$$p \frac{dV}{dt} - W_{ai} - W_t - \underbrace{p_0 \frac{dV}{dt}}_{W_o} - W_{ae} - \frac{dE_p}{dt} = \frac{dE_c}{dt}$$

$$\int p dV - L_{ai} - L_t - \underbrace{p_0 \Delta V}_{L_o} - L_{ae} - \Delta E_p = \Delta E_c$$

$$W_t = p \frac{dV}{dt} - W_a - W_o - \frac{dE_p}{dt} - \frac{dE_c}{dt}$$

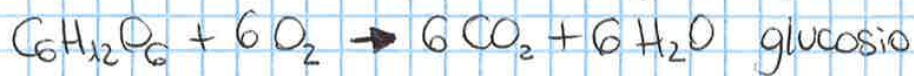
$$L_t = \int p dV - L_a - L_o - \Delta E_p - \Delta E_c$$

NB:  
 $W_a = W_{ai} + W_{ae}$

PROCESSO ESOTERMICO → calore verso l'ambiente

PROCESSO ENDOTERMICO → calore dall'ambiente

→ x es. l'ossidazione di composti organici (combustione)



METABOLISMO → insieme di reazioni chimiche utili a generare, accumulare e utilizzare energia utile alla vita  
→ CONVERSIONE DI ENERGIA

CATABOLISMO → ossidazione di nutrienti per compiere lavoro  
→ COMBUSTIONE CONTROLLATA

ANABOLISMO → biosintesi di molecole e macromolecole

## EQUAZIONE dei GAS IDEALI

$$pV = nRT$$

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

$$T_1 - T_2 \sim p_2 - p_1 = \frac{1}{2} \rho w^2$$

per ogni cammino  $\Gamma$  esiste uno ed un solo integrale della differenza del calore e del lavoro

$$\forall \Gamma \exists! \int_{\Gamma} (\delta Q - \delta L_{se}) = E_B - E_A$$

lavoro

STATO FINALE meno STATO INIZIALE

$dE$  DIFFERENZIALE ESATTO

$E$  ENERGIA TOTALE del sistema (FUNZIONE DI STATO)

Il sistema è adiabatico, lavora dentro di sé

$$Q - L_{se} = \Delta E$$

$$L_{se} = L_i - \Delta E_c$$

$$\left. \begin{array}{l} Q - L_{se} = \Delta E \\ L_{se} = L_i - \Delta E_c \end{array} \right\} Q - L_i = \Delta E - \Delta E_c$$

ma  $\Delta E - \Delta E_c = \Delta U$

lavoro meccanico → energia che MUOVE il mio sistema

$U$  → ENERGIA INTERNA

Funzione di stato!

**I PRINCIPIO PER SISTEMI CHIUSI**

$$Q - L_i = \Delta U$$

$$q - l_i = \Delta u$$

$$\Phi - W_i = \frac{dU}{dt}$$

$\Phi$  → POTENZA TERMICA  
 $W_i$  → POTENZA MECCANICA INTERNA

In presenza di dissipazioni

$$(Q + L_a) - L_i^{id} = \Delta U$$

Se si introduce il lavoro tecnico

$$Q - (L_t + L_o) = \Delta U + \Delta E_p + \Delta E_c$$

Grandezze estensive, dipendono dalla massa

CIMA:

Impianto qualsiasi (turbina, evaporatore...)  
La portata di ingresso è la stessa di quella di uscita?

SE IL SISTEMA STA LAVORANDO IN CONDIZIONI STAZIONARIE SÌ.

$$\frac{dE_p}{dt} = \left( \frac{\partial E_p}{\partial t} \right)_{V_c} + \left[ \sum_i (\pm G_i) e_{pi} \right]_{Sc}$$

$$\frac{dE_c}{dt} = \left( \frac{\partial E_c}{\partial t} \right)_{V_c} + \left[ \sum_i (\pm G_i) e_{ci} \right]_{Sc}$$

$$\frac{dU}{dt} = \left( \frac{\partial U}{\partial t} \right)_{V_c} + \left[ \sum_i (\pm G_i) u_i \right]_{Sc}$$

ciò che succede sul volume di controllo

quello che succede sul bordo

- $L_o$  → LAVORO SPESO PER DEFORMARE L'AMBIENTE ESTERNO
- $L_{sp}$  → LAVORO SPESO PER FAR TRANSITARE I FLUSSI DI MASSA ATTRAVERSO LA SC
- $L_t$  → LAVORO TECNICO, QUELLO UTILE SCAMBIATO CON L'ESTERNO



LAVORO DI SPOSTAMENTO

$$L_{sp} = p A \hat{n} \cdot \Delta \vec{x} = pV$$

POTENZA DI SPOSTAMENTO

$$W_{sp} = G p v$$

SE VOGLIO MUOVERE QUALCOSA DENTRO UN TUBO DEVO CREARE UNA DIFFERENZA DI PRESSIONE

$$W_{se}^s = W_t + W_{sp} + W_o$$

$$W_i = W_t + W_{sp} + W_o + \frac{dE_p}{dt} + \frac{dE_c}{dt}$$

$$W_{sp} = \frac{d(pV)}{dt} = p \frac{dV}{dt} + V \frac{dp}{dt} \quad \Rightarrow \quad W_i - W_{sp} = -V \frac{dp}{dt}$$

$$W_i = p \frac{dV}{dt}$$

$$W_o = p_o \frac{dV}{dt}$$

$$W_t + W_a + V \frac{dp}{dt} + W_o + \frac{dE_p}{dt} + \frac{dE_c}{dt} = 0$$

equaz. di Bernoulli → DIVIDO PER G

$$l_t + l_o + l_a + v(p_u - p_e) + g(z_u - z_e) + \frac{1}{2}(w_u^2 - w_e^2) = 0$$

EQUAZIONE DELL'ENERGIA CINETICA PER SISTEMI A DEFLUSSO

## In CONDIZIONI STAZIONARIE

$$\Phi - W_t = G (\Delta h + \Delta e_p + \Delta e_c)$$

$$q - l_t = \Delta h + \Delta e_p + \Delta e_c$$

$$l_i = l_i^{id} - l_a$$

Per un SIST. CHIUSO spariscono le portate

$$\Phi - W_t = \frac{d}{dt} H_o$$

$$\Phi - W_t = \frac{dU}{dt}$$

$$\Phi - W_t = \frac{dH}{dt}$$

I principio  
per SISTEMI  
CHIUSI

$$\Delta(pv) = \underbrace{\Delta p \cdot v}_{l_t} + \underbrace{p \Delta v}_{l_i}$$

Se non sposto materia il lavoro di spostamento diventa nullo  $\Rightarrow l_t = l_i$

$$\Downarrow$$

$$\Delta H = \Delta U$$

$$C_v = \frac{1}{M} \left( \frac{dU}{dT} \right)_v \Rightarrow dU = M C_v dT$$

$$\delta Q = T dS \Rightarrow C_v = \frac{T}{M} \left( \frac{dS}{dT} \right)_v = T \left( \frac{ds}{dT} \right)_v$$

## ENTROPIA

Quando brucio qualcosa, quanto calore massimo emette?

Grandezza che caratterizza il comportamento del nostro sistema

quando c'è un CAMBIAMENTO DI STATO

il calore diviso la temperatura permette di ottenere un differenziale esatto

$$\frac{\delta Q}{T} = dS$$

## CALORE SPECIFICO A PRESSIONE COSTANTE

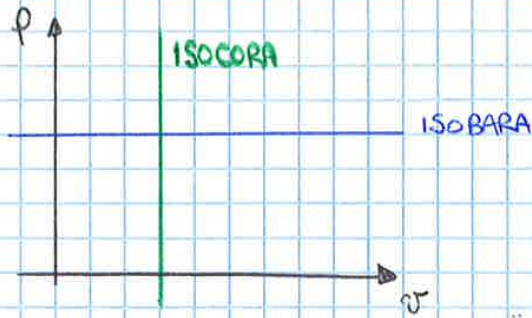
$$C_p = \frac{1}{M} \left( \frac{\delta Q}{dT} \right)_p$$

$$\begin{array}{l} \text{1° principio} \\ \delta Q - \delta L_i = dH \\ \delta L_i = 0 \end{array} \quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} \text{1° principio} \\ \delta Q - \delta L_i = dH \\ \delta L_i = 0 \end{array}} \right\} \delta Q = dH$$

⇓

$$C_p = \frac{1}{M} \left( \frac{dH}{dT} \right)_p \Rightarrow dH = M C_p dT, \quad dh = C_p dT$$

$$\delta Q = T dS \Rightarrow C_p = \frac{T}{M} \left( \frac{dS}{dT} \right)_p = T \left( \frac{ds}{dT} \right)_p$$

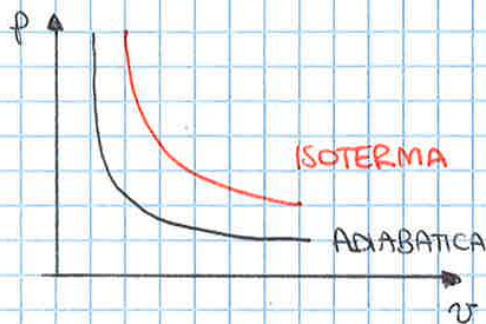


ISOBARA →  $p = \text{cost}$

ISOCORA →  $v = \text{cost}$

**ADIABATICA:** sistema che NON SCAMBIA CALORE con l'esterno

$p v = R T$  eq. di stato



IPERBOLE EQUILATERA

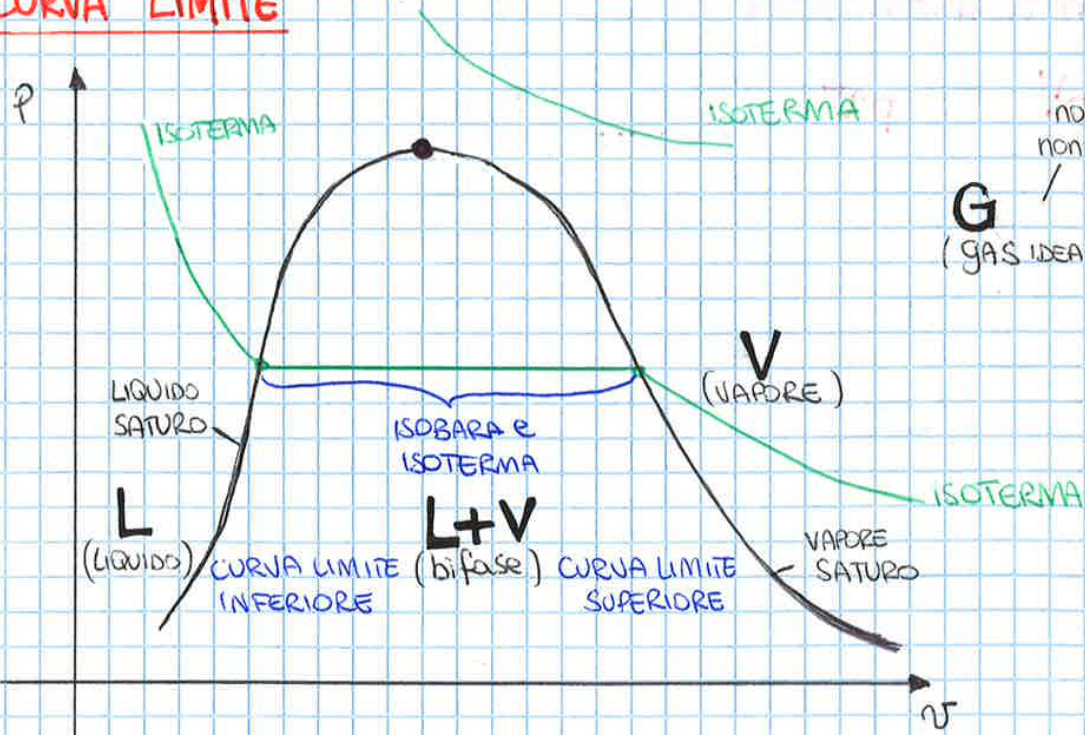
↳  $T = \text{cost}$

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

$p = \frac{\text{cost}}{v^n}$

IPERBOLE EQUILATERA COMPRESSA

**2) CURVA LIMITE**



non interagisce, non può più condensare

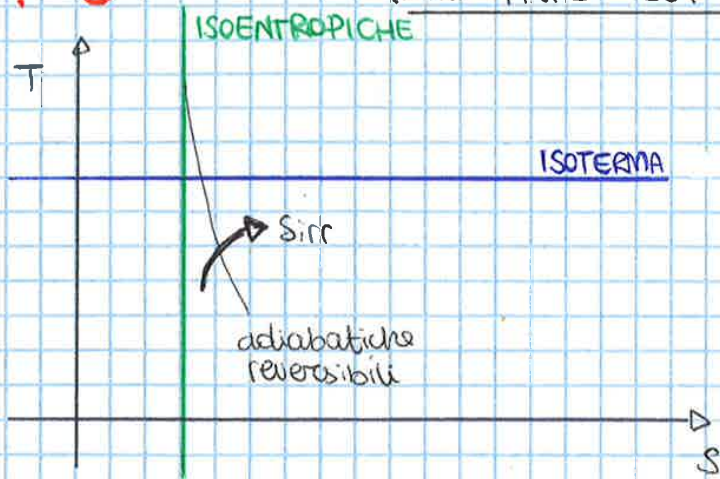
**G** (GAS IDEALE)

