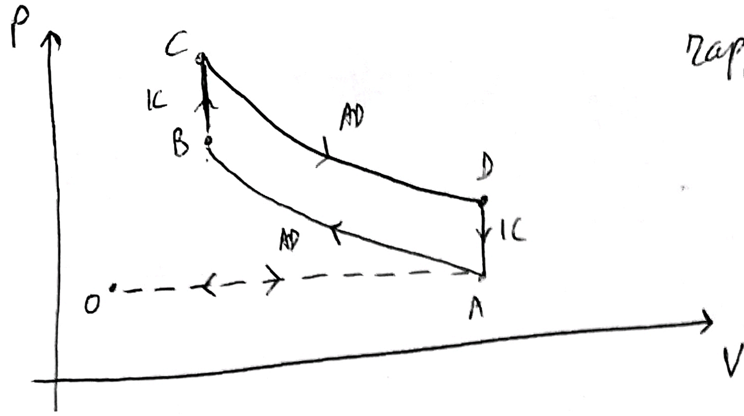
Ciclo (di) Otto

Esempio di motore a benzina, 6 tempi/fasi

rapporto di compressione: $r \equiv \frac{V_A}{V_B} = \frac{V_D}{V_C} > 1$



Fasi:

- $O \to A$: espansione, miscela di aria e benzina entra nel cilindro grazie ad aspirazione del pistone. Pressione esterna > pressione miscela (per vincere attriti)
- $A \to B$: compressione (adiabatica) fino a T, P molto alte, tramite compressione del pistone
- $B \to C$: scoppio, tramite scintilla elettrica che provoca rapidissima combustione della miscela già calda, pistone fermo, trasformazione è isocora
- $C \to D$: fase di potenza, prodotti di combustione molto caldi espandono adiabaticamente e spingono pistone verso l'esterno, generando potenza e diminuendo P e T
- $D \to A$: espulsione dalla valvola di scarico fino a quando $P \to P_{atm}$, pistone fermo
- $A \to O$: fase di espulsione, restanti prodotti di combustione spinti fuori dal cilindro

Ignoriamo trasformazioni $O \to A$ e $A \to O$

$$\eta = 1 - \frac{|Q_{out}|}{Q_{in}} = 1 - \frac{|Q_{DA}|}{Q_{BC}}$$ essendo $Q_{BC} > 0$, $Q_{DA} < 0$, $Q_{AB} = 0$, $Q_{CD} = 0$

$Q_{BC} = nc_v(T_C - T_B)$, $Q_{DA} = nc_v(T_A - T_D) \to |Q_{DA}| = nc_v(T_D - T_A)$

$$\Rightarrow \eta = 1 - \frac{\cancel{n}\cancel{c_v}(T_D - T_A)}{\cancel{n}\cancel{c_v}(T_C - T_B)} = 1 - \frac{T_D - T_A}{T_C - T_B} = 1 - \frac{T_A - T_D}{T_B - T_C} = 1 - \frac{T_A\left(1 - \frac{T_D}{T_A}\right)}{T_B\left(1 - \frac{T_C}{T_B}\right)}$$

$A \to B$ adiabatica, $C \to D$ adiabatica

$$\begin{cases} T_A V_A^{\gamma-1} = T_B V_B^{\gamma-1} \\ T_D V_D^{\gamma-1} = T_C V_C^{\gamma-1} \end{cases} \xrightarrow[V_B = V_C]{V_A = V_D} \frac{T_A}{T_D} = \frac{T_B}{T_C} \Rightarrow \frac{T_D}{T_A} = \frac{T_C}{T_B} \Rightarrow \eta = 1 - \frac{T_A}{T_B}$$

Essendo $A \to B$ adiabatica

$$T_A V_A^{\gamma-1} = T_B V_B^{\gamma-1} \Rightarrow \frac{T_A}{T_B} = \left(\frac{V_B}{V_A}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{1}{r}\right)^{\gamma-1} = r^{1-\gamma}$$

