



Formulario Macchine motrici

Macchina motrice ideale

Rendimento di 1° principio

Macchina motrice reale

Rendimento di 1° principio

Rendimento di 2° principio

Esempio:

Ciclo diretto di Carnot

Bilancio di 1° principio

Rendimento Ciclo di Carnot

Lavoro Totale

Rendimento di 2° principio

Ciclo Joule - Brayton ideale

Bilanci 1° principio

Isobare → rapporto di compressione/espansione

Isoentropiche

Rendimento ideale

Bilanci entropici

Ciclo Joule - Brayton reale

Compressione/espansione non isoentropica $s \neq \text{cost}$

Compressore reale

Turbina reale

Isobare → rapporto di compressione/espansione

Compressione/espansione non isoentropiche

Rendimento

Rendimento di secondo principio

Rendimento di secondo principio rispetto al ciclo di Carnot

Bilanci entropici

Sul sistema completo

Sul ciclo termodinamico (senza serbatoi T')

Ciclo Rankine

Introduzione: Ciclo di Carnot a vapore

Ciclo Rankine ideale

Componenti ciclo Rankine ideale

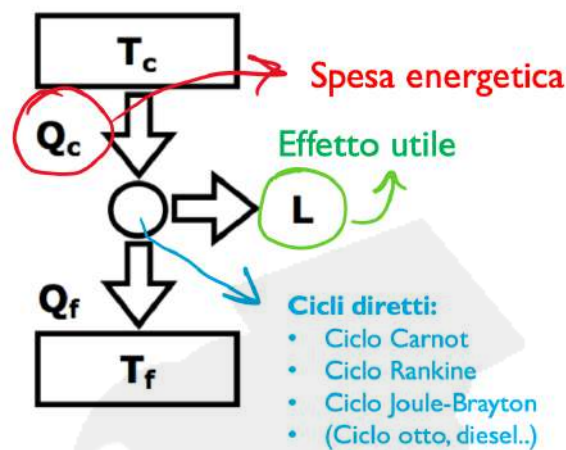
Calcolo Entalpia delle trasformazioni

Rendimento ciclo Rankine ideale

Motore

Scopo: produce lavoro meccanico

Sono regolate dall'enunciato di Kelvin



Produco lavoro meccanico

Parametro di merito: **rendimento**

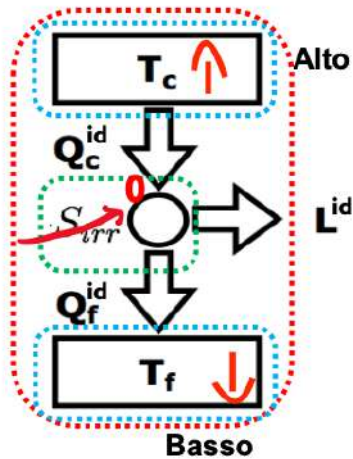
$$\eta = \frac{L}{Q_c}$$

$$0 < \eta < 1$$

Macchina motrice ideale

Ideale = **reversibile** → non genera entropia per irreversibilità S_{irr}

La **variazione di entropia** totale è **nulla!**



Bilancio entropia sul sistema complessivo:

$$\cancel{S_{irr}^{(int+est)}} = \Delta S_{tot} (= \Delta S_c^{id} + \Delta S_f^{id} + \cancel{\Delta S_{ciclo}^0})$$

$$\Delta S_c^{id} = -\Delta S_f^{id}$$

Bilancio entropia serbatoi termici:

$$\Delta S_c^{id} = -\frac{Q_c^{id}}{T_c} \quad \Delta S_f^{id} = \frac{Q_f^{id}}{T_f}$$

$$\begin{aligned} \Delta S &= \int \frac{dQ}{T} \quad T = cost \\ &= \Delta S = \frac{Q}{T} \end{aligned}$$

$$Q_c = -\Delta S_c \cdot T_c$$

$$Q_f = \Delta S_f \cdot T_f$$

Bilancio energia su macchina ciclica:

$$Q_c^{id} - L^{id} - Q_f^{id} = 0$$

$$L = Q_c - Q_f \rightarrow 1^\circ \text{ principio}$$

Rendimento di 1° principio

Rendimento ideale
irreversibilità interne ed esterne nulle

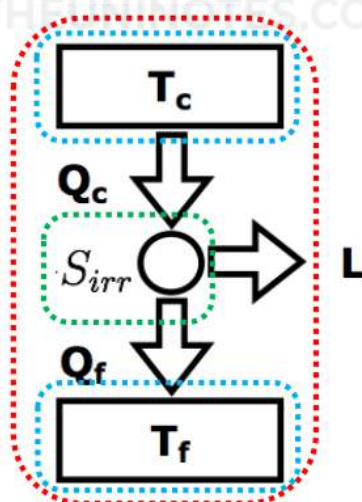
$$0 < \eta^{id} < 1$$

$$\eta^{id} = \frac{L^{id}}{Q_c^{id}} = \frac{Q_c^{id} - Q_f^{id}}{Q_c^{id}} = 1 - \frac{T_f \Delta S_f^{id}}{T_c (-\Delta S_c^{id})} = 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

Macchina motrice reale

reale = irreversibile

$$S_{irr}^{(int+est)} > 0$$



Bilancio entropia sul sistema complessivo:

$$S_{irr}^{(int+est)} = \Delta S_{tot} (= \Delta S_c + \Delta S_f + \overset{0}{\cancel{\Delta S_{ciclo}}})$$

$$\Delta S_f = -\Delta S_c + S_{irr}$$

A **parità di spesa energetica**, nel caso della **sorgente calda**, è come se fosse una **macchina motrice ideale** → perché **analizziamo a parità di condizioni iniziali** cosa cambia tra le due macchine

$$\begin{aligned} Q_c &= Q_c^{id} \\ \Delta S_c &= \Delta S_c^{id} \end{aligned}$$

Nel caso **del pozzo freddo**:

$$\begin{aligned} \Delta S_f &> \Delta S_f^{id} \\ Q_f &> Q_f^{id} \end{aligned}$$

E di conseguenza **l'effetto utile** (lavoro prodotto) è diminuito:

$$L < L^{id}$$

Rendimento di 1° principio

$$\eta = \frac{L}{Q_c} < \eta^{id} \nrightarrow \left(\eta \neq 1 - \frac{T_f}{T_c} \right)$$

$0 < \eta < \eta^{id} \rightarrow$ non può mai essere maggiore del rendimento ideale della stessa macchina.

Rendimento di 2° principio

Indica **quanto bene fa la mia macchina reale rispetto alla macchina ideale**.

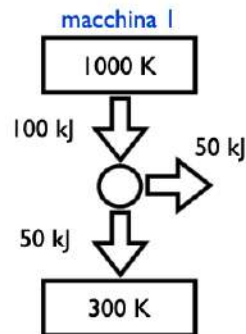
Se il rendimento è pari al 100% → indica che il **rendimento reale = rendimento ideale**

$$\eta_{II} = \frac{\eta}{\eta^{id}}$$

$0 < \eta_{II} < 1 \rightarrow$ se è maggiore, è impossibile

Esempio:

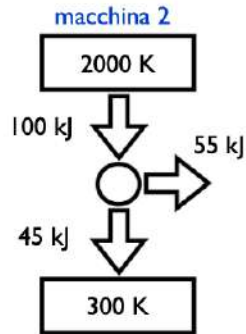
$$\bullet \quad \eta = \frac{L}{Q_c} \quad \eta_{II} = \frac{\eta}{\eta^{id}}$$



$$\eta = 0.5$$
$$(\eta^{id} = 0.7) \quad \eta_{II} = 0.71$$

↓

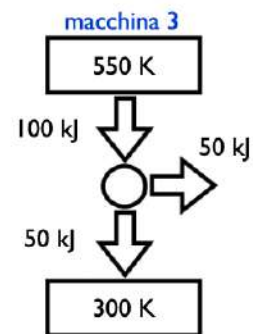
Efficiente utilizzo
delle risorse



$$\eta = 0.55$$
$$(\eta^{id} = 0.85) \quad \eta_{II} = 0.65$$

↓

Nonostante $\eta_2 > \eta_1$, maggiori
irreversibilità del processo



$$\eta = 0.5$$
$$(\eta^{id} = 0.45) \quad \eta_{II} > 1$$

↓

Processo impossibile.

Ciclo diretto di Carnot

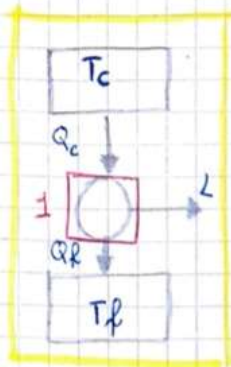
▼ Esempio

Una macchina motrice opera tra una sorgente termica a $T_c = 750^\circ\text{C}$ e un pozzo termico a T_f con un rendimento di secondo principio $\eta_{II} = 0.75$. La macchina ciclica esegue un ciclo di Carnot diretto ideale con temperatura minima (T_f) pari a T_f , assorbendo dalla sorgente calda $Q_c = 1000\text{ J}$ e cedendo al pozzo freddo $Q_f = 400\text{ J}$.

Determinare l'irreversibilità generata nel processo, il lavoro perso a causa di tale irreversibilità e la temperatura massima (T_2) del ciclo di Carnot.

Esercizio 1

Ciclo DI CARNOT DIRETTO IDEALE



2

$$T_c = 750^\circ\text{C} = 1023\text{ K}$$

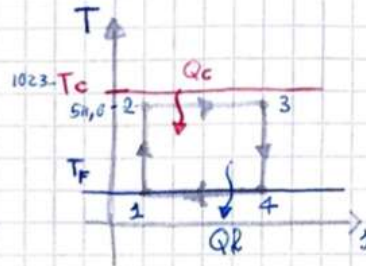
$$m_{II} = 0,75$$

$$T_1 = T_f = T_4$$

$$Q_c = 1000\text{ J}$$

$$Q_f = 400\text{ J}$$

$$? S_{irr} \quad L_{perso} \quad T_2 = T_3 = ?$$



Si come $T_2 < T_c \rightarrow$ il ciclo di Carnot, non è uguale al ciclo ideale

1-4, 2-3 $\rightarrow$ ISOTERMA

1-2, 3-4 $\rightarrow$ adiabatiche

L'entropia viene generata nella sorgente calda $\Delta T > 0$

BILANCIO 1° PRINCIPIO SU UN INTERO ~~MACCHINA~~ SISTEMA

$$\textcircled{1} Q_c - L - Q_f = 0 \rightarrow Q_c - Q_f = L \rightarrow L = 600\text{ J}$$

$$\eta_I = \frac{L}{Q_c} = 0,6 = 60\%$$

$$\eta_{II} = \frac{\eta_I}{\eta_{id}} \rightarrow \eta_{id} = \frac{\eta_I}{\eta_{II}} \rightarrow \frac{1 - T_f}{T_c} \Rightarrow \frac{\eta_I}{\eta_{II}} \rightarrow T_f = T_c \cdot \left(1 - \frac{\eta_I}{\eta_{II}}\right) = 209,63\text{ K} \quad (-68,52^\circ\text{C})$$

$$\eta_{id} = \frac{1 - T_f}{T_c} = 0,8 = 80\%$$

$$L_{perso} = L_{id} - L \Rightarrow L_{perso} \rightarrow L_{perso} = 800 - 600 = 200\text{ J}$$

$$\eta_{id} = \frac{L_{id}}{Q_c} \Rightarrow L_{id} = \eta_{id} \cdot Q_c \Rightarrow L_{id} = 800\text{ J}$$

$$\eta_{Carnot} = \frac{1 - T_f}{T_2} = \frac{L}{Q_c} = 0,6 \rightarrow T_2 = \frac{T_1}{1 - \eta_{Carnot}} = 511,6\text{ K} = 238,6^\circ\text{C}$$

