



**Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino**

**Appunti universitari**

**Tesi di laurea**

**Cartoleria e cancelleria**

**Stampa file e fotocopie**

**Print on demand**

**Rilegature**

NUMERO : 259

DATA : 05/03/2012

# A P P U N T I

STUDENTE : Grand Blanc

MATERIA : Termodinamica Applicata - Trasmissione del Calore  
Prof. Verda

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 Applicate

## IPOTESI CARDINE

Materie  $\rightarrow$  modello continuo

no pieni & vuoti,  
frattazione microspazio,  
fisica quantistica...

## Definizioni

### ENERGIA

- proprietà della materia
  - grandezza di scambio
- | posso associare a una  
qt di materia un'energia

### CORPO

“Quantità finite di materia nelle  
quali è possibile eseguire delle  
misure”

### SISTEMA

Insieme di corpi oggetto di studio

### AMBIENTE ESTERNO

Tutto ciò che sta al di fuori del sistema

} UNIVERSO

### VOLUME DI CONTROLLO

Volume occupato dal sistema, delimitato  
da una superficie reale o immaginaria  
che separa il sistema dall'ambiente  
esterno, denominata superficie di controllo

## Graandezze

estensive  $\rightarrow$  dipendono dalle pt di mense

intensive  $\rightarrow$  non  $\sim$

specifiche  $\rightarrow$  p. estensive / mense

## Stato di un sistema

Caratterizzo un sistema identificandolo un numero minimo di variabili indipendenti

$$\vec{X}(t) = \begin{vmatrix} x_1(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{vmatrix}$$

## Spazio degli stati

Le  $N$  coordinate temodinamiche

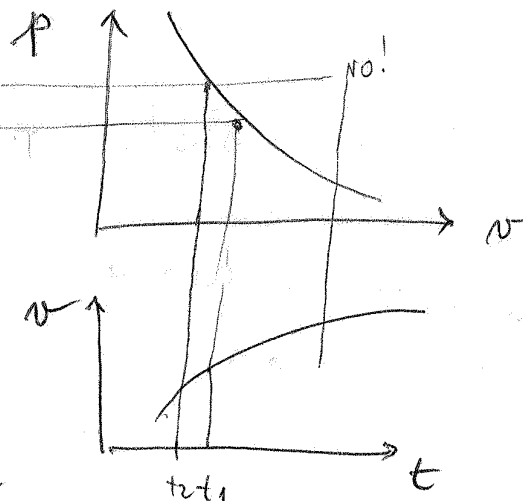
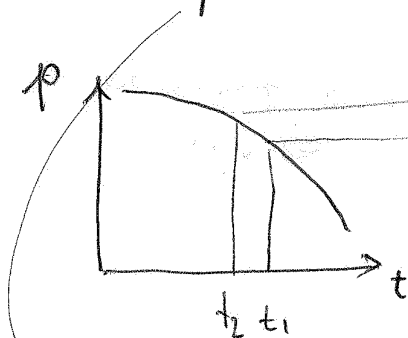
si possono interpretare come le coordinate di un punto a  $N$  dimensioni.

**NOTA**  $\rightarrow$  La rappresentazione non fornisce informazioni sul tempo di reazione.

## PROCESSO & TRASFORMAZIONE

$\hookrightarrow$  evoluzione di una variabile nel tempo

$\hookrightarrow$  proiezione del processo sullo spazio degli stati

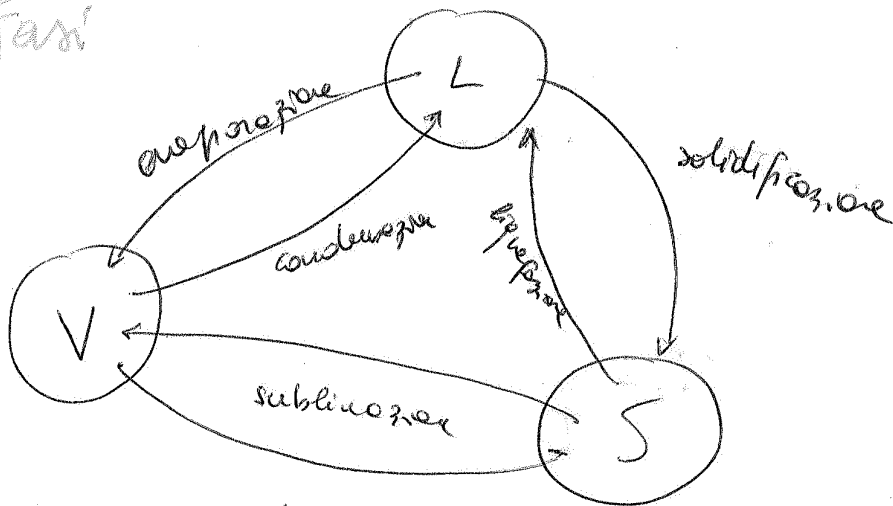


**NOTA**

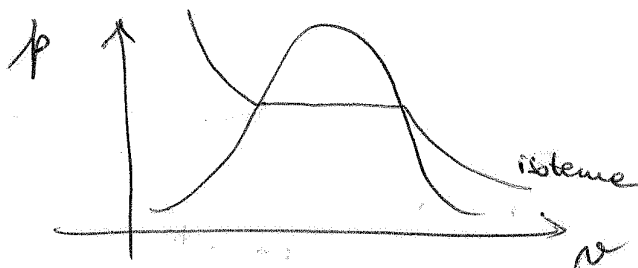
Processo composto  
Successione temporale di sottoprocessi/  
 $P_{in} = P_{out}$  | ciclo se  $n_{in} = n_{out}$

3 -

Gas



Curve di Andrews



Gas, equazioni

$$p \cdot V = n R T$$

Gas ideale

oppure

$$p \cdot v = R^* T$$

con  $R^* = R / \text{mm}$  (mole  
mole)

Condizioni solide

- no interazioni <sup>elettroniche</sup> molecole
- no coerenza sul volume delle molecole

Von der Waals

$$\Rightarrow \left( p + \frac{a}{v^2} \right) (v - b) = R^* \cdot T$$

$\left( \frac{a}{v^2} \right) \rightarrow$  pressione interna       $(v - b) \rightarrow$  coerenza

## Principio Zero della Termodinamica

"Se due corpi sono in equilibrio termico ciascuno con un terzo corpo, allora sono in equilibrio termico fra loro"

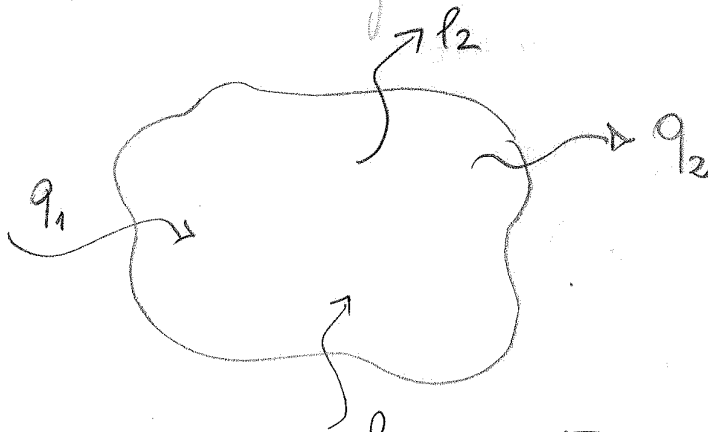
## Calore (def.)

"Energia scambiata fra due corpi fra cui esiste un disequilibrio termico"

$$\Phi = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{Q(T(\Delta t))}{\Delta t} \quad [W \text{ o } J/s]$$

flusso termico

Convenzione dei segni



## Calore

+ positivo  $\rightarrow$  fornito da ~~sistema~~ <sup>l1 ambiente</sup> e ~~ambiente~~ <sup>sistema</sup>  $q_1$   
 - negativo  $\rightarrow$   $\nu$  da ~~sistema~~ <sup>l1 ambiente</sup> e ~~ambiente~~ <sup>sistema</sup>  $q_2$

## Lavoro

+ positivo  $\rightarrow$  lavoro del sistema su ambiente  $l_2$   
 - negativo  $\rightarrow$   $\nu$  subito dal sistema dall'amb.  $l_1$

~~Equazione conservazione~~  
Teorema lavoro - Energia Cinetica

$$L_{es} + L_i = \Delta E_c$$

Ore  $L_{SE}$   $\left\{ \begin{array}{ll} L_{sp} & \text{spostamento (legato entrate, uscite fluido nel sistema)} \\ L_d & \text{deformazione} \\ L_t & \text{tecnico} \end{array} \right.$

$\boxed{+ L_{SE}^d = +\Delta E_p}$  T. lavoro-energia potenziale

$$L_d = \int p_d \cdot A \cdot dx = \int p_d \cdot dV \quad L_i = \int p \cdot dV - \underbrace{L_{ai}}_{\text{attriti interni}}$$

$$\Rightarrow -W_t - \underbrace{W_d}_{=0} - W_{sp} + W_i = \frac{dE_c}{dt} + \frac{dE_p}{dt}$$

$\nearrow G \frac{d(pv)}{dt}$

Sistemi chiusi ( $W_{sp}=0$ )

$$-W_t + \int \frac{p \cdot dv}{dt} - W_{ai} = \left[ \frac{d(E_c + E_p)}{dt} \right]_{vc} + \sum_i G_i \nearrow \begin{matrix} =0 \\ (\Delta E_c + \Delta E_p) \end{matrix}$$

In regime stazionario, con attrito nullo

$$L_t = - \int p \cdot dv$$

Sistemi aperti

$$L_t = \int v \cdot dp$$

Ges ideale

$$C_v = C_v(T) \rightarrow C_p(T) = R^* + C_v(T)$$

$$\begin{cases} \partial v = p \\ \partial p = -v \end{cases}$$

Trasformazioni

Adiabatico

$$Q_{int} = 0 \rightarrow \begin{cases} -v dp + C_p dT = 0 \\ p dv + C_v dT = 0 \end{cases}$$

$$\text{con } \begin{cases} \frac{C_p}{C_v} = \gamma \end{cases}$$

$\Rightarrow$   $p v^\gamma$  cost

$T \cdot v^{\gamma-1}$  cost

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

Isoterme

$T$  cost  $\Rightarrow$   $p v$  cost

$$q = -h_t$$



## I principio Termodinamica

$$\Phi - W_t = \left( \frac{\partial U^t}{\partial t} \right)_{rc} + \sum_i C_i h^t$$

dove  $U^t = U + e_c + e_p$   
 $h^t = h + e_c + e_p$

Sistema chiuso

$$\sum_i C_i h_i^t = 0$$

Regime stazionario

$$\left( \frac{\partial U^t}{\partial t} \right)_{rc} = 0$$

## II Principio Termodinamico

$= 0$  reversibile  
 $> 0$  irreversibile

$$\oint \frac{\Phi dt}{T} \leq 0$$

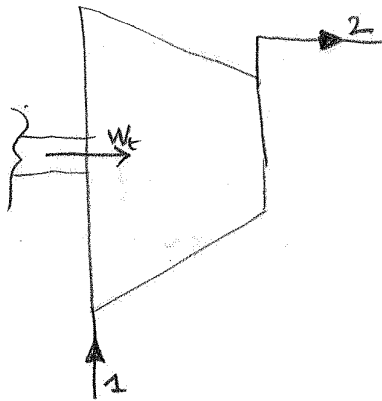
se  $= 0$   $\forall$  funz. cicliche  $\rightarrow \frac{\Phi dt}{T}$  funzione di stato!

$$\int \frac{\Phi dt}{T} \leq \Delta S$$

$$\frac{\Phi}{T} + \sum_i \dot{C}_i = \frac{dS}{dt} = \left( \frac{\partial S}{\partial t} \right)_{rc} + \sum_i C_i s_i$$

$\rightarrow = 0$  se reversibile

Azito



I p.t.

$$\Phi - W_t = \left( \frac{\partial U_t}{\partial t} \right)_{rc} + \sum_i G_i h_i$$