LIQUIDO SATURO → liquido con bolle, liquido che sta per diventare vapore

VAPORE SATURO → vapore con delle gocce

# 4) T S

(da INFO SUI CALORI)



- ISOTERME  $T = \text{cost}$

- ISOENTROPICHE

$S = \text{cost}$

adiabatiche reversibili

- ISOBARA  $p = \text{cost}$

$$\delta q = c_p dT \Rightarrow dT = \frac{\delta q}{c_p} \quad ds = \frac{\delta q}{T}$$

$$\left(\frac{dT}{ds}\right)_{\text{isobara}} = T \frac{dT}{\delta q} = \frac{T}{c_p} \frac{dT}{dT} = \frac{T}{c_p}$$

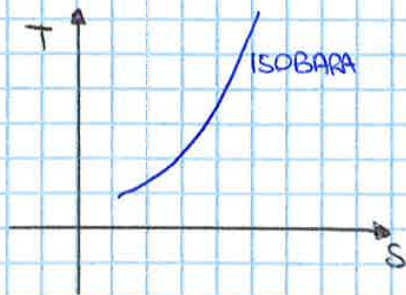
ciò che posso fare sul sistema

Non ho effetti termici  $\Rightarrow$  No dilataz voluminiche

se  $c_p \approx \text{cost}$  (intervallo di T molto piccolo)

$$\frac{dT}{T} = \frac{1}{c_p} ds$$

$$\ln \frac{T}{T_0} = \frac{1}{c_p} (s - s_0) \Rightarrow T = T_0 e^{\frac{s - s_0}{c_p}}$$



processo in condiz  
ISOBARE

equazione dell'isobara



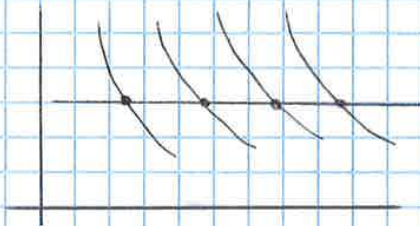
$$pV = RT$$

• se  $T = \text{cost}$  (ISOTERMA)

$$p_1 v_1 = p_2 v_2$$

• se  $p = \text{cost}$  (ISOBARA)

$$v = \frac{RT}{p}$$



• se ADIABATICA

$$p_1 v_1^\gamma = p_2 v_2^\gamma$$

$\gamma > 1$  iperbole molto schiacciata

$$C = C_v \frac{n-\gamma}{n-1}$$

$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$

$$Cn - C = C_v n - C_v \gamma$$

$$Cn - C = C_v n - C_p$$

$$(C - C_v) n = C - C_p$$

$$n = \frac{C - C_p}{C - C_v}$$

Ⓛ → LAVORO SISTEMA - ESTERNO

$$p_1 v_1^n = p v^n \rightarrow p = p_1 \frac{v_1^n}{v^n}$$

$$\begin{aligned} \ell &= \int_1^2 p dv = p_1 v_1^n \int_1^2 \frac{dv}{v^n} = p_1 v_1^n \left. \frac{v^{1-n}}{1-n} \right|_1^2 = \\ &= \frac{1}{n-1} (p_1 v_1^n v_1^{1-n} - p_2 v_2^n v_2^{1-n}) = \frac{p_1 v_1 - p_2 v_2}{n-1} \end{aligned}$$

GAS PERFETTI  $pV = RT \Rightarrow \ell = R \frac{T_1 - T_2}{n-1}$

Non ho turbine  $\Rightarrow$  1° principio

Nel tubo il fluido può anche condensare.

Presumiamo che il fluido sia isoterma; anche l'ambiente esterno è supposto isoterma

$$Q - L_t = \Delta H$$

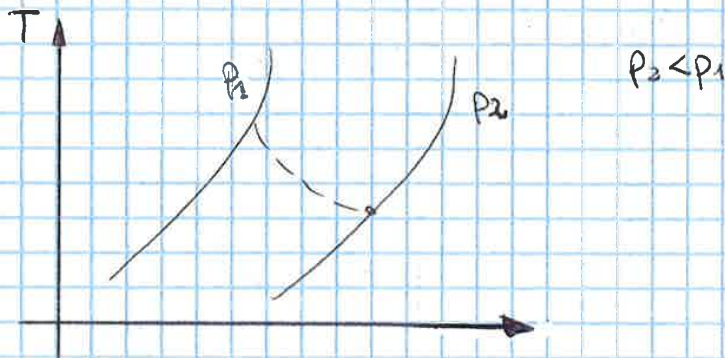
$$Q = 0 \text{ J} \quad \text{perché non ho differenze di temperatura}$$

$$L_t = 0 \text{ J} \quad \text{perché non ho elementi meccanici}$$

$$\Delta H = 0$$

$$H_u - H_i = 0$$

$$h_u = h_i$$



La p a fine tubo leggermente più piccola

Se non ho differenze di pressione il fluido non si muove

1° principio

$$W_t = G (h_1 - h_2)$$

2° principio

$$\sum_i s_i = G (s_2 - s_1) \geq 0$$

RENDIMENTO  
DI ESPANSIONE

$$m_e = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2,rev}} \leq 1$$

$h_2^{id}$

1°  
PRINC.  
SIST.  
APERTI

$$\phi - W_t = \frac{d}{dt} (H_o + E_c + E_p)_{vc} + G (h + e_c + e_p)_u - G (h + e_c + e_p)_i$$

portata di uscita  
= portata di ingresso

Analizziamo:

- c'è  $W_t$  perché ho un organo meccanico
- non può acquistare calore dall'esterno, né lo cede  $\Rightarrow \phi = 0$  ADIABATICO
- In condizioni stazionarie il volume di controllo non cambia  $\Rightarrow \frac{d}{dt} (\dots)_{vc} = 0$
- $e_c \rightarrow$  non si muove la turbina  $\Rightarrow e_c = 0$
- $e_p \rightarrow$  la turbina non "casca per terra"  $\Rightarrow e_p = 0$

$\Downarrow$

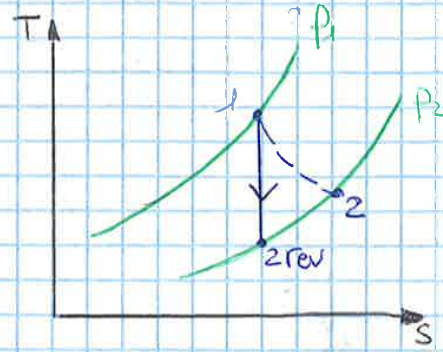
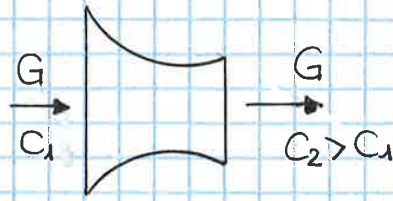
$$-W_t = G (h_u - h_i)$$

$$W_t = G (h_i - h_u)$$

## UGELLO CONVERGENTE

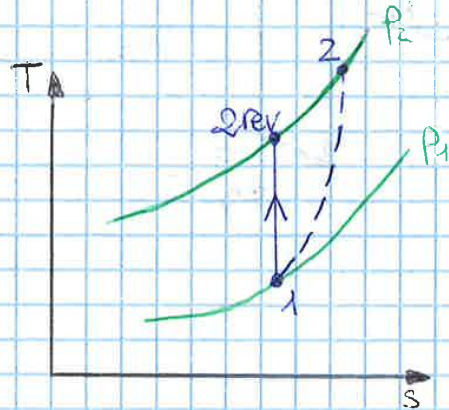
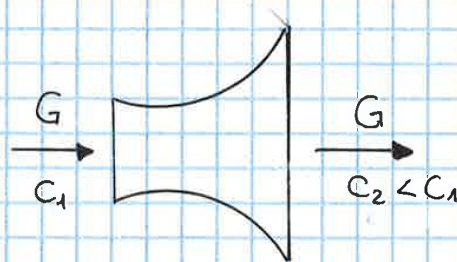
c velocità

(x es. phòn)



## UGELLO DIVERGENTE

(x es. diffusore)

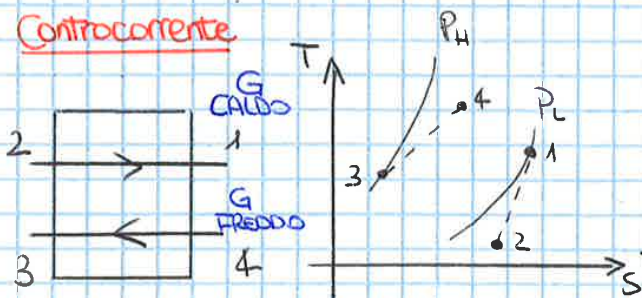


Se cambio sezione cambio velocità

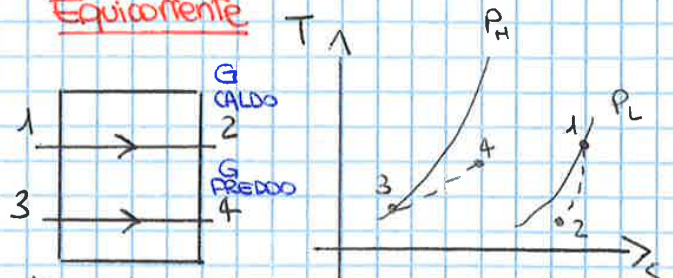
	DIVERGENTE	CONVERGENTE
1° PRINCIPIO	$h_2 - h_1 = \frac{1}{2}(c_1^2 - c_2^2)$	$h_1 - h_2 = \frac{1}{2}(c_1^2 - c_2^2)$
2° PRINCIPIO	$\sum_i = G(s_2 - s_1) \geq 0$	
RENDIMENTO	$\eta_d = \frac{h_{2,rev} - h_1}{h_2 - h_1}$	$\eta_c = \frac{c_2^2 - c_1^2}{c_{2,rev}^2 - c_1^2}$