BILANCIO DI ENTROPIA

$$\textcircled{2} S_{in} + S_{irr} - S_{out} = \Delta S_{tot}$$

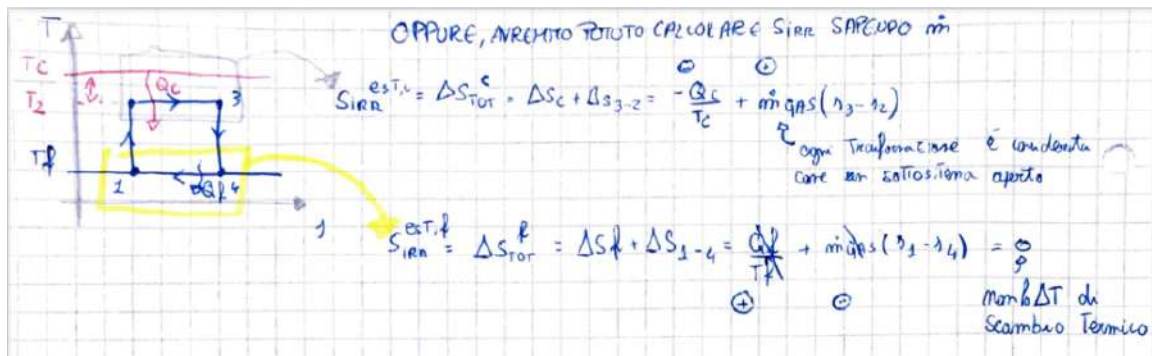
$$S_{irr} = \Delta S_{tot} \rightarrow S_{irr} = \Delta S_c + \Delta S_f + \Delta S_{perso}$$

non ha fenomeni di accumulo

$$\Delta S_c = \frac{-Q_c}{T_c} = \frac{-1000\text{ J}}{1023,15\text{ K}} = -0,98\text{ J/K} \rightarrow \text{diminuisce l'entropia}$$

$$\text{Temp costate} \rightarrow \Delta S_f = \frac{Q_f}{T_f} = \frac{400\text{ J}}{209,6\text{ K}} = +1,90\text{ J/K}$$

$$S_{irr} = -0,98 + 1,90 = 0,98\text{ J/K}$$

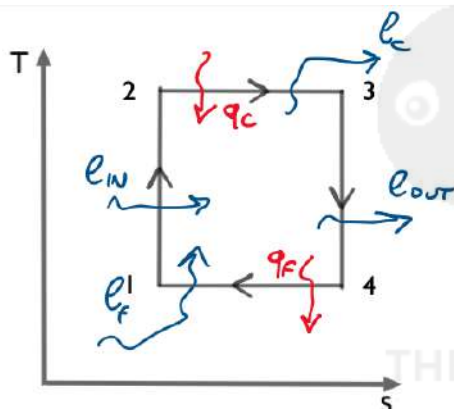


HP: Gas ideale, TIR $\rightarrow S_{irr} = 0$

É un ciclo ideale $\rightarrow$ **irrealizzabile**

É un **ciclo chiuso**, ma ogni **trasformazione** la consideriamo come un **sotto sistema aperto**

In quanto **trasformazione ciclica** $\rightarrow$ si torna allo stato iniziale. È chiuso su se stesso.



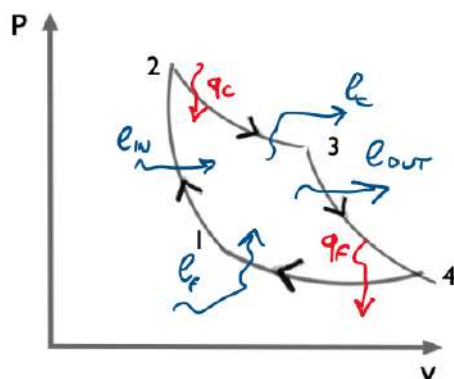
Compressione (4 - 2)

- Isoterma (4-1) + adiabatica (1-2)

Espansione (2-4)

- Isoterma (2-3) + adiabatica (3-4)

Ogni **trasformazione** eseguita la consideriamo come un sistema **aperto** (anche se non cambia nulla essendo ciclica)



$$L = \int v dP$$

Bilancio di 1° principio

$$q_c + l_{in} + l_f = q_f + l_{out} + l_c$$

Compressione (riscaldamento) → Dobbiamo fornire lavoro meccanico

Isoterma → per farlo mantenere a temperatura costante, devo **sottrarre del calore**

- **Iso-T** → $q_f = T_1(s_4 - s_1) = l_f \rightarrow (4-1)$

▼ Dimostrazione

Per q_f è la stessa cosa, cambiano solo i dati.

$$\cancel{h_2 + q_c - h_3 - l_c = 0}$$
$$\cancel{dh = c_p dT}$$
$$q_c = l_c = T(s_3 - s_2)$$
$$dq = T ds$$

Adiabatica → si scalderà → fornisco lavoro meccanico → compressione adiabatica

- **Iso-s** → $l_{in} = c_p(T_2 - T_1) = l_{out} \rightarrow (1-2)$

▼ Dimostrazione

$$h_1 + l_{in} - h_2 = 0$$
$$l_{in} = h_2 - h_1 = c_p(T_2 - T_1)$$

Espansione → genera del lavoro meccanico

Isoterma → espando e quindi si raffredda, **fornisco energia termica** (calore) in modo che la T rimanga costante.

- **Iso-T** → $q_c = T_2(s_3 - s_2) = l_c \rightarrow (2-3)$

▼ Dimostrazione

$$\cancel{h_2} + q_c - \cancel{h_3} - l_c = 0$$

$$\cancel{\Delta h} = c_p \cancel{\Delta T} \quad \downarrow$$

$$q_c = l_c = T(s_3 - s_2)$$

$$dq = T ds \quad \uparrow$$

Adiabatica → si raffredderà → produco lavoro meccanico → non scambio calore

- **Iso-s** → $l_{in} = c_p(T_2 - T_1) = l_{out} \rightarrow (3-4)$

▼ Dimostrazione

$$h_1 + l_{in} - h_2 = 0$$

$$l_{in} = h_2 - h_1 =$$

$$= c_p(T_2 - T_1)$$

(-s)
(-T)

Rendimento Ciclo di Carnot

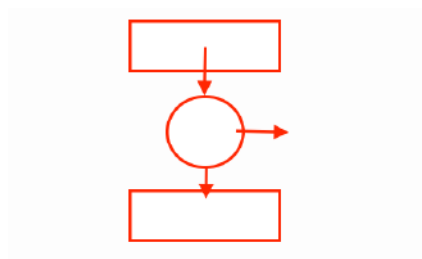
É un **riferimento ideale di prestazione**

É **reversibile**, quindi l'unica fonte di **irreversibilità è di tipo esterno** → dovuto agli scambi di calore all'interno del sistema.

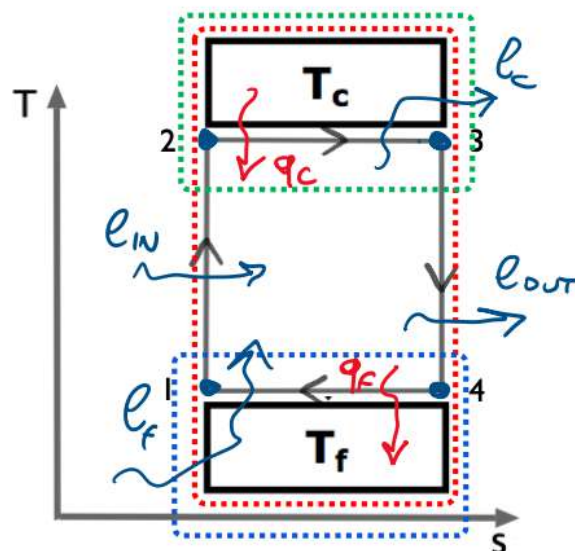
$s_2 - s_3 \rightarrow$ termine entrante di massa e termine uscente di massa. É un **sotto sistema chiuso** → ha un **termine di accumulo**. Tra gli stati 2 e 3 **aumenta l'entropia** ma non la **temperatura**.

NOI LO CONSIDERIAMO INVECE SENZA IRREVERSIBILITÀ.

$T_2 = T_c \rightarrow \Delta T = 0 \rightarrow$ faccio in modo di **non** avere le **irreversibilità esterne**, così da **semplificare** il calcolo.



=



Bilancio entropia su **sistema completo**:

$$s_{irr} (= s_{irr}^{est,c} + s_{irr}^{est,f}) = \Delta s_c + \Delta s_f$$

Bilanci entropia su scambi termici:

$$\begin{aligned} s_2 - s_3 + \cancel{s_{irr}^{est,c}} &= \Delta s_c \\ s_4 - s_1 + \cancel{s_{irr}^{est,f}} &= \Delta s_f \end{aligned}$$

$$(s_3 - s_2) = (s_4 - s_1) \quad \Delta s_c = -\Delta s_f$$

Lavoro Totale

Lavoro totale (NB positivo se uscente):

$$l_{tot} = \cancel{l_{out}} + l_c - \cancel{l_{in}} - l_f = (T_2 - T_1)(s_3 - s_2)$$

Voglio avere un guadagno $\rightarrow l_c > l_f \rightarrow$ siamo a cavallo di due isoentropiche,
 $l_{in} = l_{out}$

$$\begin{aligned}
l_c &= T_2(s_3 - s_2) = q_c \\
l_f &= T_1(s_4 - s_1) = q_f \\
s_3 &= s_4 \quad e \quad s_2 = s_1
\end{aligned}$$

Rendimento ideale

$$0 < \eta^{Carnot} \leq \eta^{id}$$

Se $T_1 = T_c$ (Temperatura **massima** = Temperatura della **sorgente calda**) e $T_2 = T_f$ (Temperatura **minima** = Temperatura del **pozzo freddo**) →
Rendimento del ciclo di Carnot è uguale al rendimento del ciclo ideale.

$$\eta^{Carnot} = \frac{l_{tot}}{q_c} = \frac{(T_2 - T_1)(s_3 - s_2)}{T_2(s_3 - s_2)} = \frac{T_2 - T_1}{T_2} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

$\eta^{Carnot} = \eta^{id}$ di una macchina motrice.