$d(e_c) \approx d(e_p) \approx 0$

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

$$\Rightarrow -l_t = (h_2 - h_1)$$

T. l-eu x not aperti

$$-l_t - \int v dp - l_{ai} = 0$$

$$-l_t = \int v dp + l_{ai} \quad | = \int v' dp$$

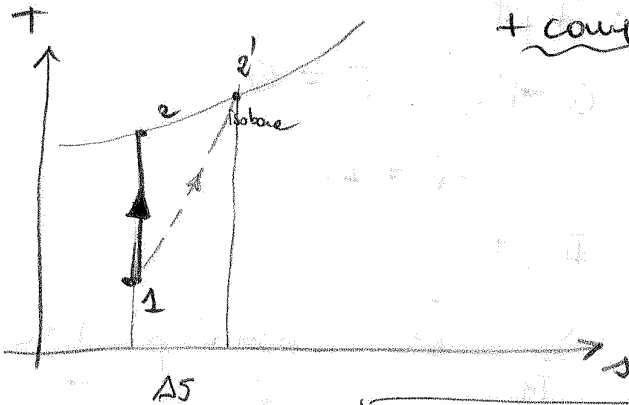
$\Rightarrow$  A partire di  $l_t$  quindi,

$$v = \frac{V}{M}$$

$v' > v$  (con  $v'$  volume specifico nel caso senza azito)

+ compressione e perdita di p

$\rightarrow$  quindi con azito, e perdita di pressione  
 $T' < T$



$$\Rightarrow \Sigma i = G(s_2' - s_1)$$

Nel caso con azito

Rend. isentropico compressione

$$\eta_{s,c} = \frac{|l_{t, ideale}|}{|l_{t, reale}|} = \frac{(h_{2'} - h_1)}{(h_2 - h_1)}$$

De nicolare

$$1) \quad dv = \beta \cdot v \cdot dT - K_T v dp$$

$$\text{con } \beta = \frac{1}{v} \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p$$

$$K_T = \frac{1}{v} \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T$$

2) ADIABATICA

$$q = 0$$

$$\text{per cui } \partial v dV + C_v dT = \partial p dP + C_p dT$$

$$\text{con } \begin{cases} C_v + R^* = C_p & \text{Relazione [1]} \\ p v^{\gamma} = R^* T & \text{H}_p \text{ gas ideale} \end{cases}$$

$$\text{ricordando che } \begin{cases} \partial v = \frac{p}{\rho} \\ \partial p = -\rho \end{cases}$$

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

$$p \cdot T^{\frac{\gamma}{1-\gamma}} = \text{cost} \quad (\text{olei us})$$

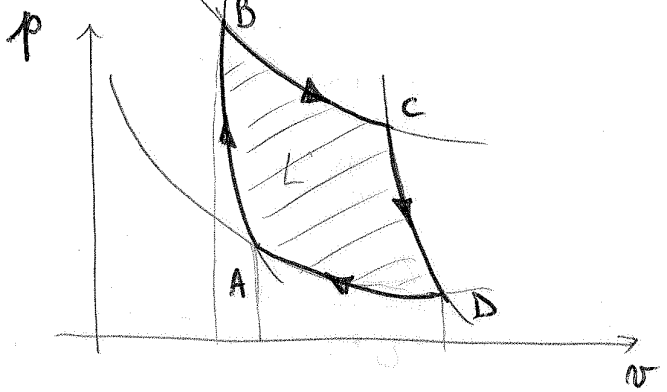
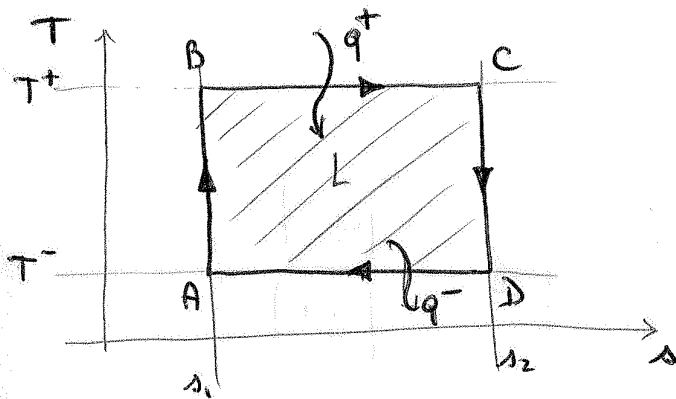
$$l = - \int p dv \quad \text{o} \quad l = \int v dp$$

ISOTERMA

$$T = \text{cost}$$

$$q + l = 0 \quad (\Delta E_{tot} = 0 \text{ a } T = \text{cost})$$

# Ciclo di CARNOT (Esercizio teorico)



- 1- Compressione reversibile (s costante) adiabatica
- 2- Assorbimento di calore isotermo ( $T_{cost}$ )
- 3- Espansione
- 4- Cessione calore

ovviamente

$$p_A p_C = p_B p_D$$

$$v_A v_C = v_B v_D$$

Levoni scambiati

$$l = |q^+| - |q^-|$$

ovvero,  $q \int \frac{1}{T} dt = \Delta s$  II princ. Terzo.

per cui  $\frac{q}{T} = \Delta s$   $q = T \cdot \Delta s$

$l$  = area sottintesa nel ciclo (T-s)

ma anche

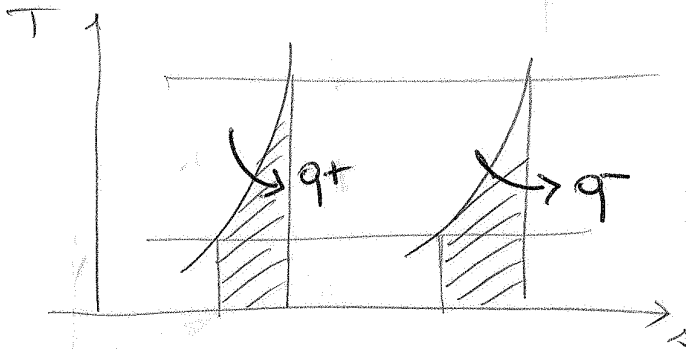
$$l = \int p dv = \int_B^C + \int_C^D - \int_D^A - \int_A^B = \text{area sottintesa nel ciclo (p-v)}$$

rendimento

## Ipotesi sui cicli

- Gas ideale  $\rightarrow$  AIR STANDARD  
 $\Rightarrow \boxed{p v = R^* T}$
- $C_p, C_v$  costanti
- Ciclo termodinamico chiuso  
(conservazione della massa, dell'energia)  
 $\Rightarrow \boxed{Q_t \equiv Q_i}$
- Operazioni di combustione = calore fornito  
(no miscela, distribuzione dei combustibili...)
- Fretta espulsione gas caldi, immersione per  
freddi  $\rightarrow$  conservate come un raffreddamento  
degli stent.

Questo ciclo diventa irreversibile del momento  
che



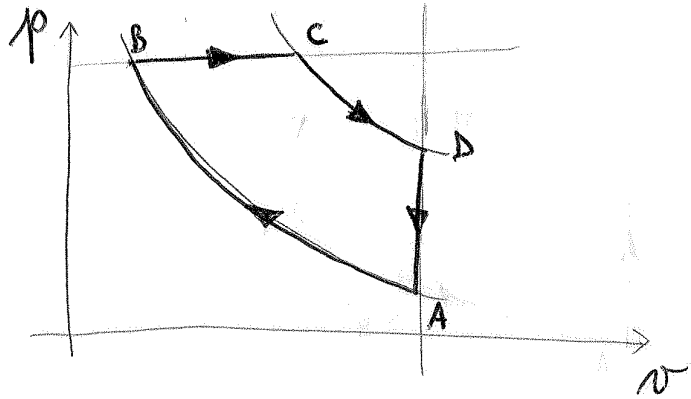
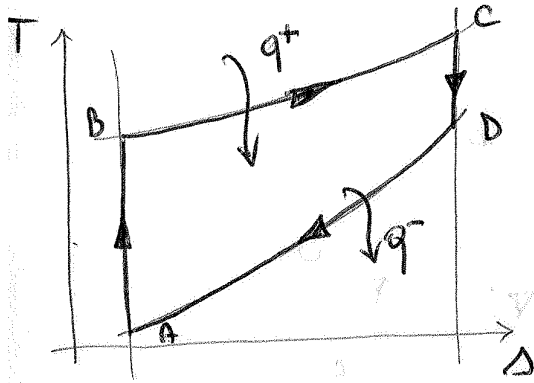
le aree sotto le curve sono uguali e pari a  $q(T^+ - T^-)$   
in modulo.

$\Rightarrow$  Posso pensare di utilizzare il calore ceduto  
per effettuare il successivo ciclo.  
Se riesco a farlo, allora l'efficienza diventa

$$\varepsilon = 1 - \frac{T_D (S_D - S_A)}{T_B (S_C - S_B)} =$$

$$\boxed{\varepsilon = 1 - \frac{T^-}{T^+}}$$

## Ciclo DIESEL



- 1- Compressione adiabatica
- 2- Assorbimento isobaro
- 3- Espansione adiabatica
- 4- Cessione isocore

note

$$\text{Isobare} \quad T = T_0 e^{\frac{\Delta S}{C_p}}$$

$$\text{Isocore} \quad T = T_0 e^{\frac{\Delta S}{C_v}}$$

La pendenza delle isobare è minore della pendenza delle isocore nei diagrammi T-s.

(legato al  $c_v$  e  $c_p$ , ~~risultante~~ inversamente)

## Rendimento

$$\eta = 1 - \frac{q^-}{q^+} = 1 - \frac{C_v(T_D - T_A)}{C_p(T_C - T_B)}$$

$$= 1 - \frac{1}{\gamma} \frac{T_A}{T_B} \left( \frac{T_D}{T_A} - 1 \right) \left( \frac{T_C}{T_B} - 1 \right)$$

risultando che  $\frac{T_A}{T_B} = \frac{1}{\gamma^{\gamma-1}}$

o.e.

$$\frac{T_D}{T_A} = \frac{T_D}{T_C} \cdot \frac{T_C}{T_B} \cdot \frac{T_B}{T_A}, \text{ per cui diventa}$$

$$\frac{T_D}{T_A} = \left( \frac{v_C}{v_D} \right)^{\gamma-1} \cdot \left( \frac{v_C}{v_B} \right) \cdot \frac{1}{\gamma^{\gamma-1}} =$$

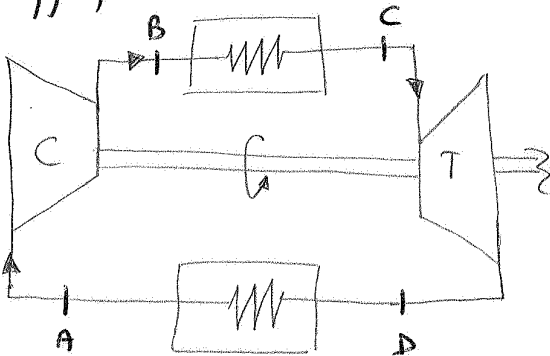
$$= \left( \frac{v_C}{v_B} \right)^{\gamma-1} \cdot \left( \frac{v_B}{v_D} \right)^{\gamma-1} \cdot \left( \frac{v_C}{v_B} \right) \cdot \frac{1}{\gamma^{\gamma-1}}$$

$$= \left( \frac{v_C}{v_B} \right)^{\gamma}$$

note

Se  $T_D > T_A$ , ovvero il calore è ceduto ad una temperatura maggiore di quella ambiente, significa che è possibile recuperare quel calore  
 $\rightarrow$  COGENERAZIONE.

stilizzazione del circuito



~~caso isoforo~~ ~~caso isobarico~~ ~~caso isocoro~~ ~~caso isocoro~~ ~~caso isocoro~~  
 eu- cinetica allo scambiatore di calore (B  $\rightarrow$  C) per calore ~~isobarico~~

$$\frac{1}{T} + \int_0^{\infty} \frac{dp}{p} + \frac{1}{T} + \Delta \epsilon_c + \Delta \epsilon_p = 0$$

caso ideale                      caso cost.

