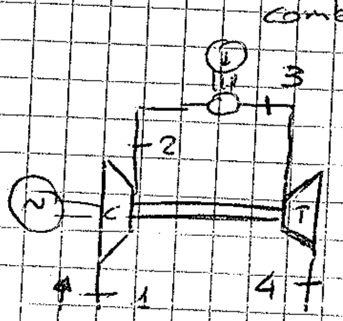
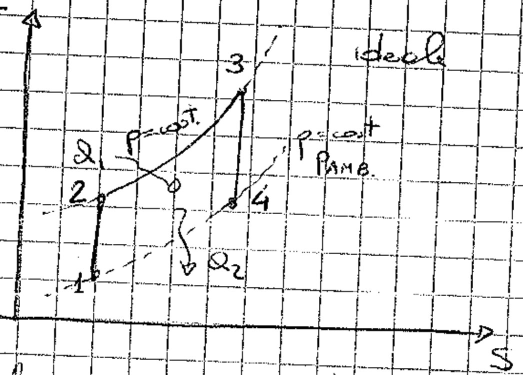
IMPIANTI TURBOGAS





Non è un ciclo chiuso, il ciclo si richiude nell'ambiente. Questo ciclo prende anche il nome di ciclo di Joule.

$$L_{i_{id}} = L_{t_{id}} - L_{c_{id}} = Q_1 - Q_2$$

$$Q_e - L_{i_{eff}} = \Delta i + \Delta E_{c,g,ef} \underset{\text{ciclo chiuso}}{=} 0 \Rightarrow Q_e = L_i \text{ se ciclo chiuso}$$

$$\eta_{id} = \frac{L_{id}}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{c_p (T_4 - T_1)}{c_p (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1 \left(\frac{T_4}{T_1} - 1\right)}{T_2 \left(\frac{T_3}{T_2} - 1\right)}$$

$$Q_1 = c_p (T_3 - T_2)$$

$$Q_2 = c_p (T_4 - T_1)$$

$\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2}$ perché $\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} \Rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$ politropica adiabatica

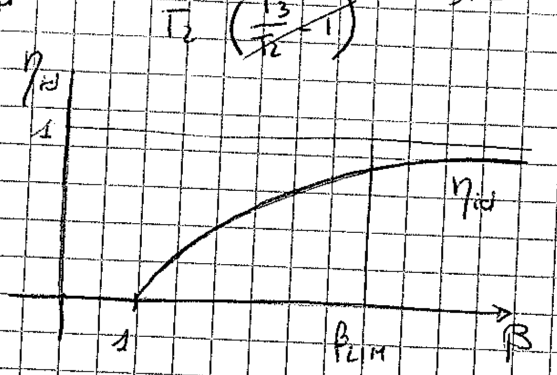
$$= \beta_c^{\frac{k-1}{k}}$$

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{p_3}{p_4}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \beta_t^{\frac{k-1}{k}}$$

$p_3 = p_2$
$p_4 = p_1$

$$\beta = \beta_t = \beta_c \Rightarrow \frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2}$$

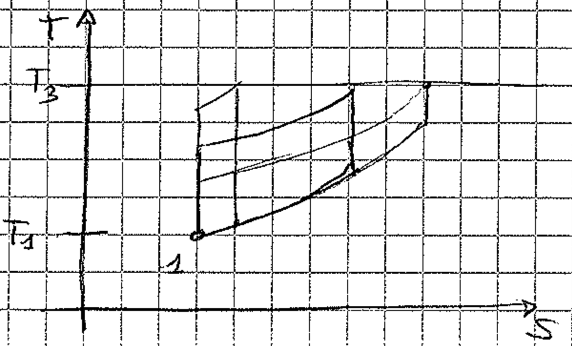
$$\eta_{id} = 1 - \frac{T_1 \cancel{\left(\frac{T_4}{T_1} - 1\right)}}{T_2 \cancel{\left(\frac{T_3}{T_2} - 1\right)}} = 1 - \frac{1}{\beta^{\frac{k-1}{k}}} = \cancel{1 - \beta^{\frac{k}{k-1}}}$$



T_1 è la temperatura ambiente ed è fissa

T_3 = cost dipende dalla temperatura delle palette della turbina

Se fisso T_1 e T_3 al variare di β cambia la forma del ciclo:



Esiste un limite per cui T_2 al max può essere pari a T_3

$$\beta_{LIM} = \left(\frac{T_3}{T_1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$$

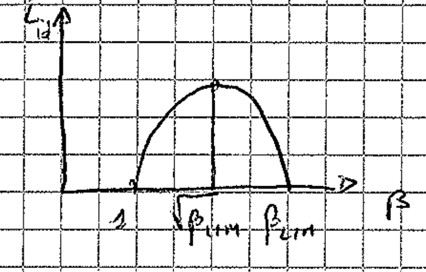
esempio $T_3 = 1200\ K$ $\quad T_1 = 288\ K$ $\quad \beta_{LIM} = 148$

