FORMULARIO

GAS IDEALI

EQUAZIONE DI STATO $PV = mR^*T$ $\quad R^* = \frac{R}{M_m} [J/kg\,°K]$ $\quad R = 8{,}314 \frac{J}{mol\,°K}$ $\quad Pv = R^*T$ $\quad v = \frac{V}{m} \; [m^3/kg]$

SISTEMI CHIUSI

PRIMO PRINCIPIO $\Delta U = Q^{\leftarrow} - L^{\rightarrow}$ IN SISTEMI ISOLATI E/O CICLICI $\Delta U = 0$ $\quad U = m \cdot u$

SECONDO PRINCIPIO $\Delta S = \underbrace{\sum_i \frac{Q_i}{T_i}}_{S_Q} + S_{irr} \; [J/°K]$ $\quad S_{irr} \geq 0$ IN SISTEMI ISOLATI $\Delta S \geq 0$ $\quad S = m \cdot s$

LAVORO $L^{\rightarrow} = \int_{V_1}^{V_2} P\,dv$ $\quad L < 0 \rightarrow$ COMPRESSIONE $\quad L > 0 \rightarrow$ ESPANSIONE $\quad$ CASI PARTICOLARI:

- ISOTERMA $L^{\rightarrow} = mR^* T \ln(V_2/V_1)$ $\quad$ T COSTANTE
- ISOCORA $L = 0$ $\quad$ V COSTANTE $\quad \Delta U = m\, c_v \Delta T$
- ISOBARA $L^{\rightarrow} = P \cdot \Delta V$ $\quad$ P COSTANTE $\quad$ n INDICE DELLA POLITROPICA
- ADIABATICA $L^{\rightarrow} = -\Delta U$ $\quad Q = 0$ $\quad n = \frac{c_x - c_p}{c_x - c_v}$

POLITROPICA $L^{\rightarrow} = \frac{P_1 V_1}{n-1}\left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{n-1}\right]$ $\quad c_x$ COSTANTE

$= \frac{P_1 V_1}{n-1}\left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right]$ $\quad$ CASO $n = 1$ $\quad L^{\rightarrow} = P_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = P_1 V_1 \ln \frac{P_1}{P_2}$

TRASFORMAZIONI

- ISOTERMA $P_1 V_1 = P_2 V_2$ $\quad c_x \rightarrow \pm\infty$ $\quad n = 1$ $\quad$ RELAZIONE DI MAYER: $c_p = c_v + R^*$
- ISOCORA $P_1/T_1 = P_2/T_2$ $\quad c_x = c_v$ $\quad n \rightarrow \pm\infty$
- ISOBARA $V_1/T_1 = V_2/T_2$ $\quad c_x = c_p$ $\quad n = 0$
- POLITROPICA (ADIABATICHE) $P_1 V_1^n = P_2 V_2^n$ $\quad T_1 V_1^{n-1} = T_2 V_2^{n-1}$ $\quad P_1 T_1^{\frac{n}{1-n}} = P_2 T_2^{\frac{n}{1-n}}$ $\quad c_x = 0$ $\quad n = k = \frac{c_p}{c_v}$

GAS IDEALI CON c_p E c_v COSTANTI ! IN GENERALE, c_p E c_v DIPENDONO DALLA TEMPERATURA

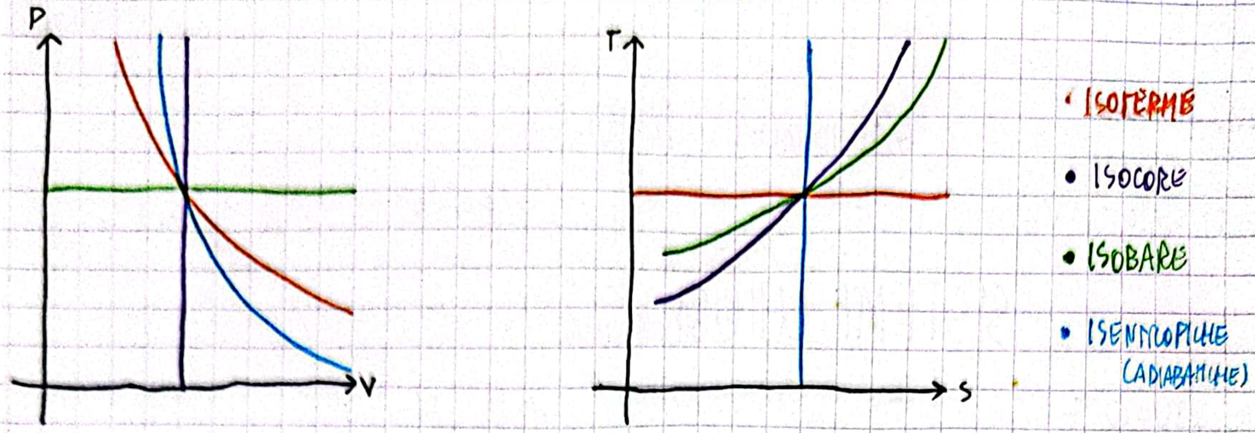
- MONOATOMICO $c_v = \frac{3}{2}R^*$ $\quad c_p = \frac{5}{2}R^*$
- BIATOMICO $c_v = \frac{5}{2}R^*$ $\quad c_p = \frac{7}{2}R^*$
- POLIATOMICO NON LINEARE $c_v = 3R^*$ $\quad c_p = 4R^*$