## SCAMBIATORI DI CALORE

Controcorrente



Equicorrente



1° princ.  $G_{caldo}(h_1 - h_2) = G_{freddo}(h_4 - h_3)$       2° princ.  $\sum_i = G_{caldo}(s_2 - s_1) + G_{freddo}(s_4 - s_3) \geq 0$

## • Entalpia

$$H = U + pV \quad \text{ENERGIA TOTALE}$$

$$h = u + p v$$

$$h = c_p T$$

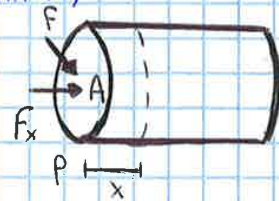


$c_p$  → calore specifico a **PRESSIONE COSTANTE**  $\left[ \frac{J}{kgK} \right]$

## • Lavoro di un gas ideale - Lavoro interno $L_i$ GRANDEZZA DI SCAMBIO

È l'effetto della proiezione di una forza sul baricentro o per noi sulla periferia del volume di controllo (→ sup. di controllo)

$$L_i = \vec{F} \cdot \vec{x} = F_x x = p A x = p \Delta V$$



## • Lavoro tecnico $L_t$

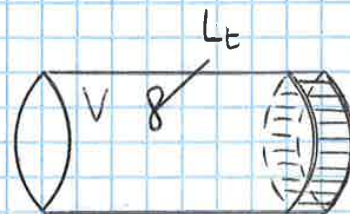
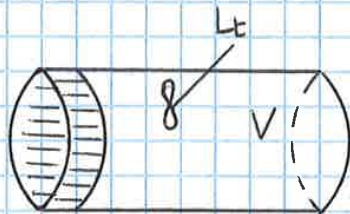
Avviene su un qualunque **COMPONENTE MECCANICO**

$V$  costante (V elemento tubo)

$$\text{Bernoulli} \quad p_1 = p_2 + \frac{1}{2} \rho w^2 \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{2} \rho w^2 = p_1 - p_2 \geq 0 \quad p_1 \geq p_2$$

$$\frac{1}{2} \rho w^2 = l_t = \frac{L_t}{V} \quad \Rightarrow \quad \frac{L_t}{V} = p_1 - p_2 \quad \Rightarrow$$

$$\Rightarrow L_t = (p_1 - p_2) V \quad \delta L_t = -V dp$$



No bisogno di un differenziale per integrarlo. Perché?

perché il differenziale è **PUNTUALE**: punto per punto vedo che succede.

(in un volume definito). **DIFFERENZIALE** ⇒ **DISTRIBUZIONE DI ENERGIA**

**INTEGRAZIONE** ⇒ **DISTRIBUZIONE, EFFETTO GLOBALE**

## Differenziale di $p \cdot v$

**GAS**  $p v = R T$

$$d(RT) = R dT = (c_p - c_v) dT = dh - du$$

$$q - l_i = du \quad \text{calore - lavoro generato da variaz volume}$$

$$q - l_t = dh \quad \text{calore - lavoro generato da lavoro mecc}$$

$$-l_t + l_i = dh - du$$

$$dh - du = l_i - l_t$$

**OGNI SOSTANZA**  $h = u + p v \Rightarrow dh - du = d(h - u) = d(p v)$

lavoro per muovere un fluido / LAVORO DI SPOSTAMENTO  $l_{sp}$

$$d(p v) = p dv + v dp$$

1)  $= 0$  se non spostato

2)  $= 0$  se lo spostam è trascurabile

$p_1 v_1 = p_2 v_2$  CASO 3) ISOTERMO

$$\Rightarrow d(p v) = 0$$

$$p dv = -v dp$$

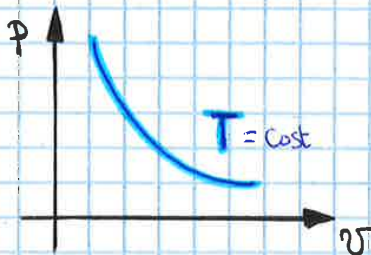
$$l_i = l_t$$

1) 2) 3) CASI IN cui  $d(p v) = 0$

## Trasform. ISOTERMA (T = cost)

$$p v = R T \Rightarrow p_1 v_1 = R T_1$$

$$p_2 v_2 = R T_2 \Rightarrow p_1 v_1 = p_2 v_2$$



$$\left. \begin{aligned} \Delta U &= m c_v \Delta T = 0 \text{ J} \\ \Delta H &= m c_p \Delta T = 0 \text{ J} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} Q &= L_i \\ Q &= L_t \end{aligned}$$



$$L_i = L_t$$

# Trasform. ADIABATICA ( $Q = 0 J$ )

$$\begin{cases} -\delta l_i = du \\ -\delta l_t = dh \end{cases}$$

Si realizza con materiali che ISOLANO, che conducano poco.

$$\begin{cases} \delta l_i = p dv \\ \delta l_t = -v dp \end{cases} \quad \begin{cases} du = c_v dT \\ dh = c_p dT \end{cases}$$

$$\begin{cases} -p dv = c_v dT \\ v dp = c_p dT \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} dT = -\frac{p dv}{c_v} \\ dT = v \frac{dp}{c_p} \end{cases}$$

faccio la differenza tra le eq

$$-p \frac{dv}{c_v} - v \frac{dp}{c_p} = 0$$

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

$$\frac{c_p}{c_v} \frac{dv}{v} + \frac{dp}{p} = 0 \Rightarrow \gamma \frac{dv}{v} + \frac{dp}{p} = 0$$

$$\ln v^\gamma + \ln p = \ln c$$

$$p v^\gamma = \text{costante}$$

$$p_1 v_1^\gamma = p_2 v_2^\gamma$$

$$v p^{\frac{1}{\gamma}} = \text{cost}$$

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

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

Si può vedere bene la differenza tra equazione di stato e trasformazione del processo

EQ DI STATO  $\rightarrow$  STO VEDENDO LO STATO  $\left\{ \begin{array}{l} \text{STATO 1 } p_1 v_1 = RT_1 \\ \text{STATO 2 } p_2 v_2 = RT_2 \end{array} \right.$

Tra stato 1 e stato 2

ho una TRASFORMAZIONE adiabatica  $\rightarrow p_1 v_1^\gamma = p_2 v_2^\gamma$

$$\begin{aligned}
 L_t &= - \int_{p_1}^{p_2} v \, dp = - p_1^{\frac{1}{\gamma}} v_1 \int_{p_1}^{p_2} p^{-\frac{1}{\gamma}} \, dp = - \frac{p_1^{\frac{1}{\gamma}} v_1}{-\frac{1}{\gamma} + 1} \left( p_2^{-\frac{1}{\gamma} + 1} - p_1^{-\frac{1}{\gamma} + 1} \right) = \\
 &= \frac{\gamma}{\gamma - 1} \left( p_2^{\frac{1}{\gamma}} v_2 p_2^{-\frac{1}{\gamma} + 1} - p_1^{\frac{1}{\gamma}} v_1 p_1^{-\frac{1}{\gamma} + 1} \right) = \frac{\gamma}{\gamma - 1} (p_2 v_2 - p_1 v_1)
 \end{aligned}$$

$$L_t = m \frac{\gamma}{\gamma - 1} (p_2 v_2 - p_1 v_1)$$

## Trasform. POLITROPICA

$$p v^n = \text{costante}$$

$$n = \frac{c - c_p}{c - c_v}$$

$$c = c_v \frac{n - \gamma}{n - 1}$$

$$n = \frac{\ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)}{\ln\left(\frac{v_1}{v_2}\right)}$$



Es. (N°2)

Calcolare la massa di aria contenuta in un recipiente di volume  $172,2 \text{ m}^3$  alla pressione di  $100 \text{ kPa}$  e alla  $T = 300 \text{ K}$

Dati:  $V = 172,2 \text{ m}^3$   
 $p = 100 \text{ kPa}$   
 $T = 300 \text{ K}$

consideriamo il gas come ideale (formule più semplici)

Eq dei gas  $\rightarrow$  sempre K  
 psicrometria  $\rightarrow$  anche  $^{\circ}\text{C}$

$$pV = mRT \quad m = \frac{pV}{RT} = \frac{100 \times 10^3 \cdot 172,2}{287 \cdot 300} = 200 \text{ kg}$$

no  $v$  volume specifico

Es. (N°3)

Calcolare la  $p$  esercitata da  $12 \text{ kg}$  di  $\text{N}_2$  in una bombola di  $0,4 \text{ m}^3$  di volume alla temperatura di  $20^{\circ}\text{C}$ . ( $\bar{M}_{\text{N}_2} = 28 \text{ kg/kmol}$ )

Dati  $\bar{M}_{\text{N}_2} = 28 \text{ kg/kmol}$   
 $m = 12 \text{ kg}$   
 $V = 0,4 \text{ m}^3$   
 $T = 20^{\circ}\text{C} = 293,15 \text{ K}$

bombola  $\rightarrow$  sicuramente  $V = \text{cost}$   
 ISOCORA  
 ma magari  $v$  varia

$$pV = m R_{\text{N}_2} T \Rightarrow p = \frac{m R_{\text{N}_2} T}{V}$$

$$R_{\text{N}_2} = \frac{\bar{R}}{\bar{M}_{\text{N}_2}} = \frac{8314}{28} = 296,8 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$$

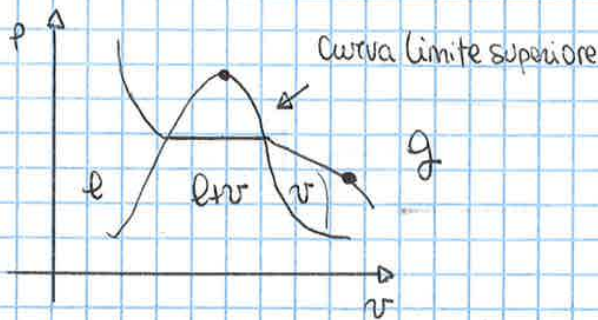
$$p = \frac{12 \cdot 296,8 \cdot 293,15}{0,4} = 2608872 \text{ Pa} = 2,609 \text{ MPa}$$

Se c'è massa c'è pressione

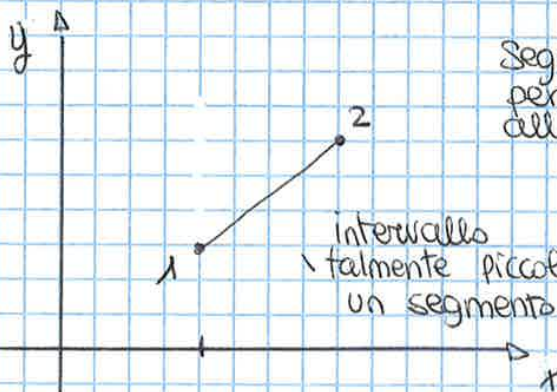
Vapore surriscaldato



oltre la curva limite!



lo consideriamo ancora gas IDEALE

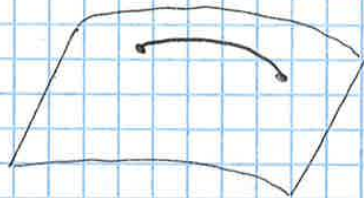


Segmento LINEARE SEMPRE perché è molto piccolo rispetto all'intervallo di misure disponibili

Intervallo talmente piccolo che unisco i punti con un segmento

⇓  
INTERPOLAZIONE LINEARE

Curva Boltzmann



tra un punto e l'altro ho tanti altri punti

## INTERPOLAZIONE LINEARE

$$\frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}$$

1)  $v$  (280°C, 13 bar)

INTERP. LINEARE  $v$  -  $p$

$$\frac{v - v_1}{v_2 - v_1} = \frac{p - p_1}{p_2 - p_1}$$

$$v_1 = 0,2480 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v_2 = 0,1200 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$p_1 = 10 \text{ bar}$$

$$p_2 = 20 \text{ bar}$$

ES. N°6

In una bombola da sub da 15L è contenuto ossigeno alla  $p$  di  $10 \text{ kg}_p \text{ cm}^{-2}$  alla  $T = 20^\circ\text{C}$ .

