

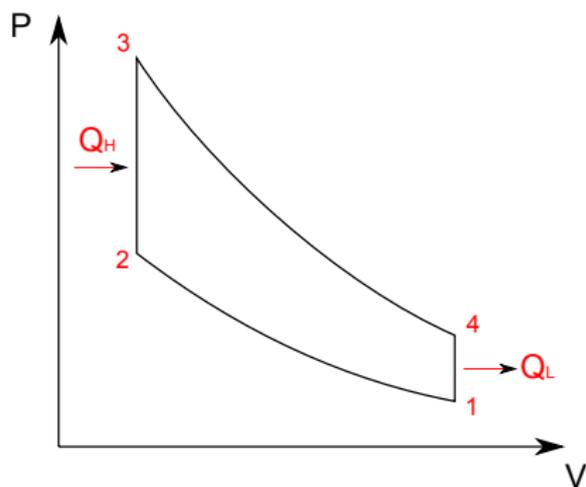
# Motores de combustión Interna

Pedro Curto-Risso, Santiago Martinez-Boggio, Lidio Braga

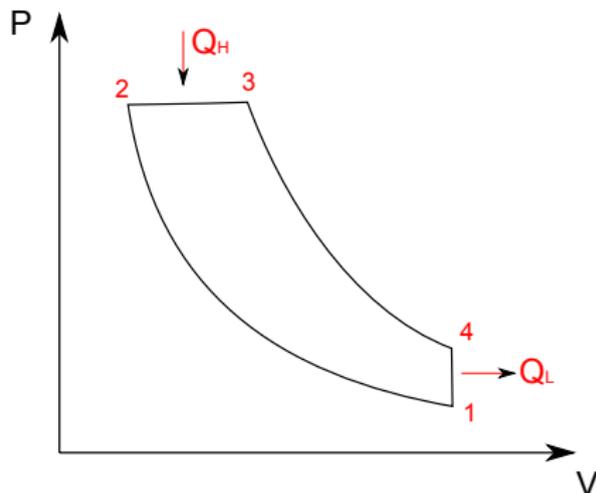
INSTITUTO DE INGENIERÍA MECÁNICA Y PRODUCCIÓN INDUSTRIAL  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

