Cicli termodinamici a gas

Ciclo di Carnot

Ciclo Joule-Brayton

Ciclo Otto

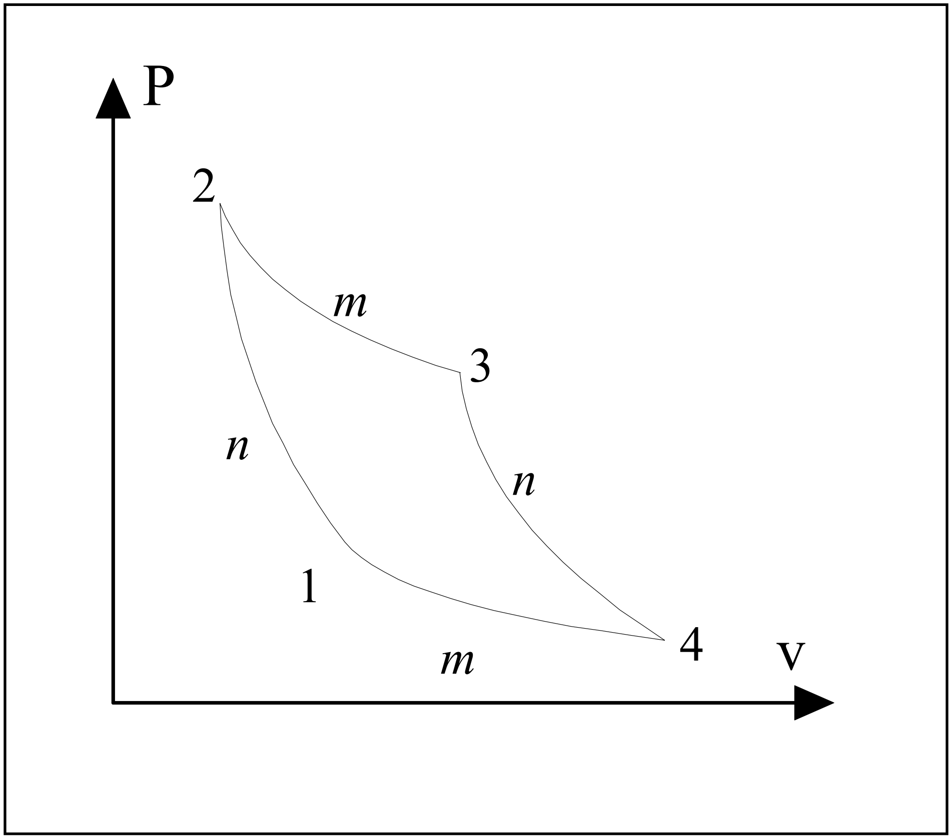
Ciclo Diesel

Ciclo Stirling

Ciclo Ericson

Cicli termodinamici a gas

Proprietà dei cicli simmetrici



$$v_1 v_3 = v_2 v_4$$

$$P_1 P_3 = P_2 P_4$$

$$T_1 T_3 = T_2 T_4$$

$$P_1 v_1^n = P_2 v_2^n$$

$$P_2 v_2^m = P_3 v_3^m$$

$$P_3 v_3^n = P_4 v_4^n$$

$$P_4 v_4^m = P_1 v_1^m$$

Moltiplicando membro a membro le equazioni di pari indice:

$$P_1 P_3 \left(v_1 v_3\right)^n = P_2 P_4 \left(v_2 v_4\right)^n$$

$$P_3 P_1 \left(v_3 v_1\right)^m = P_2 P_4 \left(v_2 v_4\right)^m$$

Dividendo membro a membro:

$$v_1 v_3 = v_2 v_4$$

che inserita nella prima equazione

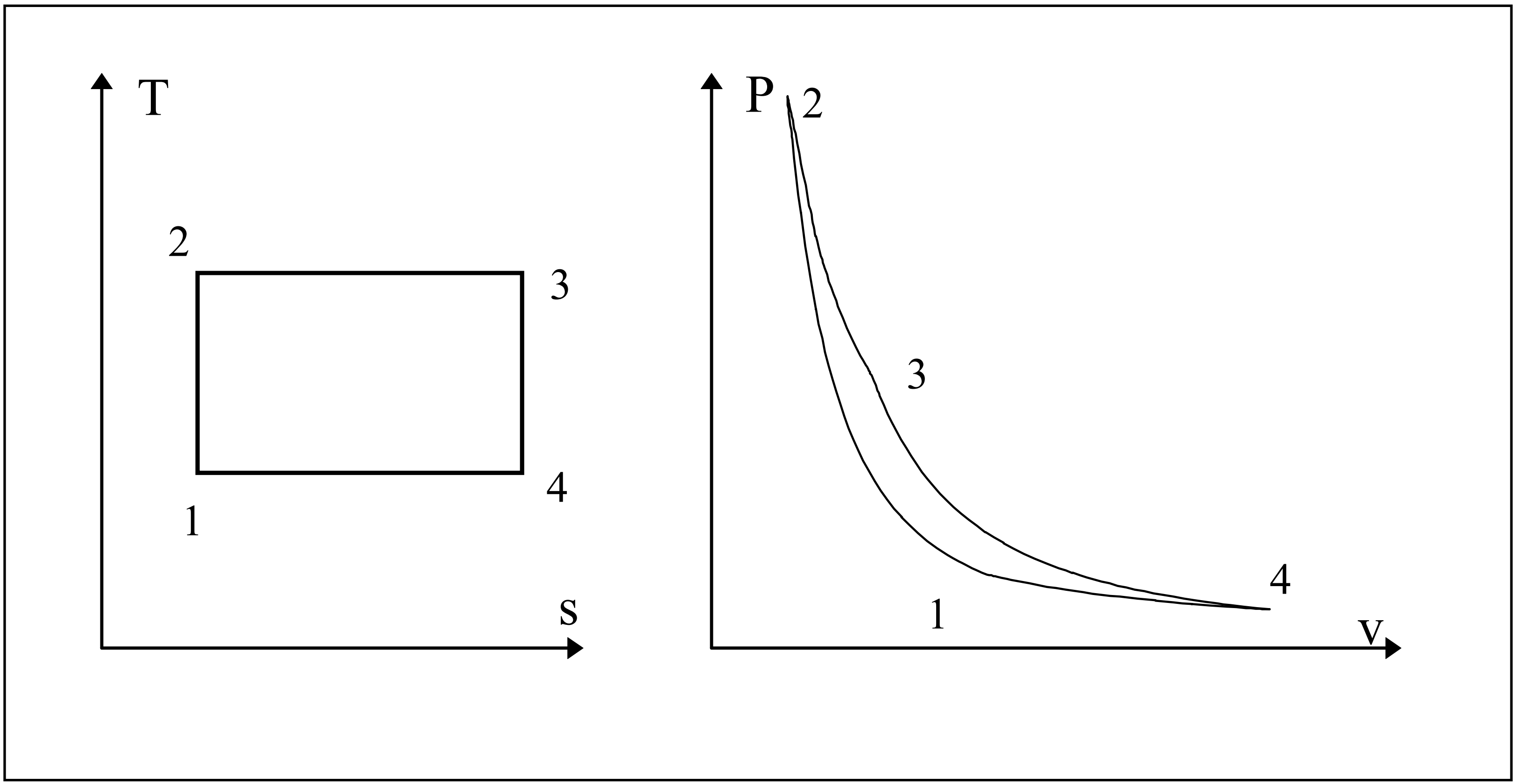
e con l'eq di stato dei gas perfetti

$$P_1 P_3 = P_2 P_4$$

$$T_1 T_3 = T_2 T_4$$

Ciclo di Carnot

ciclo simmetrico costituito da due isoentropiche e due isoterme



Ciclo di Carnot

rendimento del ciclo $\eta = \dfrac{L}{Q_C} = 1 - \dfrac{Q_F}{Q_C} = 1 - \dfrac{T_1}{T_3}$

essendo isoterme le trasformazioni lungo le quali si scambia calore)

Possibili fonti di irreversibilità per una macchina termodinamica

irreversibilità esterna ($T_1>T_f$ e $T_2<T_c$)

irreversibilità interna ($s_1<s_2$ e $s_3<s_4$)

irreversibilità esterna ($T_1 > T_f$ e $T_2 < T_c$)

$$\eta_{rev} = 1 - \frac{T_F}{T_C} > \eta_{ciclo} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

Bilancio entropico su tutta la macchina termica $-\dfrac{Q_C}{T_C} + \dfrac{Q_F}{T_F} = S_{ir}$

'er il ciclo di carnot vale: $\dfrac{Q_C}{T_2} = \dfrac{Q_C}{T_2} = \Delta S$

he risolta rispetto a Q_F

$$Q_C\left(\frac{1}{T_F}\frac{T_1}{T_2} - \frac{1}{T_C}\right) = S_{irr}$$

$$Q_C\left(\frac{T_C T_1 - T_F T_2}{T_2 T_C T_F}\right) = S_{irr} > 0$$

irreversibilità interna ($s_1<s_2$ e $s_3<s_4$)

Bilancio entropico su tutta la macchina termica $-\dfrac{Q_C}{T_C}+\dfrac{Q_F}{T_F}=S_{irr}$