Determinare

- 1) la massa di ossigeno nella bombola
- 2) la pressione dopo che è stato utilizzato il 35% di ossigeno

Dati

$$V = 15\text{L} = 0,015 \text{ m}^3$$

$$p_1 = 10 \text{ kg}_p \text{ cm}^{-2} = \frac{10 \cdot 9,81}{10^{-4}} = 981.000 \text{ Pa} = 0,981 \text{ MPa}$$

$$T = 20^\circ\text{C} = 293,15 \text{ K}$$

Sottraiamo del gas che utilizziamo

$$pV = mRT \Rightarrow m_1 = \frac{p_1 V}{RT_1} = 0,175 \text{ Kg}$$

$$R = \frac{\bar{R}}{M_{O_2}} = 287 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$$

$$m_2 = m_1 (1 - 0,35) = 0,65 \cdot 0,175 = 0,114 \text{ kg}$$

$$p_2 V = m_2 R T_1 \Rightarrow p_2 = m_2 \frac{R T_1}{V} = 639419 \text{ Pa}$$

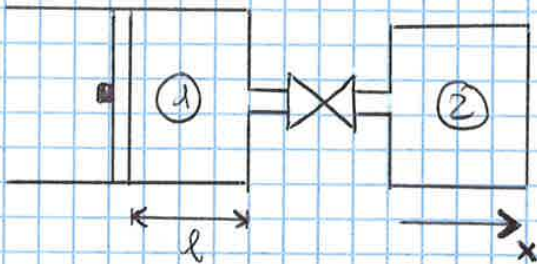
$$\Delta p = p_2 - p_1 = -341581 \text{ Pa}$$

Es. N°8

Un cilindro al cui interno può scorrere senza attrito uno stantuffo è posto in comunicazione con un serbatoio in pressione, attraverso un tubo regolato con una valvola. Lo spazio libero del cilindro ha lunghezza  $l = 20 \text{ cm}$  e contiene gas a 1 bar. Il serbatoio contiene gas a 4 bar. Determinare

- 1) lo spostamento dello stantuffo per movimento lento
- 2) " " " " " " " " veloce

Il gas è aria



• LENTAMENTE

Stati quasi stazionari  
 $\Leftrightarrow$  quasi REVERSIBILE, ISOTERMO

• VELOCEMENTE

stato che non scambia con l'ambiente  
 $\Leftrightarrow$  ADIABATICO

Dati

$p_1 = 1 \text{ bar}$

$p_f = p_2$

$p_2 = 4 \text{ bar}$

$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = 1,4$

$l = 20 \text{ cm} = 0,20 \text{ m}$

Sviluppiamento

$p_1 V_1 = p_2 V_2$

LENTO  $\Rightarrow$  ISOTERMO

$V_1 = A \cdot l$

$V_2 = A (l - x)$

$p_1 A \cdot l = p_2 A (l - x) \Rightarrow x = l \left( 1 - \frac{p_1}{p_2} \right) = 15 \text{ cm}$

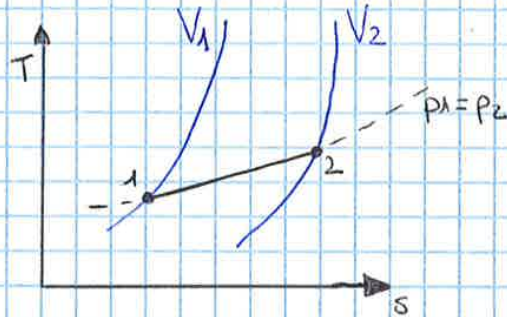
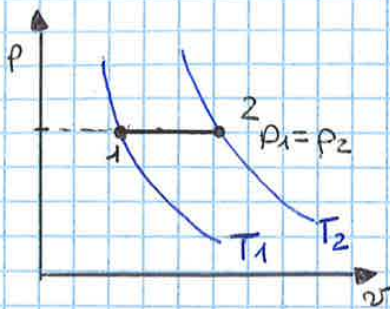
VELOCE  $\Rightarrow$  ADIABATICO

$p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma$

$p_1 (A l)^\gamma = p_2 [A (l - x)]^\gamma$

$x = l \left[ 1 - \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \right] = 12,57 \text{ cm}$

1) TRASFORMAZIONE ISOBARA



Stato 2

$$p_2 = p_1 = 5886 \text{ kPa}$$

$$V_2 = 0,3 \text{ m}^3$$

$$v_1 = \frac{V_1}{m} = \frac{0,1 \text{ m}^3}{7 \text{ kg}} = 0,01428571429$$

$$v_2 = \frac{V_2}{m} = \frac{0,3 \text{ m}^3}{7 \text{ kg}} = 0,04285714286$$

$$\left. \begin{array}{l} p_1 V_1 = m R T_1 \\ p_2 V_2 = m R T_2 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{faccio} \\ \text{il} \\ \text{rapporto} \end{array} \Rightarrow \frac{p_2}{p_1} \frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1} \Rightarrow \frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

$$T_2 = \frac{V_2}{V_1} T_1 = \frac{0,3}{0,1} \cdot 293,15 = 879,45 \text{ K} = 606,30^\circ \text{C}$$

Calore scambiato  $\delta q = dh - v dp$  ma  $dp = 0$

$$\delta q = dh$$

Entalpia  $Q_{12} = \Delta H_{12} = m c_p (T_2 - T_1) = 7 \cdot 1005 (879,45 - 293,15) = 4124620,5 \text{ J} = 4,124 \text{ MJ}$

Variatione en-internal  $du = c_v dT$

$$\Delta U = m c_v (T_2 - T_1) = 7 \cdot 717,95 (879,45 - 293,15) = 2946338,595 \text{ J} = 2,946 \text{ MJ}$$

variazione di entropia  $\Delta S = m \int_1^2 ds = m \int_1^2 \frac{\delta q}{T} = m \int_1^2 c_p \frac{dT}{T} =$

$$= m c_p \ln \frac{T_2}{T_1}$$

$$\Delta S = 7 \cdot 1005 \cdot \ln \frac{879,45}{293,15} = 7728,7 \frac{\text{J}}{\text{K}} = 7,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

entalpia  $dh = c_p dT = 0$  [J]

en. interna  $du = c_v dT = 0$  [J]

entropia  $ds = \frac{\delta q}{T} = + \frac{\delta l}{T} = + p \frac{dv}{T} = + \frac{RT}{v} \frac{dv}{T} = R \frac{dv}{v}$

$\Delta S = + m R \int_1^2 \frac{dv}{v} = + m R \ln \frac{v_2}{v_1} = 7 \cdot 287,05 \ln \frac{0,3}{0,1} = 2207 \text{ J}$

lavoro  $L_{12} = m \int_1^2 \delta l = m \int_1^2 p dv = Q_{12} = 647 \text{ kJ}$

### 3) TRASFORMAZIONE ADIABATICA

$ds = \frac{\delta q}{T} = m c_v \frac{dT}{T} + m \frac{p dv}{T}$

È sbagliato dire che siccome è adiabatico non ho salto entropico!  
 Posso avere una VARIAZIONE DI ENTROPIA dovuta ad altri fenomeni.

Stato 2  $V_2 = 0,3 \text{ m}^3$   $T_1 = 293,15 \text{ K}$

$\gamma = 1,4$

ciò che avviene durante la trasformazione, non gli stati

$p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma \Rightarrow p_2 = p_1 \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^\gamma = 5886 \left( \frac{0,1}{0,3} \right)^{1,4} = 1264 \text{ kPa}$

$\left. \begin{matrix} p_2 V_2 = m R T_2 \\ p_1 V_1 = m R T_1 \end{matrix} \right\} \Rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{p_1 V_1} \Rightarrow T_2 = 189 \text{ K}$

$\delta q = dq = c_v dT + p dv = 0$  [J]  $\rightarrow$  perché adiabatico

$c_v dT = - p dv = - \delta l$

$L = - m c_v (T_2 - T_1) = 525 \text{ kJ}$

$\Delta U = -125 \text{ kJ}$

$\Delta H = m c_p \Delta T = 733 \text{ kJ}$

$\Delta S = \int \frac{\delta q}{T} = 0$  [J]

$\Delta T = (T_2 - T_1)$

SE L'ADIABATICA È REVERSIBILE  
 $\Downarrow$   
 ISOENTROPICA  
 NON REVERS.  $\nrightarrow$  ISOENTROPICA

Es (N°1)

Un recipiente a pareti adiabatiche è diviso in due parti da un setto adiabatico. La parte di volume  $10 \text{ m}^3$  contiene acqua a  $20^\circ\text{C}$ . La parte di volume  $2,5 \text{ m}^3$  contiene acqua a  $80^\circ\text{C}$ . Determinare la  $T$  che si raggiunge rimuovendo il setto per mescolamento adiabatico.

Dati

$V_1 = 10 \text{ m}^3$

$t_1 = 20^\circ\text{C} = 293,15 \text{ K}$

$V_2 = 2,5 \text{ m}^3$

$t_2 = 80^\circ\text{C} = 353,15 \text{ K}$

H.p.

$\rho = 1000 \text{ Kg m}^{-3}$  costante  $t_1 \leq t \leq t_2$

$C_p, C_v$  costanti  $t_1 \leq t \leq t_2$

Volumi diversi  
↓  
masse diverse

Svolgimento

PRINCIPIO:

$Q - L_i = \Delta U$

$Q = 0 \text{ J}$

$L_i = 0 \text{ J}$

$\Rightarrow \Delta U = 0 \text{ J} \rightarrow$  quella TOTALE

perché il mescolam. non implica lo spostam. di qualcosa  
SOLLO MESCOLOAMENTO  $\Rightarrow L_i = 0 \text{ J}$  NON C'È ESPANSIONE

che comporterebbe la presenza di  $L_i$

$\Delta U = \Delta U_1 + \Delta U_2 = 0 \text{ J}$

Variaz. energia interna del 1° sottosistema

$\rightarrow \Delta U_1 = m_1 c (t_m - t_1)$

$t$  mescolamento

Variaz. energia interna del 2° sottosistema

$\rightarrow \Delta U_2 = m_2 c (t_m - t_2)$

$m_1 c (t_m - t_1) + m_2 c (t_m - t_2) = 0$

LIQUIDO  $\Rightarrow C_v = C_p = C$

$m_1 (t_m - t_1) + m_2 (t_m - t_2) = 0$

$m_1 = \rho V_1$

$m_2 = \rho V_2$

$\Rightarrow \rho V_1 (t_m - t_1) + \rho V_2 (t_m - t_2) = 0$

$V_1 (t_m - t_1) + V_2 (t_m - t_2) = 0$

$V_1 t_m - V_1 t_1 + V_2 t_m - V_2 t_2 = 0$

$(V_1 + V_2) t_m = V_1 t_1 + V_2 t_2$

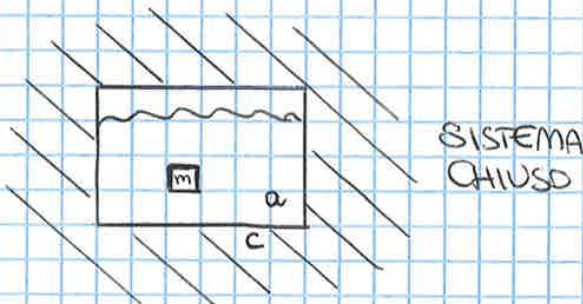
Es N°3

Determinare il calore specifico di un metallo in base ai risultati del seguente esperimento. Un contenitore termicamente isolato dall'esterno ha massa 3,6 kg ed è costituito dallo stesso metallo. Contiene 14 kg di H<sub>2</sub>O. Un elemento del metallo in studio di massa 1,8 kg, alla t = 180°C, viene immerso nell'acqua. Contenitore e H<sub>2</sub>O sono inizialmente a 16°C, la temp finale è t = 18°C.