# Ciclos Termodinámicos para motores

## Ciclo Otto

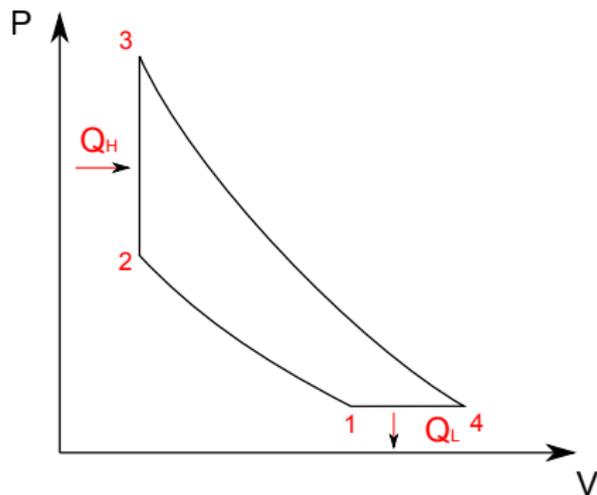


## Ciclo Diesel

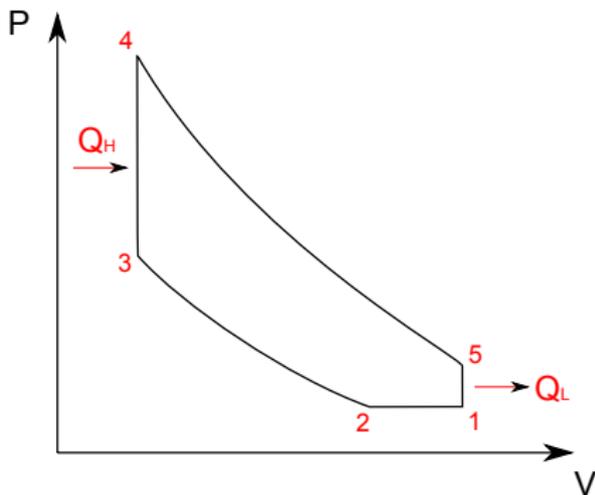


## Otros Termodinámicos para motores (cont.)

Ciclo Atkinson



Ciclo Miller



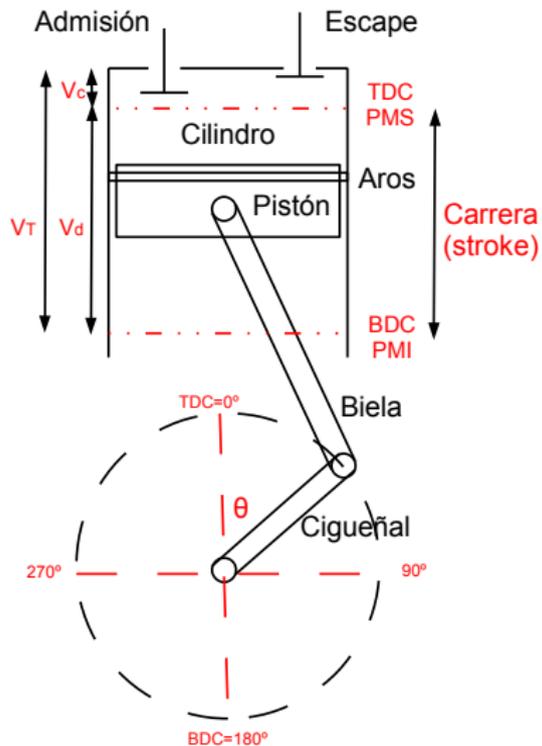
# Motor de combustión interna

**Definición:** El motor de combustión interna tiene como objetivo la producción de energía mecánica proveniente de la energía química del combustible. La quema (oxidación) del combustible se produce dentro de la máquina.

## Clasificación de motores

- Aplicación
  - automóvil
  - camiones
  - aviones
  - marinos
  - generadores
  - etc.
- Diseño
  - Alternativos (Reciprocantes)
  - Rotativos
- Ciclo de trabajo
  - 4 tiempos (2 vueltas por ciclo)
  - 2 tiempos (1 vueltas por ciclo)
- Otras

## Motores reciprocantes: 4Ts



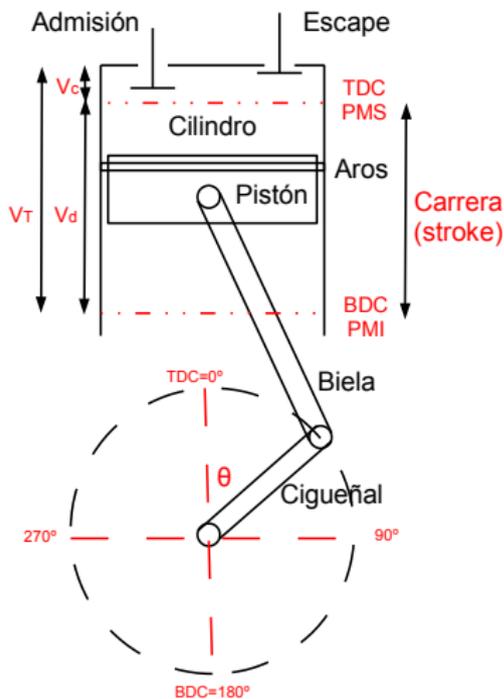
La combustión transmite potencia al pistón, el cual se mueve hacia atrás y adelante transmitiendo potencia a través de la biela al cigüeñal.