$$\int_0^{\infty} dp = 0 \Rightarrow p \text{ cost isobore}$$



$$\eta = 1 - \frac{1}{\beta^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}$$

oè,

$$h_u = |q^+| - |q^-| = c_p [(T_c - T_b) - (T_D - T_A)]$$

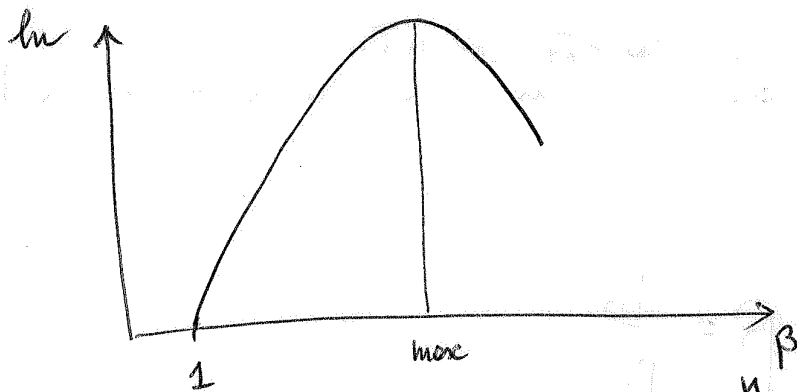
per cui

$$\frac{h_u}{c_p} = T_c \left(1 - \frac{T_D}{T_c}\right) - T_A \left(\frac{T_b}{T_A} - 1\right)$$

infine

$$\frac{h_u}{c_p} = T_{max} \left(1 - \frac{1}{\beta^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}\right) - T_{min} \left(\beta^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1\right)$$

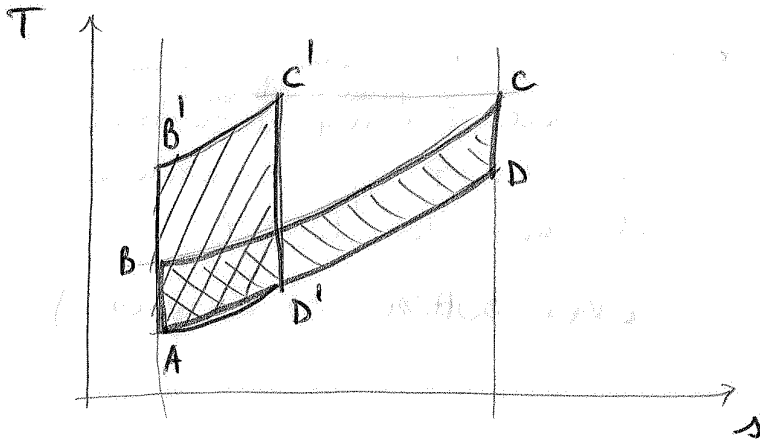
h<sub>u</sub> dipende da T<sub>max</sub>, T<sub>min</sub>, β



non occorre  
avere β troppo  
elevato  
→ rendimento  
maggiore ma  
potenze x unite  
di meno  
minore!

$$\beta(h_{u \max}) = \left( \frac{T_{\max}}{T_{\min}} \right)^{\frac{\gamma}{2(\gamma-1)}}$$

A parità di  $T_{max}$ ,  $T_{min}$  cosa succede quindi



• se  $T_{D'} > T_{B'}$ , impossibile applicare la rigenerazione (con limite  $T_{D'} = T_{B'}$ )

• si noti che generalmente  $L'_n > L_n$

Per cui

⇒ turbine a piccole potenze  
CICLO SUBRISCALDATO

⇒ piccole centrali ( $\sim 10^2$  KW)  
CICLO SATURATO-RIGENERATIVO

RAPPORTO ISOENTROPICO  
DI COMPRESSIONE

$$\eta_{is,c} = \frac{|l_{c,ideale}|}{|l_{c,reale}|}$$

$$= \frac{T_{B_{is,c}} - T_A}{T_{B_{in}} - T_A}$$

ovvero

$$l_{T,ideale} > l_{T,reale}$$

RAPPORTO ISOENTROPICO  
DI ESPANSIONE

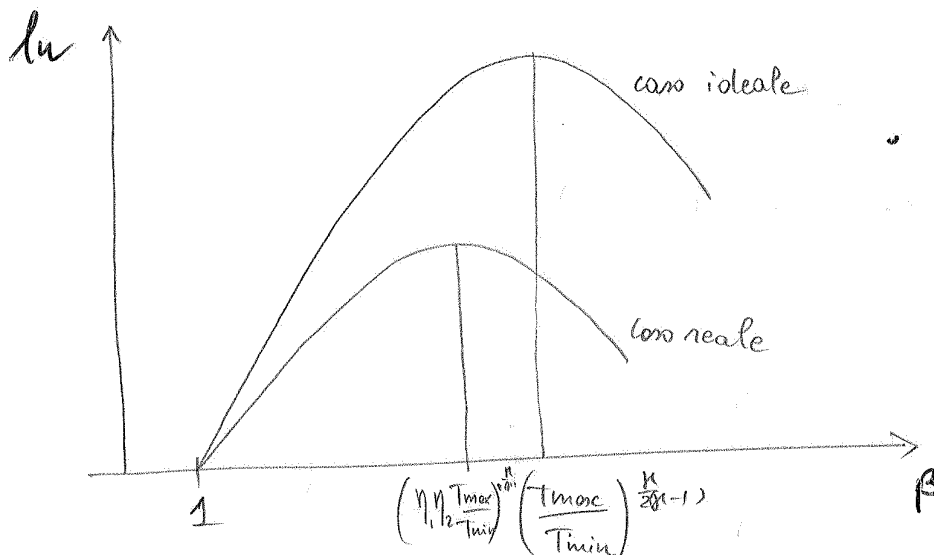
$$\eta_{is,T} = \frac{|l_{T,reale}|}{|l_{T,ideale}|}$$

$$= \frac{T_{D_{in}} - T_c}{T_{D_{is,T}} - T_c}$$

Volemmo massimizzare il  $l_u$ ,

$$l_u = -C_p(T_{D_{in}} - T_A) + C_p(T_c - T_{B_{in}}),$$

$$\beta(l_{u,max}) = \left( \eta_{is,c} \cdot \eta_{is,T} \cdot \frac{T_{max}}{T_{min}} \right)^{\frac{\gamma}{2(\gamma-1)}}$$



note

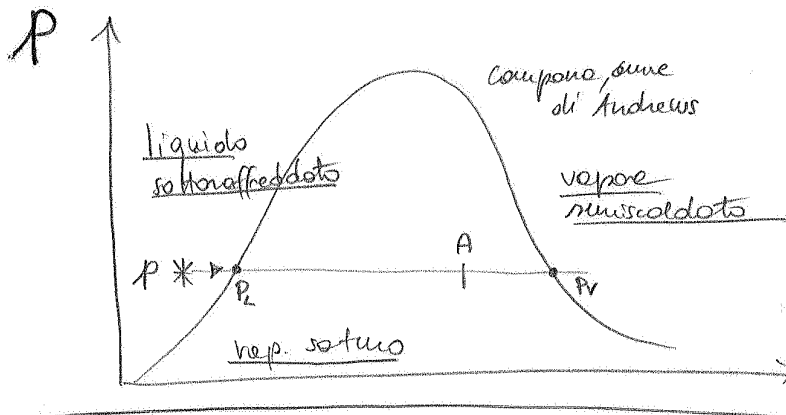
- il lavoro netto diminuisce nel caso reale, tuttavia  $\beta / l_u \rightarrow l_{u,max}$  diminuisce!

## Atm Vapor Saturo?

Definisco

TITOLO

$$x = \frac{M_{\text{vapore}}}{M_{\text{vapore}} + M_{\text{liquido}}}$$



• mole

sotto la curva di Andrews, p cost  
componi T cost

•  $P_L$  punto liquido  
contiene tutte le info  
nel liquido alle date  
pressioni e temperature, h, s  
solo punto  $P_V$ .

$$v_A = \frac{m_L \cdot v_L + m_V \cdot v_V}{m_L + m_V} = x \cdot v_V + (1-x) v_L$$

le formule sopra vale per volumi specifici, entalpie,  
entalpie, tutte le funzioni di stato.

⇒ è fondamentale quindi per descrivere la situazione  
in A conoscere il titolo x e i valori  
intermedi di  $P_L$  e  $P_V$ .

↳ poiché non ho una  
curva, le variabili indipendenti  
si riducono a 1 sola.

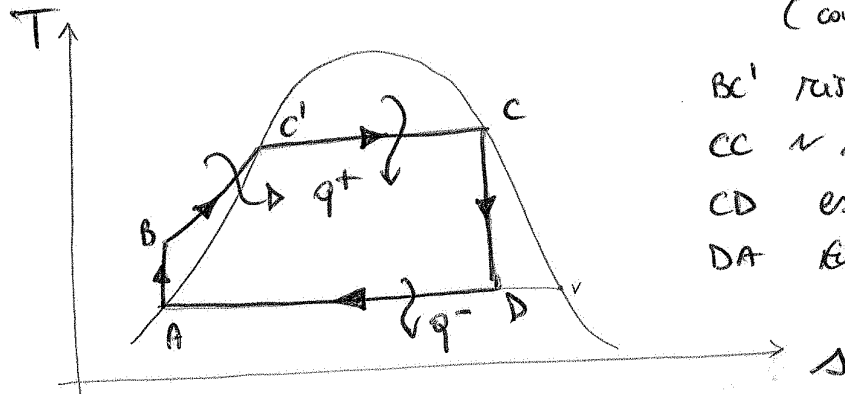
⇓

se mi trovo nel campo del vapore surriscaldato, posso  
anche pensare di abbassare la p. di gas ideale,  
ma molto difficilmente, in  
in generale, si ricorre a

• Tabelle

• Diagrammi (ad esempio di MULLER h-s)

# Ciclo RANKINE



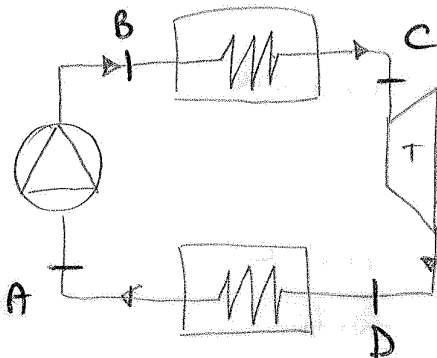
AB Pompe di circolazione  
(compressione adiabatica)

BC riscaldamento isobaro

CC ~ ~ (me anche isotermo)

CD espansione isentropica

DA completa condensazione



note sulle pompe di circolazione



pompe di circolazione

≠ compressore →  $\Delta v$

• p.c. comporta un variazione di volume molto ridotta

(ricondensazione spogli prosciutto)  $v \approx \text{cost}$

note

Essendo il fluido acqua, le condense  
avvengono fuori, non più all'interno del ciclo  
→ ACQUA

Come viene il titolo  $x_D$

Dalla relazione  $s_D = s_A x_D + (1 - x_D) \cdot s_v$ ,

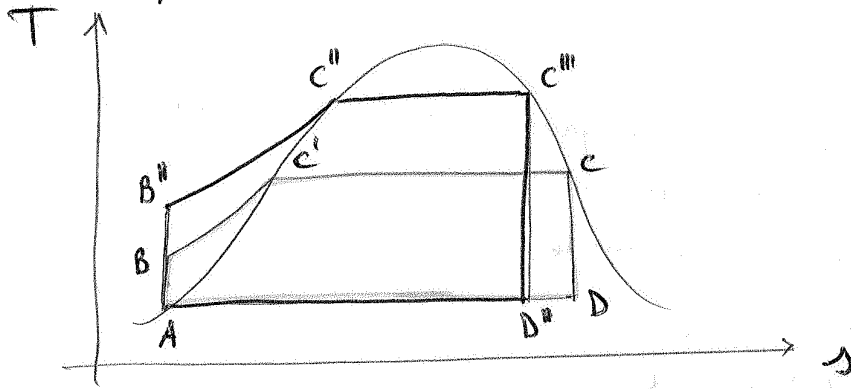
• conosco  $s_D = s_C$

• ~  $s_v$

• ~  $s_A$

(da tabelle, note le temperature)