Andamento del lavoro:

$$L_{id} = \eta_{id} \cdot Q_1 = \left(1 - \frac{1}{\beta^{\frac{k-1}{k}}}\right) c_p \left(T_3 - T_2\right) =$$

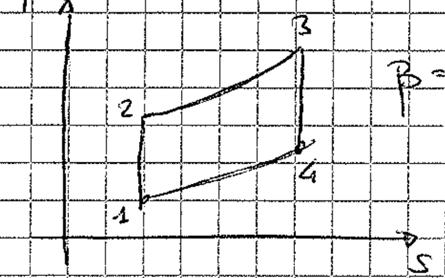
$$= \left(1 - \frac{1}{\beta^{\frac{k-1}{k}}}\right) c_p \left(T_3 - T_1\ \beta^{\frac{k-1}{k}}\right)$$

Si annulla per $\beta = 1$ e per $\beta^{\frac{k-1}{k}} = \frac{T_3}{T_1}$ cioè $\beta = \beta_{LIM}$



$L_{id_{max}} \rightarrow \frac{\partial L_{id}}{\partial \beta} = 0$

$\beta = \sqrt{\beta_{LIM}}$

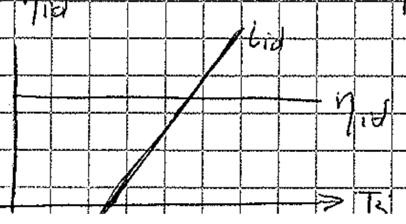


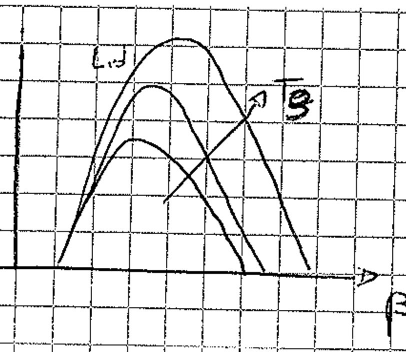
$\beta = \sqrt{\beta_{LIM}}$

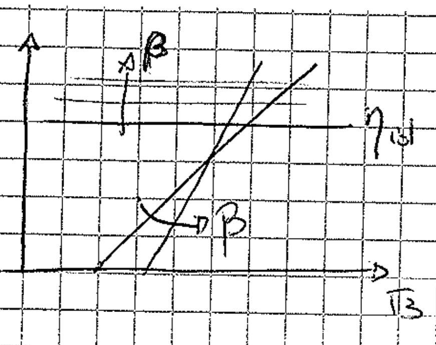
Se fissiamo T_1, ~~T_3~~ e β si ha che

$$L_{id} \propto c_p \left(T_3 \left(1 - \frac{1}{\beta^{\frac{k-1}{k}}}\right)\right)$$

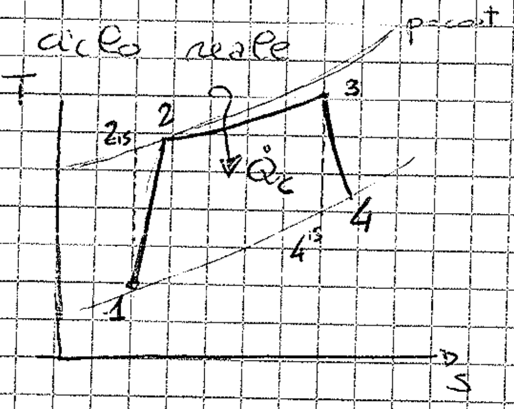
η_{id} è costante perché è stato fissato β

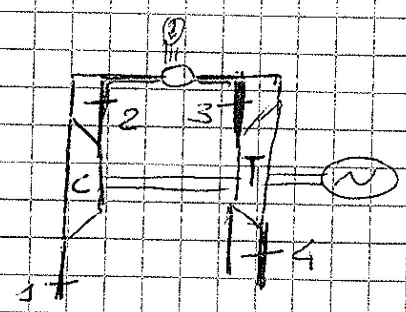






ciclo reale





compressore: ci interessano η_{yc}, η_c, m (esponente politropico)

turbina: ci interessano η_{yt}, η_t, m_t (esponente politropico)

combustore: ci interessa
$$\begin{cases} \eta_{pb} = P_3/P_2 \\ \eta_c = \dfrac{\dot{Q}_1}{\dot{m}_b H_i} = \dfrac{Q_1}{E_c} \end{cases}$$
E_c — energia utilizzabile del combustibile

