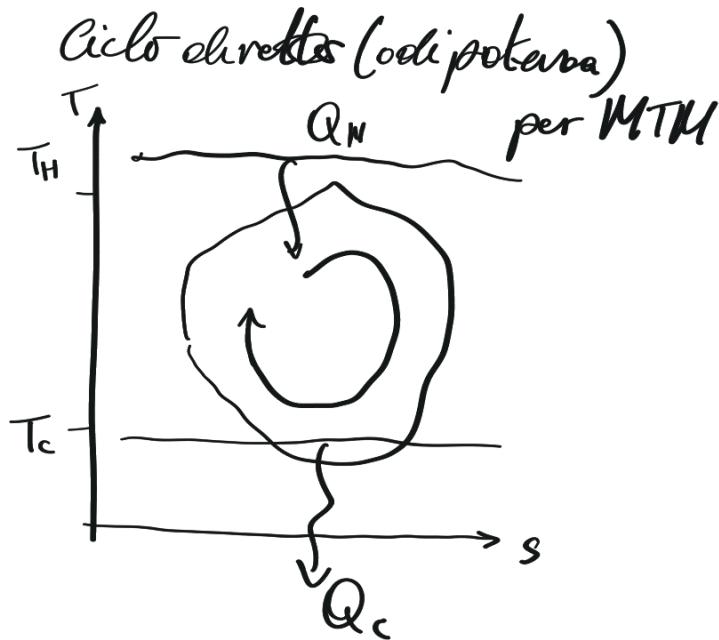
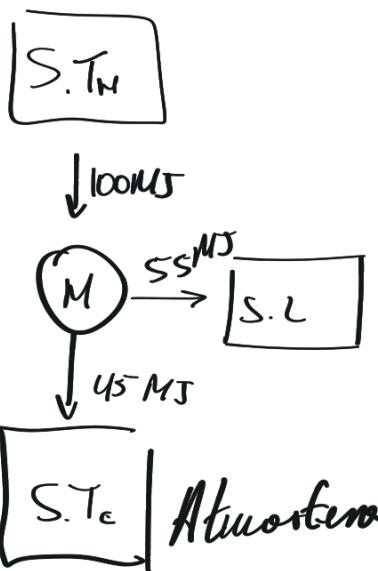
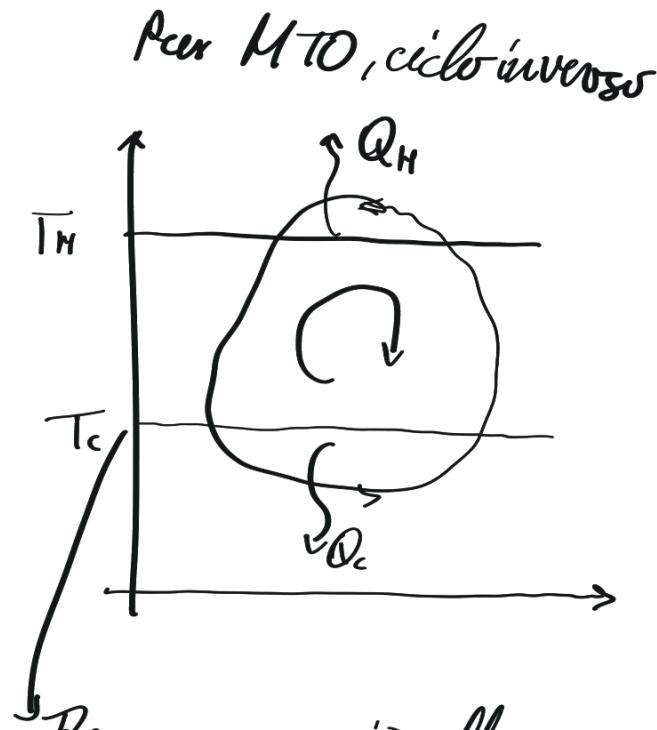


Lessione 13 - Cicli Termodinamici



Modi per realizzare macchine TD:

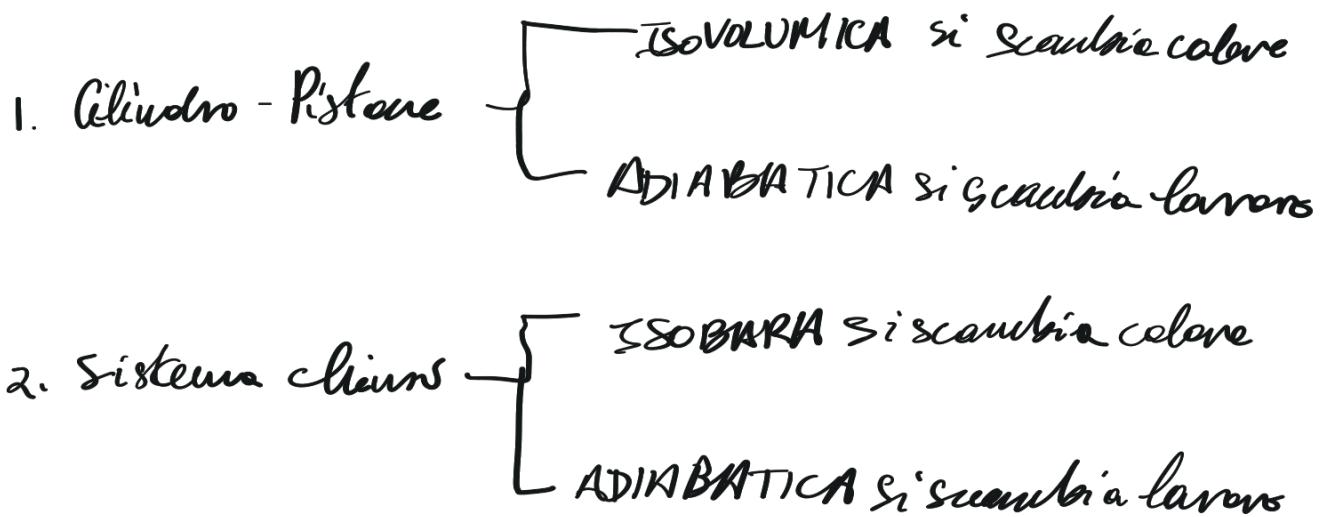
1. Sistema cilindro pistone
2. Circuito chiuso percorso da un fluido di lavoro



