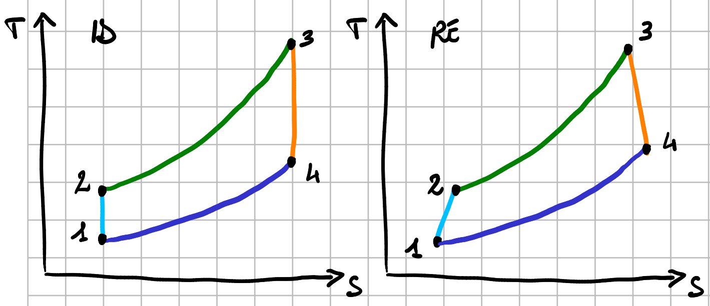
IMPIANTI A GAS

Grandi impianti termoelettrici | Propulsione navale | Industria chimica / petrolchimica | Propulsione aeronautica

CICLO DI RIFERIMENTO



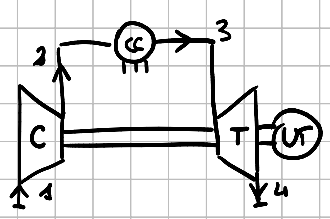
CICLO JOULE REALE: $\begin{cases} \Delta S_{12} > 0 \\ \Delta S_{34} > 0 \end{cases}$

1-2: Compress. adiab. irreversibile $(m > k)$
2-3: Adduz. a pressione costante
3-4: Espansione adiab. irrevers. $(m < k)$
4-1: Sottraz. a pressione costante

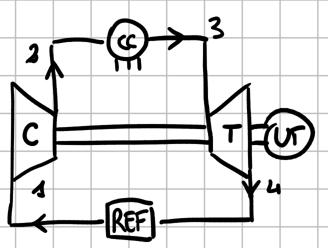
PARAMETRI DI PROGETTO: $\beta = \frac{p_2}{p_1} = \frac{p_3}{p_4}$ RAPPORTO DI COMPRESS. MANOMETRICO

$\theta = \frac{T_3}{T_1}$ RAPP. TRA TEMPERATURE MASSIMA E MINIMA

CICLO APERTO



CICLO CHIUSO



Entrambi i cicli illustrati a lato sono mantenuti in impianti monoalbero, tali che la potenza ottenuta dalla turbina sia trasferita direttamente all'utilizzatore e al compressore, tramite un unico collegamento.

RENDIMENTO

$$\eta = \frac{L}{Q_1} = \frac{L_T - L_C}{Q_1} = \frac{\cancel{c_p}(T_3 - T_4) - \cancel{c_p}(T_2 - T_1)}{\cancel{c_p}(T_3 - T_2)} = \frac{T_3 - T_2 + T_1 - T_4}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$$

Ricordiamo che: $\beta_C = \frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{k}{k-1}} = \beta_E = \frac{p_3}{p_4} = \left(\frac{T_3}{T_4}\right)^{\frac{k}{k-1}} \rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} \rightarrow \frac{T_2}{T_3} = \frac{T_1}{T_4}$

DUNQUE: $\eta = 1 - \frac{T_4}{T_3}\frac{\cancel{(1 - T_1/T_4)}}{\cancel{(1 - T_2/T_3)}} = 1 - \frac{T_4}{T_3} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{\beta^{\mu}}$

dove $\mu = \frac{k-1}{k}$

Il rendimento dipende solo dal rapporto di compressione (e dalla natura del gas).

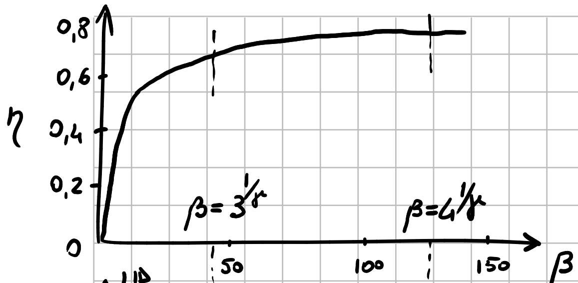
η AUMENTA CON β E k $\longrightarrow$ Se k aumenta, μ aumenta
↳ Se μ aumenta, $\beta^{-\mu}$ diminuisce