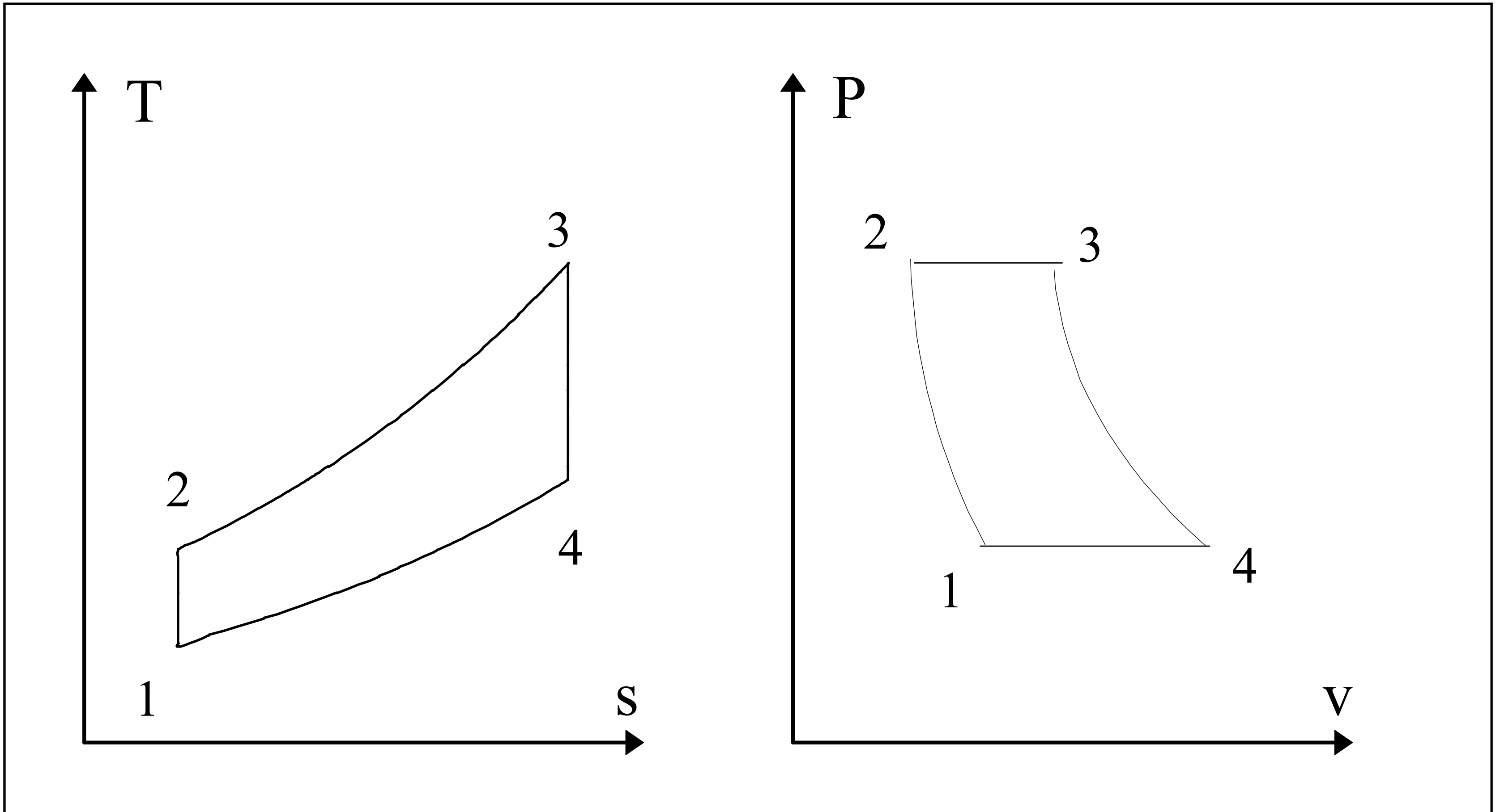
$$\frac{Q_C}{T_C}=S_3-S_2$$

$$\frac{Q_F}{T_F}=S_4-S_1$$

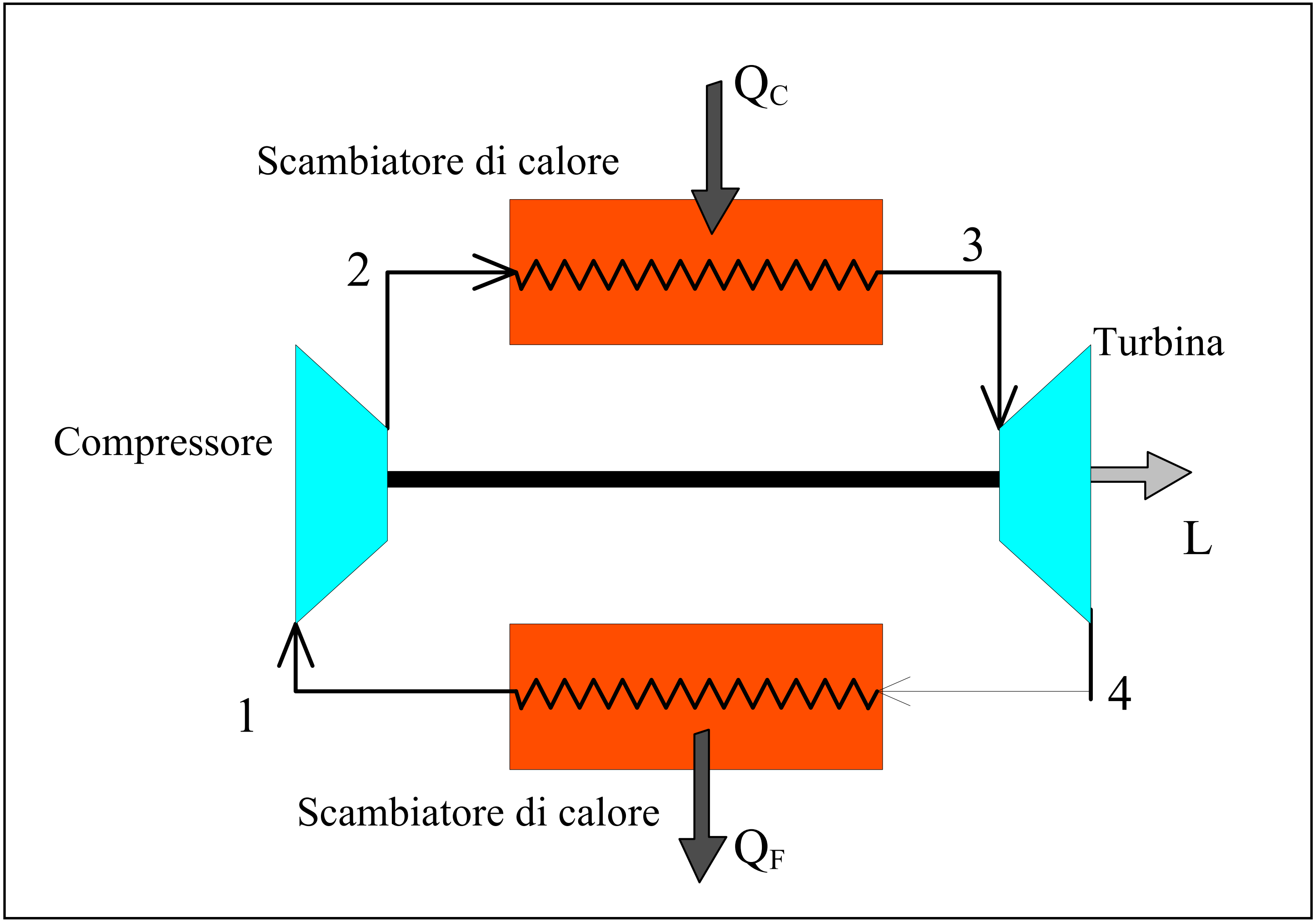
$$S_2-S_3+S_4-S_1=S_{irr}>0$$

Ciclo di Joule-Brayton

ciclo simmetrico costituito da due isoentropiche e due isobare



Ciclo di Joule-Brayton



Ciclo di Joule-Brayton

rendimento del ciclo $$\eta = \frac{\dot{L}}{\dot{Q}_C} = 1 - \frac{\dot{Q}_F}{\dot{Q}_C} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

(con il bilancio di energia per gas perfetti sugli scambiatori)

$$\eta = 1 - \frac{1}{r_P^{\frac{k-1}{k}}}$$

(inserendo il bilancio di entropia fra 1 e 2 per i gas perfetti)

r_P è il rapporto di compressione (P_2/P_1)

Il rendimento del ciclo Joule Brayton è funzione del solo rapporto di compressione e presenta un minimo quando la pressione P_2 tende alla pressione P_1