Rete esser più alta
di T più bassa del
ciclo, calore va nel
fluido col esce a
temperatura più calda

Considerazioni

Ciclo T-D → Sappiamo costruire "nel modo migliore possibile" disponibili che scambiano solo Q e L



Costruire in modo migliore possibile \rightarrow vogliamo $S_{\text{IRR}} = 0$

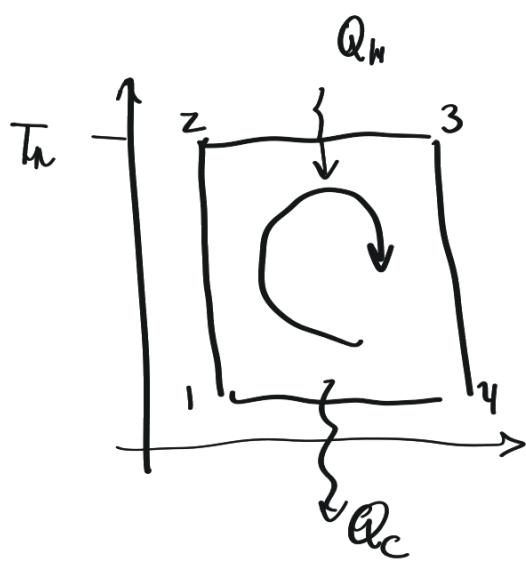
Per scambiare lavoro, servono organi di movimento. Per costruire al modo migliore serve ridurre gli attriti, costruendo piccole superfici

Per scambiare bene calore servono grosse superfici

Quindi per migliore, separiamo e costruiamo diverse, per hanno 2 requisiti opposti

Circoli → si circolo chiuso o cilindro pistone con 2 adiabatiche e 2 isoterme

Per di più max ΔL e ΔQ



$$\begin{aligned}\eta_c &= \frac{W}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_C}{Q_H} = 1 - \frac{Q_C}{Q_H} \\ &= 1 - \frac{T_C \Delta S_{41}}{T_H \Delta S_{23}} \\ &= \boxed{1 - \frac{T_C}{T_H}} \neq \underline{\underline{\eta}}\end{aligned}$$