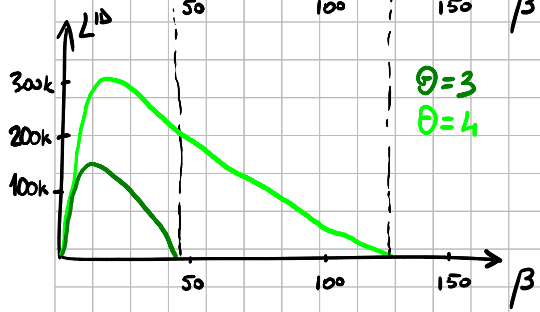
Se β aumenta, $\beta^{-\mu}$ diminuisce $\longrightarrow$ ↳ Se $\beta^{-\mu}$ diminuisce, η aumenta

LAVORO IDEALE

$$L^{ID} = L_T^{ID} - L_C^{ID} = c_p T_3 (1 - \beta^{-\mu}) - c_p T_1 (\beta^{\mu} - 1) = c_p T_1 \left(\theta - \frac{\theta}{\beta^{\mu}} - \beta^{\mu} + 1\right)$$

Se θ è fissato, L^{ID} è nullo per due valori di β: $\beta = 1, \quad \beta = \theta^{1/\mu}$





Quando il rendimento è elevato, solitamente non lo è il lavoro utile. Però:

- ▸ η dipende solo da β
- ▸ L^{ID} dipende da β e θ

→ Se aumento θ lasciando fissi β e χ, aumento il lavoro utile senza intaccare il rendimento!

CONDIZIONI DI MASSIMO LAVORO

$$\frac{dL}{d\beta} = \cancel{c_p T_1}\left(\chi\theta\beta^{-\chi-1} - \chi\beta^{\chi-1}\right) = 0$$

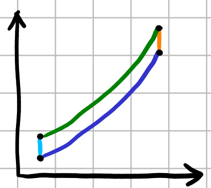
$$\text{ergo} \quad \theta\beta^{-\chi-\cancel{1}} = \beta^{\chi-\cancel{1}}, \quad \beta^{2\chi} = \theta \rightarrow \beta = \theta^{1/2\chi}$$

COSA IMPLICA QUESTO RISULTATO?

Ricordiamo che: $T_2 = T_1\beta^{\chi} = T_1\theta^{1/2}$

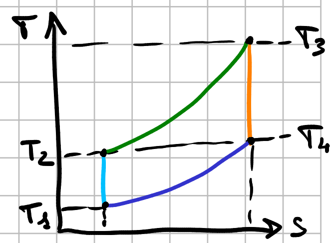
e che: $T_4 = T_3\beta^{-\chi} = T_3\theta^{-1/2} = T_1\theta\,\theta^{-1/2} = T_1\theta^{1/2} = T_2 \rightarrow \underline{T_4 = T_2}$

E SE VARIASSIMO β?



Con $\beta \rightarrow 1 \rightarrow \begin{cases} L^{ID} \rightarrow 0 \\ \eta \rightarrow 0 \end{cases}$

L^{ID} max:



Con $\beta \rightarrow \beta_{max} = \theta^{1/\chi}$

↳ $\begin{cases} L^{ID} \rightarrow 0 \\ T_2 \rightarrow T_3 \\ \eta \rightarrow \eta_{carnot} \end{cases}$

Perchè $\eta(\beta = \beta_{max}) = 1 - \theta^{-1} = 1 - \frac{T_1}{T_3} = \eta_c$

CONDIZIONI DI MASSIMO RENDIMENTO

$\eta \rightarrow \eta_{max}$ per $\beta \rightarrow \infty$ | Siccome aumentare β oltre β_{max} non ci conviene se non vogliamo $L_C > L_T$, fermiamoci a $\beta \rightarrow \theta^{1/\chi}$

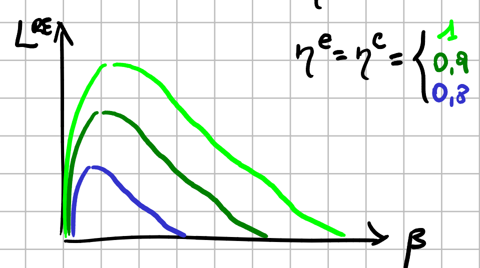
Per $\beta \rightarrow \beta_{max} = \theta^{1/\chi}$: $\eta \rightarrow \eta_c$. Tuttavia $L \rightarrow 0$.

CASO CICLO REALE

Il lavoro reale dovrà tenere conto dei rendimenti adiabatici di espansione e compressione. →

$$L^{RE} = c_p T_1\left(\eta^e_{ad}\left(\theta - \theta\beta^{-\chi}\right) - \frac{1}{\eta^c_{ad}}\left(\beta^{\chi} - 1\right)\right)$$

Con il ridursi dei rendimenti, L^{RE} si riduce a parità di β, e si annulla per valori di β_{max} decrescenti.



E IL RENDIMENTO?