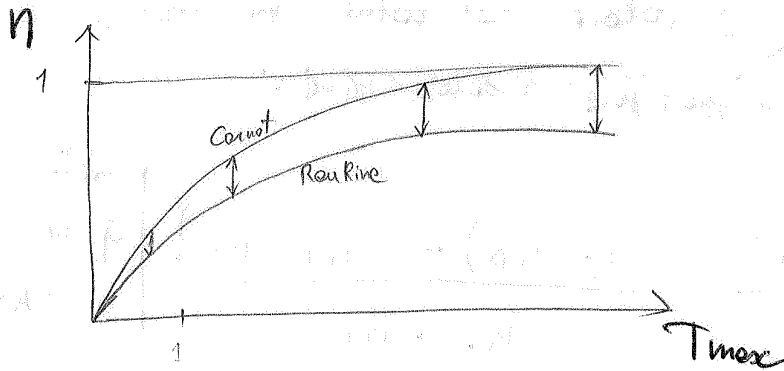
• Posso pensare di aumentare  $T_{max}$

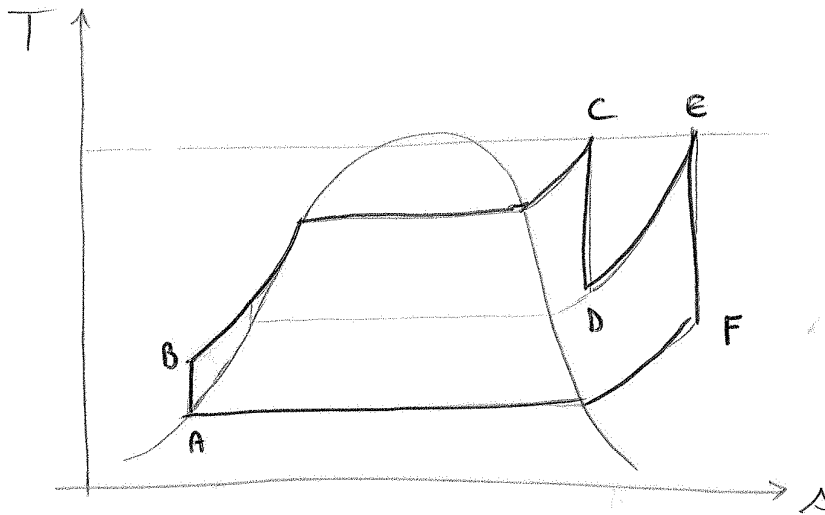


il rendimento  $\eta$  aumenta, tuttavia si discosta ancora di più dal ciclo<sup>R</sup> di Carnot corrispondente

(aumenta l'input del heat  $B''C''$ )

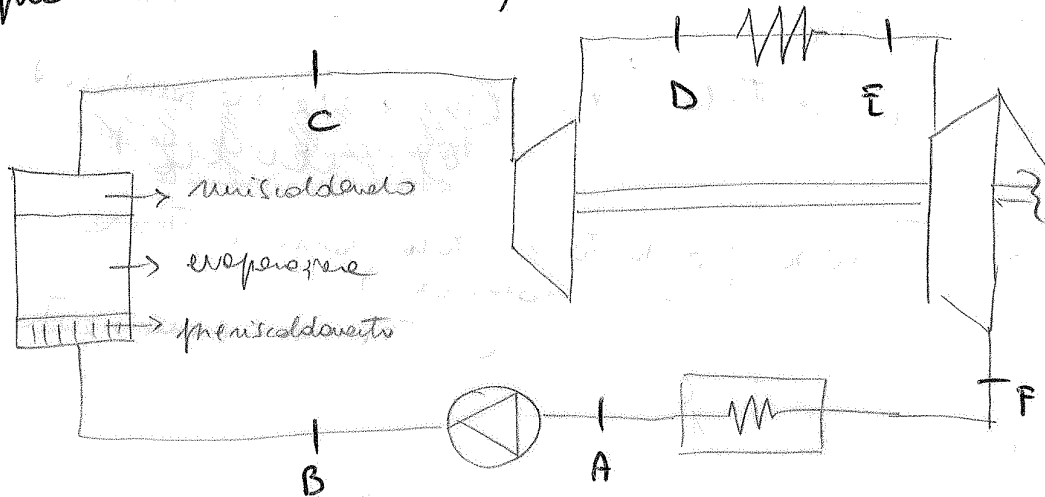
e inoltre  $x_{D''} < x_D$ , deve essere ancora accettabile





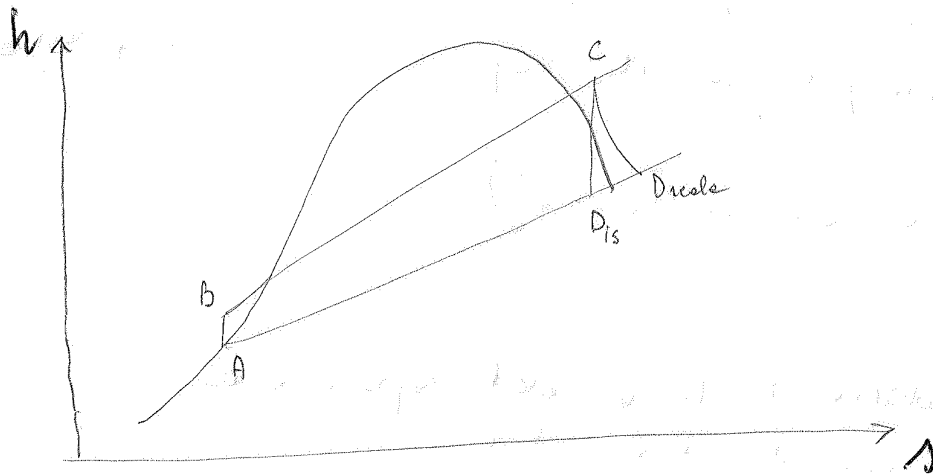
L chiedere... 7...

Per aumentare il lavoro tecnico disponibile (area)  
si può usare e soluzioni del tipo 1↓.



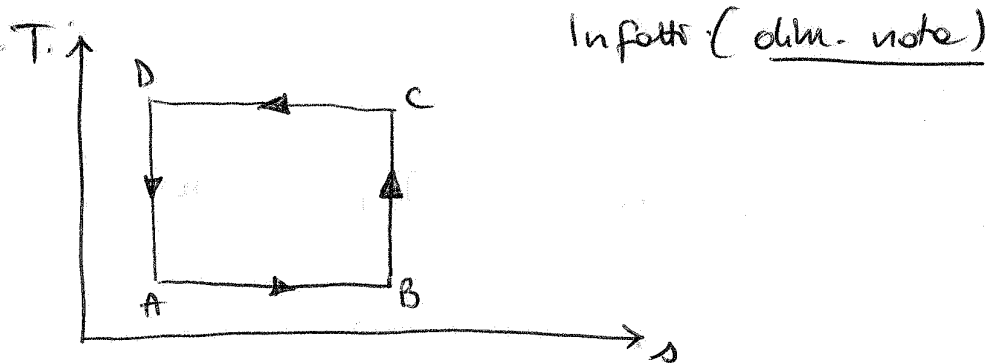
• miscelatore DE in corpo miscelatore.

Metodo complessivo e l'inevitabile dell'espansione:



$$\eta = \frac{l_T}{l_{ideale}} = \frac{h_C - h_D}{h_C - h_{D_{(0.1s)}}$$





IIPT

$$\frac{\Phi}{T} + \sum_i \frac{\dot{Q}_i}{T_i} = \frac{dS}{dt} \Rightarrow \oint \frac{\Phi dt}{T} = \Delta S = 0$$

reversibile ↳ funzione di stato

$$\int_A^B \frac{\Phi dt}{T} + \int_C^D \frac{\Phi dt}{T} = 0$$

$$\frac{Q_{AB}}{T_A} + \frac{Q_{CD}}{T_C} = 0 \quad \text{ovvero} \quad \frac{|q^-|}{T^-} - \frac{|q^+|}{T^+} = 0 \quad [1]$$

↳ il calore  $q^+$  viene ceduto

Da [1], poiché  $T^+ > T^-$

$$\Rightarrow |q^+| > |q^-|$$

Inoltre, ragionando sulle temperature:

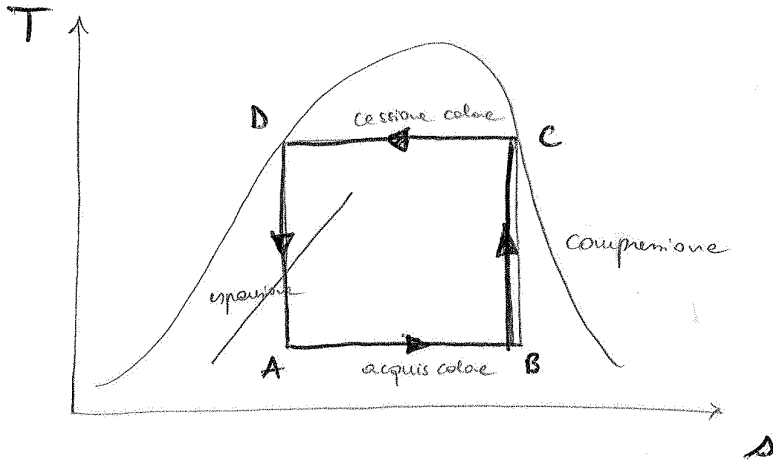
$$\varepsilon_F = \frac{|q^-|}{|q^+| - |q^-|} = \frac{|\int_A^B T ds|}{|\int_C^D T ds| - |\int_A^B T ds|} = \frac{T_A \Delta S}{T_C \Delta S - T_A \Delta S} = \frac{T_{min}}{T_{max} - T_{min}}$$

per cui

$$\boxed{\varepsilon_F = \frac{T_{min}}{T_{max} - T_{min}}}$$

$$\boxed{\varepsilon_P = \frac{T_{max}}{T_{max} - T_{min}}}$$

Acili invenit ensalati e Vapore



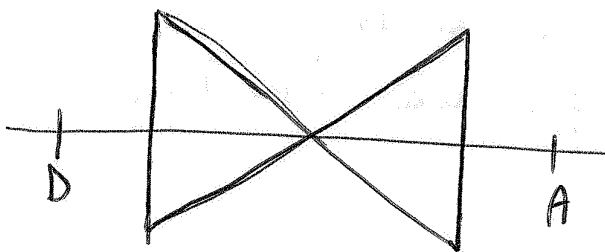
# Problemi

- ① Femore acquisizione colore e  $X_B$
  - ② Compressione  $\Gamma_{BC}$  e liquido variabile (cup fettibile)
  - ③ Espansione DA - e liquido variabile  
- fluido molto simile ad un liquido
- $l_t = - \int v dp \approx - \bar{v} \Delta p$  molto piccolo

⇒ DA eliminato

Devo tuttavia ottenere una diminuzione di Tep

# VALVOLA DI ESPANSIONE



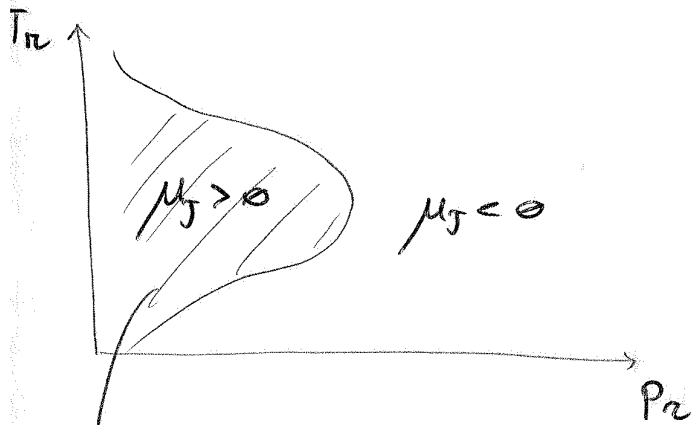
- strazzone per far diminuire le p, "sperando" che questo comporti una diminuzione del T.

→ ~~è~~ <sup>one</sup> ~~infatti è così:~~

$$k_t + l_t + \text{Indp} + \cancel{\text{Sec}} + \cancel{\text{Sep}} = 0$$

$$l_t + \text{Indp} = 0$$

- 4 -



$$\text{con } T_r = \frac{T}{T_c}$$

$$P_r = \frac{P}{P_c}$$

↓ Occorre intervenire, nelle condizioni operative, in queste aree.