ENTALPIA $\Delta H = m c_p \Delta T$ $\quad \Delta h = c_p \Delta T$ $\quad Q = m \Delta h$

ENTROPIA $\Delta S = m(c_p \ln(T_2/T_1) - R^* \ln(P_2/P_1)) = m(c_v \ln(T_2/T_1) + R^* \ln(V_2/V_1))$ $\quad \Delta s = c_p \ln(T_2/T_1) - R^* \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) = c_v \ln(T_2/T_1) + R^* \ln(P_2/P_1)$

- ISOTERMA $\Delta S = mR^* \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = mR^* \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right)$ $\quad \Delta s = R^* \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = R^* \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right)$ $\quad \Delta S = 0$ NELL' ISENTROPICA (ADIABATICA REVERSIBILE)
- ISOCORA $\Delta S = m c_v \ln(T_2/T_1)$ $\quad \Delta s = c_v \ln(T_2/T_1)$
- ISOBARA $\Delta S = m c_p \ln(T_2/T_1)$ $\quad \Delta s = c_p \ln(T_2/T_1)$

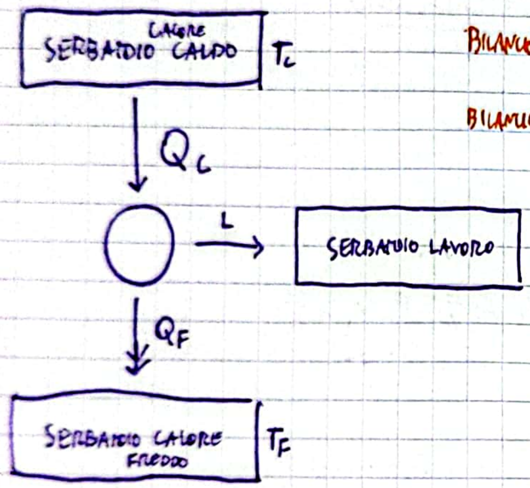
PIANI TERMODINAMICI



MACCHINE TERMICHE

Scambi con trasformazioni quasi-statiche (internamente reversibili)

MOTRICE



Bilancio energia / Bilancio entropia
$$\begin{cases} -Q_C+Q_F+L=0 \\ -\frac{Q_C}{T_C}+\frac{Q_F}{T_F}=S_{irr} \end{cases} \qquad \begin{cases} -q_C+q_F+l=0 \\ -\frac{q_C}{T_C}+\frac{q_F}{T_F}=s_{irr} \end{cases}$$

$$\begin{cases} Q_F=Q_C-L \\ L=Q_C\left(1-\frac{T_F}{T_C}\right)-T_F S_{irr} \end{cases}$$

(Lavoro massimo per processo reversibile: $S_{irr}=0$)

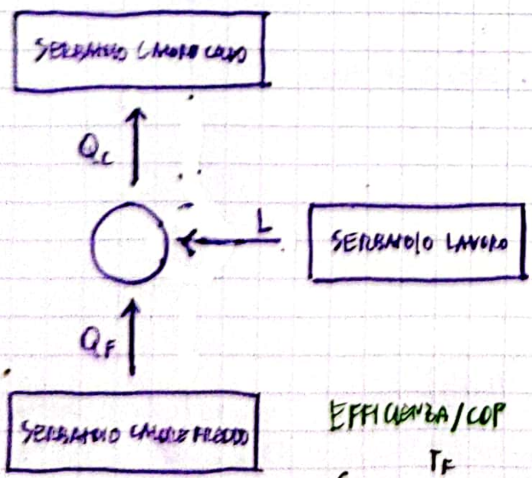
$$\eta=\frac{L}{Q_C}=1-\frac{T_F}{T_C}-\frac{T_F}{Q_C}S_{irr}$$ ideale (caso temperature costanti)