Perdite ~~Meccaniche~~ Meccaniche:
$$\begin{cases} \eta_0 \dfrac{P_u}{P_i} = \dfrac{P_u \text{ (albero)}}{P_{it} - P_{ic}} \\ \eta_{0t} = \dfrac{P_{ut}}{P_i} \\ \eta_{0c} = \dfrac{P_i}{P_{ac}} \end{cases}$$
$$P_u = P_{ut} - P_{ac}$$

~~Noti~~ Troviamo: η_y ; L_u (noti η_{id}, L_{id})

$$P_u = \eta_0 (P_{it} - P_{ic})$$

$$P_{it} = (\dot{m}_a + \dot{m}_b) \underbrace{c_p' (T_3 - T_4)}_{L_{it}} = (\dot{m}_a + \dot{m}_b) c_p' T_3 \left(1 - \frac{1}{\beta^{\eta_{yt}\frac{k-1}{k}}}\right)$$

$$P_{ic} = \dot{m}_a \underbrace{c_p (T_2 - T_1)}_{L_{ic}} = \dot{m}_a c_p T_1 \left(\beta_c^{\frac{1}{\eta_{yc}}\frac{k-1}{k}} - 1\right)$$

Ipotizziamo che $\dot{m}_a + \dot{m}_b \simeq \dot{m}_a = \dot{m}$

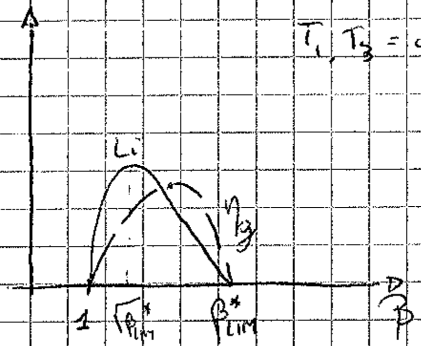
$$l_u = \frac{P_u}{\dot m} = \eta_o (L_{i_t} - L_{i_c})$$

$$\eta_\pi = \frac{\beta_t}{\beta_c}$$

$$\eta_g = \frac{P_u}{\dot m_b H_i} = \eta_b \frac{P_u}{\dot Q_{1_b}} = \eta_b \frac{(L_{i_t} - L_{i_c})}{c_p' (T_3 - T_2)}$$

$$(\dot m_a + \dot m_b) c_p' (T_3 - T_2)$$

$T_1, T_3 = \cos t$



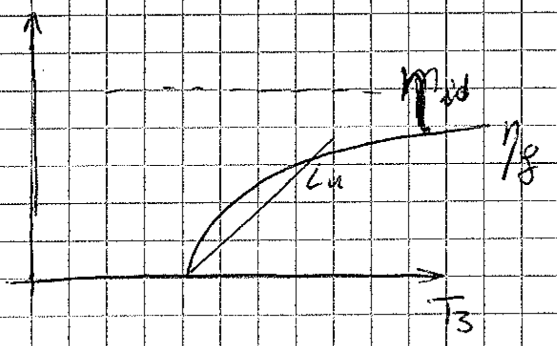
Nota il lavoro si annulla prima che l'aumento di β così $T_2 = T_3$

Esercizio: $\eta_{y_t} = \eta_{y_c} = 0{,}85$ $\eta_o = 0{,}95$ $\eta_b = 0{,}98$

$\eta_\pi = 0{,}97$ $c_p = c_p' = 1000$ $k = k' = 1{,}4$

$T_1 = 288$ K $T_3 = 1300$ K

Andamento a $\beta = \cos t$ e $T_1 = \cos t$



Dosatura: $\alpha = \frac{\dot m_a}{\dot m_b}$

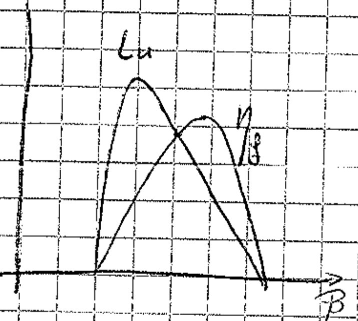
$$\eta_b = \frac{\dot Q_1}{\dot m_b H_i} = \frac{\dot m_a + \dot m_b \quad c_p' (T_3 - T_2)}{\dot m_b \quad H_i} =$$