• Ora, il valore  $q^-$  è voluto e causa dell'evento del k'holo

→ minore efficienza

Dovrei avere la portata e potenza costante

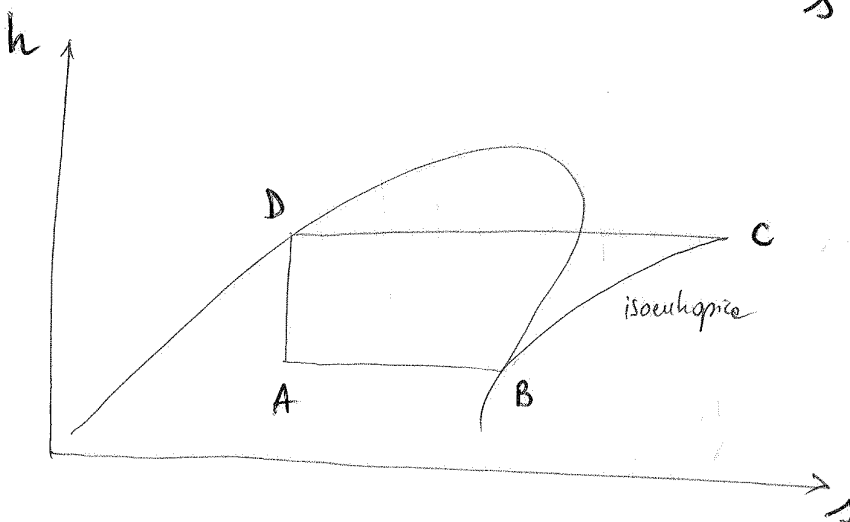
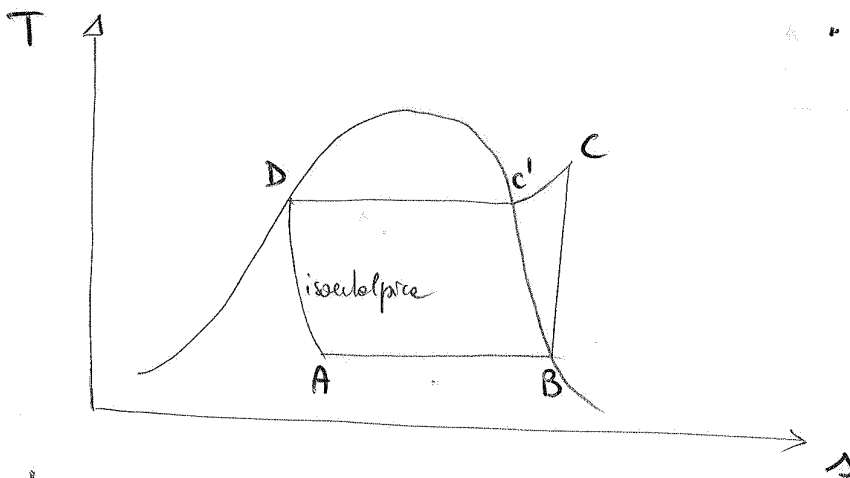
Soluzione

note

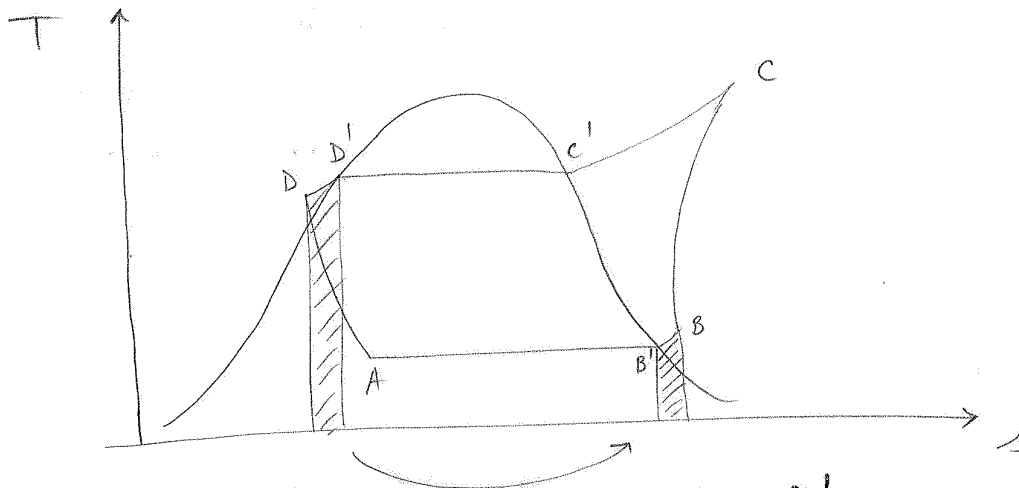
• controllo k'holo  $x_B$  migliorato  
(fine e  $x_B = 1$ )



evento di  $q^{1-}$   
(e  $q^+$ )



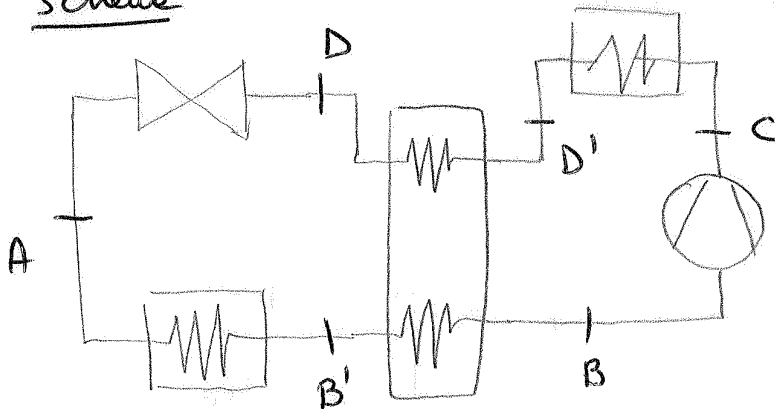
Per non perdere troppo in  $\epsilon$ ,  
è possibile usare una rigenerazione



Utilizzare il calore ceduto da D e D' per  
scaldare il fluido da B' e B.

→  $T_{min}$  e  $T_{max}$  rimangono invariate  
(caso  $\epsilon$  in confronto al caso  
non-R)

scheme



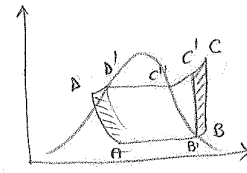
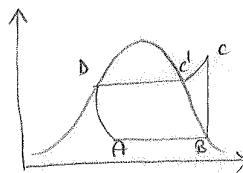
Note (di confronto)

- $l_T(BC) > l_T(B'C')$

la turbine produce maggior lavoro

- $q_{AB'}^{assorbito} > q_{AB}$

la valvola fa sì che il q condotto è maggiore  
(h'olo)



A questo punto, posso definire le variabili di stato del gas-miscela in funzione delle variabili dei gas-componenti e delle loro frazioni (molei / mistiche)

Es

$$h = X_A h_A + X_B h_B \quad \text{se } h, s \text{ sono espresse in } \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}, \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot \text{K}}$$

$$s = X_A s_A + X_B s_B$$

$$\tilde{h} = Y_A \tilde{h}_A + Y_B \tilde{h}_B \quad \text{se } \tilde{h} \text{ è espresse in } \frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}}$$

## TIPOLOGIE DI IRREVERSIBILITÀ

- Attrito;
- Scambio di calore fra fonti a temperature diverse;
- Espansione libera gas;
- Miscelamento di componenti chimici diversi

## ② Definisco due grandezze

TITOLO

$$\chi = \frac{M_{\text{vapore}}}{M_{\text{miscela}}}$$

UMIDITÀ  
RELATIVA

$$\varphi = \frac{M_{\text{vapore}}}{M_{\text{vapore, sat}}}$$

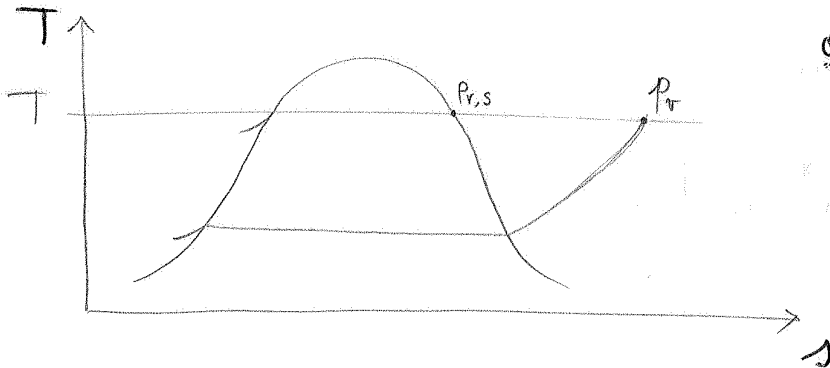
massa di  
vapore in  
condizioni di  
saturazione

Inoltre

$$\varphi = \frac{p_{\text{vapore}}}{p_{\text{vap, sat}}}$$

$$pV = MR^*T$$

con  $T, R^*, V$  costanti



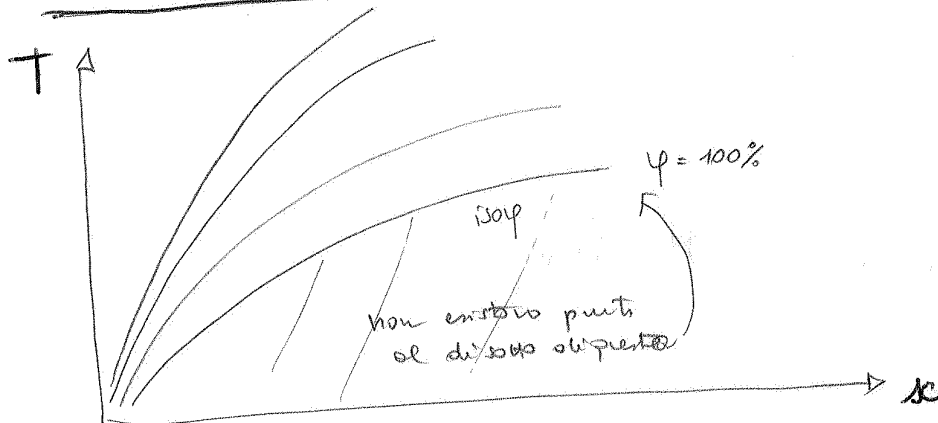
Procedimento

note  $\rightarrow$   $P_{r,s}$  si  
trova sulle curve

$\rightarrow$  con  
Amb umide

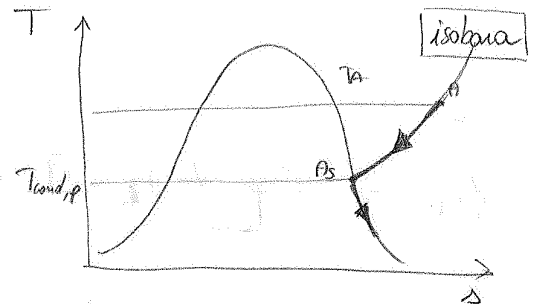
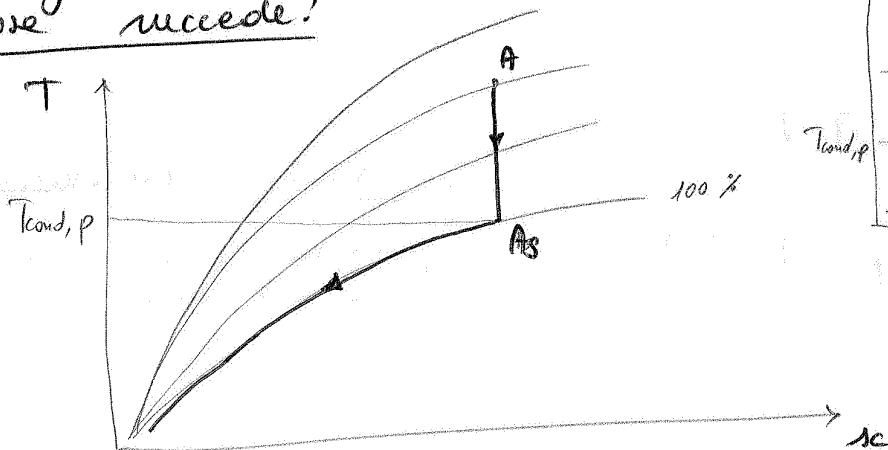
Strumento fondamentale:

## DIAGRAMMA DI MOUJER



note  
isotermie non perfettamente orizzontali  
→ non proprio //

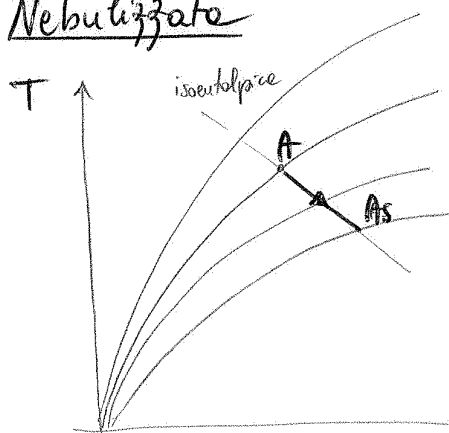
• Se voglio diminuire proporzionalmente le temperature, cosa succede?