Esempio: freddo costante, caldo tra T_1 e T_2 variabile

$$\begin{cases} Q_C=m\,c_p(T_2-T_1)=m\Delta h \\ Q_F=m\,c_p T_F \ln(T_2/T_1)=m T_F\Delta s \\ L=m\,c_p\left((T_2-T_1)-T_F\ln(T_2/T_1)\right) \end{cases} \qquad \begin{cases} q_C=c_p(T_2-T_1) \\ q_F=c_p T_F\ln(T_2/T_1) \\ l=(T_2-T_1)-T_F\ln(T_2/T_1) \end{cases}$$

Anche per operatrice

OPERATRICE



Bilancio energia / Bilancio entropia
$$\begin{cases} Q_C-Q_F-L=0 \\ \frac{Q_C}{T_C}-\frac{Q_F}{T_F}=S_{irr} \end{cases}$$

$$\begin{cases} Q_F=Q_C-L \\ L=Q_C\left(1-\frac{T_F}{T_C}\right)+T_F S_{irr} \\ L=Q_F\left(1-\frac{T_F}{T_C}\right)+T_C S_{irr} \end{cases}$$

(Lavoro minimo per processo reversibile)

Efficienza/COP $\varepsilon_F=\frac{Q_F}{L}$ $\quad\varepsilon_{PDC}=\frac{Q_C}{L}$

$$\varepsilon_F=\frac{T_F}{T_C-T_F+\frac{T_C T_F S_{irr}}{Q_F}} \qquad \varepsilon_{PDC}=\frac{T_C}{T_C-T_F+\frac{T_C T_F S_{irr}}{Q_C}}$$

! $\varepsilon_{PDC}=\varepsilon_F+1$

Rendimento 2° principio $\eta_{II}=\frac{\eta_I}{\eta_{ideale}}$

η_I → rendimento effettivo macchina

η_{ideale} → rendimento caso ideale (processo reversibile)

$\eta_{II}>\eta_I$

SISTEMI APERTI

BILANCIO DI MASSA $\frac{dm}{dt} = \sum_i \dot{m}_i^{\leftarrow}$ [kg/s] (=0 STAZIONARIO) EQUAZIONE DI CONTINUITÀ $\dot{m} = \rho W \Omega = \frac{1}{v} W \Omega$ ($\rho \rightarrow$ [kg/m³], $W \rightarrow$ [m/s], $\Omega \rightarrow$ [m²])

BILANCIO DI ENERGIA $\frac{dE}{dt} = \sum_i \dot{m}_i \cdot (h + \underbrace{gz}_{\text{ENERGIA POT.}} + \underbrace{\frac{W^2}{2}}_{\text{ENERGIA CINETICA}})_i + \dot{Q}^{\leftarrow} - \dot{L}^{\rightarrow} = 0$ STAZIONARIO (SPESSO $\dot{m}_1 = \dot{m}_2$)

(SPESSO, $\dot{m}(h_1 - h_2 + g(z_1 - z_2) + \frac{W_1^2 - W_2^2}{2}) + \dot{Q}^{\leftarrow} - \dot{L}^{\rightarrow} = 0$

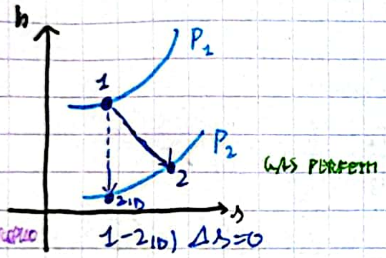
BILANCIO DI ENTROPIA $\frac{dS}{dt} = \sum_i \dot{m}_i^{\leftarrow} s_i + \dot{S}_Q + \dot{S}_{irr} = 0$ STAZIONARIO

(SPESSO, $\dot{m}(s_1 - s_2) + \dot{S}_Q + \dot{S}_{irr} = 0$)

DISPOSITIVI PARTICOLARI

- MACCHINA APERTA $\dot{m}(h_{in} - h_{out}) - \dot{L}^{\rightarrow} = 0$ $\quad \dot{m}(s_{in} - s_{out}) + \dot{S}_{irr} = 0$
- SCAMBIATORE DI CALORE $\dot{m}(h_{in} - h_{out}) + \dot{Q}^{\leftarrow} = 0$ $\quad \dot{m}(s_{in} - s_{out}) + \dot{S}_Q + \dot{S}_{irr} = 0$
- DIFFUSORE ($W_{out} < W_{in}$, $s_{out} > s_{in}$) / UGELLO ($W_{out} > W_{in}$, $s_{out} < s_{in}$) $h_{in} - h_{out} + \frac{W_{in}^2 - W_{out}^2}{2} = 0$ $\quad \dot{m}(s_{in} - s_{out}) + \dot{S}_{irr} = 0$
- VALVOLA DI LAMINAZIONE $h_{in} - h_{out} = 0$ $\quad \dot{m}(s_{in} - s_{out}) + \dot{S}_{irr} = 0$