$$\mathbf{r_{Pmin}=1}$$

E un valore massimo quando T_2 tende a T_3

$$r_{P\max}=\left(\frac{T_3}{T_1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$$

Anche il lavoro netto prodotto del ciclo Joule Brayton ideale è funzione del solo rapporto di compressione

$$l = l_T - l_C = c_p(T_3 - T_4) - c_p(T_2 - T_1) =$$

$$= c_p T_3 (1 - \frac{T_4}{T_3}) - c_p T_1 (\frac{T_2}{T_1} - 1) =$$

$$= c_p T_3 (1 - \frac{1}{r_P^{\frac{k-1}{k}}}) - c_p T_1 (r_P^{\frac{k-1}{k}} - 1)$$

Si ha il massimo lavoro in corrispondenza del rapporto di compressione

$$r_{Popt} = \left(\frac{T_3}{T_1} \right)^{\frac{k}{2(k-1)}} = \sqrt{r_{P\max}}$$

Ricordando poi che in una turbina isentropica

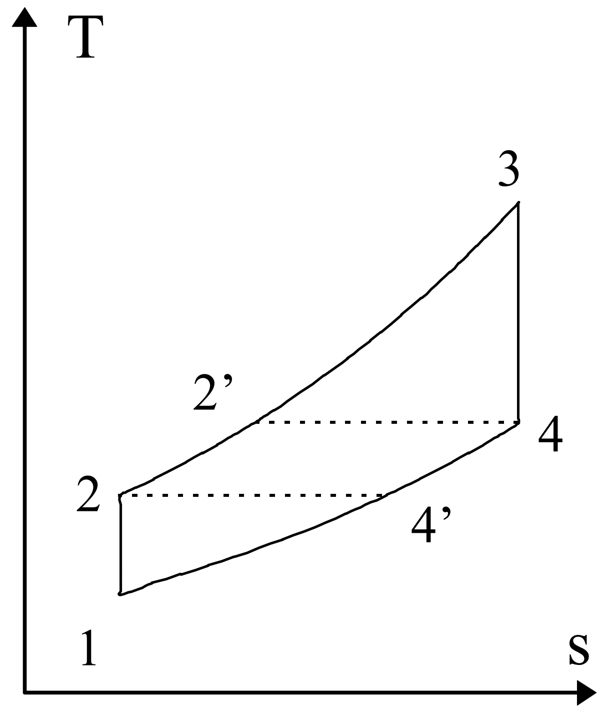
$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{\frac{R}{c_P}} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