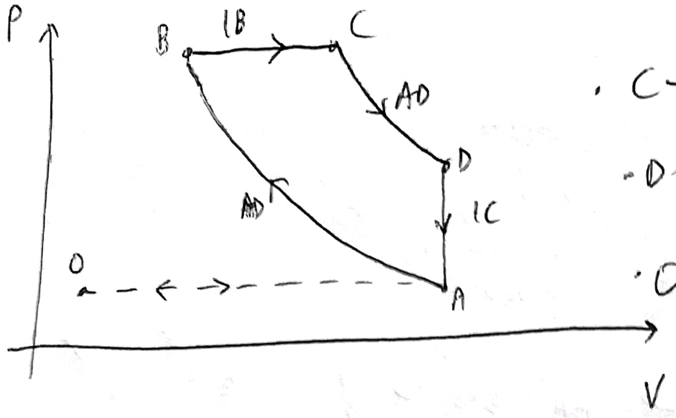
$$\Rightarrow \boxed{\eta = 1 - r^{1-\gamma}} \xrightarrow{1-\gamma<0} \begin{cases} \xrightarrow{r \to \infty} 1 \\ \xrightarrow{r \to 1} 0 \end{cases}$$

$\eta \leq 67\%$

in pratica $r < 10$ altrimenti ci sarebbe lo scoppio prima dello scoccare della scintilla

Ciclo Diesel

Nel cilindro entra solo aria



- ~~A~~ → ~~B~~ : aria compressa fino a temperature altissime
- B → C : olio immesso, combustione isobara a causa dell'alta temperatura dell'aria
- C → D : fase di potenza come motore a benzina
- D → E : fase di espulsione come motore a benzina
- O → A e A → O non servono necessariamente dato che si comprime solo aria

$$\eta = 1 - \frac{|Q_{OUT}|}{Q_{IN}} = 1 - \frac{|Q_{DA}|}{Q_{BC}}$$ essendo $Q_{BC} > 0$, $Q_{DA} < 0$, $Q_{AD} = Q_{CD} = 0$

~~Q_{DA} ... Q_{BC} =~~ $Q_{BC} = nc_p(T_C - T_B) > 0$, $Q_{DA} = nc_V(T_A - T_D) < 0 \Rightarrow |Q_{DA}| = nc_V(T_D - T_A)$

$$\Rightarrow \eta = 1 - \frac{\cancel{n}c_V(T_D - T_A)}{\cancel{n}c_p(T_C - T_B)} = 1 - \frac{c_V}{c_p}\frac{(T_D - T_A)}{(T_C - T_B)} = 1 - \frac{1}{\gamma}\boxed{\frac{T_D - T_A}{T_C - T_B}}$$

$$\boxed{\frac{T_D - T_A}{T_C - T_B}} = \frac{P_D V_D - P_A V_A}{P_C V_C - P_B V_B} = \frac{V_A(P_D - P_A)}{P_C(V_C - V_B)} =$$

$V_D = V_A$, $P_B = P_C$

$$= \frac{\frac{P_D}{P_C} - \frac{P_A}{P_C}}{\frac{V_C}{V_A} - \frac{V_B}{V_A}}$$

Ora definiamo rapporto di espansione $r_E \equiv \frac{V_A}{V_C}$

rapporto di compressione $r_C \equiv \frac{V_A}{V_B}$

$r_E, r_C \gg r_{otto}$ perché non c'è pericolo di preaccensione (comunque $\eta \lesssim 70\%$)

$$\Rightarrow \frac{T_D - T_A}{T_C - T_B} = \frac{P_D/P_C - P_A/P_C}{V_C/V_A - V_B/V_A} = \frac{P_D/P_C - P_A/P_C}{r_E^{-1} - r_C^{-1}}$$

C → D adiabatica $\quad P_D V_D^\gamma = P_C V_C^\gamma \Rightarrow P_D/P_C = (V_C/V_D)^\gamma = (V_C/V_A)^\gamma = r_E^{-\gamma}$

A → B adiabatica $\quad P_A V_A^\gamma = P_B V_B^\gamma \Rightarrow \frac{P_A}{P_B} \overset{P_B = P_C}{=} \frac{P_A}{P_C} = \left(\frac{V_B}{V_A}\right)^\gamma = r_C^{-\gamma}$

$$\Rightarrow \boxed{\eta = 1 - \frac{1}{\gamma}\frac{T_D - T_A}{T_C - T_B} = 1 - \frac{1}{\gamma}\frac{P_D/P_C - P_A/P_C}{r_E^{-1} - r_C^{-1}} = 1 - \frac{1}{\gamma}\frac{r_E^{-\gamma} - r_C^{-\gamma}}{r_E^{-1} - r_C^{-1}}}$$