Siccome $Q_1 = c_p(T_3 - T_2) = c_p T_1\left(\theta - \beta^{\frac{m-1}{m}}\right)$

$$= c_p T_1\left(\theta - 1 - \frac{\beta^{\chi} - 1}{\eta^c_{ad}}\right)$$

allora: $$\eta_e = \frac{L^{RE}}{Q_1} = \frac{\eta^e_{ad}\left(\theta - \theta\beta^{-\chi}\right) - \frac{1}{\eta^c_{ad}}\left(\beta^{\chi} - 1\right)}{\theta - 1 - \frac{\beta^{\chi} - 1}{\eta^c_{ad}}}$$

Ergo $\eta_e = f(\beta, \theta, \eta^c_{ad}, \eta^e_{ad})$

Posso scrivere gli η_{ad} in funzione degli η_{pol}.

$$\eta^c_{pol} = \frac{k-1}{k}\,\frac{m}{m-1} \qquad \eta^c_{ad} = \frac{\beta^{k}-1}{\beta^{k^*}-1} \qquad \text{con } k^* = k/\eta^c_{pol}$$

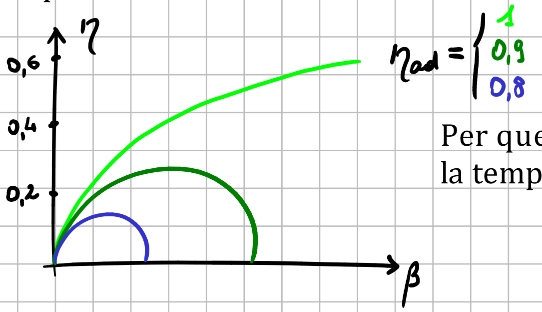
$$\eta^e_{pol} = \frac{k}{k-1}\,\frac{m-1}{m} \qquad \eta^e_{ad} = \frac{1-\beta^{-k^*}}{1-\beta^{-k}} \qquad \text{con } k^* = k\,\eta^e_{pol}$$

Possono essere sostituite in η_r!

Se η_{pol} aumenta, aumenta anche η_r.

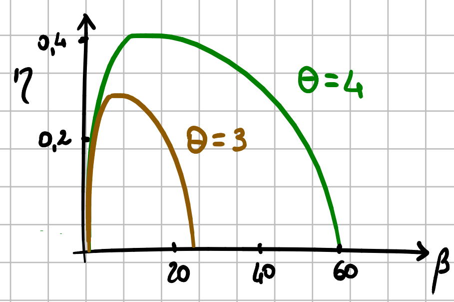
Ciclo limite

Mentre nel caso ideale il rendimento è sempre crescente con il rapporto di compressione, nel caso reale raggiunge un massimo e si annulla dove il lavoro reale di compressione uguaglia il lavoro reale di espansione.



Inoltre, nel caso reale il rendimento è funzione anche delle temperature, poiché dipende da θ.

Per questo motivo, si cercano di raggiungere i valori massimi per la temperatura T_3, compatibilmente con la resistenza dei materiali.



Per contenere la temperatura massima entro i 1100°C è necessario adottare rapporti di miscela superiori a 30.
Il fluido di lavoro (aria+gas combusti) può quindi essere con buona approssimazione considerato composto dalla sola aria.

Il ciclo limite di un impianto a gas può essere considerato quasi uguale al ciclo ideale.

Rapporto di miscela

$$\alpha = \frac{\dot m_A}{\dot m_c} \qquad \dot Q_1 = (\dot m_A + \dot m_c)(h_3 - h_2) = (\dot m_A + \dot m_c)\,c_p(T_3 - T_2)$$

$$= \dot m_c H_i \eta_b \longrightarrow \eta_b H_i = \frac{\dot m_{TOT}}{\dot m_c} c_p (T_3 - T_2) = (\alpha+1) c_p (T_3 - T_2)$$

Da cui: $T_3 = T_2 + \dfrac{\eta_b H_i}{c_p(\alpha+1)} \longrightarrow$ Maggiore α, minore T_3 (e minore θ)

Rapporto di miscela richiesto in funzione della temperatura massima:

$$\alpha = \frac{\eta_b H_i}{c_p(T_3 - T_2)} + 1 \approx \frac{\eta_b H_i}{c_p(T_3 - T_2)}$$

NOTA: nel caso dei motori alternativi le temperature massime possono raggiungere valori superiori (cfr. macchine volumetriche e dinamiche) ed è quindi possibile operare con rapporti di miscela inferiori: il ciclo limite risulta sensibilmente diverso dal ciclo ideale.