TURBINA



GAS PERFETTI

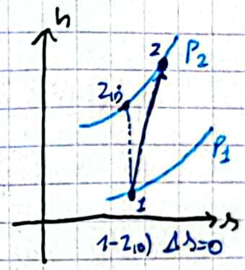
RENDIMENTO ISENTROPICO

$1-2_{ID}$) $\Delta s = 0$

$$\eta = \frac{L_{REALE}}{L_{IDEALE}} = \frac{\Delta H_{REALE}}{\Delta H_{IDEALE}} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2ID}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_{2ID}}$$

$$\Delta s = c_p \ln\left(\frac{T_{2ID}}{T_1}\right) - R^* \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) = 0$$

COMPRESSORE



$1-2_{ID}$) $\Delta s = 0$

$$\eta = \frac{L_{IDEALE}}{L_{REALE}} = \frac{h_1 - h_{2ID}}{h_1 - h_2} = \frac{T_1 - T_{2ID}}{T_1 - T_2}$$

$$\Delta s = c_p \ln\left(\frac{T_{2ID}}{T_1}\right) - R^* \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) = 0$$

SISTEMI BIFASE

TITOLO DI VAPORE $x = x_v = \frac{m_v}{m}$

TITOLO DI LIQUIDO $x_l = \frac{m_l}{m}$ $\rightarrow$ $x_v + x_l = 1$

$h = (1-x)h_l + x h_v = h_l + x h_{lv}$

(ANALOGO PER s, u, v)

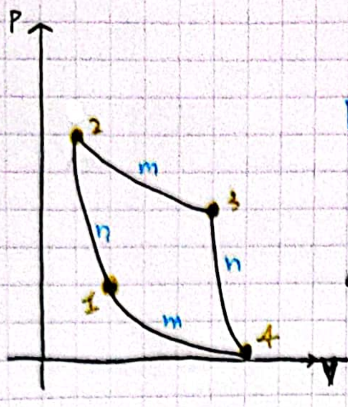
INTERPOLAZIONE LINEARE SU PARAMETRO X (PUÒ ESSERE QUALSIASI COSA) PER TROVARE Y (QUALSIASI COSA)

$\text{PESO} = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}$ (x_1: PRECEDENTE; x_2: SUCCESSIVO)

$y = (1 - \text{PESO}) \cdot y_1 + \text{PESO} \cdot y_2$

CICLI A GAS

CICLI SIMMETRICI



TRASFORMAZIONI m (4-1 E 2-3 DELLO STESSO TIPO)

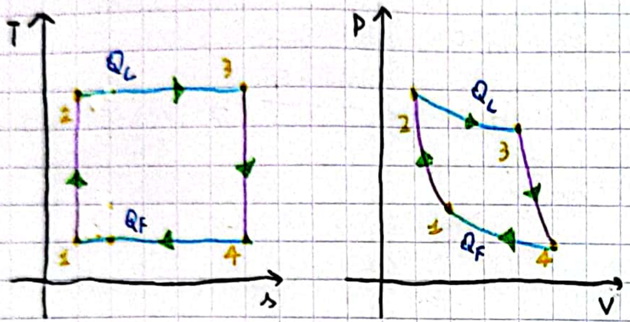
ED n (1-2 E 3-4 DELLO STESSO TIPO)

$v_1 v_3 = v_2 v_4 \quad (V_1 V_3 = V_2 V_4)$

$P_1 P_3 = P_2 P_4$

$T_1 T_3 = T_2 T_4$

CICLO DI CARNOT (SIMMETRICO)



2 ISENTROPICHE

2 ISOTERME ! $\Delta U_{tot} = 0$

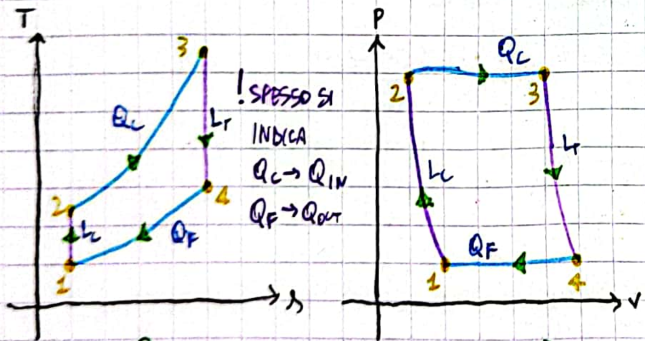
$$\eta = \frac{L}{Q_C} = \frac{Q_C - Q_F}{Q_C} = 1 - \frac{Q_{41}}{Q_{23}} = 1 - \frac{T_1}{T_3}$$