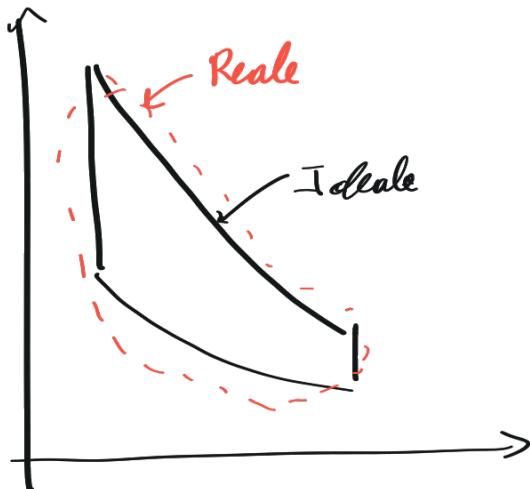
$$W = Q_H - Q_C$$

No perché T_C limitato da natura e T_H limitato da resistenza di materiali

$$\eta_c < \underline{\underline{\eta}}$$

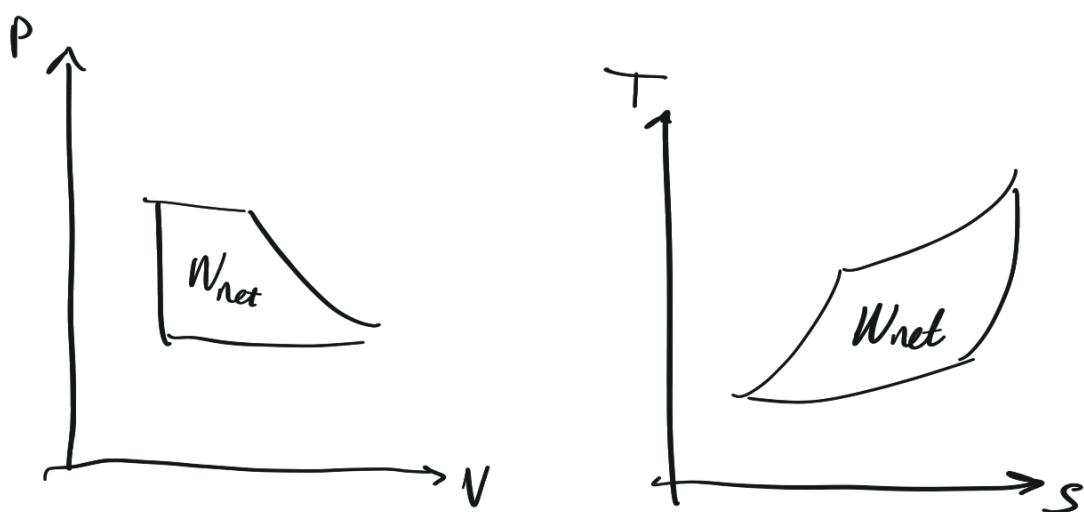
$$\eta_{II} = 1 \text{ se } \eta_I = \eta_c$$

Studieremo i cicli ideali



Primo Teorema di Carnot

1. Trascuriamo gli attriti \rightarrow nessuna perdita di carico
 \hookrightarrow fluidi ideali
2. Tutti processi quasi-statici
3. Condotti e depositi sono adiabatici

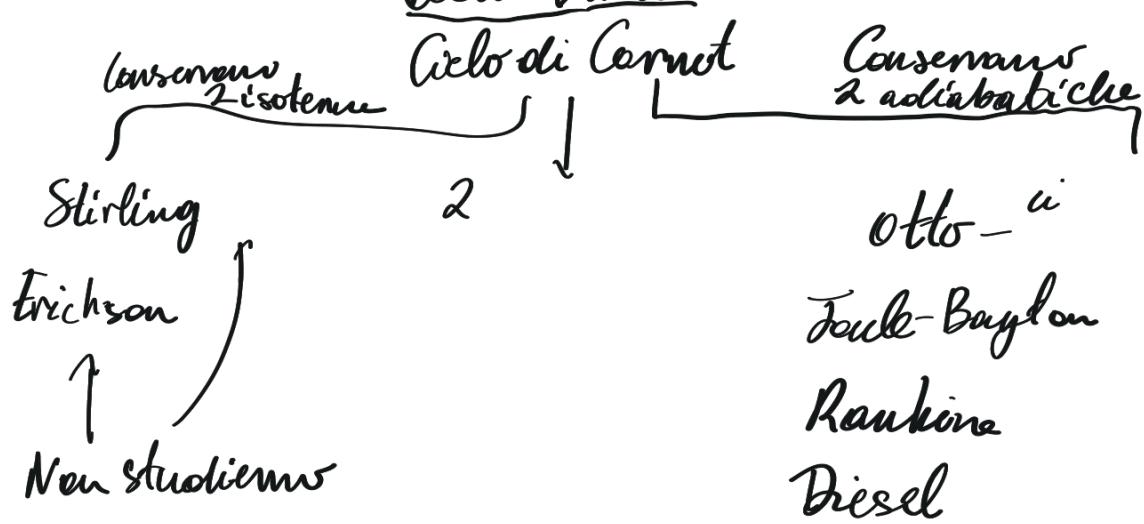


d'area racchiusa è uguale al lavoro netto svolto

Ciclo di Carnot

\hookrightarrow Principio di ogni ciclo

Cicli finti



- Otto → ciclo di Otto/motori per auto a benzina
 Otto - cilindro pistone - 2 adiabatiche, 1 isocore
 ↳ A candela
 Diesel - cilindro pistone - 2 adiabatico, 1 isocore, 1 isobare
 ↳ ciclo di Otto/motori per auto a gasolio
 ↳ Non simmetrico
 ↳ Compressione
 ↳ Riferimento per comprimere un gas (aerei a compressione, sottosuono, ...)
 Joule - Brayton - circuito chiuso, gas, 2 adiabatiche, 1 isobare
 ↳ (di solito aperto, ma studieremo chiuso) ↓
 ↳ lavora con vapore e non gas L Q
 Rankine - circuito, 2 adiabatiche + 1 isobare
 chiuso,
 sempre

Otto, Joule - Brayton, Diesel → leggi gas ideale

Rankine - Tabelle perché vapore

Otturatori ipotetici

Immaginiamo una camera di combustione
 però come ideale vorremmo riscaldamento

→ Modellichiamo con una camera detta
 scambiatore di calore, entra ed esce aria, con
 gas ideale $\Rightarrow \boxed{D} \rightarrow \boxed{D} \rightarrow$