Rendimento di 2° principio

$$\eta_{II} = \frac{\eta^{Carnot}}{\eta^{id}}$$

Se $\eta_{II} = 1 \rightarrow$ sto facendo il massimo possibile

Se $\eta_{II} > 1 \rightarrow$ **Impossibile.**

Ciclo Joule - Brayton ideale

Hp: Gas ideale, TIR → non genera entropia

É un ciclo applicabile nella realtà.

Venne brevettato a metà 1800

É un **sistema chiuso**, ma **composto** da trasformazioni singole che sono **sottosistemi aperti** → scambiano *massa all'interno della macchina*.

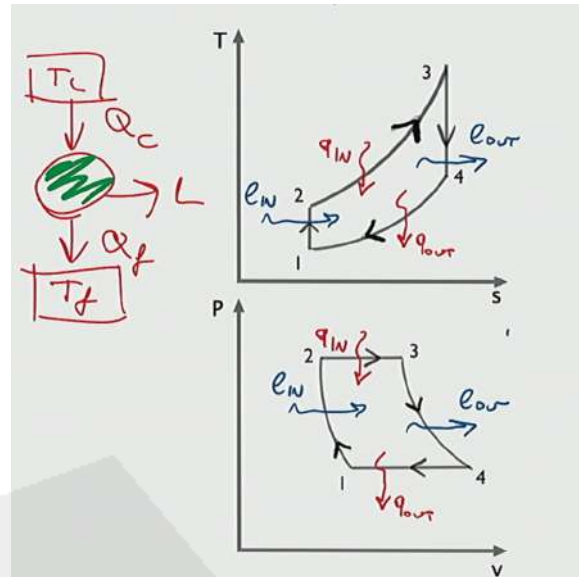
Si avvicina al ciclo di Carnot con le **isobare**, poiché le **isoterme** sono tecnologicamente **impossibili**

Lo scopo è quello di ottenere il **lavoro meccanico**, che ricordiamo per il sistema aperto si calcola come: $l_{in} = v\Delta P$ $v = \frac{1}{\rho}$, mentre il lavoro meccanico: $l = cp\Delta T = \Delta h \rightarrow$ per il gas ideale.

Bilanci 1° principio

$$q_{in} + l_{in} = q_{out} + l_{out}$$

Nel diagramma Ts le isobare sono logaritmiche



Compressione isoentropica (1-2)

$$l_{in} = h_2 - h_1 = c_p(T_2 - T_1)$$

Riscaldamento isobaro (2-3)

Volume specifico aumenta se la temperatura aumenta

$P_2 = P_3 \rightarrow$ densità è diminuita, volume specifico è aumentato

$$q_{in} = h_3 - h_2 = c_p(T_3 - T_2)$$

Espansione isoentropica (3-4)

Non c'è termine di accumulo in quanto è un sottosistema aperto in termini di regime stazionario

$$l_{out} = h_3 - h_4 = c_p(T_3 - T_4)$$

Raffreddamento isobaro (4-1)

$$q_{out} = h_4 - h_1 = c_p(T_4 - T_1)$$

Isobare → rapporto di compressione/espansione

$$\beta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_4}{P_3}$$

Isoentropiche

$$T_2 = T_1 \cdot \beta^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad T_4 = T_3 \cdot \frac{1}{\beta^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \quad \text{con } \gamma = \frac{c_p}{c_v}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} \quad \frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2}$$



$$\frac{T_1}{T_0} = \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad \gamma = \frac{c_p}{c_v}$$

Rendimento ideale

$$\eta_{JB}^{id} = \frac{l_{tot}}{q_{in}} = \frac{l_{out} - l_{in}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}}$$

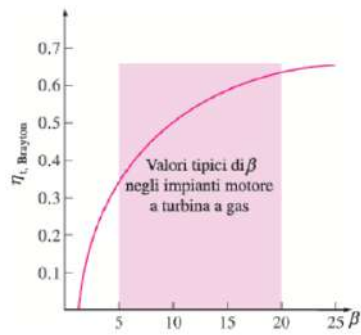
$$\Rightarrow 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \cdot \frac{\frac{T_4}{T_1} - 1}{\frac{T_3}{T_2} - 1} = 1 - \frac{T_1}{T_2} < \eta_{Carnot}$$

$$| \quad T_2^{JB} \ll T_2^{Carnot}$$

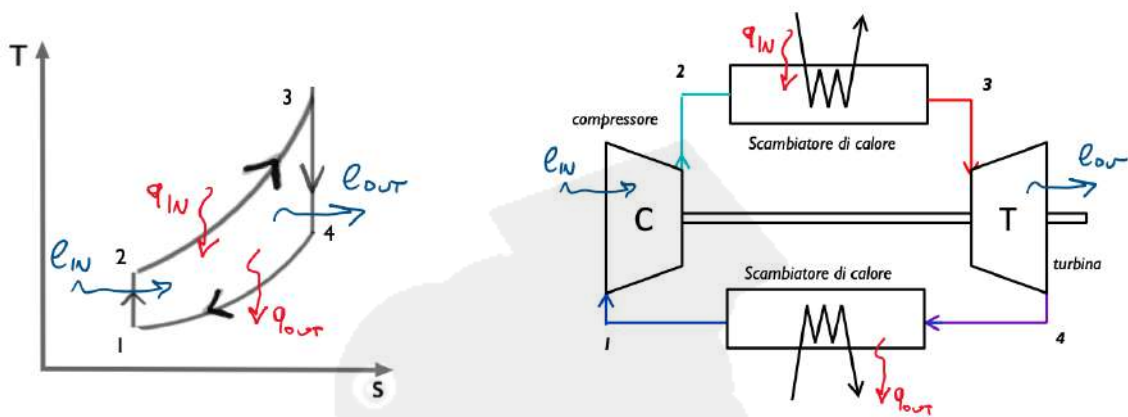
$l_{tot} = l_{out} - l_{in} \rightarrow$ è il lavoro della turbina decurtato del lavoro del compressore

Più alto β , più alto è il rendimento

$$\eta_{JB}^{id} = 1 - \frac{1}{\beta^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}$$



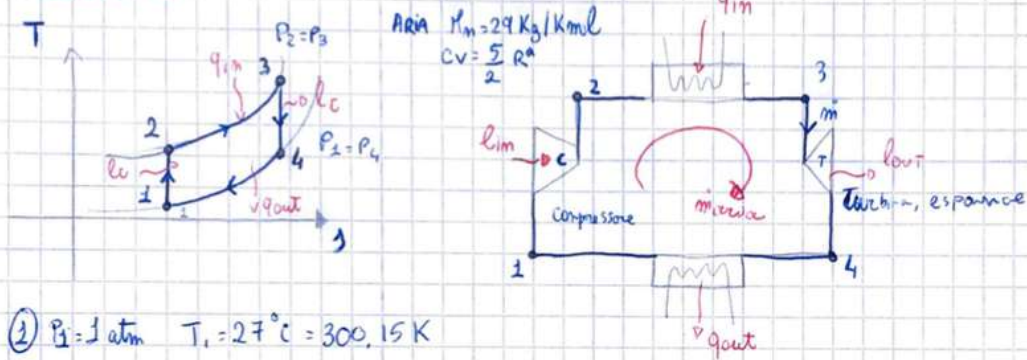
Ciclo Joule-Brayton ideale componenti



- ▼ Esempio Ciclo Joule - Brayton ideale → rendimento, lavoro netto (totale) e calore in ingresso

THEUNINOTES.COM

Esercizio 1



① $P_1 = 1 \text{ atm}$ $T_1 = 27^\circ\text{C} = 300.15 \text{ K}$

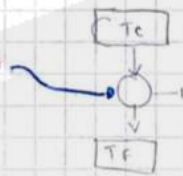
③ $T_3 = 1427^\circ\text{C} = 1700 \text{ K}$ (temperatura massima)

$\beta = 16 \rightarrow \text{rapporto di compressione} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_4}$

$[\frac{\text{J}}{\text{kg}}]$
 $l_{\text{Tot}}? \quad q_{\text{in}}? \quad \eta = ?$
 $L_{\text{out}} - l_{\text{in}}$

BILANCIO I PRINCIPIO SULLA MACCHINA

$$q_{\text{in}} + l_c - q_{\text{out}} - l_r = 0$$



VOLUME DI CONTROLLO TURBINA

$h_3 - l_t - h_4 = 0 \rightarrow \text{non c'è accumulo perché è un sottosistema aperto in termini statici}$

$l_t = h_3 - h_4 = c_p(T_3 - T_4)$

VOLUME DI CONTROLLO COMPRESSORE

$l_c + h_1 - h_2 = 0 \rightarrow l_c = h_2 - h_1 = c_p(T_2 - T_1)$

Scambiatore caldo (2-3)

$$h_2 + q_{in} - h_3 = 0 \rightarrow q_{in} = h_3 - h_2 = c_p (T_3 - T_2)$$

Scambiatore freddo (4-1)

$$h_4 - h_1 - q_{out} = 0 \rightarrow q_{out} = h_4 - h_1 = c_p (T_4 - T_1)$$

1-2 COMPRESSIONE ISOENTROPICA TIR

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} = \frac{7}{5} = 1,4$$

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = 300 \text{ K} \cdot 16^{\frac{1-1,4}{1,4}} = 662 \text{ K}$$

$$P_2 = P_1 \cdot \beta = 16 \text{ atm}$$

3-4 ESPANSIONE ISOENTROPICA TIR

$$P_3 = P_2 \quad T_4 = T_3 \left(\frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = T_3 \left(\frac{1}{\beta} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = 1700 \text{ K} \left(\frac{1}{16} \right)^{\frac{1-1,4}{1,4}} = 770 \text{ K}$$

$$l_c = l_m = c_p (T_2 - T_1) = \frac{7}{2} \cdot \frac{8,314 \text{ J/mol K}}{29 \text{ kg/mol}} (662 - 300) \text{ K} = 363,2 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

$1003,4 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$

$$l_T = c_p (T_3 - T_2) = 932,8 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

$$l_{netto} = l_{tot} = l_{turbina} - l_{compressione} = l_{out} - l_{in} = 569 \text{ KJ/kg}$$

$$\eta_{Id} = \frac{\text{effetto utile}}{\text{spesa energetica}} = \frac{l_{netto}}{q_{in}} = \frac{569}{1041} = 0,547 = 54,7\%$$

$$q_{in} = c_p (T_3 - T_2) = 1003,4 \cdot (1700 - 662) = 1041 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

$$\text{oppure } 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{300}{662} = 0,546$$

$$\text{oppure } 1 - \frac{1}{\beta^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} = 1 - \frac{1}{16^{\frac{1-1,4}{1,4}}} = 0,547$$

Bilanci entropici

Il rendimento è **inferiore** al rendimento di Carnot perché ho le **irreversibilità esterne** anche nel **ciclo ideale**. Lo scambio termico con le sorgenti ha sempre **differenze di temperatura non nulle**.

su sistema completo:

$$s_{irr} (= s_{irr}^{est,c} + s_{irr}^{est,f} + \cancel{s_{irr}^{int}}) = \Delta s_c + \Delta s_f$$