Il titolo rimane costante fino alla temperatura di condensazione (e  $p$  costante → isobara) fino  $T_{cond,p}$

⇒ A quel punto, se  $T$  diminuisce ancora, diminuisce anche il titolo (come nel condensatore)

Acque  
Nebulizzate



Inietta acque nebulizzate

→ evapora (perde calore  $\Delta h$  dell'acqua)

↓  
diminuzione delle  $T$

(l'enthalpia è costante, perché il contributo  $Ma_{acqua} \cdot h_{fip}$  è nullo)

↓  
... limito ...

(dopo l'ultima...)

Per cui

Segni negativi?  
 Se il colore è euforico, positivo

$$\begin{cases} \Phi = -G_v h_v - G_e h_I + G_e h_{AI} \\ G_a x_I + G_v - G_e x_{AI} = 0 \end{cases}$$

bilancio  
 ENERGETICO  
 PORTATA

Dal sistema ottengo

$$\frac{\Phi}{G_v} + h_v = \frac{(h_{AI} - h_I)}{(x_{AI} - x_I)}$$

RETTA AMBIENTE

CD soddisfa i

bilanci

note

- AI è determinate  $\rightarrow$  il punto  
 $AI = B$

Come determinare univocamente I?  $\Rightarrow$  Le proprietà termodinamiche solo  
 $x_I$  e  $h_I$  (condizioni volute)

- $\Delta T$  più piccolo possibile  $\rightarrow$  confort (no shock grandi  
 he immersione e ambiente)
- minore spesa energetica

note

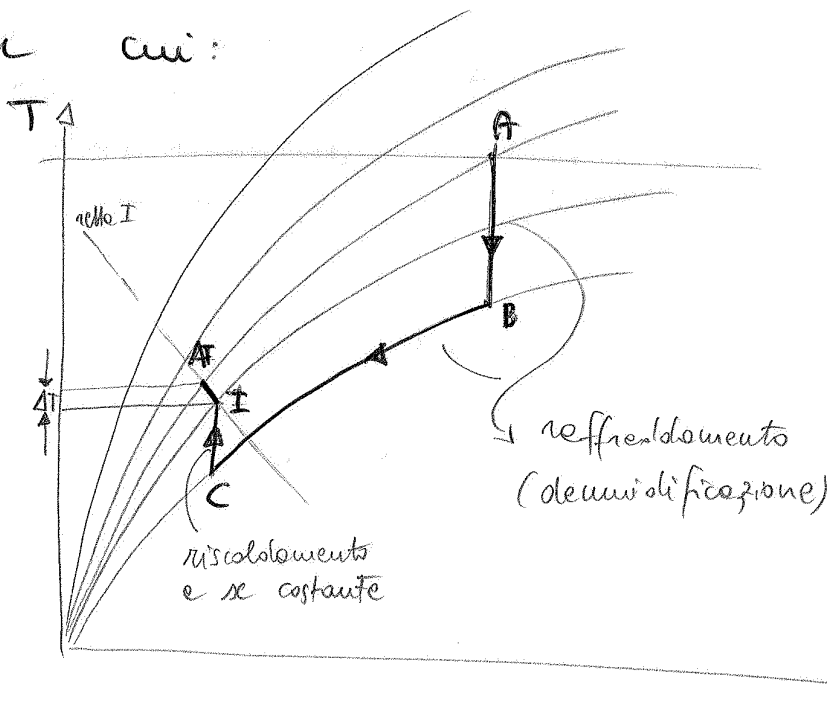
più economico e AI  
 $I \rightarrow AI$

minore salto entalpico, occorre  
 quindi neppure parlare

$$\Phi = G_e (h_{AI} - h_I) - G_v h_v$$

(significare condotti + grandi,  
 neppure veloce  
 $\rightarrow$  minore, adatto)

Per cui:



- ABC raffreddamento  
 (deumidificazione)

- CI riscaldamento  
 e x costante

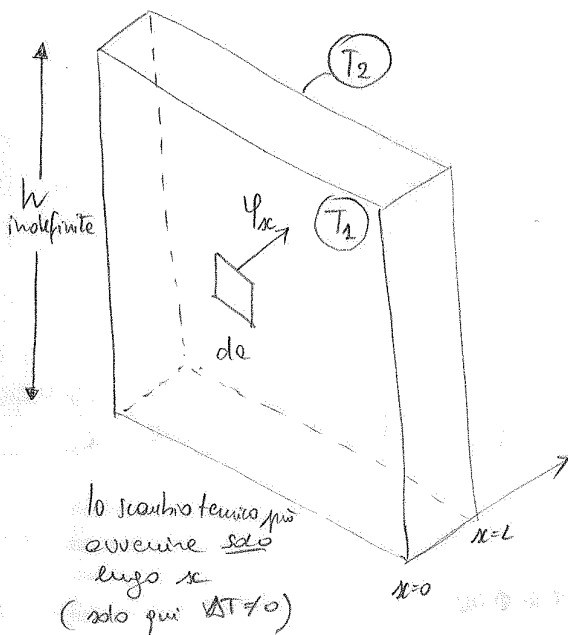
- $I \rightarrow AI$  retta ambiente



→ Le calcolatrici e condensatione utilizzati  
H<sub>s</sub> (acqua esce liquida)

# Conduzione

- Presenza di materia.
- A corpo fermo.
- Avviene per contatto.



$$\Rightarrow \varphi_x \propto \frac{|T_2 - T_1|}{L}$$

La costante di proporzionalità si indica con

$$\lambda \text{ CONDUZIONE } \left[ \frac{W}{mK} \right]$$

FLUSSO PER  
UNITÀ DI SUPERFICIE  
(IN DIREZIONE  $x$ )

$$\varphi_x = \frac{\lambda (T_1 - T_2)}{L} \quad T_1 > T_2 \quad \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

$\lambda$  è una caratteristica dei materiali che dipende al limite dalle temperature, ma non dalle geometrie

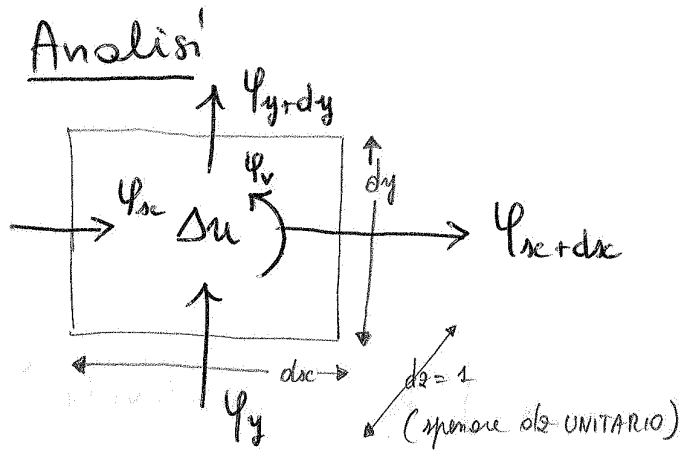
Mecanismi principali

**FONONICO** | Associato alla vibrazione delle molecole

→ buon conduttore ⇒ reticolo cristallino

**ELETTRICO** | Associato al movimento degli elettroni liberi

→ buon conduttore ⇒ materiali metallici



IPT

$$\Phi - \cancel{W_t} = \left( \frac{\partial U}{\partial t} \right)_{vc} + \sum_i \cancel{G_i h_i}$$

no lavoro

no potenze in mano

$\Delta(e, ep) = 0$  corpo in quiete

$$\Phi = \left( \frac{\partial U}{\partial t} \right)_{vc} \quad \text{ovvero} \quad \varphi = \left( \frac{\partial u}{\partial t} \right)_{vc}$$

Per cui:

$$\underbrace{\varphi_x}_{\rho=1} dy + \varphi_y dx - \varphi_{x+dx} dy - \varphi_{y+dy} dx + \varphi_v dx dy =$$

$$= \left( \frac{\partial u}{\partial t} \right)_{vc} = \frac{\partial}{\partial t} (c \rho T dx dy)$$

note

$$dU = d(M du) =$$

$$= \underbrace{\rho dV}_{dM} \cdot \underbrace{c}_{du} dT$$

Inoltre, posso sviluppare (Taylor)

$$\varphi_{x+dx} = \varphi_x + \frac{\partial \varphi_x}{\partial x} dx + o(c)$$

$$\varphi_{y+dy} = \varphi_y + \frac{\partial \varphi_y}{\partial y} dy + o(c)$$

perché sono  
funzioni lineari  
 $\varphi$ !

Per cui ottengo

$$\left\{ \begin{array}{l} - \frac{\partial \varphi_x}{\partial x} (dx dy) - \frac{\partial \varphi_y}{\partial y} (dx dy) + \varphi_v (dx dy) = \rho c (dx dy) \frac{\partial T}{\partial t} \\ \vec{\varphi} = - \lambda \nabla T = - \lambda \left( \frac{\partial T}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \vec{j} \right) \end{array} \right.$$



ottengo

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_x = \vec{\varphi} \cdot \vec{i} = - \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \\ \varphi_y = \vec{\varphi} \cdot \vec{j} = - \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \end{array} \right.$$

Per risolvere il problema abbiamo bisogno di ulteriori informazioni:

- GEOMETRIA ( $\nabla^2$ )
- PROP. MATERIALI ( $\rho, c, \lambda$ )
- CONDIZIONI AL CONTO RNO (mob. conv., ...)
- CONDIZIONI INIZIALI (se il prop. è transiente)

Condizioni al contorno

1) DIRICHLET (o 1° tipo)

$T_s$  nota

2) NEUMANN (o 2° tipo)

$\varphi_s$  noto ( $\rightarrow$  e quindi  $\text{grad } T|_s$ )

Caso particolare

ADIABATICA

$$\varphi_s = 0$$

3)  $\varphi_{s, \text{cond, ind}} = \varphi_{s, \text{conv, ext}}$

$$\Rightarrow \varphi_x = - \lambda \frac{\partial T}{\partial x} =$$

$$= - \lambda \frac{(T_2 - T_1)}{L} = \lambda \frac{(T_1 - T_2)}{L} \quad \text{c.k.V}$$

$$\Phi = \varphi_x \cdot A = \frac{A \cdot \lambda}{L} (T_1 - T_2)$$

Analogo elettrico, con la legge di Ohm

$$I = \frac{\Delta V}{R}$$

Posso definire in analogia una RESISTENZA TERMICA  
(in questo caso di CONDUZIONE)

$$\Phi = \frac{\Delta T}{L/A\lambda}$$

$$R_{\text{cond}} = \frac{L}{A\lambda}$$

RESISTENZA TERMICA  
CONDUZIONE

Per cui ci troviamo nelle <sup>condiz.</sup> ~~condiz.~~ di risolvere problemi del tipo in fig:

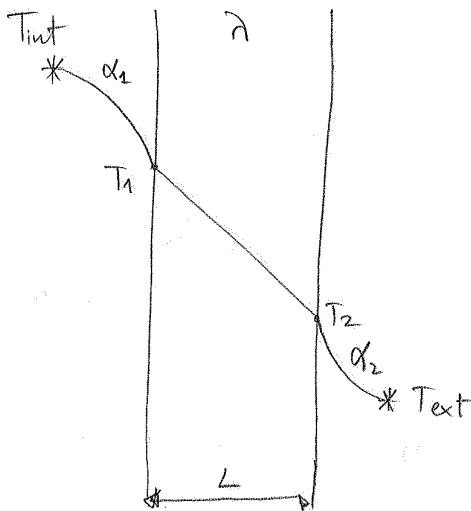


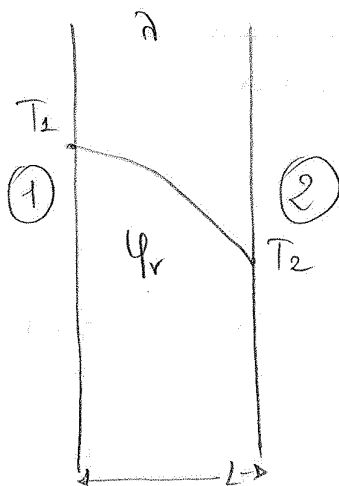
fig.