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

$$\Downarrow$$

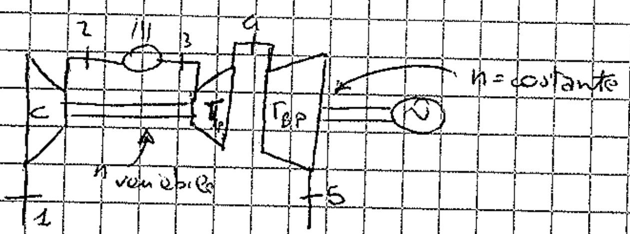
$$\alpha + 1 = \eta_b \frac{H_i}{c_p' (T_3 - T_2)} \rightarrow \alpha = \eta_b \frac{H_i}{c_p (T_3 - T_2)} - 1$$

α_{ST} è la minima portata d'aria rispetto al combustibile necessaria ad ossidare gli idrocarburi



Se voglio massimizzare la potenza devo lavorare a β bassi se voglio massimizzare il rendimento a lavoro utile costante devo aumentare le dimensioni della macchina.
Si usano soluzioni di compromesso

Turbogas bialbero



Si hanno vantaggi nella regolazione rispetto ad un normale Turbo GAS.

Combustore

- aria primaria: fa partire la combustione
- aria secondaria: completa combustione
- parte terziaria: porta alla temperatura voluta il gas.

Calcoli con dati delle fotocopie

GE10 $\quad P_{el} = 11{,}25\ MW \quad \eta_{el} = 0{,}312 \quad \beta_c = 15{,}4$

$\dot{m} = 48{,}9\ \frac{kg}{s} \quad T_1 = 288\ K \quad T_4 = 484\ °C \quad \eta_{m,el} = 0{,}85$

$\eta_{yc} = \eta_{yt} = 0{,}85 \quad \eta_\pi = 0{,}96 \quad \eta_b = 0{,}98$

$c_p' = 1{,}050\ \frac{kJ}{kg\,K} \quad c_p = 1\ \frac{kJ}{kg\,K} \quad R = 0{,}287\ \frac{kJ}{kg\,K}$

$\frac{k'-1}{k'} = \frac{R}{c_p'} = 0{,}2733 \qquad \frac{k-1}{k} = \frac{R}{c_p} = 0{,}287$

$T_2 = T_1\,\beta_c^{\frac{k-1}{k}\frac{1}{\eta_{yc}}} = 725\ K \qquad T_3 = T_4\,\beta_t^{\eta_{yt}\frac{k'-1}{k'}} = 1011\ K$

$\beta_T = \beta_c\,\eta_\pi =$

$$L_{el} = \eta_o \left(L_{i_t} - L_{i_c} \right) = \eta_{m,el} \left(c_p' (T_3 - T_4) - c_p (T_2 - T_1) \right) = 212{,}2 \ \frac{kJ}{kg}$$

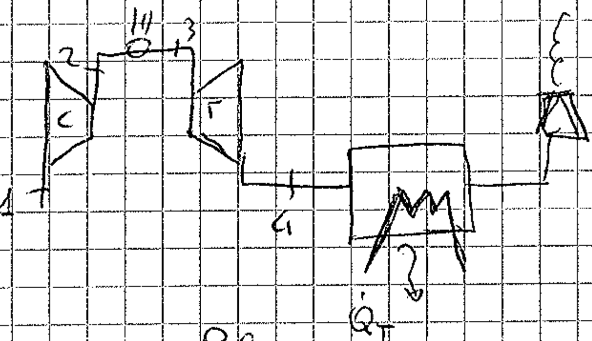
$$L_{el} = \frac{P_{el}}{\dot{m}} = \frac{11{,}25 \ MW}{46{,}9 \ \frac{kg}{s}} = 238{,}8 \ kJ/kg$$

LM 6000

$$l_{el_{NOM}} = \frac{43076}{131} = 328 \ \frac{kJ}{kg} \qquad T_4 = 443 \ °C$$

$$T_3 = T_4 \cdot \beta^{0{,}85 \cdot 0{,}273} \cdot 0{,}95 = 1570 \ K$$

$$\eta_{el} = \frac{L_{el}}{c_p' (T_3 - T_2)} \cdot \eta_b = \frac{212}{1{,}05 \, (1441 - 725)} \cdot \eta_b = 0{,}288$$



$$T_4 = 484\,°C$$

$$\dot{Q}_T = \dot{m} \, c_p' (T_4 - T_5) = 46{,}9 \cdot 1{,}05 \cdot (484 - 140) = 16{,}940 \ MW$$

$$I_e = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_T} = 0{,}66$$

$$PES = 1 - \frac{m_b H_i}{\frac{P_{el}}{0{,}52} + \frac{\dot{Q}_T}{0{,}8}} = 0{,}11 \quad \text{limite accettabilità} \ (> 0{,}1)$$

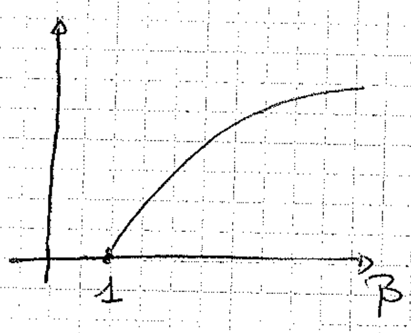
Microturbine a gas (30-100 KW)

Impianti di cogenerazione.