1. Fluido di lavoro è aria e è gas ideale biatomico

2. Transformazioni quasi statiche

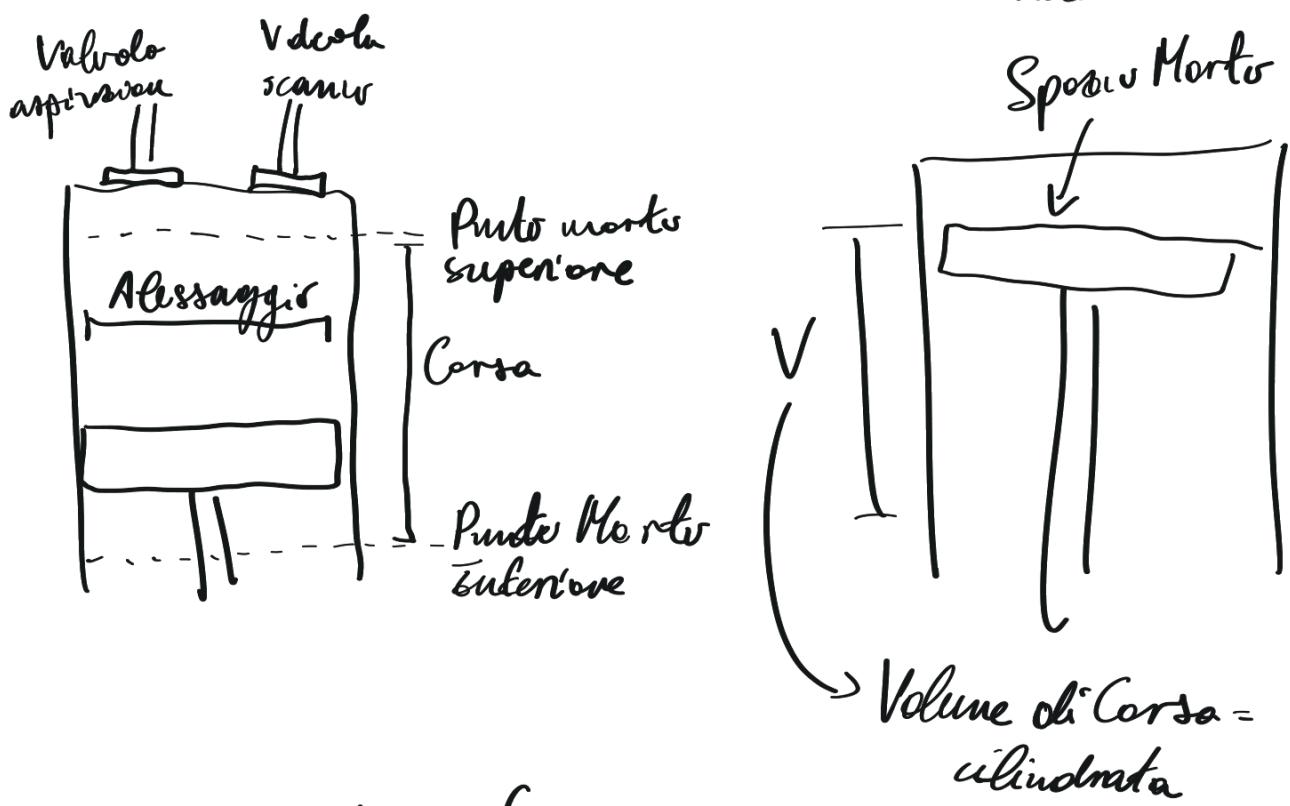
3. Processo di combustione

fig. 7

$$\text{Aria Standard} : M_m = 28,96 \text{ kg/mol}$$

$$C_V = 100 \approx \text{kJ/mol}$$

Nomenclatura Ciclo - Pistone \rightarrow compressione e combustione interna

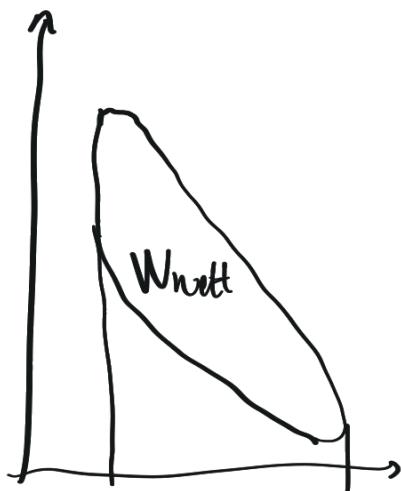


$$\text{Cilindrata} = \text{Area} \cdot \text{Corsa}$$

$$\text{Rapporto di compressione} = \frac{V_{max}}{V_{min}}$$

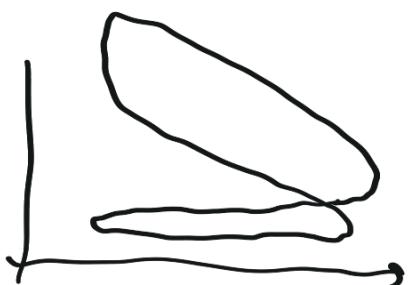
$$P_{Mg} - W_{netto} \cdot \text{area pistone} \cdot \text{corsa} = P_{Mg} \cdot \text{cilindrata}$$

(pressione netta effettiva)