$$R_{TOT} = \frac{1}{\alpha_1 A} + \frac{L}{\lambda A} + \frac{1}{\alpha_2 A}$$

$$\phi = \frac{\Delta T}{R_{TOT}} = \frac{T_{ext} - T_{int}}{R_{TOT}}$$



Poisson



Input

- $\lambda, \rho, c$  noti
  - $\varphi_v \neq 0$
  - Condiz. stazionarie
  - Cond. al contorno Dirichlet
- Poisson

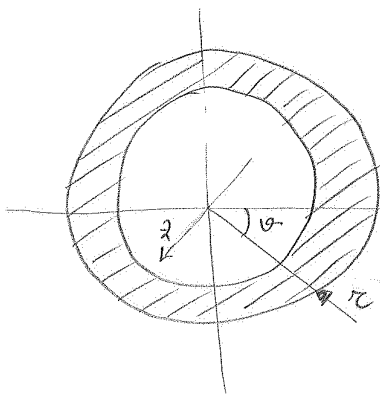
$$\lambda \nabla^2 T + \varphi_v = 0$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = -\frac{\varphi_v}{\lambda} \rightarrow T = -\frac{\varphi_v}{\lambda} \frac{x^2}{2} + R_1 x + R_2$$

Impongo le condiz al contorno e ottengo

$$\begin{cases} R_1 = \frac{2\lambda (T_2 - T_1) + \varphi_v L^2}{2\lambda L} \\ R_2 = T_1 \end{cases}$$

Tubo. Condizioni al contorno,  $P_r = 0$  (isoplece)



$$\nabla^2 T = 0$$

ovvero

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0$$

formula conosciuta

Situazione che interessa, abbiamo  $T$  indipendente da  $\theta$  e da  $z$

$$\Rightarrow \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = 0$$

ovvero

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0$$

$$\Rightarrow r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} = \text{costante}$$

ovvero  $\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{R_1}{r}$

$$\Rightarrow T = \underline{R_1 \ln r + R_2}$$

Impongo le condiz al contorno di Dirichlet

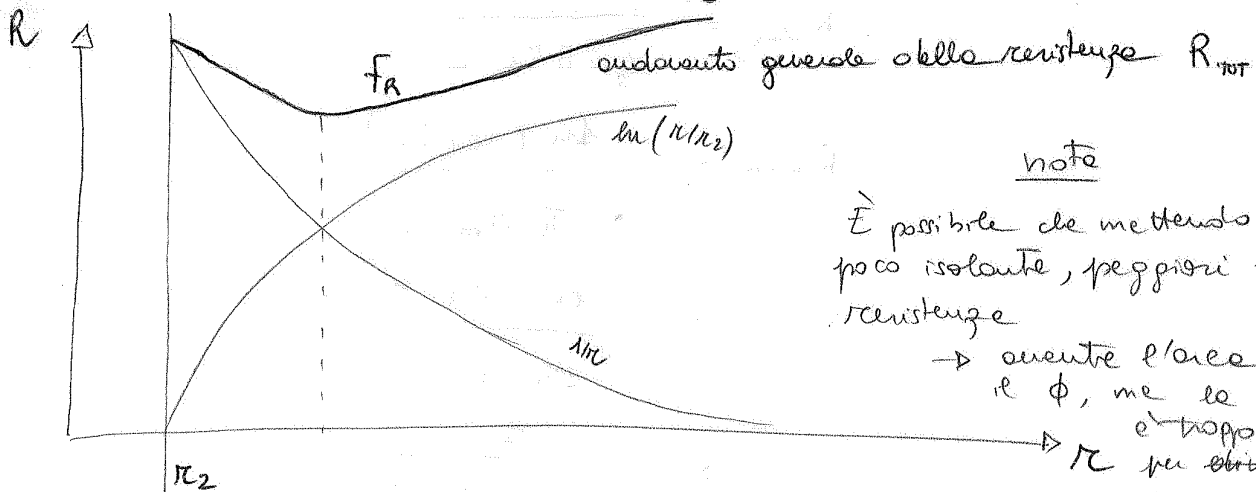
$$\begin{cases} T_1 = R_1 \ln r_1 + R_2 \\ T_2 = R_1 \ln r_2 + R_2 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} R_1 = \frac{(T_1 - T_2)}{\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)} \\ R_2 = T_1 - \frac{(T_1 - T_2) \ln r_1}{\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)} \end{cases}$$

- In particolare posso vedere come varia  $\phi$  in funzione di  $r_3$  (raggio esterno isolante)

$$\phi(r) = \frac{T_i - T_e}{R_{(conv, h, cond, 1)}^* + \frac{\ln(r/r_2) \alpha_2 \cdot r + \delta_{is}}{(2\pi L)(\alpha_2 \delta_{is}) \cdot r}}$$

- $R^*$  costante
- $R_{cond, 2}$  ha andamento logaritmico, con  
 $r = r_2$  ( $r_{min}$ )  $\rightarrow R_{cond, 2} = 0$  [no isolante]  
 $r > r_2 \rightarrow R_{cond}$  crescente
- $R_{conv, B}$  ha andamento  $\frac{1}{r}$  iperbolico, diminuisce.



Studio del minimo

$$\frac{d R_{TOT}}{dr} = 0 \rightarrow \frac{1}{2\pi L \delta_{is}} \cdot \frac{1}{r} - \frac{1}{2\pi \alpha_B L r^2} = 0$$

RAGGIO CRITICO  
DI ISOLAMENTO

$$r_c = \frac{\delta_{isolante}}{\alpha_{fluido\ ext}}$$

In generale  
 $r_c \approx 2 \text{ mm}$   
 $(\delta \approx 0,03, \alpha \approx 10 \div 20)$



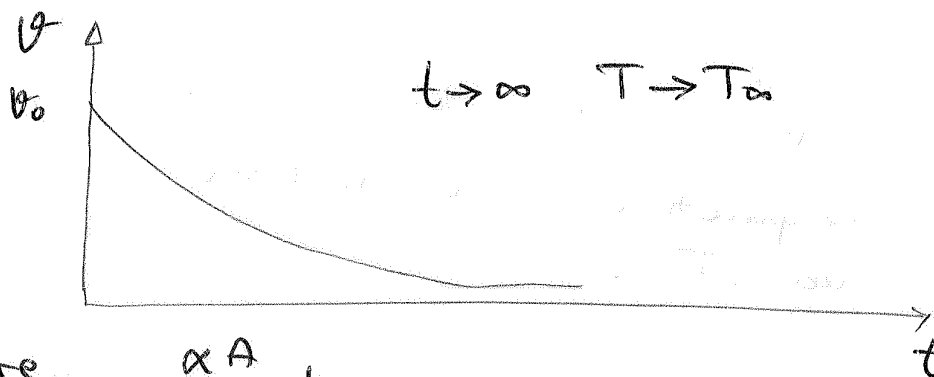
Posso scrivere

$$\rho V c \frac{d\vartheta}{dt} + \alpha A \vartheta = 0$$

equazione differenziale a variabili separabili

$$\vartheta = \vartheta_0 e^{-\frac{\alpha A}{\rho V c} \cdot t}$$

con  $\vartheta_0 = T_0 - T_\infty$



Esponente  $\frac{\alpha A}{\rho V c} t$

$$\begin{aligned} \frac{\alpha A}{\rho V c} t &= \frac{\alpha \cdot t}{\rho c} \frac{A}{V} = \text{Definisco} \\ &= \frac{\alpha t}{L^* \lambda} \cdot \frac{\lambda}{\rho c} = \begin{aligned} &\cdot \boxed{L^*} \text{ LUNGHERZA CARATTERISTICA} \\ &\quad \boxed{(V/A)} \\ &\cdot \boxed{a} \text{ DIFFUSIVITA' TERMICA} \\ &\quad \boxed{\frac{\lambda}{\rho c}} \end{aligned} \\ &= \frac{a \alpha t}{L^* \lambda} \cdot \frac{L^*}{L^*} \end{aligned}$$

$$Bi = \frac{\alpha L}{\lambda} \quad \text{numero di BIOT}$$

adimensionato

La relazione  
studiata ha  
senso per

$$Bi \ll 1$$

(è grande...)

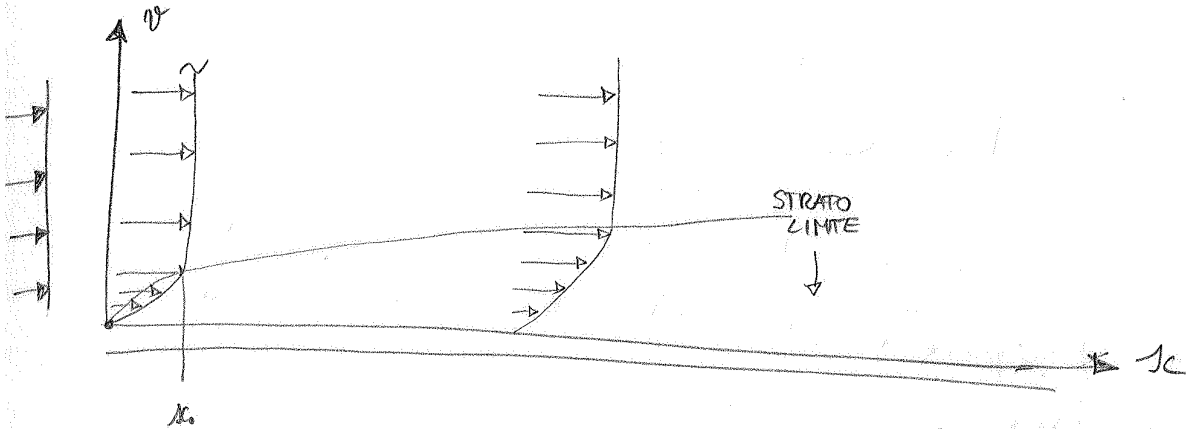
Discriminate

$$Bi_0 \leq 0,1$$

(allineati la cond. dif.  
diventa rilevante)

Caso A.

- Convezione forzata
- superficie liscia



Le particelle a contatto della parete avrà  
 $v = 0$  per attrito, viscosità.

A loro volta, queste particelle trasmettono il  
 disturbo che arriverà fino ad un certo  
 valore  $y$  ( $y = y(x)$ )

Le zone in cui la presenza della parete  
 provoca degli effetti di rallentamento e' delle

STRATO LIMITE FLUIDODINAMICO

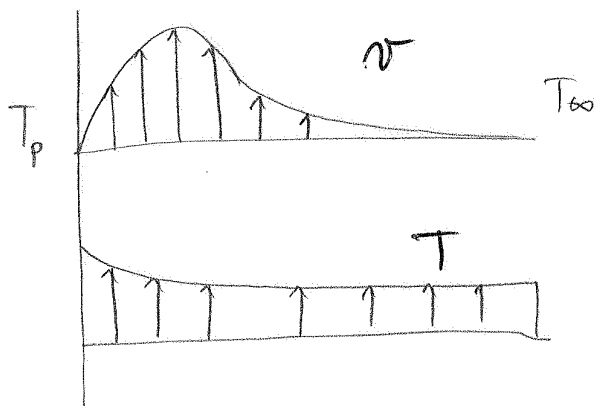
$$\delta_F = \frac{v}{v_{\infty}} \quad (\text{spessore strato})$$

discriminante

$$\text{sheto} = \delta_F < 0,99$$

## Corso C

- Convezione naturale
- Deflusso esterno



note

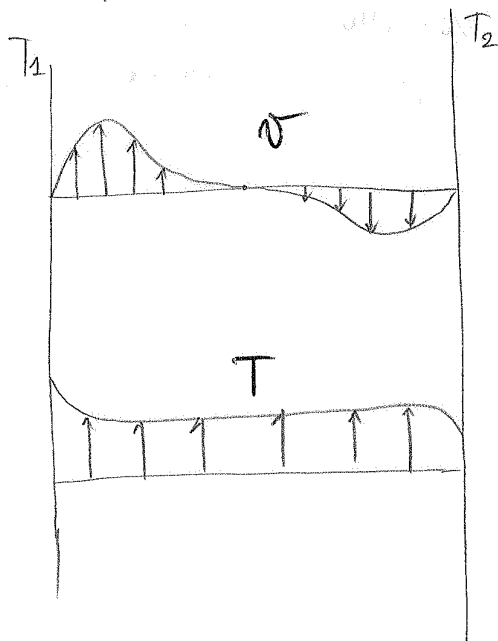
e il disturbo si propaga

- $v = 0$  sulle pareti / Tutte vie più si avvicina, maggiore è la temperatura  $\rightarrow$  minore densità  $\rightarrow$

gravità fa sì che scenda + velocemente

## Corso D

- Convezione naturale
- Deflusso interno



avvicinate con

$$T_1 > T_2$$

I numeri adimensionati sono

$$Re = \frac{\text{Forze cinetiche}}{\text{Forze viscosi}} = \frac{\rho v L}{\mu} \quad \text{numero di REYNOLDS}$$

$$Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda} \quad \text{numero di PRANDEL}$$

e Nusselt, che può essere espresso come

$$Nu = c Re^a \cdot Pr^b$$

note

- $Re = \frac{\rho v L}{\mu}$ , voglio conoscere  
per me avere  
⇒ ne faccio un modello,  
L più piccolo, avendo  
v con Re non cambia!