Irr. esterne
(scambi termici con
sorgente + pozzo)

su scambi termici:

$$s_{irr}^{est,c} = \Delta s_c + (s_3 - s_2)$$

$$s_{irr}^{est,f} = \Delta s_f + (s_1 - s_4)$$

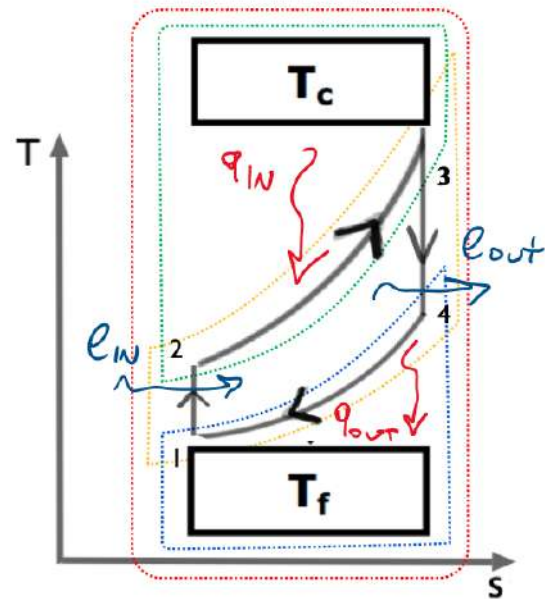
$$(s_3 - s_2) + (s_1 - s_4) = 0 \quad \Delta s_c \neq \Delta s_f$$

su ciclo termodinamico (senza serbatoi T):

$$s_{Qin} + \cancel{s_{irr}^{int}} - s_{Qout} = 0$$

$$s_{Qin} = (s_3 - s_2)$$

$$-s_{Qout} = (s_1 - s_4)$$



Sugli scambi termici $\rightarrow s_2 - s_3 + s_{irr}^{est,c} = \Delta s_c$

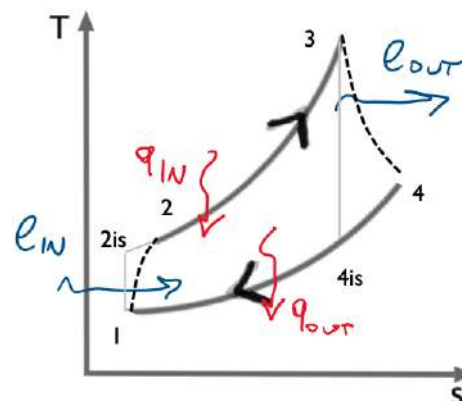
Ciclo Joule - Brayton reale

Hp: Gas ideale, **NON - TIR**. É un sistema chiuso composto, cioè costituito da **sottosistemi aperti** connessi tra loro.

Non conosco gli stati intermedi durante il percorso della trasformazione.

Il **compressore reale** richiede più lavoro (NON TIR) $\rightarrow (1-2)$

La **turbina reale** produce meno lavoro (NON TIR) $\rightarrow (3-4)$



I principio Termodinamica

$$q_{in} + l_{in} = q_{out} + l_{out}$$

Compressione non-TIR (1-2)

$$l_{in} = h_2 - h_1 = C_P(T_2 - T_1)$$

Riscaldamento isobaro (2-3)

$$q_{in} = h_3 - h_2 = C_P(T_3 - T_2)$$

Espansione non-TIR (3-4)

$$l_{out} = h_3 - h_4 = C_P(T_3 - T_4)$$

Raffreddamento isobaro (4-1)

$$q_{out} = h_4 - h_1 = C_P(T_4 - T_1)$$

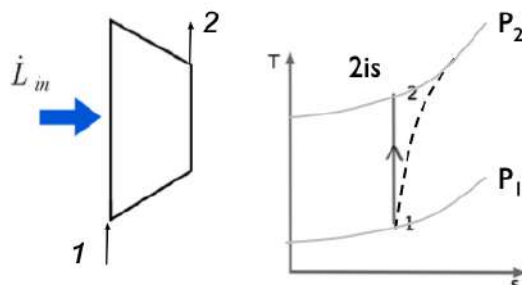
2is = punto 2 isentropica

Compressione/espansione non isoentropica $s \neq \text{cost}$

Facendo uno zoom sulla **compressione** (1-2) e **sull'espansione** (3-4) non-TIR :

Compressore reale

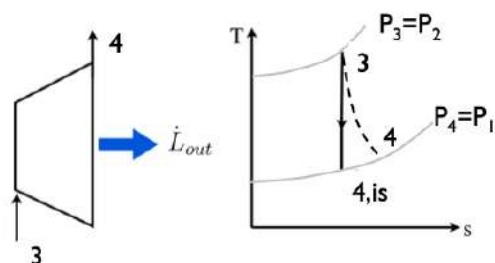
Compressione adiabatica non - TIR:
Hp **stazionario** → *nessuna proprietà varia nel tempo.*



Bilancio II principio

Turbina reale

Espansione adiabatica non - TIR: Hp **stazionario** → *nessuna proprietà varia nel tempo.*



Bilancio II principio

$$\begin{aligned} \dot{m} \cdot s_3 + \dot{S}_{irr,t} - \dot{m} \cdot s_4 &= 0 \\ s_4 &> s_3 \quad \dot{S}_{irr,t} > 0 \end{aligned}$$

$$\dot{m} \cdot s_1 + \dot{S}_{irr,c} - \dot{m} \cdot s_2 = 0$$

$$s_2 > s_1 \quad \dot{S}_{irr,c} > 0$$

Rendimento isoentropico compressore

Rendimento isoentropico compressore

$$\eta_{is,c} = \frac{l_{in,is}}{l_{in}} = \frac{T_{2,is} - T_1}{T_2 - T_1} \leq 1$$

Es: per conoscere T_2

$$T_2 = T_1 + \frac{T_{2,is} - T_1}{\eta_{is,c}}$$

Dove $T_{2,is}$ è la temperatura T_2 nel caso ideale.

$$\eta_{is,t} = \frac{l_{out}}{l_{out,is}} = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_{4,is}}$$

Es: Per conoscere T_4

$$T_4 = T_3 - (T_3 - T_{4,is}) \cdot \eta_{is,t}$$

Dove $T_{4,is}$ è la temperatura T_4 nel caso ideale.

Isobare → rapporto di compressione/espansione

$$\beta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_4}$$

Più alto β , più alto è il rendimento

Compressione/espansione non isoentropiche

$$T_2 = T_1 + \frac{T_{2,is} - T_1}{\eta_{is,c}}$$

$$T_4 = T_3 - \eta_{is,t}(T_3 - T_{4,is})$$

$$\frac{T_4}{T_1} \neq \frac{T_3}{T_2} \quad \frac{T_2}{T_1} \neq \frac{T_3}{T_4}$$

Rendimento

Il rendimento della macchina reale è inferiore al rendimento ideale.

$$\eta_{JB} = \frac{l_{tot}}{q_{in}} = \frac{l_{out} - l_{in}}{q_{in}} < \eta_{JB}^{id}$$

Rendimento di secondo principio

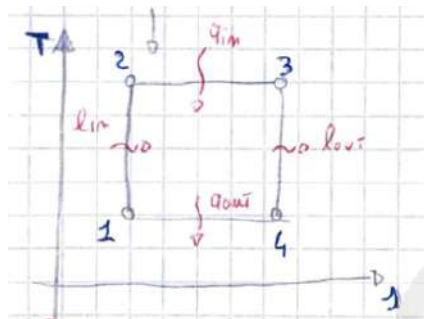
É un confronto tra il rendimento ideale e il rendimento ideale, per capire quanto sta facendo bene il nostro ciclo rispetto all'equivalente ideale.

$$\eta_{II}^{JB} = \frac{\eta_{reale}^{JB}}{\eta_{ideale}^{JB}}$$

La percentuale indica quanto sta facendo bene il nostro ciclo rispetto al massimo raggiungibile.

Rendimento di secondo principio rispetto al ciclo di Carnot

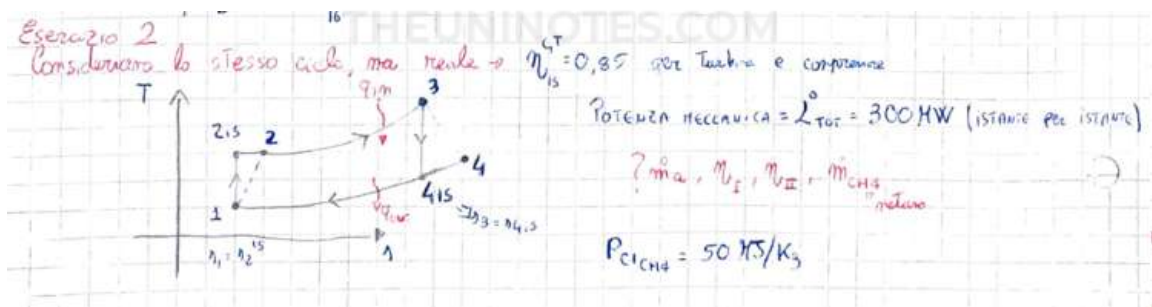
Possiamo effettuare anche un paragone con l'equivalente di Carnot



$$T_2 = T_3 \quad T_1 = T_4$$

$$\eta_{II}^{Carnot} = \frac{\eta_{reale}^{JB}}{\eta_{ideale}^{Carnot}} = \frac{\eta_{reale}^{JB}}{1 - \frac{T_1}{T_2}}$$

▼ Esempio ciclo reale, equivalente al ciclo ideale dell'esempio sopra. Calcolo portata massica di aria e di metano e calcolo dei rendimenti di primo e secondo principio rispetto a Carnot e rispetto al ciclo ideale.