Calcolo alternativo dell'efficienza del ciclo Diesel

Ripartiamo da $\eta = 1 - \frac{1}{\gamma}\frac{T_D - T_A}{T_C - T_B}$

$$\frac{T_D-T_A}{T_C-T_B} = \frac{T_A\left(\boxed{\frac{T_D}{T_A}}-1\right)}{T_B\left(\boxed{\frac{T_C}{T_B}}-1\right)} \qquad \boxed{\frac{T_D}{T_A}} = \frac{P_D}{P_A} \text{ essendo } D \to A \text{ isocora}$$

$C \to D$ adiabatica $P_D V_D^{\gamma} = P_C V_C^{\gamma} \to \frac{P_D}{P_C} = \left(\frac{V_C}{V_D}\right)^{\gamma} \overset{V_A=V_D}{=} \left(\frac{V_C}{V_A}\right)^{\gamma} = r_E^{-\gamma}$

$\frac{P_D}{P_A} = \frac{P_D}{P_C}\frac{P_C}{P_A} \overset{P_C=P_B}{=} \frac{P_D}{P_C}\frac{P_B}{P_A}$ ma $A \to B$ adiabatica $\Rightarrow P_A V_A^{\gamma} = P_B V_B^{\gamma} \Rightarrow \frac{P_B}{P_A} = \left(\frac{V_A}{V_B}\right)^{\gamma} = r_C^{\gamma}$

$$\Rightarrow \frac{T_D}{T_A} = \frac{P_D}{P_A} = \frac{P_D}{P_C}\frac{P_B}{P_A} = r_E^{-\gamma} r_C^{\gamma}$$

$\boxed{\frac{T_C}{T_B}} = \frac{V_C}{V_B}$ essendo $B \to C$ isobara $\frac{V_C}{V_B} = \frac{V_C}{V_A}\frac{V_A}{V_B} = r_E^{-1} r_C$

Quindi $\eta = 1 - \frac{1}{\gamma}\frac{T_A}{T_B}\left(\frac{T_D/T_A - 1}{T_C/T_B - 1}\right) = 1 - \frac{1}{\gamma}\frac{T_A}{T_B}\left(\frac{r_E^{-\gamma} r_C^{\gamma} - 1}{r_E^{-1} r_C - 1}\right)$

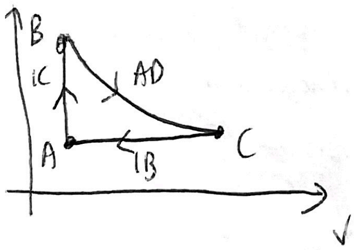
Essendo $A \to B$ adiabatica $T_A V_A^{\gamma-1} = T_B V_B^{\gamma-1} \Rightarrow T_A/T_B = \left(\frac{V_B}{V_A}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{1}{r_C}\right)^{\gamma-1} = r_C^{1-\gamma}$

$$\Rightarrow \eta = 1 - \frac{1}{\gamma}\frac{T_A}{T_B}\left(\frac{r_E^{-\gamma} r_C^{\gamma} - 1}{r_E^{-1} r_C - 1}\right) = 1 - \frac{1}{\gamma} r_C^{1-\gamma}\left(\frac{r_E^{-\gamma} r_C^{\gamma} - 1}{r_E^{-1} r_C - 1}\right) = 1 - \frac{1}{\gamma}\frac{r_C^{-\gamma}}{r_C^{-1}}\left(\frac{r_E^{-\gamma} r_C^{\gamma} - 1}{r_E^{-1} r_C - 1}\right) = \boxed{1 - \frac{1}{\gamma}\frac{r_E^{-\gamma} - r_C^{-\gamma}}{r_E^{-1} - r_C^{-1}}}$$

CVD!!