Dati

$m_a = 14 \text{ kg}$      $c_a = 4186 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$   
 $m_c = 3,6 \text{ kg}$      $t_1 = 16^\circ\text{C} = 289,15 \text{ K}$   
 $m_m = 1,8 \text{ kg}$      $t_m = 180^\circ\text{C} = 453,15 \text{ K}$   
 $t_2 = 18^\circ\text{C}$

Svilgimento



$Q - L_i = \Delta U$   
 $L_i = 0 \text{ J}$   
 $Q = 0 \text{ J}$  ISOLATO     $\Rightarrow \Delta U = 0 \text{ J}$

$\Delta U = \Delta U_c + \Delta U_a + \Delta U_m$

$\Delta U_c = m_c c_m (t_2 - t_1)$   
 $\Delta U_a = m_a c_a (t_2 - t_1)$   
 $\Delta U_m = m_m c_m (t_2 - t_m)$

$\Delta U_c + \Delta U_a + \Delta U_m = 0$

$m_c c_m (t_2 - t_1) + m_a c_a (t_2 - t_1) + m_m c_m (t_2 - t_m) = 0$

$c_m = \frac{-m_a c_a (t_2 - t_1)}{m_c (t_2 - t_1) + m_m (t_2 - t_m)} = \frac{-14 \cdot 4186 \cdot 2}{3,6 \cdot 2 + 1,8 \cdot (-162)} = 412,12 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$



ENTALPIA DEL CAMBIO DI STATO

$$\Delta H_{se} = m_g h_{se}$$

→ il GHIACCIO ha bisogno di ENERGIA per CAMBIARE FASE

$$\Delta H_a = m_g C_a (t_f - t_{se})$$

0°C temp. di solidific. - liquefazione  
 il GHIACCIO è diventato acqua e si scalda ancora  
 → sino alla temperatura di equilibrio

$$\Delta H_c = m_c C_c (t_f - t_c)$$

→ caffè che si RAFFREDDA  $t_c > t_f$

$$m_g C_g (t_{se} - t_g) + m_g h_{se} + m_g C_a (t_f - t_{se}) + m_c C_c (t_f - t_c) = 0$$

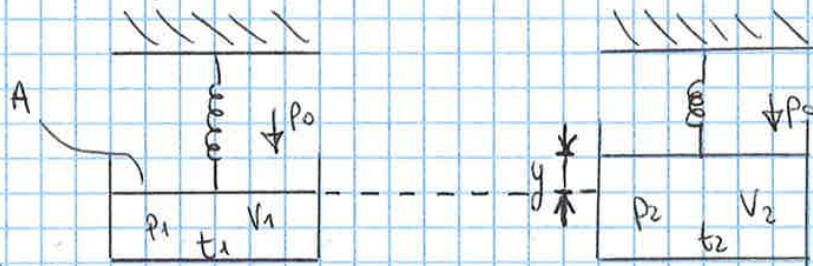
$$t_f = \frac{-m_g C_g (t_{se} - t_g) + m_g h_{se} + m_g C_a t_{se} + m_c C_c t_c}{m_c C_c + m_g C_a} = \frac{12 \times 10^{-3} (2220 \cdot (-10) - 333 \times 10^3 + 4186 \cdot 0) + 130 \times 10^{-3} \cdot 4186 \cdot 80}{12 \times 10^{-3} \cdot 2220 + 130 \times 10^{-3} \cdot 4186} =$$

$$t_f = 68,80^\circ\text{C}$$

20 ottobre 2016

Es. N°5

Un sistema cilindro pistone senza attrito e di peso trascurabile contiene aria (gas ideale). Il pistone ha area della sezione trasversale di  $1 \text{ dm}^2$ . Il pistone è contrastato da una molla di cost elastica  $10^4 \text{ Nm}^{-1}$ . Nelle condit iniziali l'aria occupa  $4 \text{ dm}^3$  a 1 bar o  $27^\circ\text{C}$ . Sulla sup del pistone agisce la press atmosferica di 1 bar quando la molla è in posizione neutra. Calcolare la quantità di calore che si deve fornire all'aria per sollevare il pistone di 1 dm.



Dati

$$p_0 = 1 \text{ bar}$$

$$p_0 = p_1 = 10^5 \text{ Pa}$$

$$p_1 = 1 \text{ bar} \quad V_1 = 4 \text{ dm}^3 \quad t_1 = 27^\circ\text{C}$$

$$V_1 = 4 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$k = 10^4 \text{ Nm}^{-1} \quad y_2 = 1 \text{ dm} = 10^{-1} \text{ m}$$

$$t_1 = 300,15 \text{ K}$$

$$\text{aria} \quad A = 1 \text{ dm}^2$$

$$A = 10^{-2} \text{ m}^2$$

Svolgimento

Sospetto ci sia lavoro interno. Quindi

$$Q - L_i = \Delta U$$

$$L_i = \int_{V_1}^{V_2} p dV$$

$$V_1 = 4 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$V_2 = V_1 + A y_2 = 10^{-2} \cdot 10^{-1} + 4 \cdot 10^{-3} = 5 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$P = P_0 + \frac{F}{A} = P_0 + \frac{K y}{A} = P_0 + k \frac{A y}{A^2} = P_0 + \frac{k}{A^2} (V - V_1)$$

vale se il fenomeno avviene LENTAMENTE, no fenomeno impulsivo

MOLLA  
NON - Ky perché è nella stessa direzione della forza.

$$L_2 = \int_{V_1}^{V_2} \left[ P_0 + \frac{k}{A^2} (V - V_1) \right] dV = \int_{V_1}^{V_2} \left( P_0 - \frac{k}{A^2} V_1 \right) dV + \frac{k}{A^2} \int_{V_1}^{V_2} V dV =$$

$$= \left( P_0 - \frac{k}{A^2} V_1 \right) (V_2 - V_1) + \frac{k}{2A^2} (V_2^2 - V_1^2) =$$

$$= \left( 10^5 - \frac{10^4}{(10^{-2})^2} \cdot 4 \times 10^{-3} \right) (5 \times 10^{-3} - 4 \times 10^{-3}) + \frac{10^4}{2 \cdot (10^{-2})^2} \left[ (5 \times 10^{-3})^2 - (4 \times 10^{-3})^2 \right] =$$

$$= 150 \text{ J}$$

Il gas si è dilatato  $\rightarrow$  2 stati con  $p, v$  diversi

$$\Delta U = m_a C_v (T_2 - T_1)$$

si espande, ma la massa non cambia

$\rightarrow$  la variazione di potenziale fornisce lavoro

L'effetto fisico della variazione di energia è il LAVORO!

$$T_1 = 300,15 \text{ K}$$

aria  $\rightarrow$  gas ideale

$$pV = m_a R T \quad R = 287 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$$

$$p_2 V_2 = m_a R T_2$$

$$P_2 = P_0 + \frac{k}{A^2} (V_2 - V_1) = 10^5 + \frac{10^4}{(10^{-2})^2} (5 \times 10^{-3} - 4 \times 10^{-3}) = 2 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$V_2 = 5 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$m_a \Rightarrow p_1 V_1 = m_a R T_1$$

$$p_1 = 10^5 \text{ Pa}$$

$$V_1 = 4 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \quad \Rightarrow \quad m_a = \frac{p_1 V_1}{R T_1} = 4,65 \times 10^{-3} \text{ Kg}$$

$$T_1 = 300,15 \text{ K} \quad R = 287, \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$$

## Svolgimento

TABELLA PROPRIETÀ ACQUA A 7 bar

$$t_s = 164,98^\circ\text{C}$$

$$v_L = 0,00111 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$h_L = 697,35 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$v_V = 0,27281 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$h_V = 2763,30 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$L = m p (v_V - v_L) = 3,5 \cdot 7 \times 10^5 \cdot (0,27281 - 0,00111) = 665,7 \text{ kJ}$$

↓ costante per la transizione di fase

$$Q = m \cdot h_{LV} = 3,5 \cdot 2066 = 7231 \text{ kJ}$$

massa da far evaporare      en per far evaporare l'unità di massa

$$\tau = \frac{Q}{\phi} = \frac{7231 \times 10^3}{1 \times 10^3} = 7231 \text{ s} = 2,01 \text{ h}$$

### LAVORO DI EVAPORAZIONE

$$L = m p (v_V - v_L)$$

$m$  → massa che EVAPORA  
 $p$  → pressione a cui avviene il cambiam. di fase (è costante)  
 $v_V, v_L$  → vol. spec. di liquido e di vapore

### CALORE DI EVAPORAZIONE

$$Q = m \cdot h_{LV}$$

$m$  → massa che deve EVAPORARE  
 $h_{LV}$  →  $h_V - h_L$ , energia che serve per il cambio di fase

## ES (N°7)

Una massa di 0,5g di gas ideale è contenuto in un sist. cilindro-pistone disposto verticalmente. Il pistone ha massa 10kg e superf.  $A = 0,0078 \text{ m}^2$ . È collegato ad un sistema fisso tramite una molla con cost. elastica  $10^4 \text{ N/m}$ . All'istante iniziale è a riposo, la pressione atmosf. vale 1 bar. Si fornisce calore al sistema. Il pistone si solleva e si arresta all'altezza dei fermi posizionati nella parte superiore, percorrendo 0,5 m. Determinare:

- 1) la pressione iniziale del gas
- 2) il lavoro compiuto sul pistone
- 3) il calore fornito

- il fermo blocca lo scorrimento -

sapendo che il gas subisce una variazione di en. interna tra  $214 \text{ kJ kg}^{-1}$  e  $337 \text{ kJ kg}^{-1}$ .

### Dati

$$m_g = 0,5 \text{ g} = 5 \times 10^{-4} \text{ kg}$$

$$m_p = 10 \text{ kg}$$

$$k = 10^4 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

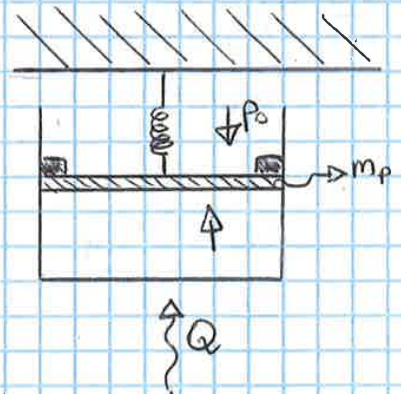
$$A = 7,8 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$u_f = 337 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1}$$

$$u_i = 214 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1}$$

$$p_0 = 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$x = 0,05 \text{ m}$$



Svolgimento

$$P_{A1} = m_A \frac{R_A T_{A1}}{V_A}$$

→ Caratterizziamo lo STATO (A)  
 ↓  
 gas ideale  
 ↓  
 Eq. di stato

$$m_A = 0,5 \text{ Kg}$$

$$R_A = R_{O_2} = 259,83 \frac{\text{J}}{\text{KgK}}$$

$$\frac{\text{J}}{\text{KgK}} = \frac{\bar{R}}{M}$$

$$P_{A1} = 380845 \text{ Pa} = 3,8 \text{ bar}$$

$$T_{A1} = T_{B1} = 293,15 \text{ K}$$

→ perché è adiabatico ⇒ sono in equilibrio

$$V_A = 100 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

Stiamo caratterizzando gli stati iniziali, non ciò che succede durante il processo

$$m_B = \frac{P_{B1} V_{B1}}{R_B T_{B1}}$$

$$P_{B1} = 2 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$V_{B1} = 100 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$R_B = R_{He} = 2077,04 \frac{\text{J}}{\text{KgK}}$$

$$\frac{\text{J}}{\text{KgK}}$$

} ⇒  $m_B = 3,28 \times 10^{-2} \text{ Kg}$

$$T_{B1} = 293,15 \text{ K}$$

Lo scambio totale di calore è nullo, ma non i singoli scambi.