**TDC (PMS):** Posición de volumen mínimo, se denomina volumen muerto,  $V_c$  (clearance volume).

**BDC (PMI):** Posición de volumen máximo,  $V_T$

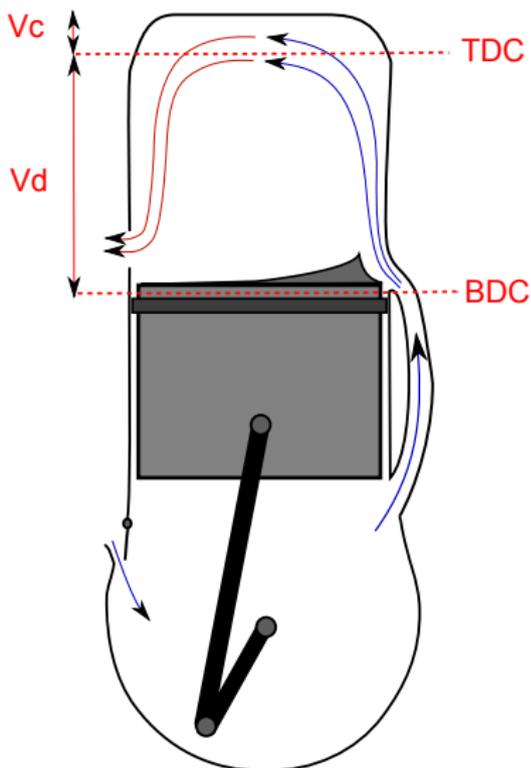
**Volumen desplazado**  $V_d = V_T - V_c$

## Motor 4 T



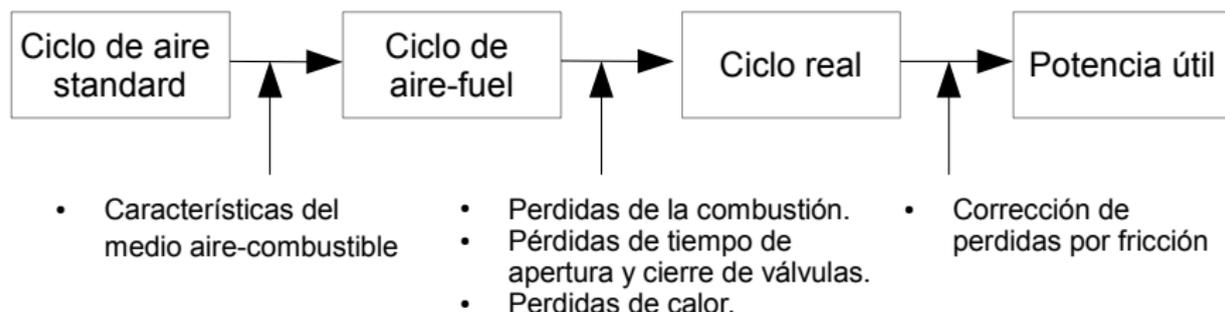
- **Admisión:** La válvula de admisión está abierta, el pistón baja y se bombea la mezcla combustible-aire hacia el interior del cilindro.
- **Compresión:** Ambas válvulas cerradas, el pistón sube hasta alcanzar el TDC comprimiendo la mezcla y dando lugar a la combustión.
- **Expansión:** Aumenta presión y temperatura, el pistón es desplazado por los gases hasta BDC produciendo trabajo.
- **Escape:** Válvula de escape abierta, sube el pistón, libera gases al ambiente.

## Motor 2 T



- **Compresión:** Comienza con los puntos de admisión y escape cerrados, y se comprime la mezcla. En la parte inferior del cilindro el pistón genera vacío produciendo la recarga de mezcla en el carter. Cuando el pistón alcanza el TDC se produce la combustión.
- **Carrera de potencia o expansión:** El pistón desciende debido a la alta presión de los gases produciendo trabajo. Primero se descubre la lumbrera de escape y después la de admisión. La presión del carter aumenta lo que produce que el flujo de gases nuevos ingrese a la cámara.

# Método de estudio de los ciclos de combustión



## Ciclos de aire standard

Se estudiarán los ciclos de un gas ideal que evoluciona para producir trabajo (o potencia).

### Condiciones:

- Presentan un caso límite del ciclo real.
- Permiten un tratamiento matemático simple.