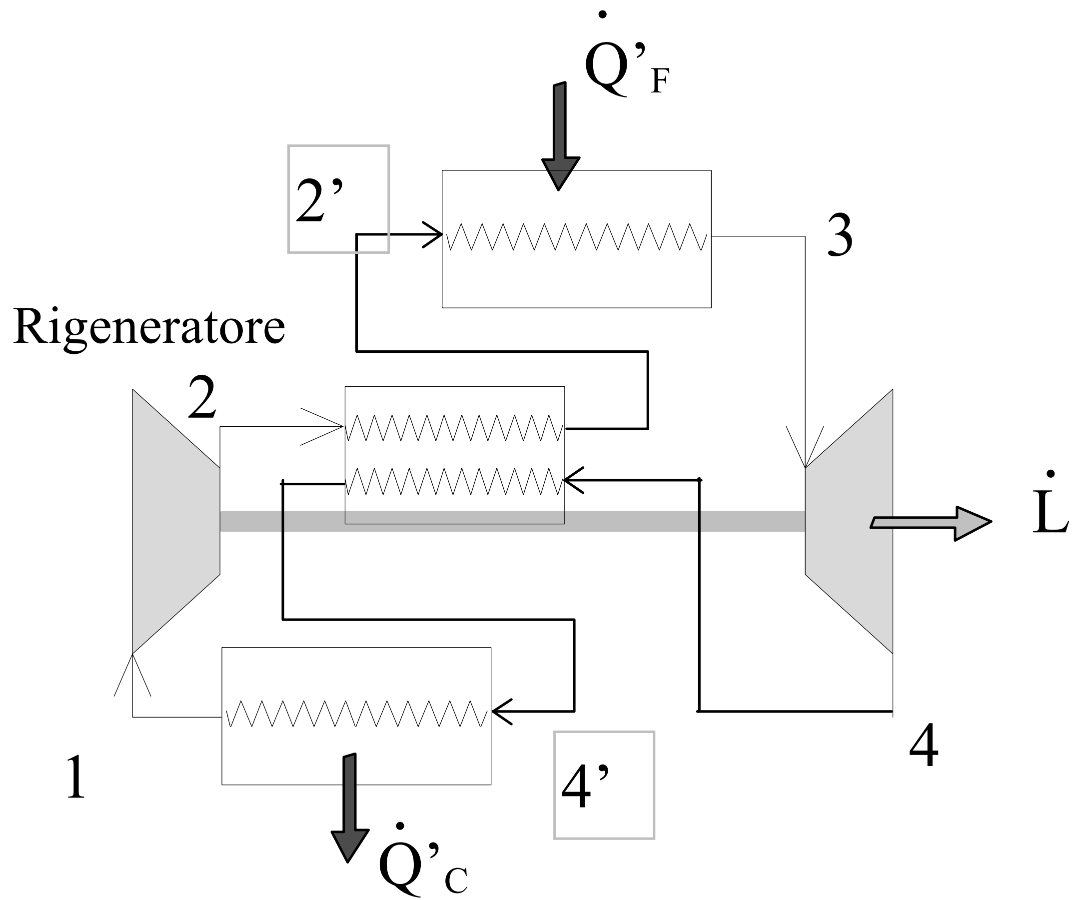
E inserendo in questa espressione al posto di P_3/P_4 (pari a P_2/P_1) il valore di r_{Popt} e sfruttando le proprietà dei cicli simmetrici si ottiene

$$T_4 = T_2 = \sqrt{T_1 T_3}$$

Cioè il lavoro specifico è massimo nel ciclo in cui la temperatura di fine espansione coincide con quella di fine compressione

Ciclo di Joule-Brayton con rigenerazione





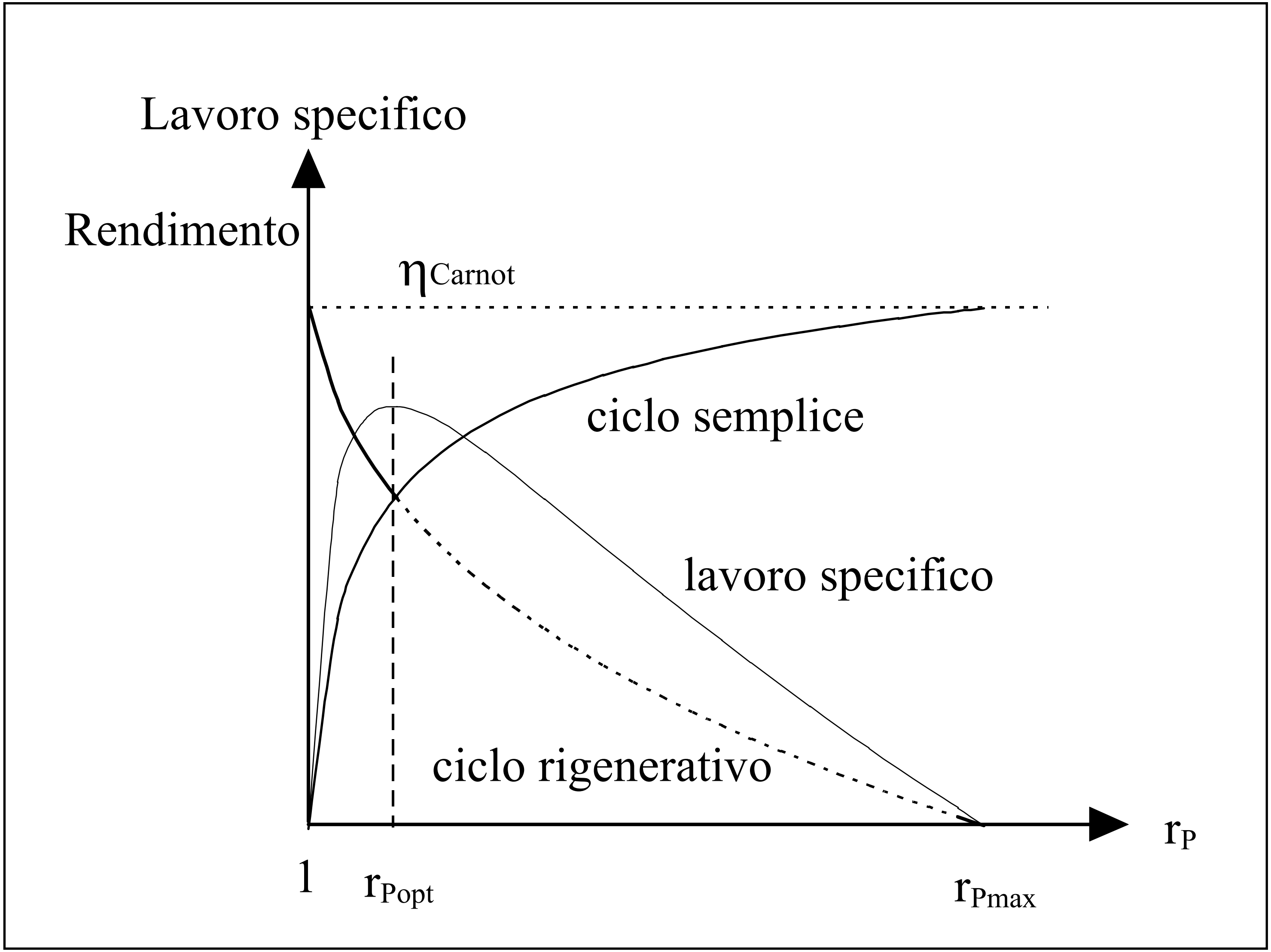
Ciclo di Joule-Brayton con rigenerazione ideale