IRREVERSIBILITÀ ESTERNA ($T_1 > T_F$, $T_2 < T_C$) $\eta_{rev} = 1 - \frac{T_F}{T_C} > 1 - \frac{T_1}{T_3}$

DA $-\frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} = S_{irr}$ (CICLO DI CARNOT: $\frac{Q_C}{T_3} = \frac{Q_F}{T_1} = \Delta S$) $\rightarrow Q_C\left(\frac{1}{T_F}\cdot\frac{T_1}{T_3} - \frac{1}{T_C}\right) = S_{irr} > 0$.

IRREVERSIBILITÀ INTERNA ($s_1 < s_2$, $s_3 < s_4$) DA $-\frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} = S_{irr}$ ($\frac{Q_C}{T_C} = S_3 - S_2$, $\frac{Q_F}{T_F} = S_4 - S_1$) $\rightarrow S_2 - S_3 + S_4 - S_1 = S_{irr} > 0$

CICLO DI JOULE-BRAYTON (SIMMETRICO)



! SPESSO SI INDICA
$Q_C \rightarrow Q_{IN}$
$Q_F \rightarrow Q_{OUT}$

2 ISENTROPICHE 2 ISOBARE

1-2) COMPRESSORE

3-4) TURBINA

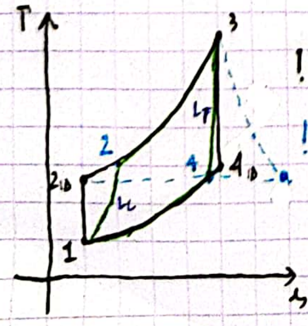
2-3 E 4-1) SCAMBIATORI DI CALORE (Q_C E Q_F RISPETTIVAMENTE)

$$\eta = \frac{L}{Q_C} = 1 - \frac{Q_F}{Q_C} = 1 - \frac{\dot{m} c_P (T_4 - T_1)}{\dot{m} c_P (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$! SE ISOBARE

IN GENERALE? $\Delta s_{12} = 0 = c_P \ln(T_2/T_1) - R^* \ln(P_2/P_1) = 0$

$$\rightarrow \eta = 1 - \frac{1}{r^{\frac{k-1}{k}}} \qquad k = \frac{R^*}{c_P} \qquad r = \frac{P_2}{P_1}$$

CICLO DI JOULE-BRAYTON CON RIGENERAZIONE (SIMMETRICO)



! $P_{2ID} = P_2$ E $P_{4ID} = P_4$

! $\eta_{reale} \neq 1 - \frac{T_1}{T_2}$

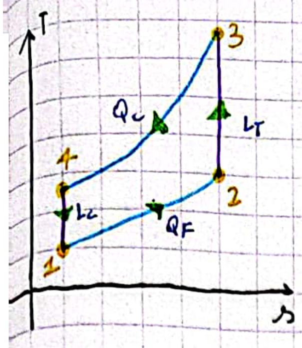
$$\eta_{ng} = \frac{L}{Q_C} = \frac{(T_3 - T_{4ID}) - (T_{2ID} - T_1)}{T_3 - T_{4ID}} = 1 - \frac{T_{2ID} - T_1}{T_3 - T_{4ID}}$$

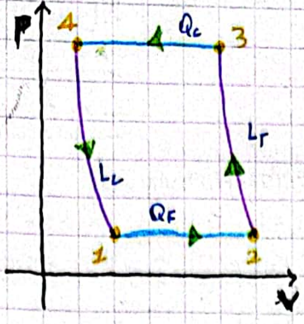
(L = $L_{turbina} - L_{compressore}$)

RENDIMENTO ISENTROPICO IN TURBINA $\eta_T = \frac{L_{REALE}}{L_{IDEALE}} = \frac{T_4 - T_3}{T_{4ID} - T_3}$

RENDIMENTO ISENTROPICO IN COMPRESSORE $\eta_C = \frac{T_2 - T_1}{T_{2ID} - T_1}$

Ciclo di Joule-Brayton inverso (frigorifero) (simmetrico)