→ I METODO

$$Q_A - L_A = \Delta U_A$$

→ Non uso  $Q_{-L} = \Delta H$  perché difficilmente l' $O_2$  a queste temp. si liquefa e poi non ho organi meccanici

$$L_A = 0 \text{ J} \rightarrow \text{setto rigido, no variaz. volume}$$

⇓

$$Q_A = \Delta U_A = m_A C_V (T_{A2} - T_{A1})$$

$$C_{VA} = C_{V_{O_2}} = 657,79 \frac{\text{J}}{\text{KgK}} \quad (\text{de non costante } C_{VA1}, C_{VA2} \text{ e faccio media})$$

$$Q_A = 0,5 \cdot 657,79 \cdot (200 - 20) = 59201 \text{ J}$$

IL CALORE SI SCAMBIA attraverso il SETTO (NON ADIAB.)

$Q_B = -Q_A$  il calore perso da B è quello ricevuto da A

$$Q_B - L_B = \Delta U_B$$

$$L_B = Q_B - \Delta U_B = -Q_A - \Delta U_B = -Q_A - m_B C_{VB} (T_{B2} - T_{B1})$$

$$T_{B2} = T_{A2} = 200^\circ \text{C}$$

$$C_{VB} = C_{V_{He}} = 3123,38 \frac{\text{J}}{\text{KgK}}$$

$$\Phi - W_t = \frac{\partial}{\partial t} \left[ \int_{V_c} \rho dV \left( u + \frac{1}{2} w^2 + gz + p_0 v \right) \right] +$$

- VOLUME DI CONTROLLO

$$+ G_2 \left( h_2 + \frac{1}{2} w_2^2 + gz_2 \right) - G_1 \left( h_1 + \frac{1}{2} w_1^2 + gz_1 \right) \rightarrow \text{FLUSSI}$$

$$q - l_t = \frac{\partial}{\partial t} \left[ u + \frac{1}{2} w^2 + gz + p_0 v \right]_{V_c} +$$

$$+ \left( h_2 + \frac{1}{2} w_2^2 + gz_2 \right) - \left( h_1 + \frac{1}{2} w_1^2 + gz_1 \right)$$

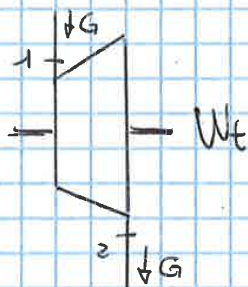
CONDIZIONI STAZIONARIE  $\rightarrow \frac{d}{dt} = 0$

↓

PORTATA COSTANTE  $G_1 = G_2 = G$

### Es. (N°1) Turbina adiabatica ideale

Una turbina adiabatica è attraversata in moto stazionario da una corrente di vapore d'acqua di portata massica  $5000 \text{ kg/h}^{-1}$ . Determinare la potenza meccanica tecnica sviluppata dalla turbina sapendo che l'entalpia di ingresso vale  $1298 \text{ kJ/kg}$  quella di uscita  $1005 \text{ kJ/kg}$ , la velocità media del fluido in ingresso è  $225 \text{ m/s}^{-1}$  e quella di uscita  $100 \text{ m/s}^{-1}$ . Si trascuri la differenza di quota.



Dati

$$G = 5000 \text{ kg/h} = 1,39 \text{ kg/s}$$

$$h_1 = 1298 \text{ kJ/kg} = 1298 \times 10^3 \text{ J/kg}$$

$$h_2 = 1005 \text{ kJ/kg} = 1005 \times 10^3 \text{ J/kg}$$

$$w_1 = 225 \text{ m/s}^{-1}$$

$$w_2 = 100 \text{ m/s}^{-1}$$

$$\Delta z = 0 \text{ m} \Rightarrow \Delta e_p = g \Delta z = 0 \text{ J/kg}$$

Hp.  $T_1 = T_2$  temp. di ingresso e uscita costante (urto ideale  $\rightarrow$  ISOTERMO)

$G_v = \text{costante}$

$$v_1 = v_2 = v(15^\circ\text{C}) = 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$$

Svolgimento

$$\Phi - W_t = \frac{d}{dt} \left[ U + \int dV_p \left( \frac{1}{2} w^2 + gz \right) + p_0 V \right]_{v_c} + G_2 \left( h_2 + \frac{1}{2} w_2^2 + g z_2 \right) - G_1 \left( h_1 + \frac{1}{2} w_1^2 + g z_1 \right)$$

stazion. e adiab.  $\frac{d}{dt} [ ]_{v_c} = 0 \quad G_1 = G_2 = G$

$$\Phi = 0 \quad W$$

$$G = \rho G_v = \frac{G_v}{v}$$

$$\Delta z = 0 \text{ m} \Rightarrow \Delta p = 0 \quad \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$



$$-W_t = (\rho G_v) \left[ \left( h_2 + \frac{1}{2} w_2^2 \right) - \left( h_1 + \frac{1}{2} w_1^2 \right) \right]$$

$h = u + p v$  per avere info su introduzione ed estrazione fluido

$$W_t = -\rho G_v \left[ (u_2 - u_1) + (p_2 v_2 - p_1 v_1) + \frac{1}{2} (w_2^2 - w_1^2) \right]$$

$$T_1 = T_2 \Rightarrow u_2 - u_1 = 0 \text{ J/kg}$$

\*  $u = c_v T$

$$v_1 = v_2 \Rightarrow p_1 = p_2 \Rightarrow \Delta h = \Delta u + \Delta(pv) = v(p_2 - p_1) \rightarrow \text{senza questo il fluido non si muove}$$

$$W_t = -\rho G_v \left[ (p_2 - p_1) v + \frac{1}{2} (w_2^2 - w_1^2) \right]$$

$$G_v = A w \Rightarrow w_1 = \frac{G_v}{A_1} = 4 \frac{G_v}{\pi d_1^2} = \frac{4 G_v}{\pi} \frac{1}{d_1^2}$$

$$A = \pi \left( \frac{d}{2} \right)^2 = \frac{\pi}{4} d^2 \quad w_2 = \frac{G_v}{A_2} = \frac{4 G_v}{\pi} \frac{1}{d_2^2}$$

$$W_t = -\frac{1}{v} G_v \left[ (p_2 - p_1) v + \frac{1}{2} \left( \frac{4 G_v}{\pi} \right)^2 \left( \frac{1}{d_2^4} - \frac{1}{d_1^4} \right) \right] = 14720 \text{ J} \approx 14,7 \text{ kJ}$$


$$dh = \overbrace{du}^{\text{contrib. TERMICO}} + \overbrace{d(pv)}^{\text{contrib. Meccanico (di spostamento)}} = du + pdv + vdp =$$

$$= c_v dT + pdv + v dp$$

} PER LE  
VARIAZIONI

Se non dobbiamo calcolare lo stato singolo

usiamo  $dh = du + d(pv)$



$\Delta z = 0$        $v = \text{const}$

$$\Phi - W_t = G \left( h_2 + \frac{1}{2} w_2^2 \right) - G \left( h_1 + \frac{1}{2} w_1^2 \right)$$

$$\left. \begin{array}{l} \Phi = 0 \text{ W} \\ W_t = 0 \text{ W} \\ W = \text{const} \end{array} \right\} \Rightarrow h_2 = h_1 \quad \text{ISOENTALPICO}$$

↓  
ISOTERMICO

$$C_p T_2 = C_p T_1$$

↳  $T_2 = T_1$

Ma così l'acqua si muove senza differenza di pressione  
↳ IMPOSSIBILE

$$u_1 + p_1 v = u_2 + p_2 v$$

$$c_v (T_2 - T_1) = v (p_1 - p_2)$$

$p_1 - p_2 = \frac{1}{2} w^2$

$p_1 > p_2$

$$\frac{F_1}{A} > \frac{F_2}{A}$$

riscaldam  
devuto agli attriti

**ES (N°4)**

Una portata  $G = 4 \text{ kg/s}$  di liquido di densità  $\rho = 1000 \text{ m}^3/\text{kg}$  evolve con deflusso dalle condizioni di ingresso ( $h_1 = 168 \text{ kJ/kg}$ ,  $p_1 = 5 \text{ bar}$ ) e quella di uscita ( $h_2 = 176 \text{ kJ/kg}$ ,  $p_2 = 1 \text{ bar}$ ). La quota geodetica rimane invariata. La velocità passa da  $w_1 = 90 \text{ m/s}$  a  $w_2 = 15 \text{ m/s}$ . Il sistema scambia lavoro e riceve un flusso termico  $\Phi = 27 \text{ kW}$ . Calcolare la potenza sviluppata e quella dissipata in attrito.

- Dati
- $G = 4 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$
  - $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$
  - $h_1 = 168 \text{ kJ/kg} = 168 \times 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$
  - $h_2 = 176 \text{ kJ/kg} = 176 \times 10^3 \text{ J/kg}$
  - $w_1 = 90 \text{ m/s}$
  - $\Phi = 27 \text{ kW} = 27 \times 10^3 \text{ W}$
  - $p_1 = 5 \text{ bar} = 5 \times 10^5 \text{ Pa}$
  - $p_2 = 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$
  - $w_2 = 15 \text{ m/s}$
  - $\Delta z = 0 \text{ m} \Rightarrow \Delta e_p = 0 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$

## ES (N°8) COMPRESSIONE A 2 STADI CON INTERREFRIGERAZIONE

Un compressore aspira una portata volumetrica di  $150 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  di aria considerata come un gas ideale con  $c_p = 0,240 \text{ kcal kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . Calcolare la potenza del compressore ed il suo flusso termico nei seguenti casi:

- 1) Compressione adiabatica quasi statica
- 3) Compressione adiabatica quasi statica in 2 stadi con raffreddamento intermedio con press. intermedia sino alla temp. iniziale;
- 2) Compressione isoterma quasi statica  
 $[p_1 = 1 \text{ ata}, p_2 = 30 \text{ ata}, t_1 = 25^\circ \text{C}]$

Dati  $p_1 = 0,81 \times 10^5 \text{ Pa}$      $T_1 = 293,15 \text{ K}$      $p_2 = 294,3 \times 10^4 \text{ Pa}$

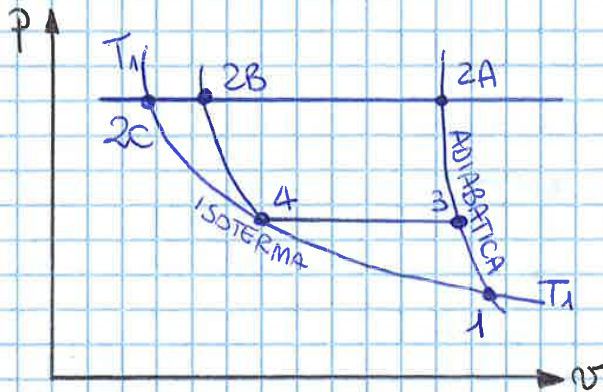
$$G_v = 150 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} = \frac{150}{3600} = 0,042 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$$

$$c_p = 0,240 \text{ kcal kg}^{-1} \text{ K}^{-1} = 0,240 \cdot 4187 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1} = 1005 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$$