Non è possibile fare turbine a molti stadi. Si usano compressori a stadio centrifugo ($\beta_c \simeq 4 \div 4{,}5$). Turbine centripete (fluido va da diametro esterno ad interno)

Il ciclo di Carnot

La differenza $(T_2 - T_4)$ è molto ~~minore~~ maggiore rispetto alla del ciclo turbogas



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

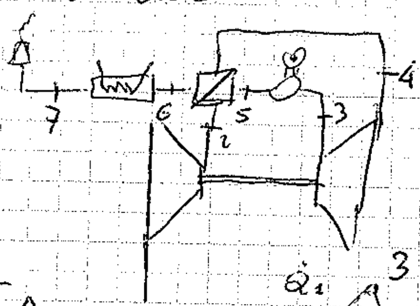
Se $\beta_c \simeq 4$ $\quad \eta_{id} = 0{,}327$

Se $\beta_c \simeq 20$ $\quad \eta_{id} = 0{,}575$

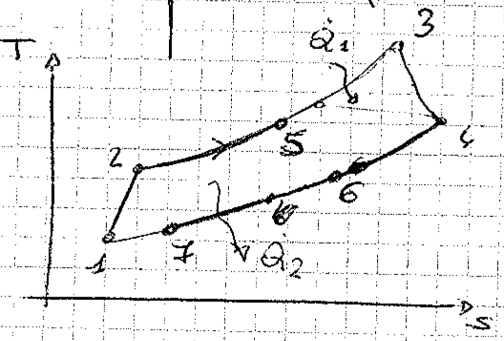
Se consideriamo lo stesso rapporto η_g/η_{id} per entrambe le macchine a $\beta_c \simeq 4$ $\eta_g = 0{,}15 \div 0{,}17$ e ~~se~~ $\beta_c = 20$ $\eta_g \simeq 0{,}3$

η_g del micro turbogas il rendimento è molto basso.

Possiamo pensare di fare un <u>ciclo rigenerativo</u> per aumentare il rendimento



scambiatore per produrre acqua calda



$T_5 \leq T_4$ e $T_6 \geq T_2$

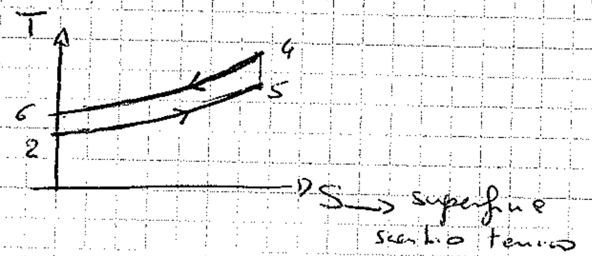
$\dot{Q}_1$ avviene tra 5 e 3

$\dot{Q}_2$ è da 6 a 1

$\dot{Q}_R$ avviene tra 4-6 e 5-2

$$\dot{Q}_R = \dot{m}\, c_p\, (T_5 - T_2) = \dot{m}\, c_p'\, (T_4 - T_6) = K\, S\, \underset{\simeq T_4 - T_5}{\Delta T_m}$$

S: superficie di scambio termico



A fronte di una potenza utile $P_u \simeq$ costante avremo $\dot{m}_b H_i \rightarrow \dot{Q}_1$ che diminuisce notevolmente cioè η aumenta.

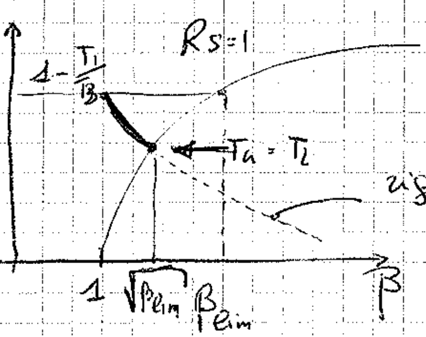
Supponiamo rigenerazione ideale con $R_S = 1$ (R_S è efficienza di rigenerazione)

$$R_S = \frac{T_5 - T_2}{T_4 - T_2} = 1 \Rightarrow T_5 = T_4 \quad e \quad T_6 = T_2$$

$$\eta_{id} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{\cancel{c_p}\,(T_6 - T_1)}{\cancel{c_p}\,(T_3 - T_5)} = 1 - \frac{T_2 - T_1}{T_3 - T_4}$$