rendimento del ciclo (ricordando che $T_{2'}=T_4$)

$$\eta = \frac{\dot{L}}{\dot{Q}} = \frac{(T_3 - T_4) - (T_2 - T_1)}{(T_3 - T_4)} = 1 - \frac{T_2 - T_1}{T_3 - T_4}$$

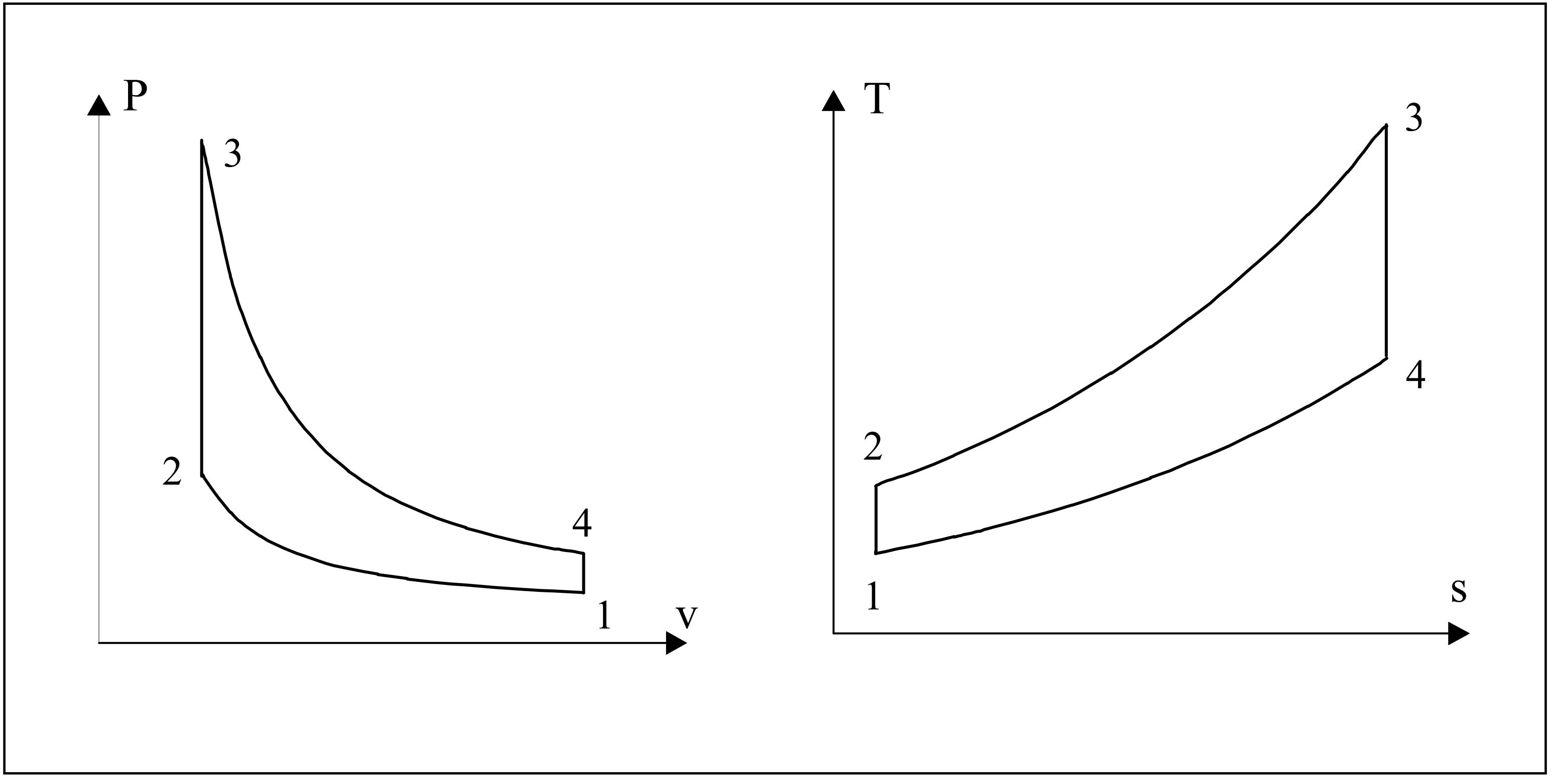
$$\eta_{rig} = 1 - \frac{T_1}{T_3} r_P^{\frac{k-1}{k}}$$