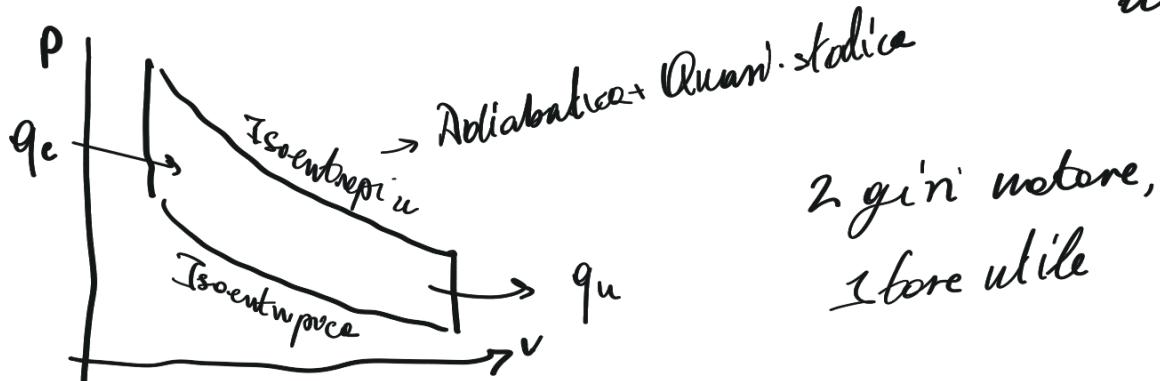


Ciclo Otto

Più o meno reale



Ciclo di Ideale di Riferimento (Area standard \rightarrow fluido di massa)



Motore a quattro tempi

Ciclo - 4 tempi - 2 ruotazioni \rightarrow 1 tempo utile \rightarrow lavoro

Motore a due tempi

a carico di espansione ed

L' ciclo = 2 tempi - Iniezione
 gas
 lo stesso tempo a causa
 dell'espansione del gas

Rendimento Otto

$$q_e = q_{23} = u_3 - u_2 = c_v(T_3 - T_2) \quad q_u = -q_{41} = -(u_4 - u_1) = c_v(T_1 - T_4)$$

$$\eta_{otto} = \frac{W_{netto}}{Q_e} = \frac{Q_e - Q_u}{Q_e} = 1 - \frac{Q_u}{Q_e} = 1 - \frac{c_v(T_4 - T_1)}{c_v(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

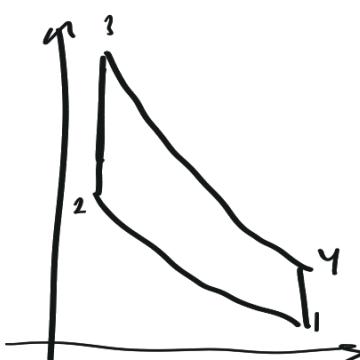
$$T_1 V_1^{\gamma} = T_2 V_2^{\gamma} \rightarrow \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^{\gamma-1} = \frac{T_4}{T_3}$$

$$f = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_1}{V_3}$$

$$\boxed{\eta_{otto} = 1 - \frac{1}{f^{\gamma-1}}}$$

Otto di solito con ρ tra 7 e 10

perché in cicli
 simmetrici esiste una
 proprietà tale da



$$T_1 \cdot T_3 = T_2 \cdot T_4 \rightarrow \frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2}$$

anche per

$$P_1 \cdot P_3 = P_2 \cdot P_4$$

$$V_1 \cdot V_3 = V_2 \cdot V_4$$

Nunca ρ si porta a T_e (P più alta),
 limitiamo ρ per evitare l'auto accensione (battito
 in testa) prima di V_{min}

Da evitare in moto a combustione

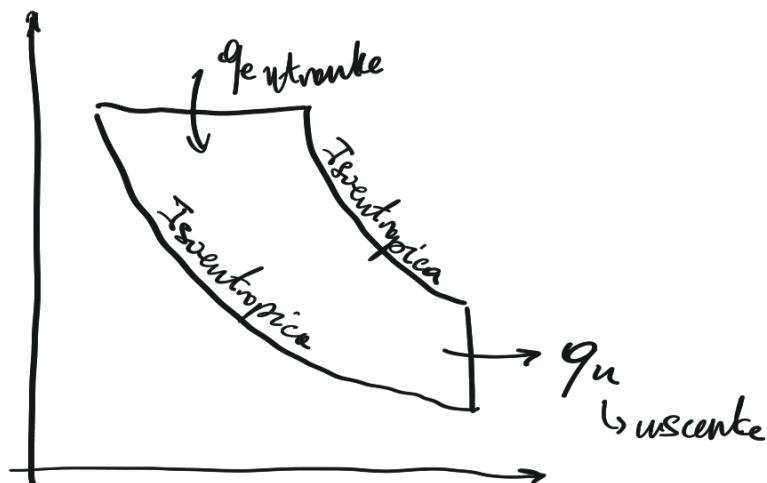
interna

Più ottano, più alta T di autoaccensione

Ciclo Diesel \rightarrow Non simmetrico
 \rightarrow viene nebulizzato

Funziona per auto accensione, hanno alte p
fra 12 e 24.