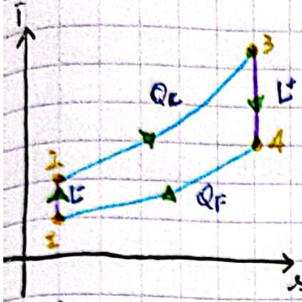


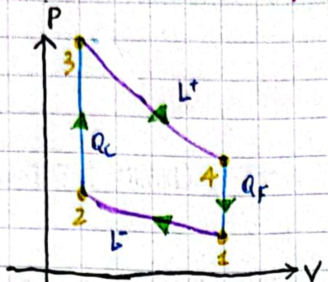


$$\varepsilon = \frac{Q_F}{Q_C - Q_F} = \frac{T_2 - T_1}{(T_3 - T_4) - (T_2 - T_1)}$$

Per cicli simmetrici $\varepsilon = \frac{T_2}{T_3 - T_2} = \frac{T_4}{T_4 - T_1} = \frac{1}{r^{\frac{k-1}{k}} - 1}$

Ciclo Otto (simmetrico)





2 isentropiche 2 isocore

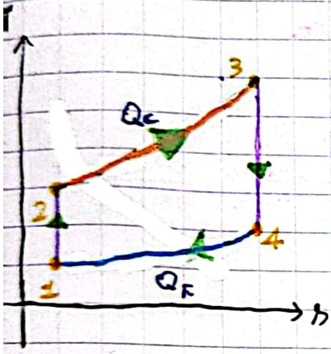
$$\eta = 1 - \frac{Q_F}{Q_C} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_1}{T_2}\left(\cancel{\frac{T_4/T_1 - 1}{T_3/T_2 - 1}}\right)$$ per cicli simmetrici

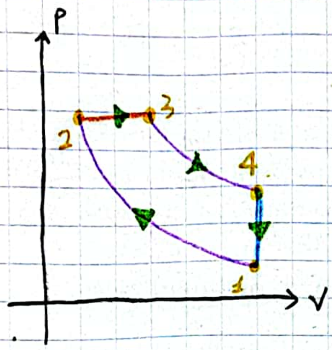
In generale $\eta = 1 - \frac{1}{r_v^{k-1}}$

$r_v = V_1/V_2$ rapporto di compressione volumetrica

$L = m c_v (T_3 - T_4) - m c_v (T_2 - T_1)$

Ciclo Diesel (non simmetrico)





2 isentropiche 1 isocora 1 isobara

$$\eta = \frac{L}{Q_C} = 1 - \frac{Q_F}{Q_C} = 1 - \frac{c_v (T_4 - T_1)}{c_p (T_3 - T_2)}$$

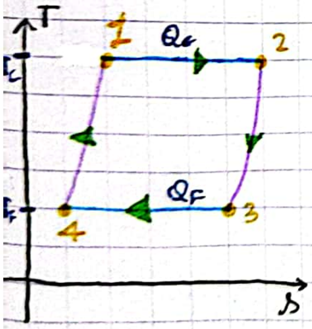
$$\eta = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \cdot \frac{1}{k} \frac{(z^k - 1)}{z - 1}$$

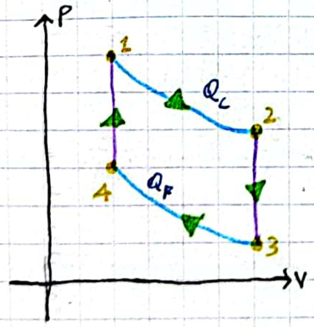
$k = c_p/c_v$

$r = V_1/V_2$ rapporto di compressione volumetrico

$z = V_3/V_2$ rapporto di combustione

Ciclo Stirling (simmetrico)



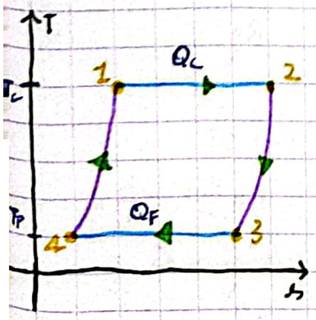


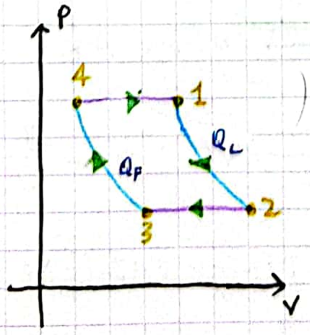
2 isoterme

2 isocore

$$\eta = \frac{L}{Q_C} = 1 - \frac{Q_F}{Q_C} = 1 - \frac{T_F}{T_C}$$

Ciclo Ericsson (simmetrico)