1-2 COMPRESSIONE ADIABATICA NON TIR

$$m_{15}^c = \frac{l_c^{15}}{l_c^{ideale}} \Rightarrow \frac{c_p(T_2^{15} - T_1)}{c_p(T_2 - T_1)} \rightarrow T_2 = T_1 + \frac{T_2^{15} - T_1}{m_{15}^c} = 725,8 \text{ K}$$

3-4 ESPANSIONE ADIABATICA NON TIR

$$m_{15}^T = \frac{l_T}{l_T^{15}} = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_4^{15}} \sim T_4 = T_3 - (T_3 - T_4^{15}) \cdot m_{15}^T = 909,5 \text{ K}$$

$$l_c = c_p(T_2 - T_1) = 427 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

$$l_T = c_p(T_3 - T_4) = 793 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

$$l_{TOT} = l_T - l_c = 366 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

RENDIMENTO 1° PRINCIPIO

$$\eta_I^{ideale} = \frac{l_{TOT}}{q_{im}} = 0,375 = 37,5\%$$

$$l_c = c_p(T_2 - T_1) = 427 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

RENDIMENTO 2° PRINCIPIO

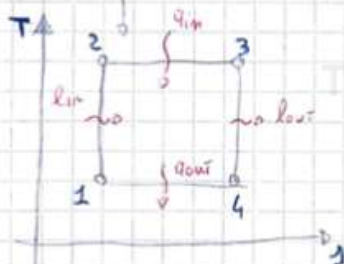
$$\eta_{II}^{SD} = \frac{\eta_I^{reale}}{\eta_{II}^{ideale}} = \frac{0,375}{0,547} = 0,686 = 68,6\% \rightarrow \text{è il } 68,6\% \text{ rispetto al massimo ottenibile } (\eta_{II}^{ideale})$$

OPPURE FACCIAMO IL CONFRONTO CON η_{II}^{ideale} di Carnot

$$T_2 = T_3$$

$$T_1 = T_4$$

$$\eta_{II}^c = \frac{\eta_I^{reale}}{\eta_{II}^{ideale}} = \frac{\eta_I^{reale}}{1 - \frac{T_1}{T_2}} = \frac{0,375}{0,83} = 0,45 = 45\% \text{ (rispetto al massimo ottenibile con CARNOT)}$$



PORTATA DI ARIA

$$\dot{L}_{TOT} = l_{TOT} \cdot \dot{m}_a = \dot{m}_a = \frac{\dot{L}_{TOT}}{l_{TOT}} = \frac{300 \text{ MW}}{366 \text{ KJ/kg}} \Rightarrow \dot{m}_a = \frac{300 \cdot 10^3 \text{ KW}}{366 \text{ KJ/kg}} = 820 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

PORTATA DI METANO

$$\dot{Q}_{im} = q_{im} \cdot \dot{m}_a = 800 \text{ MW} \rightarrow \text{potenza termica da fornire con il gas metano}$$

$$\dot{Q}_{im} = P_{ci,CH_4} \cdot \dot{m}_{CH_4} \rightarrow \dot{m}_{CH_4} = \frac{\dot{Q}_{im}}{P_{ci,CH_4}} = 16 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \rightarrow 16 \text{ kg di metano da bruciare ogni secondo}$$

Bilanci entropici

Sul sistema completo

su sistema completo

$$s_{irr} (= s_{irr}^{est,c+f} + s_{irr}^{int,t+c}) = \Delta s_c + \Delta s_f$$

Irr. esterne
(scambi termici con
sorgente + pozzo)

$$s_{irr}^{est,c} = \Delta s_c + (s_3 - s_2)$$

$$s_{irr}^{est,f} = \Delta s_f + (s_1 - s_4)$$

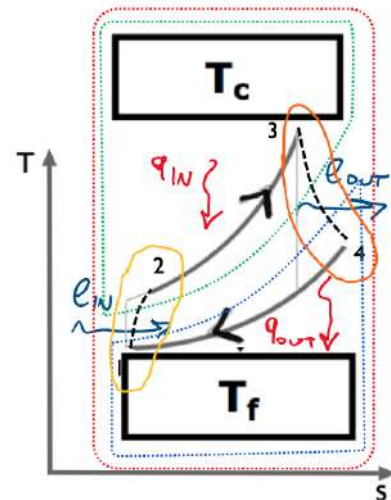
$$(s_3 - s_2) + s_{irr}^{int,t+c} + (s_1 - s_4) = 0$$

Irr. interne
(turbina +
compressore)

$$s_{irr}^{int,c} = (s_2 - s_1) = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1} = c_p \ln \frac{T_2}{T_{2,is}}$$

$$s_{irr}^{int,t} = (s_4 - s_3) = c_p \ln \frac{T_4}{T_3} - R \ln \frac{P_4}{P_3} = c_p \ln \frac{T_4}{T_{4,is}}$$

$$(s_3 - s_2) + (s_2 - s_1) + (s_4 - s_3) + (s_1 - s_4) = 0$$



Dove $\Delta s_c = \frac{-q_{in}}{T_c} = \frac{-q_{in}}{T_3}$ e $\Delta s_f = \frac{q_{out}}{T_f} = \frac{q_{out}}{T_1}$

»

Sul ciclo termodinamico (senza serbatoi T)

su ciclo termodinamico (senza serbatoi T)

$$s_{Qin} + s_{irr}^{int,t+c} - s_{Qout} = 0$$

$$s_{Qin} = (s_3 - s_2)$$

$$-s_{Qout} = (s_1 - s_4)$$

$$(s_3 - s_2) \neq (s_4 - s_1)$$

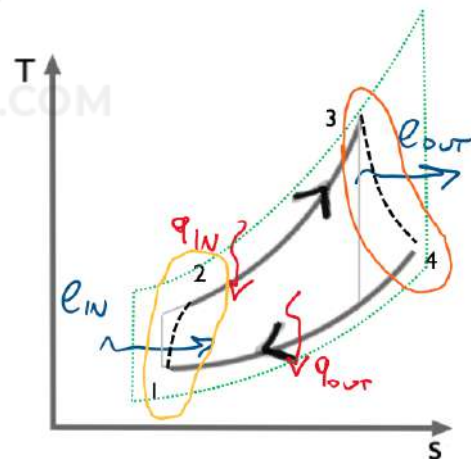
$$(s_3 - s_2) + s_{irr}^{int,t+c} + (s_1 - s_4) = 0$$

Irr. interne
(turbina +
compressore)

$$s_{irr}^{int,c} = (s_2 - s_1) = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1} = c_p \ln \frac{T_2}{T_{2,is}}$$

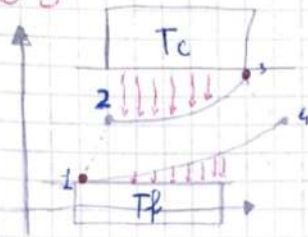
$$s_{irr}^{int,t} = (s_4 - s_3) = c_p \ln \frac{T_4}{T_3} - R \ln \frac{P_4}{P_3} = c_p \ln \frac{T_4}{T_{4,is}}$$

$$(s_3 - s_2) + (s_2 - s_1) + (s_4 - s_3) + (s_1 - s_4) = 0$$



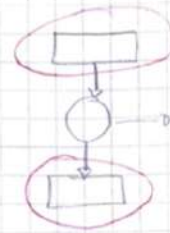
▼ Calcolo delle entropie (irreversibilità interne ed esterne del serbatoio caldo e freddo) su un ciclo reale (come esercizi di sopra)

Esercizio 3



$$T_c = T_3$$

$$T_f = T_1$$



$$? \dot{S}_{irr}^{TOT}, \dot{S}_{irr}^{est}, \dot{S}_{irr}^{int}$$

Bilancio di 2° Principio sul sistema completo

$$\dot{m}_1 \dot{s}_1 + \dot{S}_{irr}^{TOT} + \dot{S}_{irr}^{int} - \dot{m}_2 \dot{s}_2 - \dot{S}_{irr}^{est} = \Delta \dot{S}_{TOT}$$

$$\dot{S}_{irr}^{TOT} = \Delta \dot{S}_{TOT}$$

$\hookrightarrow \Delta \dot{S}_c + \Delta \dot{S}_f + \Delta \dot{S}_{scambio}$ non accumulabili (cicli)

$$\dot{S}_{irr}^{est} + \dot{S}_{irr}^{int}$$

(c+f) (c+t)

$$\dot{S}_{irr}^{int} = \dot{S}_{irr}^{c} + \dot{S}_{irr}^{f} \rightarrow \dot{m}_1 \Delta s_{(2-1)}$$



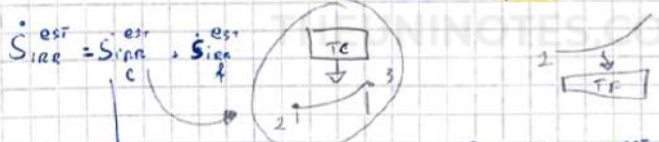
Bilancio sul compressore $\rightarrow \dot{m}_1 \dot{s}_1 + \dot{S}_{irr}^{int} - \dot{m}_2 \dot{s}_2 - \dot{S}_{irr}^{est} = \Delta \dot{S}_{TOT}$ (aperta, H-pagine 572-573)

$$\dot{S}_{irr}^{int} = \dot{m}_1 (\dot{s}_2 - \dot{s}_1) = \dot{m}_1 \Delta s_{(2-1)}$$

$$\dot{S}_{irr}^{int} = \dot{m}_1 (\Delta s_{(2-1)} + \Delta s_{(4-1)}) = \dot{m}_1 a \left(c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1} + c_p \ln \frac{T_4}{T_3} - R \ln \frac{P_4}{P_3} \right)$$

$\Delta \dot{S}_{(2-1)}^{int} \quad \Delta \dot{S}_{(4-3)}^{int}$

$$\dot{S}_{irr}^{int} = 214 \frac{KW}{K}$$



$$\dot{m}_1 \dot{s}_1 + \dot{S}_{irr}^{est} + \dot{S}_{irr}^{int} - \dot{m}_2 \dot{s}_2 - \dot{S}_{irr}^{est} = \Delta \dot{S}_{TOT} \rightarrow \dot{S}_{irr}^{est} = \Delta \dot{S}_{TOT} + \dot{m}_1 (\dot{s}_3 - \dot{s}_2)$$

$$\dot{S}_{irr}^{est} = \Delta \dot{S}_f + \dot{m}_1 (\dot{s}_3 - \dot{s}_2)$$

$$\dot{S}_{irr}^{est} = -\frac{\dot{Q}_c}{T_c} + \dot{m}_1 a (\dot{s}_3 - \dot{s}_2) \rightarrow -\frac{\dot{Q}_c}{T_c} + \dot{m}_1 a \left(c_p \ln \frac{T_3}{T_2} - R \ln \frac{P_3}{P_2} \right) = -\frac{800 \cdot 10^3}{1700} + 820 \cdot 10^3 \cdot 1,003 \cdot \ln \left(\frac{1700}{725} \right) = 230 \frac{KW}{K}$$

$$\hookrightarrow -\frac{800 \cdot 10^3}{1700} + \frac{820 \cdot 10^3}{s} \cdot 1,003 \frac{KJ}{KgK} \ln \left(\frac{1700}{725} \right) = 230 \frac{KW}{K} \quad \text{Scambio (+)}$$

$$\dot{S}_{irr}^{est} = \frac{\dot{Q}_f}{T_f} + \dot{m}_1 a \left(c_p \ln \frac{T_1}{T_4} - R \ln \frac{P_1}{P_4} \right)$$

$$\dot{Q}_p = \dot{Q}_{out} = m_a c_p (AT_{4-1}) = 501 \text{ MW} \quad (\text{oppure } 1^{\circ} \text{ PRINCIPIO SUL CICLO COMPRESSIVO})$$

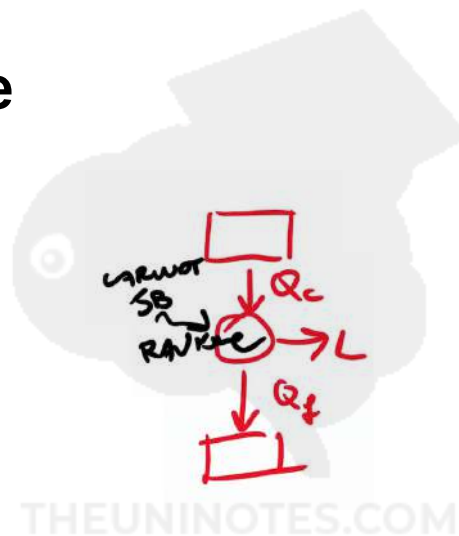
$$\dot{S}_{irr}^{est} = 758 \frac{\text{KW}}{\text{K}} \quad \text{source } (+)$$

$$\dot{S}_{irr}^{est} = 988 \frac{\text{KW}}{\text{K}}$$

$$\dot{S}_{irr}^{TOT} = \dot{S}_{irr}^{est} + \dot{S}_{irr}^{int} = 988 + 214 \frac{\text{KW}}{\text{K}} = 1202 \frac{\text{KW}}{\text{K}}$$

$$\text{oppure } -\frac{\dot{Q}_c}{T_c} + \frac{\dot{Q}_f}{T_f} = \frac{-800 \cdot 10^3 \text{ KW}}{1700 \text{ K}} + \frac{501 \cdot 10^3 \text{ KW}}{800,15 \text{ K}} = 1199 \frac{\text{KW}}{\text{K}}$$

Ciclo Rankine



É un ciclo motore $\rightarrow$ produce $L_{tot} \rightarrow$ **potenza meccanica utile**

Introduzione: Ciclo di Carnot a vapore

Il ciclo di Carnot indica il massimo termodinamico raggiungibile. Nella **realtà** le trasformazioni **isoterme** sono le **transizioni di fase**.