Aria → gas ideale

$$pV = RT$$

$$\gamma = 1,4$$



- 1) 1 → 2A
- 2) 1 → 2C
- 3) 1 → 3 → 4 → 2B

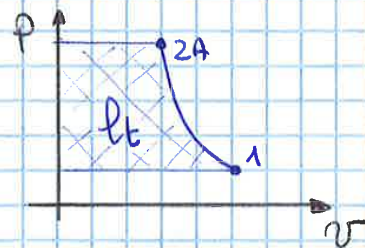
Hp: CASO STAZIONARIO  $\frac{d}{dt} [ \int v_c ] = 0$

### ① COMPRESSIONE ADIBATICA 1 → 2A

$$\Phi - W_t = G \Delta \left( h + \frac{1}{2} w^2 + qz \right)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta \left( \frac{1}{2} w^2 \right) &= 0 \text{ J kg}^{-1} \\ \Delta (qz) &= 0 \text{ J kg}^{-1} \end{aligned} \right\} \Rightarrow -W_t = G(h_2 - h_1) = -G l_t =$$

$$G = \frac{G_v}{v_1}$$

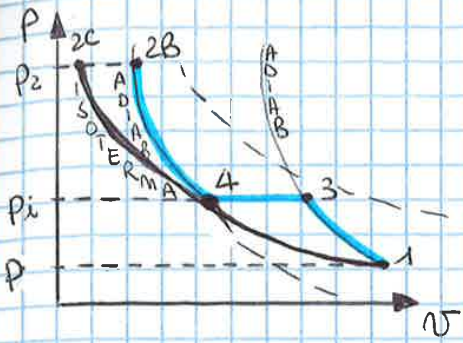


$$W_t = G \frac{\gamma}{\gamma-1} p_1 v_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] = \frac{G_v}{v_1} \frac{\gamma}{\gamma-1} p_1 v_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] =$$

$$= G_v \frac{\gamma}{\gamma-1} p_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] = -23,69 \times 10^3 \text{ W} = -23,69 \text{ kW}$$

$$T_{2A} = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = 774,68 \text{ K} = 501,53^\circ \text{C}$$





$$\begin{aligned}
 l_t &= l_{t1} + l_{t2} = \\
 &= l_t(1 \rightarrow 3) + l_t(4 \rightarrow 2B) = \\
 &= \frac{\gamma}{\gamma-1} p_1 v_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_i}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] + \\
 &+ \frac{\gamma}{\gamma-1} p_i v_4 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_i} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]
 \end{aligned}$$

problema  $p_i = ?$

$p_i$  ottima  $\Rightarrow$  minimo della potenza di compressione richiesta!

$$p_i = \sqrt{p_1 p_{2B}}$$

$$p_i = \sqrt{9,81 \times 10^4 \cdot 294,3 \times 10^4} = 53,7 \times 10^4 \text{ Pa}$$

$$\Phi - W_t = G \Delta h$$

$$\begin{aligned}
 W_t &= \frac{G}{v} \frac{\gamma}{\gamma-1} \left\{ p_1 v_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_i}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] + p_i v_4 \left[ 1 - \left( \frac{p_{2B}}{p_i} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \right\} = \\
 &= \frac{0,041}{v_1} \cdot \frac{1,4}{1,4-1} \left\{ 9,81 \times 10^4 v_1 \left[ 1 - \left( \frac{53,7 \times 10^4}{9,81 \times 10^4} \right)^{\frac{0,4}{1,4}} \right] + \right. \\
 &\quad \left. + 53,7 \times 10^4 \cdot v_4 \left[ 1 - \left( \frac{294,3 \times 10^4}{53,7 \times 10^4} \right)^{\frac{0,4}{1,4}} \right] \right\} = \\
 &= -8798 - 48239 \frac{v_4}{v_1}
 \end{aligned}$$

$$p_1 v_1 = R T_1$$

$$p_4 v_4 = R T_1 \Rightarrow \frac{v_4}{v_1} = \frac{p_1}{p_4} = \frac{9,81 \times 10^4}{53,7 \times 10^4} = 0,183$$

$$p_4 = p_i$$

$$W_t = -17625 \text{ W} = -17,6 \text{ kW}$$

$$\Delta h = c_p (T_{2B} - T_1)$$

$$T_1 = 293,15 \text{ K}$$

$$T_{2B} \Rightarrow p_4^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} T_4 = p_{2B}^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} T_{2B}$$

## IDRAULICA (fluidodinamica per liquidi)

$h$  quota, altezza del fluido (per pompe)

perdite di carico  $h_a$

$$h_a = h_d + h_c$$

Dissipazioni

$h_d$  → perdite di carico distribuite → EFFETTI VISCOSI

$h_c$  → perdite di carico concentrate → RESTRINGIMENTI  
CURVE VALVOLE

$$h_d = f \frac{L}{D_e} \frac{w^2}{2g}$$

$f$  → fattore di attrito o coeff. di Darcy

$$f = f\left(Re, \frac{\epsilon}{D_e}\right)$$

$D_e$  → diametro equivalente

$Re$  → n° di Reynolds

$$Re = \frac{\rho \bar{w} D_e}{\mu}$$

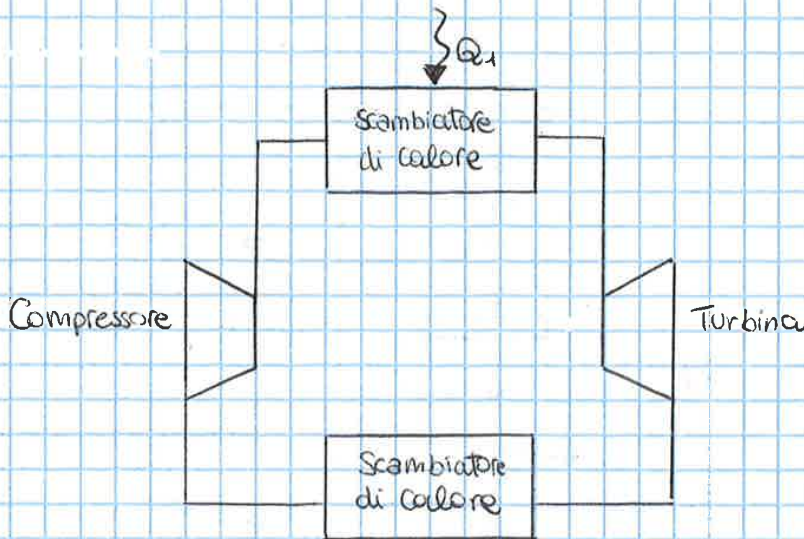
$$D_e = \frac{4A}{P}$$

$P$  perimetro

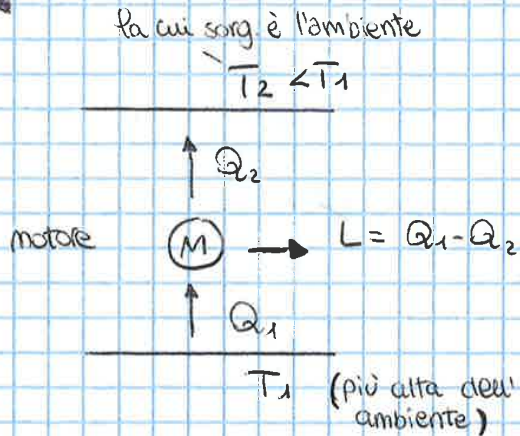
$\epsilon$  → SCALOSITÀ

$\frac{\epsilon}{D_e}$  → SCALOSITÀ RELATIVA

**RENDIMENTO** → L'EFFETTO UTILE CHE SI OTTIENE  
di un ciclo → RAPPORTO TRA IL GUADAGNO (BENEFICIO) OTTENUTO  
E LA SPESA EFFETTUATA.



sc ← scaldo, fornisco calore, temperatura al gas  
 ↓  
 energia maggiore  
 ↓  
 lo faccio passare dentro un oggetto che quando il gas **espande** si muove  
 → **TURBINA** → lavoro  
 ↓  
 cede calore all'ambiente → sc  
 ↓  
 lo spingo a scaldarsi nuovamente  
 → **COMPRESSORE**



$Q_1$  → calore fornito al sistema

$Q_2$  → calore disperso verso l'ambiente

BENEFICIO : lavoro  $L$  ?

SPESA : calore  $Q_1$        $Q_1 = L + Q_2$

1° principio       $Q - L = \Delta U$

$$Q = Q_1 - Q_2$$

$\Delta U = 0$       ciclo (stato finale = stato iniziale)

$$Q_1 - Q_2 - L = 0 \Rightarrow L = Q_1 - Q_2$$

$$\eta = \frac{L}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

Massimo rendimento ottenibile in natura per un SISTEMA IDEALE (no irreversibilità, no dissipazioni) Ma il rendimento = 1 non esiste! ⇒ IRREVERSIBILITÀ.

$$Q_2 < Q_1$$

$$\eta < 1$$

↳ massima conversione energetica che possiamo fare

↳ **RENDIMENTO ciclo di CARNOT**

$$Q_2 = \frac{T_2}{T_1} Q_1$$

$$T_2 = \frac{Q_2}{Q_1} T_1 \Rightarrow T = 273,16 \frac{Q}{Q_1}$$

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1} = \frac{\vartheta_2}{\vartheta_1} \quad \text{— temperature di un termometro a gas equivalente}$$

Il rapporto dei calori scambiati nel ciclo è uguale al rapporto delle temperature

analogie formule con la metrologia della temperatura

↳ scala termometrica

$$T = 273,16 \frac{x}{x_T}$$

**PUNTO TRIPLO** (dell'acqua)  
con tutte e 3 le fasi (S, L, G)  
che coesistono in un unico volume definito

## CICLO DI CARNOT INVERSO

$$Q_1 = Q_2 = L$$

$$\frac{Q_2}{T_2} = \frac{Q_1}{T_1}$$

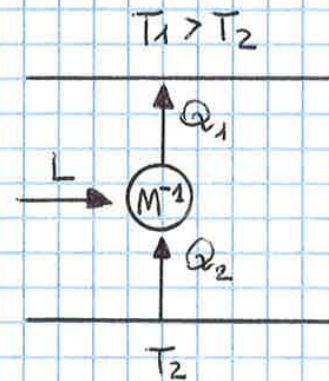
**EFFICIENZA** (Rendimento dei cicli inversi)

ciclo frigorifero

pompe di calore

$$\epsilon_f = \frac{Q_2}{L} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$$

$$\epsilon_p = \frac{Q_1}{L} = \frac{Q_1}{Q_1 - Q_2}$$



ESISTE UN UNICO MODO PER DEFINIRE E MISURARE  
L'ENERGIA: LA TEMPERATURA

↓  
temperatura assoluta:  
possò averla sia con un  
termometro a gas che  
con un ciclo di Carnot

@ 1037

RADIO MARZIA

**Temperatura di rugiada  $T_r$**

Temperatura alla quale, a una certa pressione  $p$  costante, la miscela BIFASE aria-vapore raggiunge la saturazione.