2 isoterme

2 isobare

$$\eta = \frac{L}{Q_C} = 1 - \frac{Q_F}{Q_C} = 1 - \frac{T_F}{T_C}$$

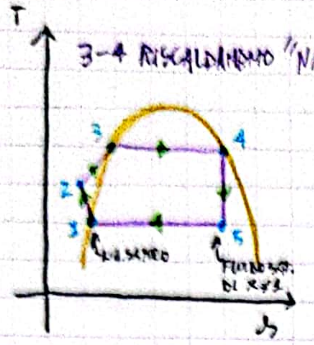
Scansionato con CamScanner

CICLI A VAPORE

! NON SONO GAS PERFETTI

$\Delta h \neq C_p \Delta T$

CICLO RANKINE SEMPLICE



1-2) POMPA → COMPRESSIONE LIQUIDO SATURO

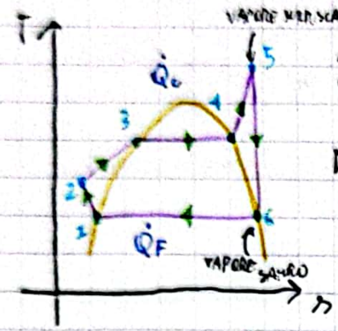
2-3) GENERATORE DI VAPORE → RISCALDAMENTO (NON ISOTERMO) × OTTENERE LIQUIDO SATURO A $T_3 > T_1$

3-4) RISCALDAMENTO ISOTERMOBARICO (P COSTANTE) × VAPORE SATURO

4-5) TURBINA

5-1) CONDENSATORE → × TORNARE A 1

CICLO RANKINE CON SURRISCALDAMENTO



4-5) RISCALDAMENTO × VAPORE SURRISCALDATO (INFATTI 2-5 TRASFORMAZIONE ISOBARA)

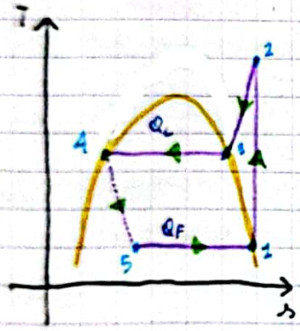
5-6) TURBINA → RITORNARE A VAPORE SATURO

TUTTO IL RESTO COME CASO SEMPLICE

$\dot{L}_{POMPA} = \dot{m}(h_2 - h_1)$ $\quad \dot{Q}_c = \dot{m}(h_5 - h_2)$ $\quad$ 1-2-5-6 PUNTI DI NOSTRO INTERESSE

$\dot{L}_{TURBINA} = \dot{m}(h_5 - h_6)$ $\quad \dot{Q}_F = \dot{m}(h_6 - h_1)$

CICLO FRIGORIFERO A VAPORE



1-2) COMPRESSORE → DA VAPORE SATURO A SURRISCALDATO ($s_2 = s_1$ E $P_{CONDENSATORE}$)

2-3) RENDIMENTO ISENTROPICO DI COMPRESSIONE $h_2 = h_1 + \frac{h_{2'} - h_1}{\eta_c}$ $\quad \eta_c = \frac{h_{2'} - h_1}{h_2 - h_1}$

3-4) SCAMBIATORE DI CALORE → DA VAPORE SATURO A LIQUIDO SATURO

4-5) VALVOLA DI LAMINAZIONE → $\Delta h = 0$

5-1) EVAPORATORE → DA $h_l(T_{DATO})$ A $h_v(T_{DATO})$ SATURO

$\dot{Q}_c = \dot{m}(h_3 - h_4)$ $\quad \dot{L}_{COMPRESSORE} = \dot{m}(h_3 - h_1)$

$\dot{Q}_F = \dot{m}(h_5 - h_1)$

TRASMISSIONE CALORE

FLUSSO TERMICO $\Phi = \dot{Q}/A$ $[W/m^2]$ RESISTENZA TERMICA $R_{COND} = \frac{s}{K \cdot A}$ $\quad R_{CONV} = \frac{1}{h A}$

CONDUZIONE

VETTORE FLUSSO DI CALORE $\vec{q}$ $[W/m^2]$ CONDUTTIVITÀ TERMICA $K [\frac{W}{m\,°K}]$ COEFFICIENTE CONVETTIVO $h [\frac{W}{m^2\,°K}]$ POTENZA PER UNITÀ DI VOLUME $\sigma [\frac{W}{m^3}]$ RESISTENZA TERMICA $R [°K/W]$

EQUAZIONE DI FOURIER $\frac{\rho c_v}{K} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 T + \frac{\sigma}{K} \xrightarrow[\text{STAZIONARIO}]{\text{EQ. POISSON}} \nabla^2 T + \frac{\sigma}{K} = 0$