Hp: **Fluido** (mix liquido ideale/vapore reale): acqua. TIR $\rightarrow s_{irr}^{int} = 0$

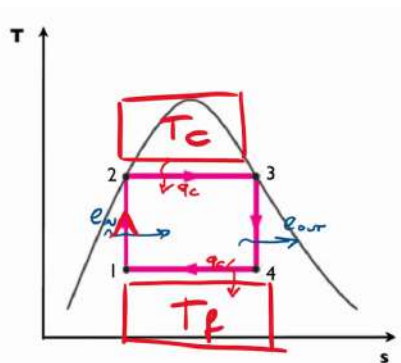
Compressione isoentropica (1-2)

Riscaldamento isotermodarico (2-3)

Espansione isoentropica (3-4)

Raffreddamento isotermodarico (4-1)

utilizzo di transizioni di fase per ottenere isoterme



(1-2) **compressione** → Da **liquido + vapore** a solo **liquido**

(3-4) **espansione** → Da **vapore** a **vapore + liquido**

(4-1) **condensazione** parziale (non arriviamo alle condizioni di liquido saturo) $X_1 \neq 0$ (regola della leva)

Siccome è difficile da realizzare, per via dei problemi tecnologici causati dalla compressione e dall'espansione (mix bifase), si utilizza il ciclo **Rankine** per approssimarlo.

Ciclo Rankine ideale

$$l_{in} = v \Delta P \quad v = \frac{1}{\rho}$$

Hp: Liquido ideale + (mix liquido-vapore/vapore) reale: acqua → TIR: $s_{irr}^{int} = 0$

È un sistema chiuso composto, costituito da sottosistemi aperti connessi tra loro.

Si avvicina al ciclo di Carnot con isoterme (sfruttando transizioni di fase).

Sfrutta lo stesso principio del ciclo Joule Bryton

Bilanci I principio:

$$q_c + l_p = q_f + l_t$$

Compressione isentropica (liq) (1-2)

$$l_p = h_2 - h_1$$

Riscaldamento isobaro (liq → vap) (2-3)

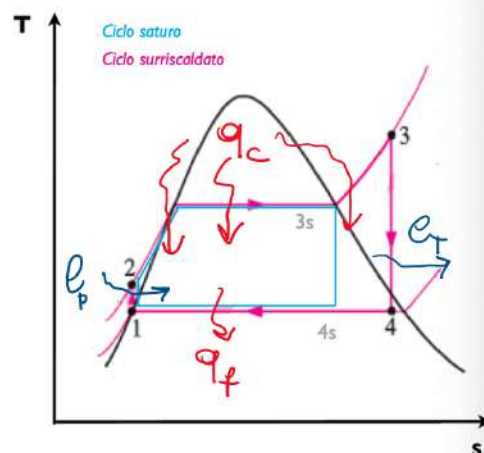
$$q_c = h_3 - h_2$$

Espansione isentropica (vap) (3-4)

$$l_t = h_3 - h_4$$

Raffreddamento isobaro (vap → liq) (4-1)

$$q_f = h_4 - h_1$$



Surriscaldamento è opzionale → se assente, è **ciclo Rankine saturo** 1-2-3s-4s ($X_4 \downarrow$)

Liquido ideale → a sinistra della campana (1-2)

1 → liquido saturo

Liquido + vapore reale (acqua) → dentro e a destra della campana

$$\text{Rankine } \frac{l_f}{l_i} < \text{Joule Bryton } \frac{l_f}{l_i}$$

Osservazione



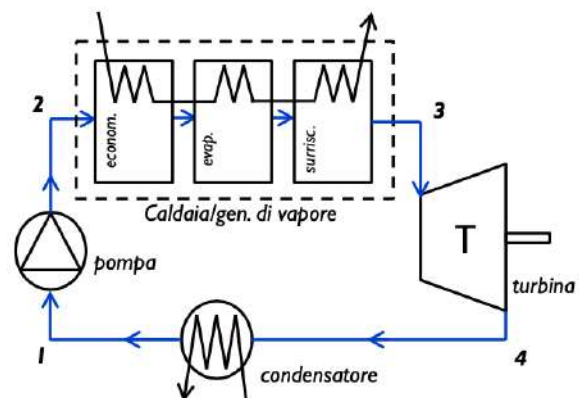
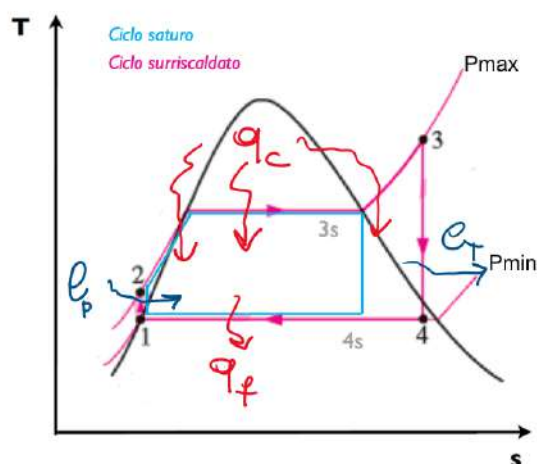
Il v (volume specifico) in (1-2) è molto diverso dal volume specifico in (3-4) → $v_{1-2} \ll v_{3-4}$

TABELLA A.4
Acqua saturo: tabella in temperatura

Temp. T °C	Press. sat. p_{sat} kPa	Volume specifico m ³ /kg	
		Liquido sat. u_f	Vapore sat. u_g
100	0.10133	0.001044	1.6729

Ci concentreremo sul **ciclo surriscaldato**

Componenti ciclo Rankine ideale



(2-3)

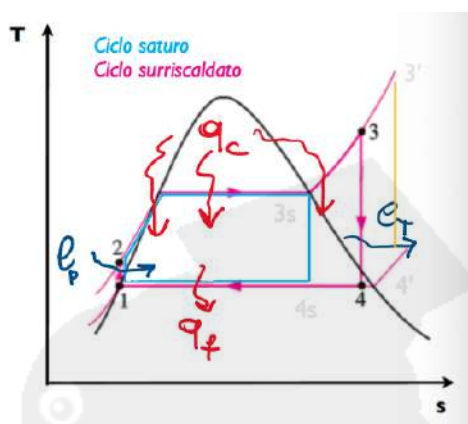
Economizzatore → si occupa del liquido

Evaporatore → si occupa della transizione di fase

Surriscaldatore → si occupa del vapore

(4-1) **Condensazione completa** (c'è uno scambiatore di calore che prevede la transizione di fase)

Calcolo Entalpia delle trasformazioni



- **(1-2) Pompa (Hp: Liquido ideale)**

$$l_p = h_2 - h_1 = c(T_2 - T_1) + v_1(P_2 - P_1)$$

Essendo una pompa **isoentropica**

$$s_2 - s_1 = 0 \rightarrow c \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = 0 \rightarrow T_2 = T_1 \rightarrow \Delta T = 0$$

- **(2-3) Caldaia**

$$q_c = h_3 - h_2$$

Utilizzo le **tabelle dell'acqua satura** per conoscere i valori di entalpia.

- **(3-4) Turbina vapore**

Hp: mix liquido/vapore **reale**

Essendo vapor d'acqua → Non posso utilizzare le formule del gas ideale, quindi **utilizzo le tabelle dell'acqua surriscaldata**

$$l_t = h_3 - h_4 \quad s_3 = s_4 \quad (\text{turbina iso-s})$$

Punto 3

vap. saturo

vap. surriscaldato

$$\begin{aligned} \rightarrow h_3 &= h_{vsat}(P_3) \\ \rightarrow h_3 &= h_{vsurr}(T_3, P_3) \end{aligned}$$

per evitare danneggiamento
turbina $X_4 > 0.8$

Punto 4

mix bifase ($X_4 < 1$)

vap. saturo ($X_4 = 1$)

vap. surriscaldato ($X_4 > 1$)

$$\begin{aligned} \rightarrow h_4 &= X_4 \cdot h_{vsat}(P_4) + (1 - X_4) \cdot h_{lsat}(P_4) \\ \rightarrow h_4 &= h_{vsat}(P_4) \\ \rightarrow h_4 &= h_{vsurr}(T_4, P_4) \end{aligned}$$

Analogamente per entropia

$h_{vsat}, h_{lsat}, s_{sat}, s_{vsat}$ da tabella saturazione acqua
 h_{vsurr}, s_{vsurr} da tabella vapore surriscaldato

vap saturo ($X_4 = 1$) $\rightarrow h_4$ può essere anche calcolato con la regola della leva con un titolo di vapore pari al 100% (1)

Di solito si finisce all'interno della campana per il punto 4.

• (4-1) Condensatore

$$q_f = h_4 - h_1$$

Utilizzo le **tabelle dell'acqua satura** per conoscere i valori di entalpia.

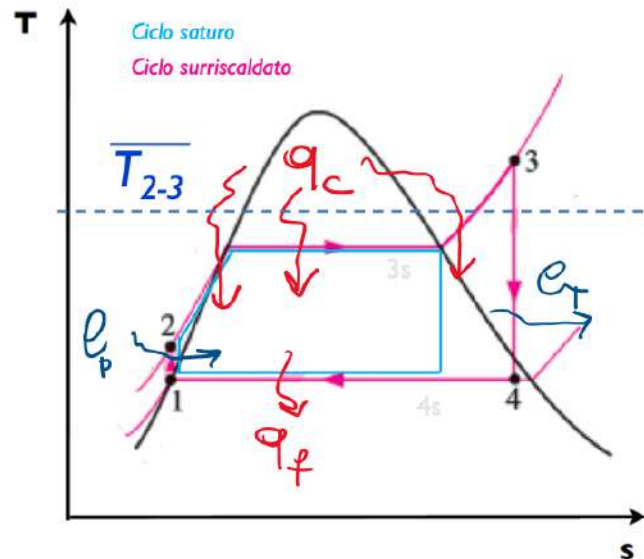
Rendimento ciclo Rankine ideale

$$\eta = \frac{l_{tot}}{q_c} = \frac{l_t - l_p}{q_c} = 1 - \frac{q_f}{q_c} = 1 - \frac{T_1(s_1 - s_4)}{\overrightarrow{T_{2-3}(s_3 - s_2)}} \\ (s_1 - s_4) = (s_3 - s_2)$$

Dove $\overrightarrow{T_{2-3}}$ è la temperatura media durante la trasformazione (2-3).