$$= 1 - \frac{T_2 \cancel{\left(1 - \frac{1}{\beta^{\frac{k-1}{k}}}\right)}}{T_3 \cancel{\left(1 - \frac{1}{\beta^{\frac{k-1}{k}}}\right)}} = 1 - \frac{T_2}{T_3}$$

$$\eta_{id} = 1 - \frac{T_2}{T_3} = 1 - \frac{T_1}{T_3}\beta^{\frac{k-1}{k}}$$



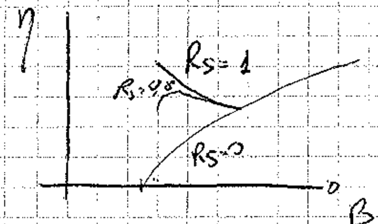
$T_3 = T_2 \quad \eta_{id} = 1 - \frac{T_2}{T_3}$

Facendo la rigenerazione il rendimento è dello stesso ordine di grandezza delle Turbogas.

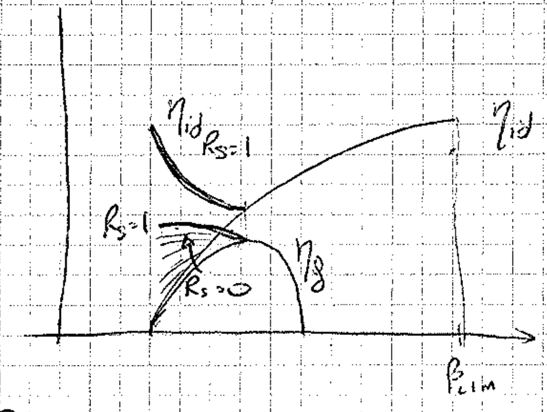
I valori tipici di R_S sono prossimi a $0,8 \div 0,85$

Esempio $\quad \eta_c = \eta_T = 0,85 \quad \eta_{el} = 0,8 \quad \eta_b = 0,98 \quad \beta_c = 4 \quad T_3 = 1400K$

$T_1 = 288K \quad R_S = 0,85 \Longrightarrow T_5 \qquad T_7 = 120°C$



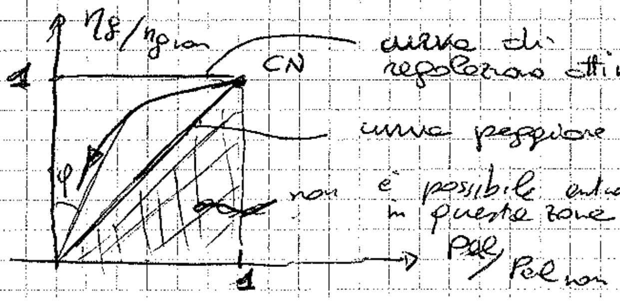
Nel caso reale accade



Regolazione degli impianti Turbogas

Da $P_{el\,nom} \to P_{el} < P_{el\,nom}$ - ci aspettiamo che $\dot m_b$ diminuisca.

~~Un punto~~ Tracciamo una curva di regolazione



$\to P_e = \eta_e \, \dot m_b \, H_i$

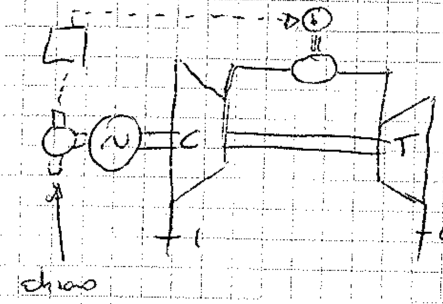
$$\frac{\dot m_b}{\dot m_{b_{nom}}} = \frac{P_e/P_{e_{nom}}}{\eta_g/\eta_{g_{nom}}} = \tan\varphi$$

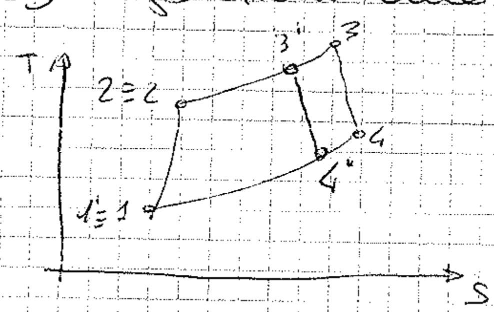
man mano che la portata di combustibile diminuisce più ~~aumenta~~ $\tan\varphi$ diminuisce