Infine

$$\begin{cases} Nu = c Re^a Pr^b \\ Nu = \frac{\alpha L}{\lambda} \end{cases} \Rightarrow \underline{\alpha \text{ cercato!}}$$

Ad esempio

$$Nu = 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.33}$$

Il numero in gioco è

$$Gr = \frac{g \beta L^3 (T_p - T_\infty)}{\nu^2} \quad \text{numero di GRASHOFF}$$

con  $\nu$   $\frac{\text{VISCOSITA'}}$   
CINEMATICA

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

$\frac{\text{VISCOSITA'}}$   
DENSITA'

$$Nu = C Gr^e \cdot Pr^b$$

(in molti casi  $e = b \rightarrow Nu = C (Gr Pr)^a$ )

$Gr Pr = Re$  ma to' ....

$$\Phi_{x+dx} = \Phi_x + \frac{\partial \Phi_x}{\partial x} dx$$

Per cui diventa

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{\partial \Phi_x}{\partial x} dx - \Phi_{conv} = 0 \end{array} \right. \quad \text{Bilancio eneg.}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_x = -\lambda A \frac{\partial T}{\partial x} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \nearrow A = \text{sezione} \\ \text{Modello Fourier} \end{array}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_{conv} = \alpha p dx (T - T_{\infty}) \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \nearrow \text{Superficie di superficie totale per convezione} = p \cdot dx \end{array}$$

Per cui definendo  $\vartheta = T - T_{\infty} \Rightarrow \frac{d^2 \vartheta}{dx^2} = \frac{d^2 T}{dx^2}$

otengo

$$\frac{d^2 \vartheta}{dx^2} - \frac{\alpha p}{\lambda A} \vartheta = 0$$

Definisco

CARATTERISTICA  
MORFIA DELL'NOTA

$$m^2 = \frac{\alpha p}{\lambda A}$$

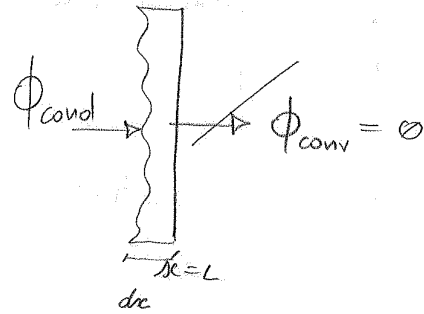
Da cui ottengo

$$\vartheta = R_1 e^{-mx} + R_2 e^{mx}$$

espressione  
generale  
soluzione

## Punto Addebatto

$$\boxed{\phi_{\text{punte}} = 0} \quad \text{Condizione}$$



Per cui  $\phi_{\text{conv}}$

$$-\lambda A \frac{\partial T}{\partial x} = -\lambda A \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad \text{per } x=L$$

per cui  $\frac{\partial}{\partial x} (R_1 e^{-mx} + R_2 e^{mx}) \Big|_{x=L} = 0$

$$\Rightarrow -R_1 e^{-mL} + R_2 e^{mL} = 0$$

Inoltre  $x=0 \rightarrow \phi = \phi_0$

$$\begin{cases} \phi_0 = R_1 + R_2 \\ -R_1 e^{-mL} + R_2 e^{mL} = 0 \end{cases}$$

Da cui

$$\boxed{R_1 = \phi_0 \cdot \frac{e^{-mL}}{e^{-mL} + e^{mL}}}$$

$$\boxed{R_2 = \phi_0 \cdot \frac{e^{-mL}}{e^{-mL} + e^{mL}}}$$

~~$R_2 = \phi_0 \cdot \frac{e^{-mL}}{e^{-mL} + e^{mL}}$~~

ovvero  $R_2 = \phi_0 \left( 1 - \frac{e^{-mL}}{e^{-mL} + e^{mL}} \right)$

$$\Rightarrow \boxed{\phi = \phi_0 \frac{\cosh(m(L-x))}{\cosh(mL)}}$$

# Scambiatori di Calore

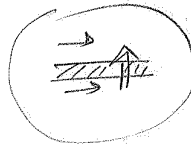
(sono coinvolti sempre due fluidi)

La classe avviene secondo tre criteri.

## MISCELAZIONE

- Scambiatori di calore a miscela.
- a superficie

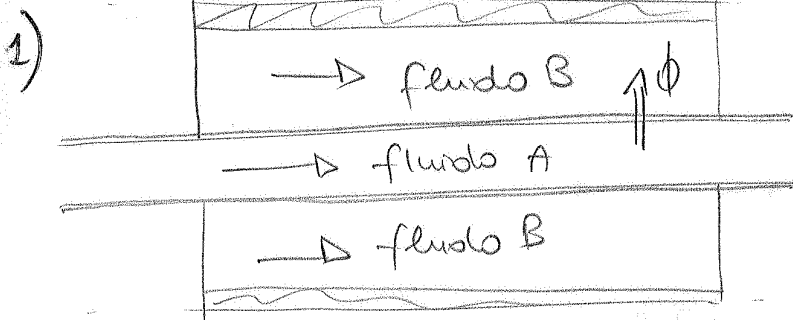
si calcolano separatamente con due bilanci energetici



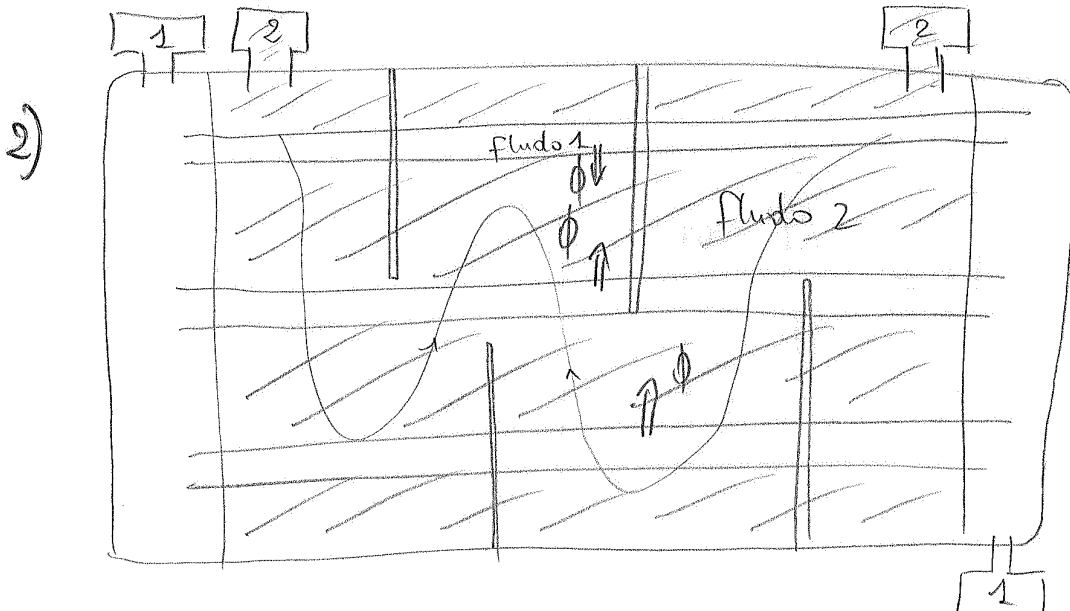
## RUOLO

- Evaporatori
- Condensatori

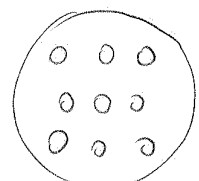
## GEOMETRIA



TUBI  
CONCENTRICI



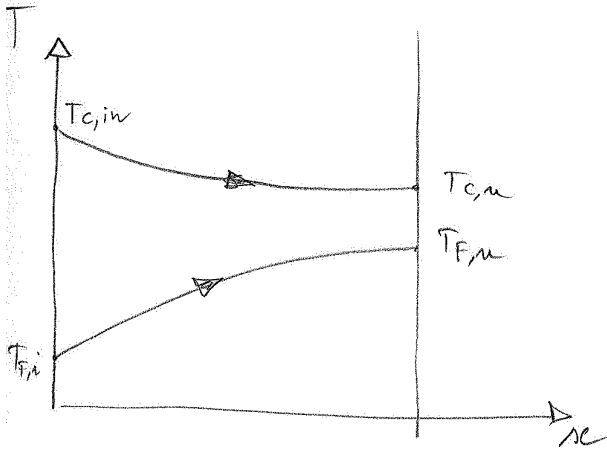
TUBI  
E  
MANTELLO  
(efficiente, compatto)



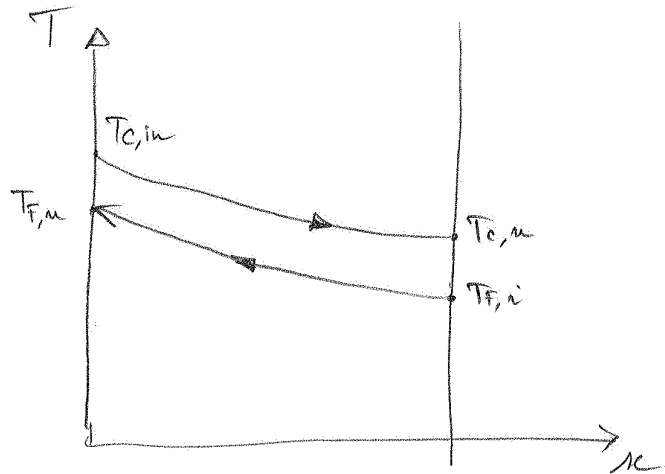


Analisi

→ Ma non è vero che i fluidi entrano e escono nello scambiatore, la loro  $T$  varia.



EQUICORRENTE



CONTROCORRENTE

Nota che

$T_{f,u} > T_{c,u}$   
è possibile!

(occluso...)

(in generale le configurazioni sono MISTE)

→ occorre studiare i due casi e introdurre in seguito dei coeff. correttivi)

in generale più efficace

→  $T_{c,c} - T_{f,c}$

+ spinge la lunghezza dello scambiatore

Metto e note

$$\begin{cases} dT_c = -d\phi \left( \frac{1}{C_c} \right) \\ dT_F = d\phi \left( \frac{1}{C_F} \right) \\ d\phi = K dA (\bar{T}_F - \bar{T}_c) \end{cases} \begin{aligned} &\rightarrow \frac{1}{C_c} (T_{c,u} - T_{c,i}) = -\phi \quad * \\ &\rightarrow C_F (T_{F,u} - T_{F,i}) = \phi \\ &\rightarrow \text{poniamo} \\ &d(T_F - T_c) = d\phi \left( \frac{1}{C_F} + \frac{1}{C_c} \right) \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \frac{d(T_F - T_c)}{(T_F - T_c)} = -K \left( \frac{1}{C_c} + \frac{1}{C_F} \right) \cdot dA$$

Integrando

$$\ln \frac{(T_F - T_c)_2}{(T_F - T_c)_1} = -K \left( \frac{1}{C_c} + \frac{1}{C_F} \right) A \quad * \text{ sostituisco}$$

Pongo  $\Delta_2 = T_{c,u} - T_{F,u}$   $\Delta_1 = T_{c,i} - T_{F,i}$   $\parallel$  noto, nel caso CONTROCORRENTE vanno i  $\Delta$ , ma non il risultato finale

$$\phi = K \cdot A \cdot \frac{\Delta_2 - \Delta_1}{\ln \left( \frac{\Delta_2}{\Delta_1} \right)} = KA \Delta T_{m, \log}$$

ovvero

DIFFERENZA DI  
TEMPERATURA MEDIA  
LOGARITMICA

$$\Delta T_{m, \log} = \frac{\Delta_2 - \Delta_1}{\ln \left( \frac{\Delta_2}{\Delta_1} \right)}$$