### Gas ideal:

$$pV = nRT = mR_g T$$

$$R = c_p - c_v$$

$$R_g = \frac{R}{PM_g}$$

# Termodinámica de gases

## Calor específico a presión y volumen constante:

$$c_p = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_{p=cte} \rightarrow \Delta h = \int_{T_{ref}}^T c_p dT$$

$$c_v = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_{v=cte} \rightarrow \Delta u = \int_{T_{ref}}^T c_v dT$$

## Primer y segundo principio de la termodinámica :

$$\left. \begin{array}{l} 1^{er} \text{ principio} \\ 2^o \text{ principio} \\ \text{Proceso reversible} \end{array} \right\} \begin{array}{l} dU = \delta Q - p dV \\ dS \geq \frac{\delta Q}{T} \end{array} \rightarrow \boxed{dU = TdS - PdV}$$

$$dS = \frac{dU}{T} + \frac{P}{T} dV = \frac{dU}{T} + \frac{nR}{V} dV \rightarrow \boxed{ds = \frac{du}{T} + \frac{R}{V} dV}$$

# Proceso isentrópico-Gas ideal

**Proceso isentrópico:**  $ds = 0$

$$\left. \begin{aligned} \frac{du}{T} &= -R \frac{dV}{V} \\ c_v &= \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_{v=cte} \end{aligned} \right\} \rightarrow \int_1^2 \frac{c_v}{T} dT = -R \int_1^2 \frac{dV}{V}$$

$$\left. \begin{aligned} \ln \left( \frac{T_2}{T_1} \right) &= -\frac{R}{c_v} \ln \left( \frac{V_2}{V_1} \right) \\ \frac{R}{c_v} &= \frac{c_p}{c_v} - 1 = \gamma - 1 \end{aligned} \right\} \rightarrow \boxed{T_2 = T_1 \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1}}$$