- CASO PARTICOLARE (PARETE PIANA INFINITA) DOTATO DI SIMMETRIA $T = -\frac{\sigma}{2K} x^2 + AX + B$ $\quad q = \sigma x - AK$

- LASTRA PIANA MONOSTRATO $\begin{cases} T = T_1 & \text{IN } x = 0 \\ T = T_2 & \text{IN } s = 0 \end{cases} \rightarrow T = \frac{T_2 - T_1}{s} X + T_1$ $\quad q = -\frac{\Delta T}{R}$ $\quad \dot{Q} = -\frac{KA}{s} \Delta T$

- CASO PARTICOLARE (CILINDRO DI ALTEZZA INFINITA) DOTATO DI SIMMETRIA $T = -\frac{\sigma}{4K} r^2 + A \ln(\frac{r}{B}) = -\frac{\sigma}{4K} r^2 + A \ln(r) + B$ $\quad q = \frac{\sigma}{2} r + \frac{K}{r} C$

- BARRA PIENA (CILINDRICA) CON GENERAZIONE DI POTENZA $T = -\frac{\sigma}{2K} r$ $\quad q_{RADIALE} = \frac{\sigma}{2} r$ $\quad q_{PER\ UNITÀ\ DI\ LUNGHEZZA} = \pi r^2 \sigma$ $\quad \dot{Q} = \pi r^2 L \sigma$

- BARRA PIENA (CILINDRICA) SENZA GENERAZIONE DI POTENZA $T = T_i + \frac{T_{ESTERNO} - T_{INTERNO}}{\ln\left(\frac{r_{ESTERNO}}{r_{INTERNO}}\right)} \cdot \ln\left(\frac{r}{r_{INTERNO}}\right)$ $\quad q_{RADIALE} = K \frac{T_i - T_e}{\ln\left(\frac{r_{ESTERNO}}{r_{INTERNO}}\right)} \cdot \frac{1}{r}$

$q_{\text{unità di lunghezza}} = \frac{2\pi k}{\ln\left(\frac{R_{ext}}{R_{int}}\right)} \cdot (T_{interno} - T_{esterno})$ $\dot{Q} = k \frac{T_i - T_e}{\ln\left(\frac{\text{raggio ext}}{\text{raggio int}}\right)} \cdot 2\pi L$ COSTANTE

- SFERA $T = -\frac{\alpha}{6k} r^2 + \frac{A}{r} + B$

CONVEZIONE

! SPESSO K INDICATO CON λ

LEGGE DI NEWTON $\dot{Q} = h \Delta T$ $h = \frac{N_u k}{D}$

GRUPPI ADIMENSIONALI NUMERO DI Nusselt $N_u = \frac{hD}{k}$ NUMERO DI Reynolds $Re = \frac{\rho D w}{\mu}$ NUMERO DI Prandtl $P_r = \frac{c_p \mu}{k}$

Re CRITICI

IN UN CONDOTTO (RISPETTO A D) CIRCOLARE $Re_D < 2000 \rightarrow$ MOTO LAMINARE $Re_D > 2500 \rightarrow$ MOTO TURBOLENTO

LUNGO UNA LASTRA PIANA (RISPETTO A x) $Re_x \begin{cases} < 5 \cdot 10^5 \rightarrow \text{LAMINARE} \\ > 5 \cdot 10^5 \rightarrow \text{TURBOLENTO} \end{cases}$

ATTORNO AD UN CILINDRO (RISPETTO A D) $Re_D \begin{cases} < 2 \cdot 10^5 \rightarrow \text{LAMINARE} \\ > 2 \cdot 10^5 \rightarrow \text{TURBOLENTO} \end{cases}$

N_u EMPIRICI

CONDOTTO
- LAMINARE CON T_P COSTANTE $Nu_D = 3{,}66$
- LAMINARE CON J COSTANTE $Nu_D = 4{,}36$
- TURBOLENTO $Nu_D = 0{,}023 Re^{0{,}8} P_r^n$ (RELAZIONE DI Dittus-Boelter) $n = \begin{cases} 1/3 \text{ SE IL FLUIDO STA RAFFREDDANDO} \\ 0{,}4 \text{ SE IL FLUIDO STA RISCALDANDO} \end{cases}$

CILINDRO RELAZIONE DI Hilpert $Nu_D = C \cdot Re^m \cdot P_r^{1/3}$

Re	C	m
0,4-4	0,989	0,330
4-40	0,911	0,385
40-4000	0,683	0,466
4000-40000	0,193	0,618
40000-400000	0,027	0,805