Per incrementare η :

$$\downarrow T_1 \left\{ \begin{array}{l} \bullet P_{\text{cond}} \downarrow (P_{4-1}) \\ \bullet T_3 \uparrow \\ \bullet P_{\text{evap}} \uparrow (P_{2-3}) \\ \quad (\text{ma } X_4 \downarrow) \end{array} \right.$$



Bilanci entropici

su sistema completo:

$$s_{\text{irr}} (= s_{\text{irr}}^{\text{est},c} + s_{\text{irr}}^{\text{est},f} + s_{\text{irr}}^{\text{int}}) = \Delta s_c + \Delta s_f$$

su scambi termici:

$$s_{\text{irr}}^{\text{est},c} = \Delta s_c + (s_3 - s_2)$$

$$s_{\text{irr}}^{\text{est},f} = \Delta s_f + (s_1 - s_4)$$

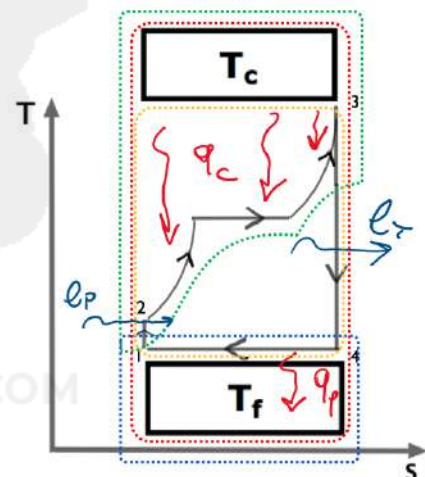
$$(s_3 - s_2) = (s_4 - s_1) \quad \Delta s_c \neq \Delta s_f$$

su ciclo termodinamico (senza serbatoi T):

$$s_{Qin} + s_{\text{irr}}^{\text{int}} - s_{Qout} = 0$$

$$s_{Qin} = (s_3 - s_2)$$

$$-s_{Qout} = (s_1 - s_4)$$



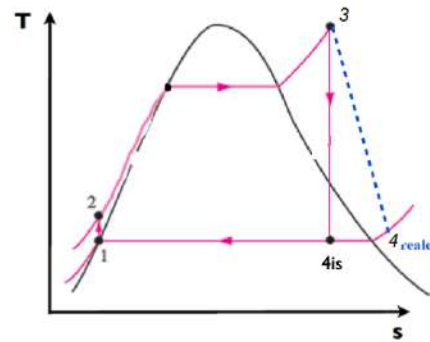
Irreversibilità esterne non si annullano neppure nel ciclo ideale: lo scambio termico con la sorgente calda ha sempre differenze di temperatura non nulle

Ciclo Rankine reale

Hp: Liquido ideale + mix Liquido-vapore/vapore (reale): acqua

É un sistema chiuso composto, costituito da sottosistemi aperti connessi tra loro

Compressione isoentropica (liq) (1-2)
Riscaldamento isobaro (liq→vap) (2-3)
Espansione non-TIR (vap) (3-4)
Raffreddamento isobaro (vap→liq) (4-1)



(1-2) è sempre **isoentropica** → è sempre **ideale**

(3-4) **Turbina a vapore: macchina non TIR** → **reale**

$$s_3 = s_{4is} \quad s_4^{reale} > s_3^{reale} \quad \dot{S}_{irr,t} > 0$$

Rendimento isoentropico turbina

$$\eta_{is}^{Turbina} = \frac{l_{out}}{l_{is}} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4is}} \neq \frac{c_p \Delta T}{c_p \Delta T}$$

$$\eta_{is}^{Turbina} \leq 1$$

Rendimento ciclo Rankine reale

$$\eta = \frac{l_{tot}}{q_c} = \frac{l_t - l_p}{q_c} = 1 - \frac{q_f}{q_c}$$

$$\begin{array}{ccccc}
 l_t \downarrow & q_f \uparrow & \eta \downarrow & \text{X} \\
 & & Ma \ X_4 \uparrow & \checkmark
 \end{array}$$

Bilanci entropici

su sistema completo:

$$s_{irr} (= s_{irr}^{est,c} + s_{irr}^{est,f} + s_{irr}^{int,t}) = \Delta s_c + \Delta s_f$$

Irr. esterne
(scambi termici con
sorgente + pozzo)

su scambi termici:

$$s_{irr}^{est,c} = \Delta s_c + (s_3 - s_2)$$

$$s_{irr}^{est,f} = \Delta s_f + (s_1 - s_4)$$

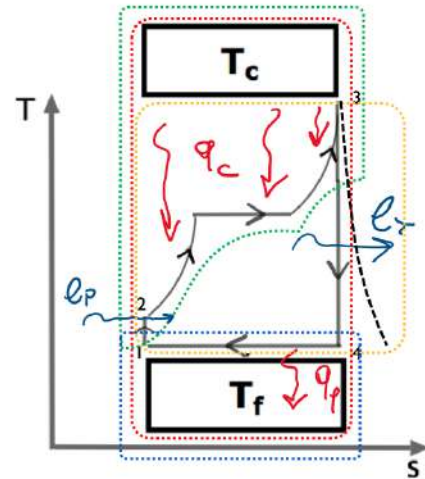
$$(s_3 - s_2) + s_{irr}^{int,t} = (s_4 - s_1)$$

$$\Delta s_c \neq \Delta s_f$$

Irr. interna
(turbina)

$$s_{irr}^{int,t} = (s_4 - s_3)$$

$$(s_3 - s_2) + (s_4 - s_3) + (s_1 - s_4) = 0$$



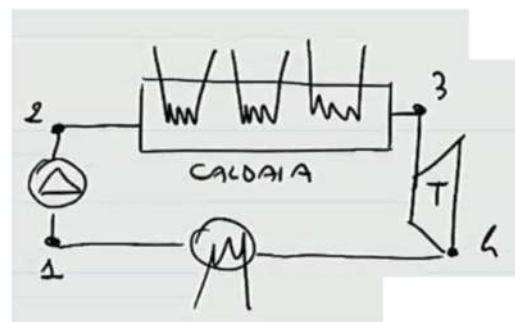
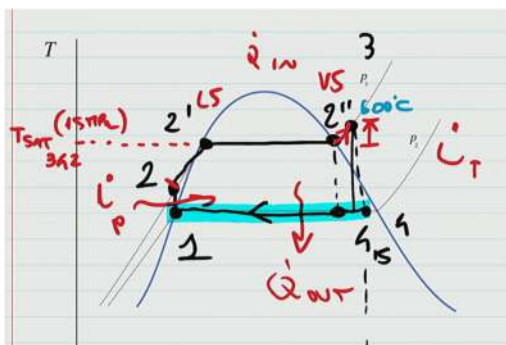
Ciclo combinato, rendimento vicino al 60%. Il calore scartato dal ciclo Joule - Brayton diventa calore in ingresso per il ciclo Rankine

▼ Esempio Ciclo Rankine con turbina reale → interpolazione lineare

Si consideri un ciclo Rankine in cui il vapore è condensato alla temperatura di 33°C, l'acqua è inviata in caldaia alla pressione di 15 MPa, riscaldata sino alla temperatura di 600°C ed espansa in una turbina a vapore adiabatica caratterizzata da rendimento isoentropico di 0.85. Sapendo che il ciclo produce una potenza utile di 150 MW, calcolare la portata di vapore necessaria, il rendimento di primo principio e la potenza termica necessaria, commentando opportunamente il titolo di vapore in uscita alla turbina.

$$[\dot{m}_v = 115.4 \text{ kg/s}; \eta_l = 38\%; \dot{Q}_{in} = 395.7 \text{ MW}; x_4 = 88\%]$$

THEUNINOTES.COM



DA 4 a 1, condensiamo tutto il vapore

$$T_1 = T_4 = 33^\circ\text{C} = 306\text{ K} = T_{\text{cond}}$$

↳ se l'espansione finisce dentro la camera

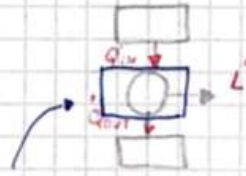
$$P_{\text{cilindro}} = P_2 = P_2' = P_2'' = P_3 = 15\text{ MPa}$$

$$T_3 = T_{\text{max}} = 600^\circ\text{C} = 873\text{ K}$$

$$\eta_{13}^r = 0,85 \rightarrow \text{reale}$$

$$\dot{L}_{\text{TOT}} = 150\text{ MW}$$

$$\dot{m}_1, \eta_{12}, \dot{Q}_{12}, X_{12}$$



BILANCIO 1° PRINCIPIO SULLA MACCHINA CICLICA

$$\dot{L}_P + \dot{Q}_{in} = \dot{L}_C + \dot{Q}_{out}$$

BILANCIO 1° PRINCIPIO SULLE TRASFORMAZIONI

$$(1-2) \quad h_1 + \dot{L}_P = h_2$$

$$(2-3) \quad h_2 + \dot{Q}_{in} = h_3$$

$$(3-4) \quad h_3 = \dot{L}_C + h_4$$

$$(4-1) \Rightarrow h_4 = \dot{Q}_{out} + h_1$$

Dobbiamo utilizzare le Tabelle,
non possiamo approssimare a liquido ideale.

Interpolazione lineare → quando nella tabella non troviamo il giusto valore.