Ciclo di Joule-Brayton



Ciclo Otto

ciclo simmetrico costituito da due isoentropiche e due isocore



Ciclo Otto

rendimento del ciclo
$$\eta = \frac{L}{Q_C} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

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

$$r_v = \frac{V_1}{V_2} \qquad r_{vopt} = \left(\frac{T_3}{T_1}\right)^{\frac{1}{2(k-1)}}$$

r_v è il rapporto di compressione volumetrico

Ciclo Otto

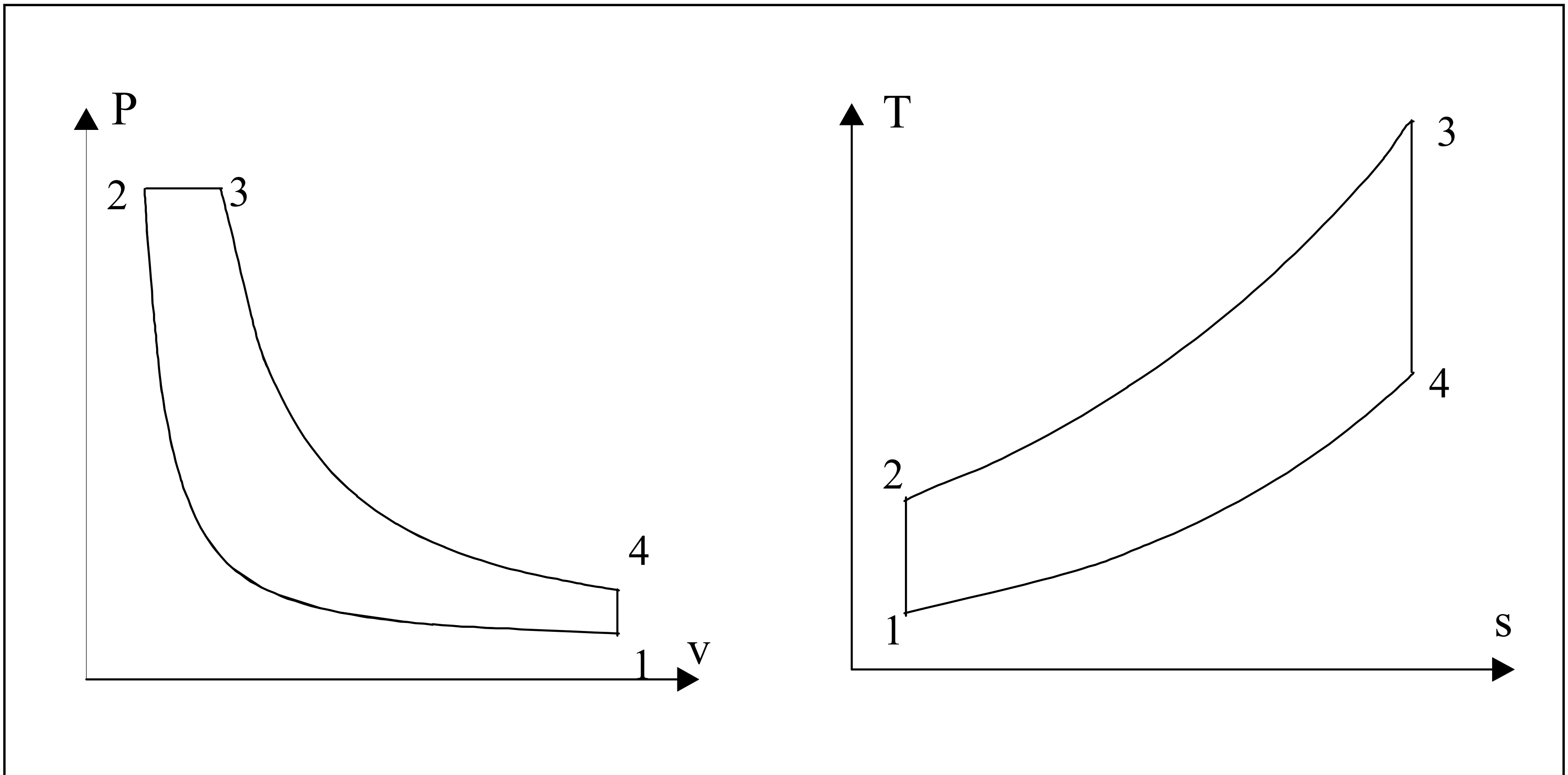
Lavoro specifico prodotto

$$L = c_v T_3 \left(1 - \frac{T_4}{T_3} \right) - c_v T_1 \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right)$$

$$L = c_v T_3 \left(1 - \frac{1}{r_v^{\,k-1}} \right) - c_v T_1 \left(r_v^{\,k-1} - 1 \right)$$