Dato p alto η è più alto di Otto



Prendimento Diesel

$$\gamma = \frac{V_2}{V_3} = \frac{V_3}{V_2} \quad \text{Rapporto volumetrico di compressione}$$

$$q_e = q_{23} = h_3 - h_2 = c_p(T_3 - T_2)$$

$$q_u = q_{u1} = (u_1 - u_2) = c_v(T_1 - T_2)$$

$$\eta_{DIESEL} = \dots = 1 - \frac{c_v(T_1 - T_2)}{c_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1}{\gamma T_2} \left(\frac{\frac{T_4}{T_1} - 1}{\left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)} \right)$$

Adiabatico 1-2

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{\gamma-1} \cdot \frac{1}{P^{\gamma-1}}$$

Isobara 2-3

$$\frac{T_2}{V_2} = \frac{T_3}{V_3} \rightarrow \frac{T_3}{T_2} = \frac{V_3}{V_2} = \gamma$$

Isocora 4-1

$$\frac{T_1}{P_1} = \frac{T_4}{P_4} \rightarrow \frac{T_4}{T_1} = \frac{P_4}{P_1}$$

Dove valgono 1-2 per 2-4

$$P_1 V_1 T = P_2 V_2^\gamma$$

$$P_3 V_3 T = P_4 V_4^\gamma T$$

$$\frac{P_4}{P_1} \left(\frac{V_4}{V_1} \right)^\gamma = \frac{P_3}{P_2} \left(\frac{V_3}{V_2} \right)^\gamma \rightarrow \frac{P_4}{P_1} = \left(\frac{V_3}{V_2} \right)^\gamma \rightarrow \frac{T_4}{T_1} = \left(\frac{V_3}{V_2} \right)^\gamma = \gamma^\gamma$$

$$\eta_{\text{DIESEL}} = 1 - \frac{1}{P^{r-1}} \left[\frac{\gamma^{r-1}}{k(\gamma-1)} \right]$$

Per $\gamma=1$ abbiamo una isocora invece di una isobara, quindi sarebbe il ciclo otto

$$\Rightarrow \eta_{\text{DIESEL}} > \eta_{\text{OTTO}}$$

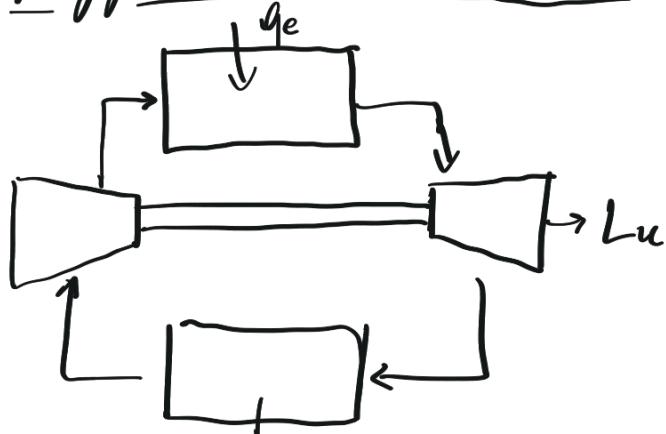
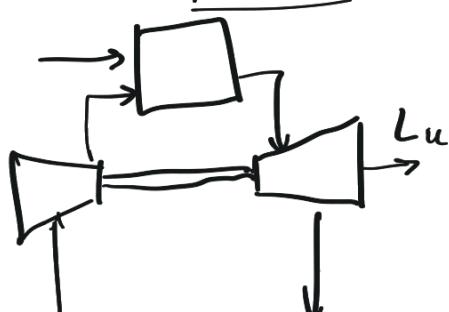
↪ più efficiente, più inquinante a causa di cosa meno pregiata.

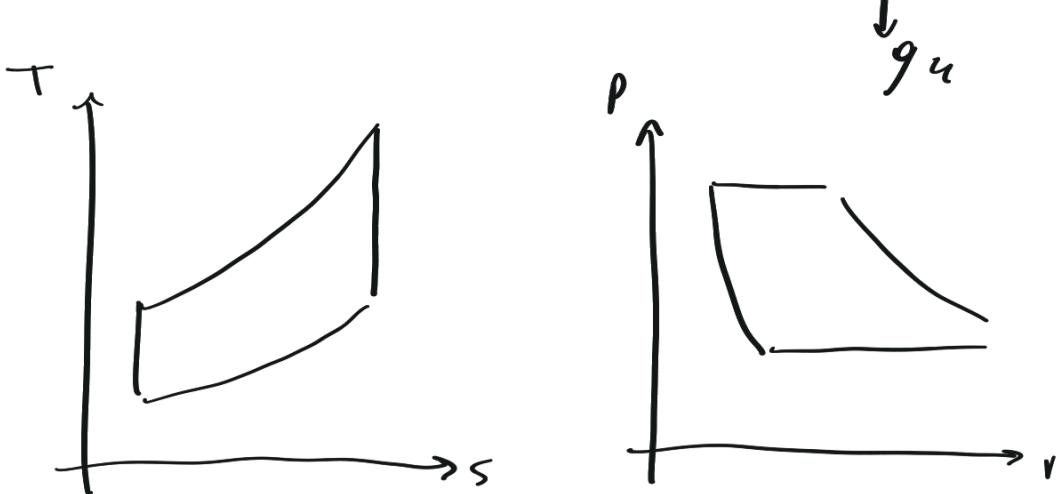
Joule - Brayton → ciclo ideale per turbine a gas