36

Metodi di regolazione

1) Regolazione della $\dot m_b$





$$\eta_B \dot m_b H_i = (\dot m_a + \dot m_b)\, c_p (T_3 - T_2)$$

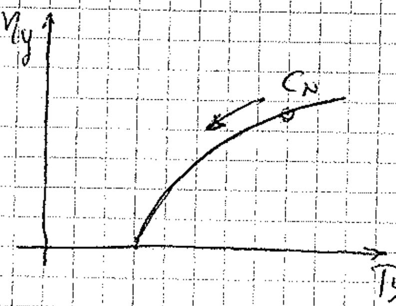
$$\eta_B H_i = (1+\alpha)\, c_p (T_3 - T_2) \qquad T_3 = T_2 + \frac{\eta_B H_i}{(1+\alpha)\, c_p}$$

con $\alpha = \frac{\dot m_a}{\dot m_b}$

$$P_e = \eta_{el}\, \dot m_a \,(L_{i_T} - L_{i_C})$$

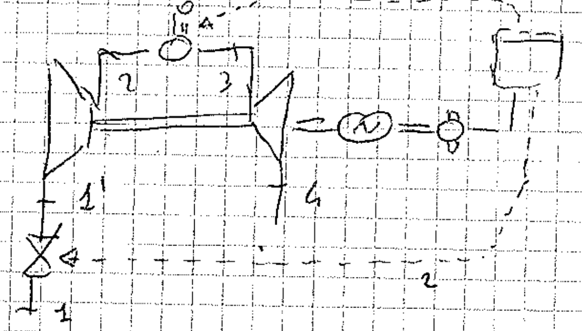
$$c_p' T_3' \left(1 - \frac{1}{\beta_t^{\left(\eta_{yt}\frac{k-1}{k}\right)}}\right) \downarrow$$

il rendimento sarà



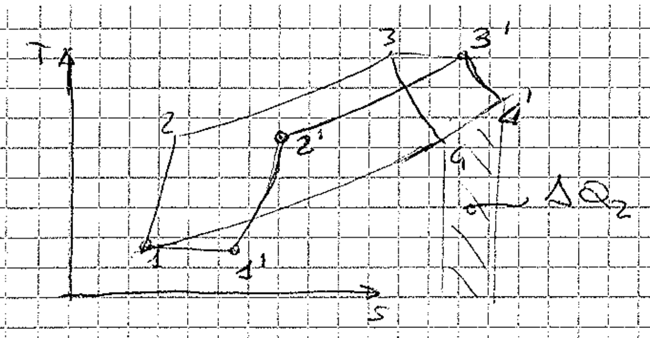
il rendimento diminuisce sempre più velocemente col diminuire della T_3

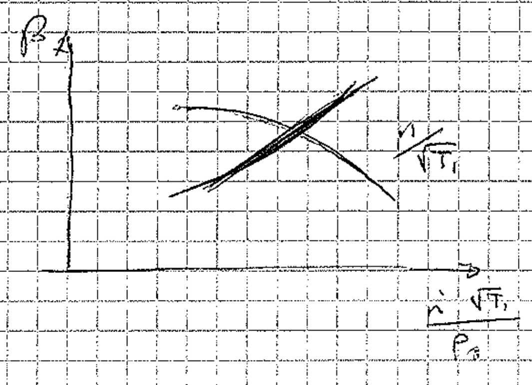
2) Variazione della $\dot m_b$ con laminazione all'aspirazione del compressore (β = cost)$_1$



1) Regola $\dot m_b$

2) Regola portata d'aria





$$\dot m_a + \dot m_b \simeq \dot m_a$$

$$\dot m_a \propto \frac{p_3}{\sqrt{T_3}}$$ se turbina è critica

turbina $$\frac{\dot m_a \sqrt{T_1}}{p_1} \propto \underbrace{\frac{p_3}{p_1}}_{\beta_t} \frac{\sqrt{T_1}}{\sqrt{T_3}} \propto \beta_t$$

Ne segue che il punto di funzionamento resta costante. Attenzione: se si riduce p_1 si riduce anche $\dot m_a$

$$\frac{\dot m_a \sqrt{T_1}}{p_1} = \text{cost} \Rightarrow \dot m_a \propto p_1$$

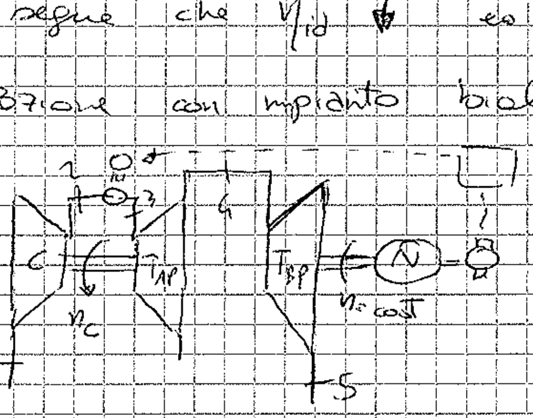
$$P_e = \eta_{el}\, \underbrace{\dot m}_{\propto p_1 \downarrow} \big(\underbrace{L_{it}}_{c_p' T_3 \left(1 - \frac{1}{\beta_t^{\eta_{yt}\frac{k-1}{k}}}\right)\downarrow} - \underbrace{L_{ic}}_{\text{cost}} \big) \downarrow$$