Ciclo Diesel

ciclo costituito da due isoentropiche una isocora ed una isobara



Ciclo Diesel

rendimento del ciclo

$$\eta = \frac{L}{Q_C} = 1 - \frac{c_v\left(T_4 - T_1\right)}{c_P\left(T_3 - T_2\right)}$$

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

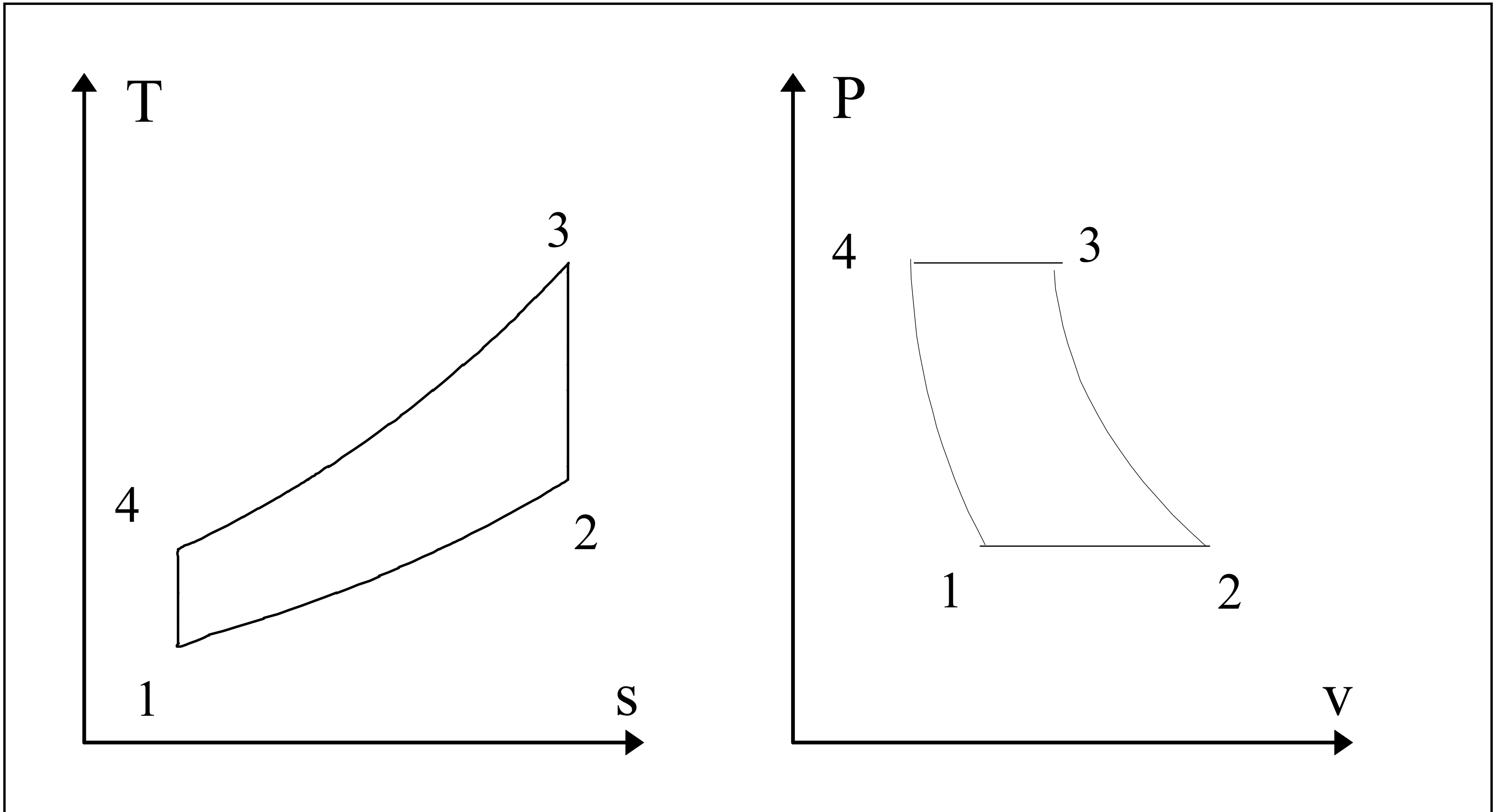
$$r = \frac{V_1}{V_2} \qquad z = \frac{V_3}{V_2}$$

r è il rapporto di compressione volumetrico

z è il rapporto di combustione

Ciclo di Joule-Brayton inverso

ciclo frigorifero simmetrico costituito da due isoentropiche e due isobare



$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_F}{\dot{Q}_C - \dot{Q}_F} \qquad \varepsilon = \left(\frac{T_2 - T_1}{(T_3 - T_4) - (T_2 - T_1)} \right)$$

$$\varepsilon = \frac{T_2}{T_3 - T_2} = \frac{T_1}{T_4 - T_1} = \left(\frac{1}{r^{\frac{k-1}{k}} - 1} \right)$$

(solo per cicli simmetrici)

Ciclo Stirling

ciclo costituito da due isoterme e due isocore

Ciclo Ericson

ciclo costituito da due isoterme e due isobare