↪ simmetria

Reale → circuito aperto

Progetto reattori: ciclo ideale → ciclo chiuso





$$q_e = q_{23} = h_3 - h_2 = c_p(T_3 - T_2) \quad q_u = -q_{41} = -(h_1 - h_4) = c_p(T_4 - T_1)$$

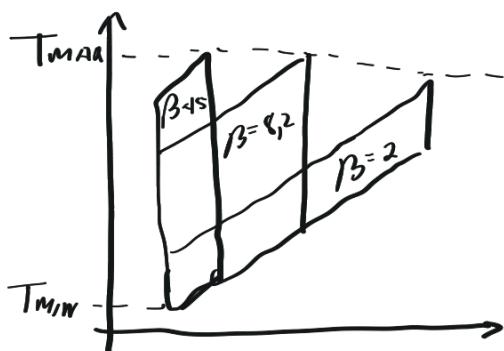
manometrico
Rapporto di compressione $\beta = \frac{P_{max}}{P_{min}} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_4}$

$$\eta_{\text{teorico}} = \frac{W_{\text{netto}}}{Q_e} = \frac{Q_e - Q_u}{Q_e} = 1 - \frac{Q_u}{Q_e} = 1 - \frac{c_p}{\beta}$$

$$\eta_{\text{teorico}} = \dots = 1 - \frac{1}{\beta^{\frac{n-1}{n}}}$$

η_{teorico} crescente per β crescente

β tra 2 e 16



$$\text{Fissato } T_{\min} \text{ e } T_{\max} \quad \beta = \left(\frac{T_{\max}}{T_{\min}} \right)^{\frac{\gamma}{2(\gamma-1)}}$$

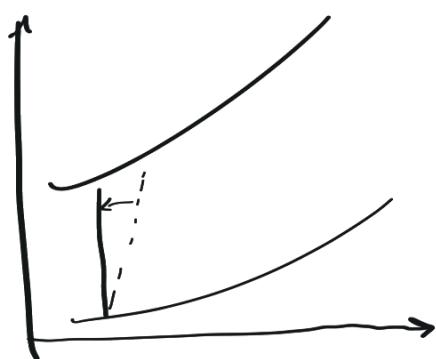
L'aria all'ingresso è sia ossidante che raffrigerante
della parte della turbina.

Circa 50% del lavoro generato dalla turbina è
usato dal compressore.

Come aumentare efficienza

1. Aumentare la temperatura di combustione
2. Efficienza delle macchine
3. Modificare ciclo base (introducendo interriferenze)

Pg 17)



Ciclo Rankine con Rigeneroazione



Quando rapporti di compressione sono bassi.

Ammare del gas al passo 2 con i gas al passo 4 dato che sono ancora caldi
 Riduce q_e riducendo per aumentare la T_a (3)

Il lavoro netto non cambia, quello che cambia è q_e che ci serve per aumentare la temperatura

$$\eta_J = \frac{W_n}{Q_H} = \frac{W_T - W_C}{Q_H} = \frac{c_p(T_3 - T_4) - c_p(T_2 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)}$$

Con rigenerazione:

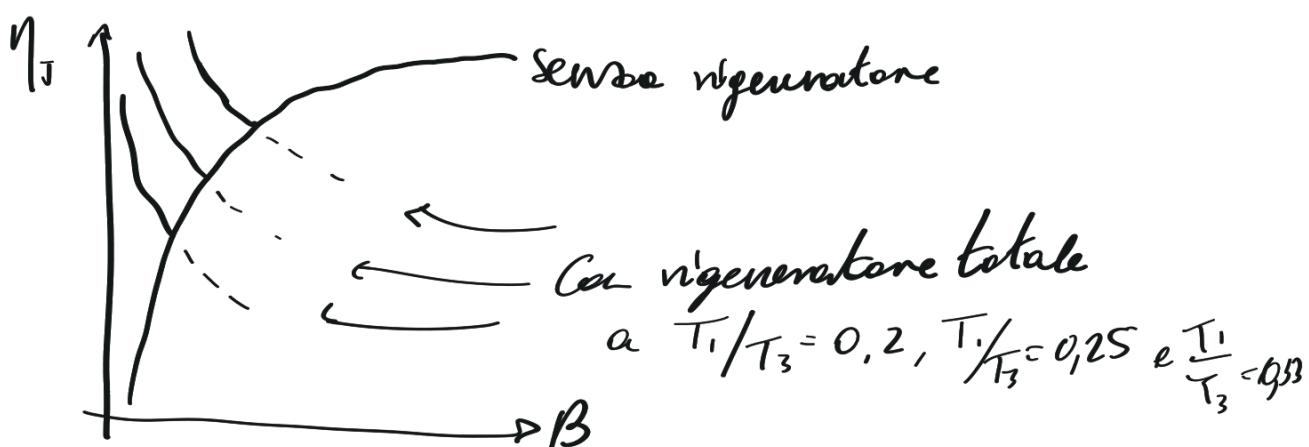
$$\eta_{Jr} = \frac{c_p(T_3 - T_4) - c_p(T_2 - T_1)}{c_p(T_3 - T_5')}$$