Ciclo di Lenoir

Alla base del pulsoreattore (combustione in maniera intermittente ~~fornendo~~ spinta a impulsi a differenza di statoreattore fornisce spinta a punto fisso)



$r \equiv \frac{V_C}{V_A}$

$$\eta = 1 - \frac{|Q_{out}|}{Q_{in}} = 1 - \frac{|Q_{CA}|}{Q_{AB}} = 1 - \frac{|nc_P(T_A - T_C)|}{nc_V(T_B - T_A)} =$$

$$= 1 - \frac{nc_P(T_C - T_A)}{nc_V(T_B - T_A)} = 1 - \gamma\left(\frac{T_C - T_A}{T_B - T_A}\right) = 1 - \gamma\frac{T_A}{T_A}\left(\frac{T_C/T_A - 1}{T_B/T_A - 1}\right) = 1 - \gamma\left(\frac{r-1}{T_B/T_A - 1}\right)$$

Ma $\frac{T_B}{T_A} = \frac{P_B}{P_A} \overset{P_A=P_C}{=} \frac{P_B}{P_C}$ Essendo $A \to C$ adiabatica, $P_B V_B^{\gamma} = P_C V_C^{\gamma} \to \frac{P_B}{P_C} = \left(\frac{V_C}{V_B}\right)^{\gamma} \overset{V_A=V_B}{=} \left(\frac{V_C}{V_A}\right)^{\gamma} = r^{\gamma}$

$$\Rightarrow \boxed{\eta = 1 - \gamma\left(\frac{r-1}{r^{\gamma}-1}\right)}$$

meno efficiente del ciclo Otto a parità di r $\left(\eta = 1 - r^{1-\gamma}\right)$!!!

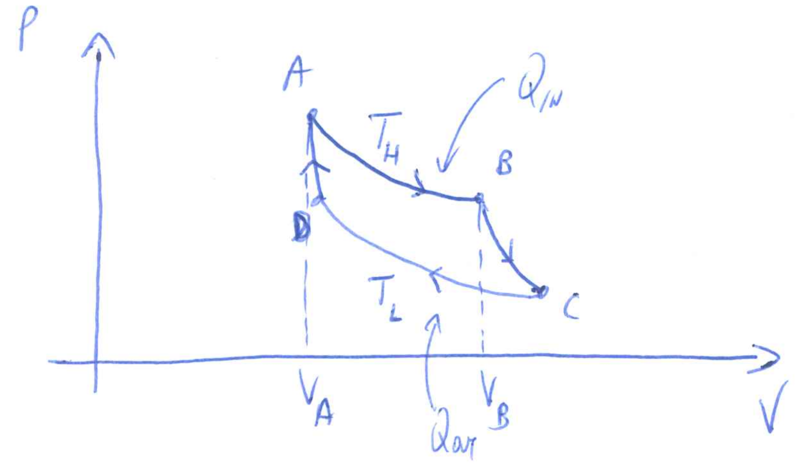
η fissato da:

- "forma" del ciclo
- tipo di gas ideale (mono- o poli-atomico)
- rapporti di compressione

} ma sempre ≤ 1 (in realtà $\ll 1$)

Ciclo di Carnot

$$IT \longrightarrow AD \longrightarrow IT \longrightarrow AD$$



Isoterma $A \to B$

$\Delta U_{AB} = 0$ $\qquad W_{AB} = nRT_H \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right) = nRT_H \ln\left(\frac{P_A}{P_B}\right) > 0$

$Q_{AB} = W_{AB} = nRT_H \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right) > 0 \longrightarrow Q_{IN}$ assorbito

Adiabatica $B \to C$

$Q_{BC} = 0$ $\qquad W_{BC} = -\Delta U_{BC} = nC_V(T_H - T_L) > 0$

Isoterma $C \to D$

$\Delta U_{CD} = 0$ $\qquad W_{CD} = nRT_L \ln\left(\frac{V_D}{V_C}\right) = nRT_L \ln\left(\frac{P_C}{P_D}\right) < 0$

$Q_{CD} = W_{CD} = nRT_L \ln\left(\frac{V_D}{V_C}\right) < 0 \longrightarrow Q_{OUT}$ ceduto

$$\eta = 1 - \frac{|Q_{OUT}|}{Q_{IN}} = 1 - \frac{nRT_L \ln\left(\frac{V_C}{V_D}\right)}{nRT_H \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right)} = 1 - \frac{T_L}{T_H}\frac{\ln(V_C/V_D)}{\ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right)} = \boxed{1 - \frac{T_L}{T_H}}$$

Siccome BC e DA adiabatici,

$$\begin{cases} T_H V_B^{\gamma-1} = T_L V_C^{\gamma-1} \\ T_H V_A^{\gamma-1} = T_L V_D^{\gamma-1} \end{cases} \longrightarrow \frac{V_B}{V_A} = \frac{V_C}{V_D}$$