THEUNINOTES.COM

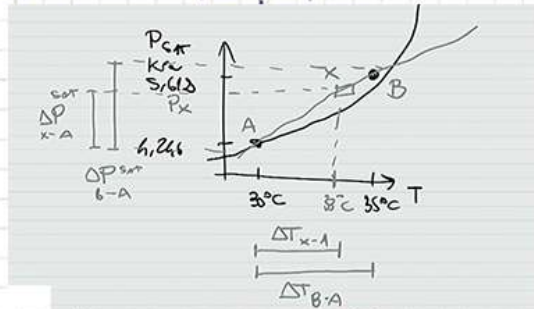
① Liquido saturo P_{cond} , T_{cond}

$T_1 = 33^\circ\text{C}$ $P_1 = P_{SAT}(T_1)$ -> Tabella -> non c'è la $T = 33,3$ -> quindi interpoliamo linearmente. Tutti i valori

$$h_1 = h_{f,1}(5\text{KPa}) = 137,81 \text{ KJ/Kg}$$

$$s_1 = s_{f,1}(5\text{KPa}) = 0,4764 \text{ KJ/KgK}$$

$$v_1 = v_{f,1}(5\text{KPa}) = 0,001005 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$



$$\frac{\Delta P_{X-A}}{\Delta P_{B-A}} = \frac{\Delta T_{X-A}}{\Delta T_{B-A}} \rightarrow P_X - 0,246 \text{ KPa} = \frac{33 - 30}{35 - 30} (10,33 - 0,246) \text{ KPa}$$

$$P_X = P_1 = 5,075 \text{ KPa} \approx 5 \text{ KPa}$$

② Liquido SOTTO RAFFREDDATO (IDEALE) (LIQUIDO IDEALE, INCOMPRESSIBILE)

$$s_2 = s_1 = 0,4764 \text{ KJ/KgK}$$

$$v_1 = v_2 = 0,001005 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$s_2 = s_1 \rightarrow c_p \ln \frac{T_2}{T_1} = 0 \rightarrow T_2 = T_1$$

$$h_p = h_2 - h_1 = c_p (T_2 - T_1) + v (P_2 - P_1)$$

$$= 0,001005 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} (15 \cdot 10^3 \text{ KPa} - 5,075 \text{ KPa}) \rightarrow$$

$$= 15,07 \text{ KJ/Kg}$$

$$h_2 = h_1 + h_p \rightarrow 137,81 + 15,07 = 152,89 \text{ KJ/Kg}$$

2' h_2 2" v_2 a 15 MPa -> Tabella

③ Vapore SURRISCALDATO o SATURO (NON LO SAPPIAMO)

VAP SURR = ACQUA SURR

$$T_3 = 600^\circ\text{C} \quad P_3 = 15 \text{ MPa}$$

Se $T_3 > T_{SAT}(15\text{MPa})$ -> Vapore surriscaldato -> siccome $T_{SAT} = 342$, si tratta di Vapore SURRISCALDATO
Se $T_3 < T_{SAT}(15\text{MPa})$ -> Vapore saturo

$$v_3 = 0,02491 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$h_3 = 3582,3 \text{ KJ/Kg}$$

$$s_3 = 6,6716 \text{ KJ/KgK}$$

④ η_{15}^T non ideale

$$\eta_{15}^T = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} \rightarrow \text{non è GAS IDEALE}$$

4.15) MIX BIFASE O VAPORE SURRISCALDATO?

$$P_{4,15} \hat{=} 5 \text{ kPa} \quad T_{4,15} \hat{=} 33^\circ \text{C} \quad \lambda_4^{15} = \lambda_3 = 6,8776 \text{ KJ/kgK}$$

$$\begin{aligned} \text{Se } \lambda_4 > \lambda_{4,s} &\rightarrow \text{MIX BIFASE} & \lambda_4 = 8,3951 > 6,8776 &\rightarrow \text{MIX BIFASE} \\ \text{Se } \lambda_4 < \lambda_{4,s} &\rightarrow \text{VAP SURR} & \downarrow & \\ & & (5 \text{ kPa}) & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_4 &= S_{4,s} = 8,3951 \text{ (5 kPa)} \\ S_{4,s} &= 0,4764 \text{ (5 kPa)} \end{aligned}$$

$$X_4^{15} = \frac{S_4^{15} - S_{4,s}}{S_{4,s} - S_{4,s}} = 0,783 = 78\%$$

$$h_4^{15} = \text{Regola della leva} \rightarrow X_4^{15} \cdot h_{v,s} + (1 - X_4^{15}) \cdot h_{4,s} = 2035,6 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

$\downarrow$ $\downarrow$
 TABELLA 137,82
 2561 $\frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$ $\frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$

$$\textcircled{4} \quad h_4 = h_3 - \eta_{15}^T (h_3 - h_4^{15}) = 2267,6 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

$$\begin{aligned} \text{Se } h_4 > h_{v,s} &= \text{vapore surr} \\ \text{Se } h_4 < h_{v,s} &= \text{mix/bifase} \rightarrow h_{v,s} = 2561 > 2267,6 \rightarrow \text{mix/bifase} \end{aligned}$$

$$X_4 = \frac{h_4 - h_{4,s}}{h_{v,s} - h_{4,s}} \rightarrow 0,88 \rightarrow 88\%$$

$$\lambda_4 = X_4 S_{v,s} + (1 - X_4) S_{4,s} = 7,4348 \frac{\text{KJ}}{\text{kgK}}$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{TOT}} &= \dot{Q}_{\text{TOT}} \cdot \dot{m}_v \sim \dot{m}_v = \frac{\dot{Q}_{\text{TOT}}}{\dot{Q}_{\text{TOT}}} \\ [\text{KW}] &= \left[\frac{\text{KJ}}{\text{kg}} \right] \cdot \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \end{aligned}$$

$\dot{Q}_{\text{TOT}} \rightarrow \dot{Q}_T - \dot{Q}_P = 1299,63 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$
 $\downarrow$
 $\dot{Q}_P = h_2 - h_1 = 15,07 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$
 $\dot{Q}_T = h_3 - h_4 = 1314,7 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$

$$\dot{m}_v = \frac{150 \text{ KW}}{1,345 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}} \rightarrow 115,38 \text{ kg/s}$$

$$Q_{1W} = \dot{m}_v \cdot q_{1m} = 395,7 \text{ KW} \quad (\text{spesa energetica})$$

$\downarrow$
 $h_3 - h_2 =$

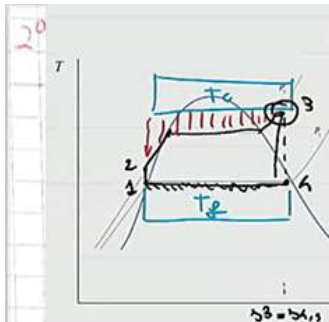
$$\eta_I = \frac{\dot{Q}_{\text{TOT}}}{Q_{1W}} = 0,379 \approx 38\% \quad \text{il 60\% del calore viene "buttato"}$$

Considerare dunque che il ciclo riceva il calore in caldaia da una sorgente calda isoterma a T_c e ceda il calore al condensatore a un pozzo freddo isoterma a T_f le cui temperature sono rispettivamente pari alla massima e minima del ciclo. Determinare l'irreversibilità totale generata, individuandone la principale fonte di irreversibilità e specificandone se di tipo interno od esterno. Calcolare poi i rendimenti di secondo principio confrontando rispettivamente tale ciclo con il ciclo Rankine ideale e un ciclo di Carnot operanti tra gli stessi serbatoi termici.

$[\dot{S}_{irr,TOT}=349.5 \text{ kW/K}$ (contributo maggiore è $\dot{S}_{irr,est,C}=262.3 \text{ kW/K}$); $\eta_{II,RK}=85\%$; $\eta_{II,CARNOT}=58\%$]



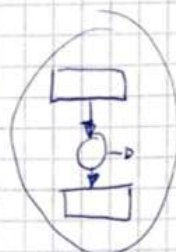
THEUNINOTES.COM



$$T_c = T_3 = 600^\circ\text{C} \quad (\text{voglio annullare il salto termico (irreversibile)})$$

$$T_f = T_1 = T_4 = 33,3^\circ\text{C}$$

$$? \dot{S}_{\text{irr}}^{\text{tot}} \quad \eta_{\text{RK}}^{\text{tot}} \quad \eta_{\text{II}}^{\text{tot}}$$



BILANCIO 2° PRINCIPIO SULLA INTERA MACCHINA

$$\dot{S}_{\text{irr}}^{\text{tot}} + \dot{m}_v \dot{s}_{\text{in}} + \dot{S}_{\text{irr}}^{\text{tot}} = \dot{S}_{\text{out}} + \dot{m}_v \dot{s}_{\text{out}} + \Delta \dot{S}_{\text{tot}}$$

$$\dot{S}_{\text{irr}}^{\text{tot}} = \Delta \dot{S}_{\text{tot}}$$

$$\Delta \dot{S}_{\text{tot}} = \Delta \dot{S}_c + \Delta \dot{S}_f + \Delta \dot{S}_{\text{RK}}$$

$$= \frac{\dot{Q}_{\text{out}}}{T_f} - \frac{\dot{Q}_{\text{in}}}{T_c} \rightarrow 349,5 \frac{\text{KW}}{\text{K}}$$

$$\dot{Q}_{\text{out}} = \dot{m}_v (h_4 - h_1) = 245,73 \text{ MW}$$

BILANCIO 2° PRINCIPIO SULLA SORLENTE CALDA

$$\dot{m}_v \dot{s}_2 + \dot{S}_{\text{irr}}^{\text{esc}} = \dot{m}_v \dot{s}_3 + \Delta \dot{S}_c$$

$$\dot{S}_{\text{irr}}^{\text{esc}} = \dot{m}_v (\dot{s}_3 - \dot{s}_2) = \frac{\dot{Q}_{\text{in}}}{T_c} \rightarrow 262,3 \frac{\text{KW}}{\text{K}}$$

$$(6,6776 - 0,4764)$$

BILANCIO 2° PRINCIPIO SUL AZZO FREDDO

$$\dot{S}_{\text{irr}}^{\text{esc}} = \dot{m}_v (\dot{s}_1 - \dot{s}_4) + \frac{\dot{Q}_{\text{out}}}{T_f} \approx 0$$

perché $T_f = T_2 = T_4$ (salto termico 0, salto termico reversibile)

TURBINA IRREVERSIBILITA'

$$\dot{S}_{\text{irr}}^{\text{int}} = \dot{m}_v (\dot{s}_4 - \dot{s}_3) = 87,36 \frac{\text{KW}}{\text{K}}$$



$$\dot{S}_{\text{irr}}^{\text{tot}} = \dot{S}_{\text{irr}}^{\text{int}} + \dot{S}_{\text{irr}}^{\text{esc}} = 349,5 \frac{\text{KW}}{\text{K}}$$

RENDIMENTO 2° PRINCIPIO CON RANKINE IDEALE

$$\eta_{\text{II}} = \frac{\eta_{\text{I}}}{\eta_{\text{RK}}} = \frac{\eta_{\text{I}}}{\eta_{\text{RK}}} = \frac{\eta_{\text{I}}}{\frac{\dot{Q}_{\text{tot}}^{\text{ID}}}{\dot{Q}_{\text{in}}}} = 1 - \frac{\dot{Q}_{\text{out}}^{\text{ID}}}{\dot{Q}_{\text{in}}}$$

$$\dot{Q}_{\text{out}}^{\text{ID}} = \dot{m}_v (h_{4'} - h_1) = 218,97 \text{ MW}$$

$$\eta_{\text{II}} = \frac{\eta_{\text{I}}}{\eta_{\text{RK}}} = \frac{0,38}{0,447} = 0,85 = 85\%$$

RENDIMENTO 2° PRINCIPIO CON CARNOT IDEALE

$$\eta_{\text{C}}^{\text{ID}} = 1 - \frac{T_f}{T_c} = 0,65$$

$$\eta_{\text{II}} = \frac{\eta_{\text{I}}}{\eta_{\text{C}}^{\text{ID}}} = \frac{0,38}{0,65} = 0,58 = 58\%$$