$$q_{rig-ideale} = h_{5'} - h_2 = h_4 - h_2$$

$$\epsilon_{rig} = \frac{q_{rig\ real}}{q_{rig\ ideale}}$$

✓ Efficienza rigeneratore

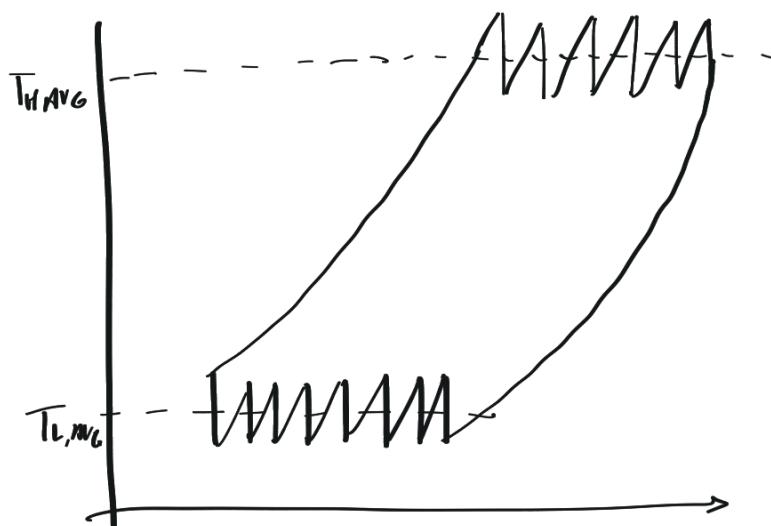
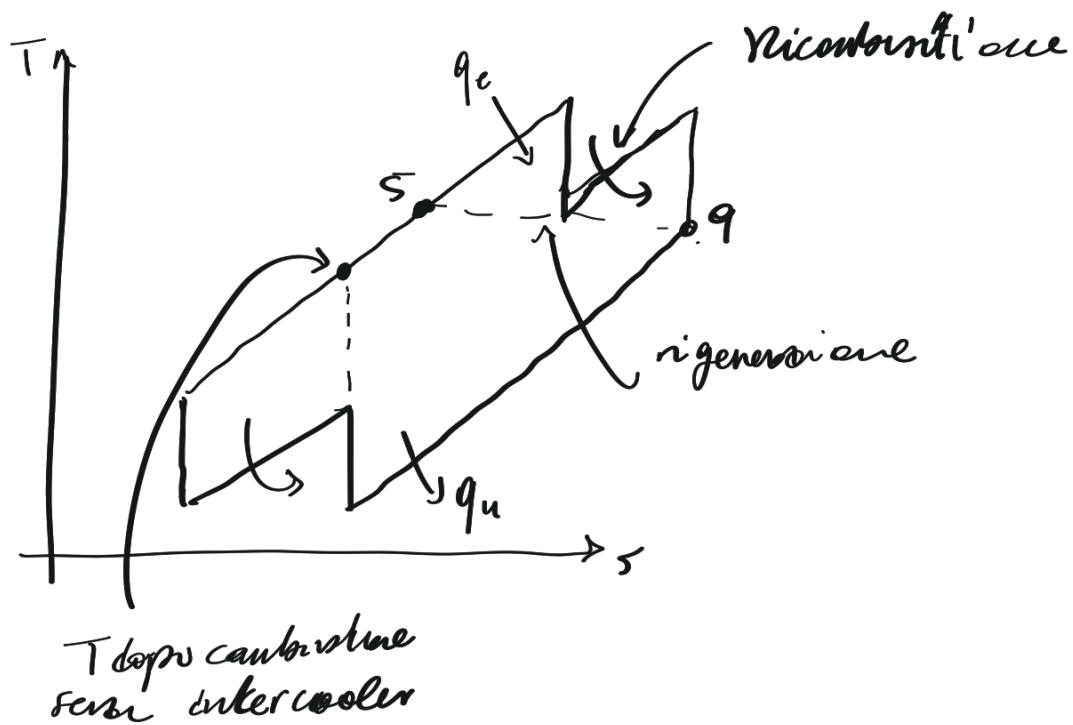
$$\eta_{Jr} = 1 - \left(\frac{T_1}{T_3} \right) \beta^{\frac{r-1}{r}}$$



L'effetto è maggiore quando minimizziamo

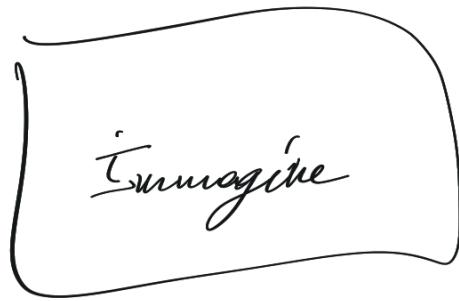
$$\beta \text{ e } \frac{T_1}{T_3} = \frac{T_{min}}{T_{max}}$$

Torre con interriferogenazione, Ricombinazione e generazione



Stadi di interriferogenazione → max 2 per costo e effetto
decrecente

Turbine



$$F = (\dot{m} w)_n - (\dot{m} w)_e$$

$$\dot{L}_{sp} = F \cdot w_a = \dot{m} (w_n - w_e) w_a \quad [W]$$

$$\eta = \frac{\dot{L}_{sp}}{\dot{Q}_e}$$

Turbo jet