ISOBARO ( $p = \text{cost}$ )

↑ solo vapore

$T_r$

↓ liquido e vapore (BIFASE)

Se  $T_r < 0^\circ\text{C} \Rightarrow$  BRINA

Classe Class

Indirizzo Address

Cellulare Mobile

Telefono Telephone

Nickname

e-mail

Facebook

Sistema chiuso



Caratterizzare

SUBITO lo

Stato iniziale

(se è possibile anche quello finale)

$$\Delta S = 0 \quad \frac{J}{K}$$

Per qualunque CICLO

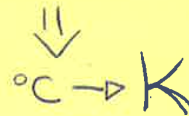
(dove stato iniziale e stato finale sono coincidenti)

ADIABATICA REV.  $\rightarrow \Delta S = 0 \quad \frac{J}{K}$

PSICROMETRIA



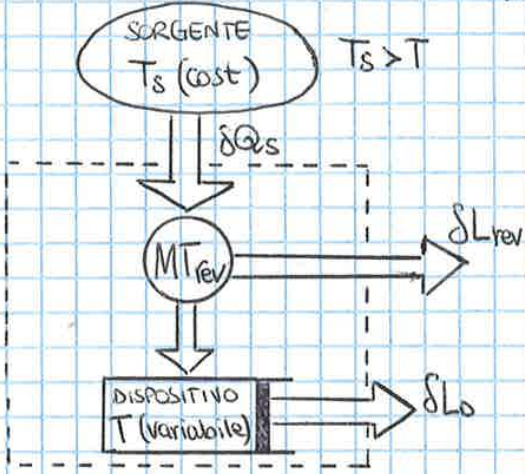
FLUIDI BIFASE  
e  
MISCELE



Chienjel?



Per trasformazioni cicliche  $\oint_{irr} \frac{\delta Q}{T} < 0 \rightarrow$  C'È SEMPRE QUALCOSA CHE VIENE RILASCIATA IN MODO IRREVERSIBILE



$$\delta L_{comb} = \delta L_{rev} + \delta L_o$$

$$\Delta Q_s - \delta L_{comb} = dE_{comb}$$

$$\frac{\delta Q_s}{T_s} = \frac{\delta Q}{T} \quad \delta Q_s = \frac{\delta Q}{T} T_s$$

$$\delta L_{comb} = \frac{\delta Q}{T} T_s - dE_{comb}$$

$$L_{comb} = T_s \oint \frac{\delta Q}{T}$$

Enunciato di Kelvin-Planck  $\rightarrow L_{comb} \leq 0$

$$T_s \oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$$

scelgo un volume di controllo che contenga il sistema + il suo ambiente  $\Rightarrow$  SISTEMA ISOLATO

DIFFERENZIALE ESATTO (trasformazione reversibile)

$$dS = \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_{rev}$$

$$\Delta S = \int_{t_1}^{t_2} \left( \frac{\Phi(t)}{T(t)} \right)_{rev} dt = \int_{\Gamma} \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_{rev}$$

$$\oint \left( \frac{\delta Q}{T} \right) = 0$$

$$\frac{dS(t)}{dt} = \left( \frac{\Phi(t)}{T(t)} \right)_{rev}$$

**S**  $\rightarrow$  ENTROPIA TOTALE

per una trasformazione NON reversibile  $\Rightarrow \Delta S \geq \int_{\Gamma} \frac{\delta Q}{T}$

**IN UN SISTEMA ISOLATO L'ENTROPIA NON PUÒ MAI DIMINUIRE**

$$\Delta S_{isolato} \geq 0 \Rightarrow \Delta S_{isolato} = S_{irr} \geq 0$$

conseguenza ( $S_{irr} \geq 0$ )  $\Delta S = \int_{\Gamma} \frac{\delta Q}{T} + S_{irr}$

$$(\Sigma_{irr} \geq 0) \quad \frac{dS(t)}{dt} = \frac{\Phi(t)}{T(t)} + \Sigma_{irr}$$

7 novembre 2016

# FORMULARIO

Sistemi chiusi (scambiano calore, NON ISOLATI)

$$dS = \frac{\delta Q}{T} \quad \text{ENTROPIA}$$

$\delta Q \rightarrow$  variaz. di calore  
 $T \rightarrow$  temper. a cui avviene la  $\delta Q$

DISUGUAGLIANZA DI CLAUDIUS-PLANK

$$\Delta S = \int \frac{\Phi dt}{T} + S_g$$

$$S_g \geq 0$$

( $S_g = S_{irr} = S_i$ )

perdite dovute alle irreversibilità

$$Q \leq Q_{max} = \int T ds$$

$$\frac{ds}{dt} = \frac{\Phi}{T} + \sum_{irr}$$

$$\sum_{irr} \geq 0$$

Sistemi aperti (scambio di massa)

$$\frac{\Phi}{T} + \sum_{irr} = \left( \frac{ds}{dt} \right)_{vc} + \sum_j G_j s_j$$

$G > 0$  USCENTE

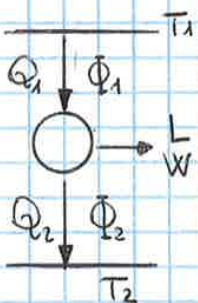
$G < 0$  ENTRANTE

sorgente termica  $\Rightarrow$  non integrale (la temperatura è costante, ho un isoterma)

**SORGENTE TERMICA**

## RENDIMENTO

SPONTANEO (ciclo diretto)



CICLO DIRETTO

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

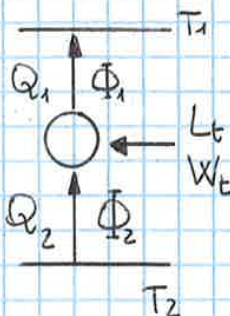
reale

$$\eta_c = 1 - \frac{T_2}{T_1} \rightarrow \text{se il ciclo è ideale, CARNOT}$$

## EFFICIENZA

FORZATO  $\rightarrow$  potenza e lavoro TECNICO (ciclo inverso)

$\hookrightarrow$  perché per quello inverso devo fare del lavoro sul sistema



$$E_f = \frac{Q_2}{L_t} = \frac{\Phi_2}{W_t}$$

FRIGORIFERO

$$E_p = \frac{Q_1}{L_t} = \frac{\Phi}{W_t}$$

POMPA DI CALORE

Es. (N°2)

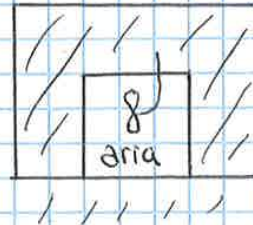
Una massa di 2 kg di aria a 20°C è contenuta in un recipiente a pareti rigide e adiabatiche. Un agitatore compie 120 J di lavoro su di essa. Calcolare la variaz. di entropia dell'aria.

Dati

INDEFORMABILI



Lavoro interno nullo



PARETI RIGIDE  
SIST. ADIABATICO

LAVORO CONVERTITO  
IN CALORE

$m = 2 \text{ kg}$

$L_t = -120 \text{ J}$

aria  $\Rightarrow c_v = 0,718 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$

Svolgimento

Adiabatico  $\Rightarrow Q = 0 \text{ J} \Rightarrow \Delta S = \int \frac{\delta Q}{T} = 0 \rightarrow \text{NO!!}$

$Q - L_t = \Delta U \Rightarrow \delta Q = dU + p dV$

gas  $\Rightarrow \delta Q = m c_v dT + m R \frac{dV}{V}$

$pV = nRT$

$pV = mRT$

$\Delta S = \int \frac{\delta Q}{T} = m c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + m R \ln \frac{V_2}{V_1}$

Adiabatico con  
lavoro tecnico

$Q - L_t = \Delta U \Rightarrow -L_t = \Delta U$

$dH = dU + d(pV)$

Quando non ho  
lavoro di spostam.

$d(pV) = 0 \Rightarrow L_t = L_i$  sist chiuso  $\rightarrow$  incremento di temperatura

$-L_t = -L_i = \Delta U$

$m c_v (T_2 - T_1) = -L_t$

$h = u + p v$

$T_2 = T_1 + \frac{-L_t}{m c_v} = 293,15 + \frac{120}{2 \cdot 718} = 376,56 \text{ K}$

PARETI RIGIDE  $\Rightarrow V_2 = V_1 \Rightarrow \Delta S = m c_v \ln \frac{T_2}{T_1} = 2 \cdot 718 \cdot \ln \frac{376,56}{293,15} = 360 \frac{\text{J}}{\text{K}}$



Vasca ~ sorgente  $\Rightarrow \Delta S_v = \frac{Q_a}{T_a}$  (per una sorgente è sempre  $\frac{Q}{T}$ )  
 La sua temperatura in Kelvin!  
 Non cambia temperatura ( $T = \text{cost}$ )  
 ma scambia calore

$Q_a \Rightarrow Q_s - L_{is} = \Delta U_s$   
 $L_{is} = 0 \text{ J}$   
 ↑  
 la sorg. non si sta espandendo o contraendo  
 quello della sfera perché cambia  $T_1 - T_2$  perché si raffredda  
 $\Rightarrow Q_s = \Delta U_s = mc(T_1 - T_2) =$   
 $= -2 \cdot 480 (473,15 - 288,15) =$   
 $= -177600 \text{ J}$

$Q_a = -Q_s = 177600 \text{ J}$   
 - perché lo sottraiamo alla sfera e lo prende il sistema

$$\Delta S_v = \frac{Q_a}{T_a} = \frac{177600}{288,15} = 616,35 \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

$$\Delta S_{s-v} = \Delta S_s + \Delta S_v = -476,09 + 616,35 = 140,26 \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

- 1) Il singolo sistema può avere ENTROPIA NEGATIVA
- 2) La variazione di ENTROPIA TOTALE del sistema isolato è SEMPRE POSITIVA. (Sistema + ambiente  $\Rightarrow$  POSITIVA)

Il singolo sistema può avere una diminuzione di entropia per il fatto che sta perdendo calore. (meno potenzialità di generare trasformaz)

- 3) l'entropia generata  $\Sigma_{irr}$  è sempre POSITIVA perché gli attriti fanno sempre perdere calore (segno positivo)

**CAVITAZIONE** → liquido saturo. Compaiono delle bollicine perché si sta muovendo, a causa di FORZE MECCANICHE  
 ↳ le bollicine esplodono a contatto sulle superfici  
 x es. scia delle navi; il sangue cavitava  
 cavità d'aria

**NUCLEAZIONE** → scaldare TERMICAMENTE provoca la formazione di nuclei di aria

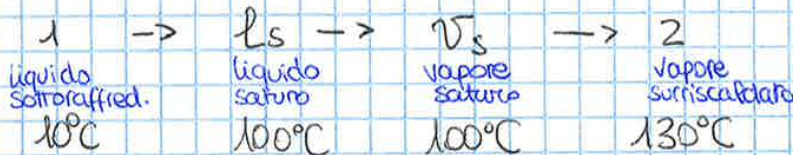
Ma posso anche scrivere X come:

$$X = \frac{v - v_L}{v_v - v_L} = \frac{h - h_L}{h_v - h_L}$$

lunghezza del SEGMENTO

TRASFORMAZIONE

8 novembre 2016



$\Delta S_{1-ls}$        $\Delta S_{ls-vs}$        $\Delta S_{vs-2}$

$$\Delta S_{1,2} = \Delta S_{1-ls} + \Delta S_{ls-vs} + \Delta S_{vs-2}$$

$$\Delta S_{1,ls} = m c_1 \ln \left( \frac{T_{es}}{T_1} \right) + R \ln \frac{v_{ls}}{v_1}$$

il volume tende a NON cambiare

m = 1 kg

T<sub>es</sub> = T<sub>s</sub> (1 atm) = 100°C = 373,15 K

T<sub>1</sub> = 283,15 K

c → valore medio tra c(10°C) e c(100°C)

T [°C]	c [J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
10°C	4194 J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
100°C	4217 J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>

Tabella Çengel, TAB. A.18  
pag. A.28

$$c_1 = \frac{c_e(100^\circ\text{C}) + c_e(10^\circ\text{C})}{2} = \frac{4194 + 4217}{2} = 4206 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$$

$$\Delta S_{1-ls} = 1 \cdot 4206 \cdot \ln \left( \frac{373,15}{283,15} \right) = 1161 \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

$$\Delta S_{ls-vs} = m (S_{vs} - S_{ls})$$

S<sub>vs</sub> = 7,3542 kJ/kgK → tabelle

S<sub>ls</sub> = 1,3072 kJ/kgK → tabelle