Per quanto riguarda il rendimento

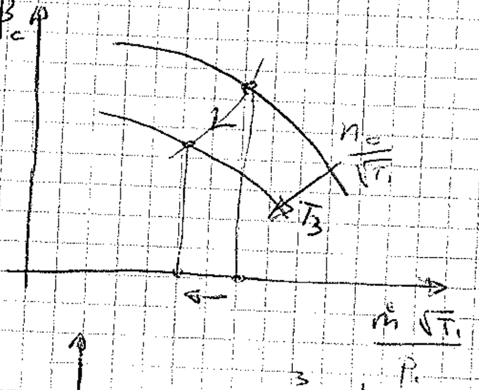
$$\eta_{id} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2 \uparrow\uparrow}{\underbrace{c_p (T_3 - T_2)}_{\text{cost}}} \qquad Q_2 = c_p(\underbrace{T_4}_{\text{aumentato}} - \underbrace{T_1}_{\text{cost}})$$

Ne segue che $\eta_{id} \downarrow$ e quindi cala anche η_g

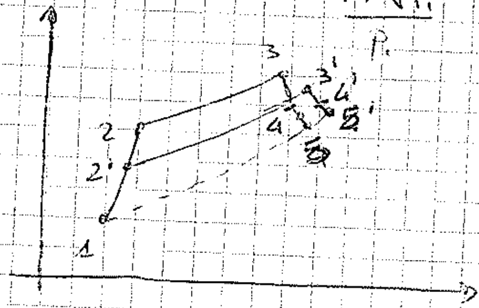
3) Regolazione con impianto bialbero



Liberiamo n_c dal fatto di dover essere costante.
Ad una diminuzione di T_3 diminuisce automaticamente n_c.



Se anche T_3 diminuisce per forza anche la portata perché il numero di giri diminuisce inoltre diminuisce anche β_c



il punto 4(4') viene trovato con il bilancio all'albero del compressore

$$\cancel{\dot m_a} L_{i_c} = \eta_{m_c} (\dot m_a + \dot m_b) L_{i_t}$$

$$c_p (T_1)\left(\beta_c^{\frac{k-1}{k}\frac{1}{\eta_{yc}}} - 1\right) = \eta_{mc} c_p' T_3 \left(1 - \frac{1}{\beta_{tAP}^{\eta_{yt}\frac{k-1}{k}}}\right)$$

$$\beta_{t_{BP}} = \frac{\beta_c}{\beta_{t_{AP}}}$$

Come varia in regolazione β_{tAP}?

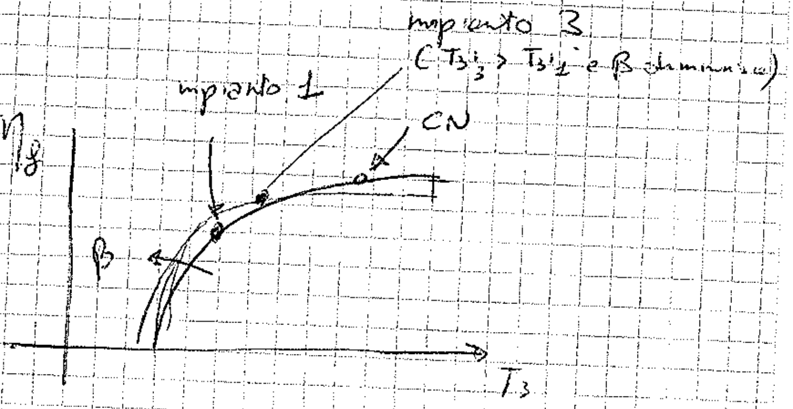
$$\left.\begin{aligned} \dot m_a + \dot m_b &\propto \frac{p_3}{\sqrt{T_3}} \\ &\propto \frac{p_4}{\sqrt{T_4}} \end{aligned}\right\} \qquad \frac{p_3}{p_4} = \underset{\text{cost.}}{A} \frac{\sqrt{T_3}}{\sqrt{T_4}}$$

$$\frac{p_3}{p_4} = \left(\frac{T_3}{T_4}\right)^{\underbrace{\frac{k}{k-1}\frac{1}{\eta_{yt}}}_{\text{cost.}}} \qquad \eta_{yt} \simeq \text{costante}$$

$\beta_{t_{AP}} = \frac{p_3}{p_4}$ è costante

Ne segue che $P_e \downarrow$

η_g



In conclusione