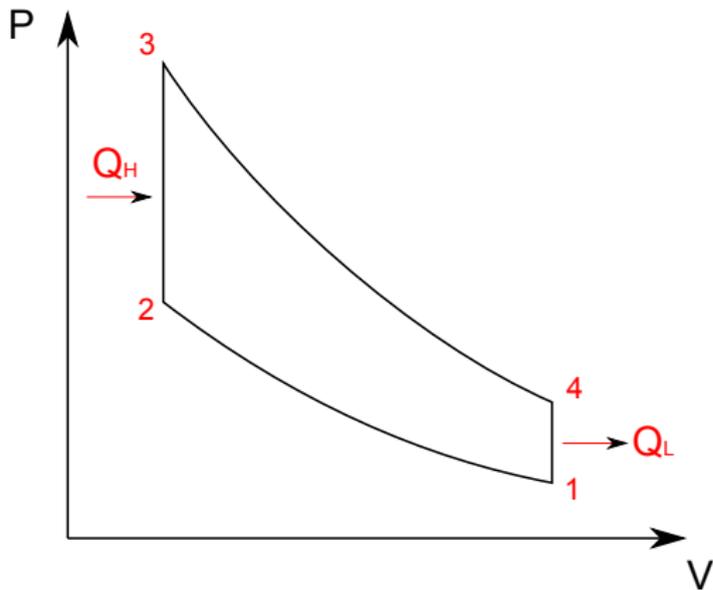
**Relación de compresión:**

$$\boxed{r = \frac{V_1}{V_2}}$$

→

$$\boxed{T_2 = T_1 r^{\gamma-1}}$$

## Ciclo Otto

**Primer principio:**

$$W = Q_H - Q_L$$

$$W = mc_v (T_3 - T_2) - mc_v (T_4 - T_1)$$

$$W = mc_v (T_3 - T_2 - T_4 + T_1)$$

**Proceso isentrópico-gas ideal:**

$$T_2 = T_1 r^{\gamma-1}$$

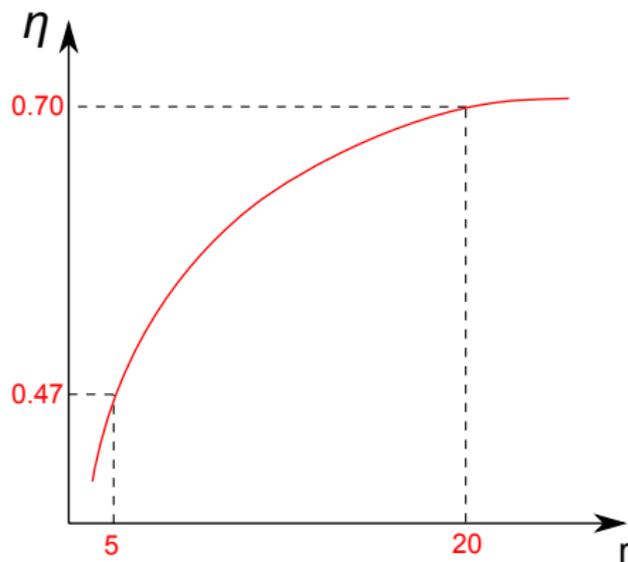
$$T_4 = T_3 r^{1-\gamma}$$

$$r = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_4}{V_3}$$

## Ciclo Otto ideal

Rendimiento:

$$\eta = \frac{W}{Q_H}$$



$$\eta = \frac{mc_v(T_3 - T_2 - T_4 + T_1)}{mc_v(T_3 - T_2)}$$

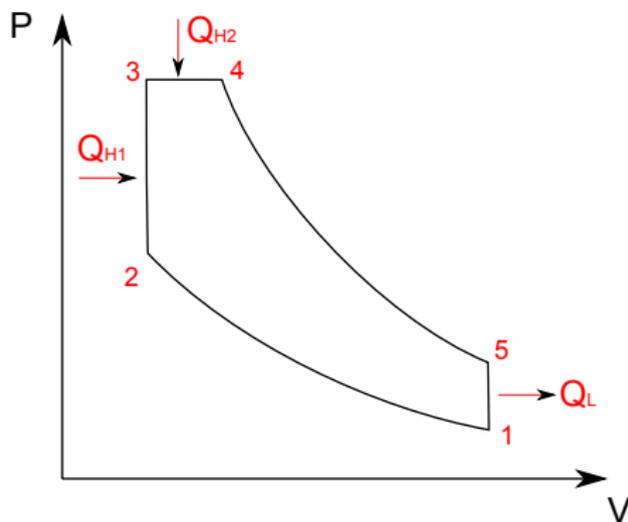
$$\eta = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_3 r^{1-\gamma} - T_1}{T_3 - T_1 r^{\gamma-1}}$$

$$\eta = 1 - r^{1-\gamma} \frac{\left(T_3 - \frac{T_1}{r^{1-\gamma}}\right)}{\left(T_3 - T_1 r^{\gamma-1}\right)}$$

$$\eta = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}}$$

El rendimiento depende únicamente de la relación de compresión (si  $\gamma$  constante).

## Ciclo Dual - Diésel de aire



## Primer principio:

$$W = Q_H - Q_L$$

$$Q_H = Q_{H1} + Q_{H2}$$

$$Q_H = mc_v (T_3 - T_2) + mc_p (T_4 - T_3)$$

$$Q_L = mc_v (T_5 - T_1)$$

$$W = mc_v (T_3 - T_2) + mc_p (T_4 - T_3) - mc_v (T_5 - T_1)$$

## Rendimiento:

$$\eta = \frac{W}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

$$\eta = 1 - \frac{mc_v (T_5 - T_1)}{mc_v (T_3 - T_2) + mc_p (T_4 - T_3)}$$

## Ciclo Dual - Diésel de aire

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} \rightarrow \eta = 1 - \frac{(T_5 - T_1)}{(T_3 - T_2) + \gamma(T_4 - T_3)} \rightarrow \eta = 1 - \frac{T_3 \left( \frac{T_5}{T_3} - \frac{T_1}{T_3} \right)}{T_3 \left( 1 - \frac{T_2}{T_3} \right) + \gamma T_3 \left( \frac{T_4}{T_3} - 1 \right)}$$

**Definimos:**

Relación de compresión:

$$r = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_5}{V_3}$$

Relación  $\beta$  y  $\tau$ 

$$\beta = \frac{V_4}{V_3} = \frac{T_4}{T_3} \quad \tau = \frac{T_1}{T_3}$$

**Procesos isentrópicos:**

$$T_4 V_4^{\gamma-1} = T_5 V_5^{\gamma-1} \rightarrow T_5 = T_4 \left( \frac{\beta}{r} \right)^{\gamma-1}$$

$$T_2 = T_1 r^{\gamma-1}$$

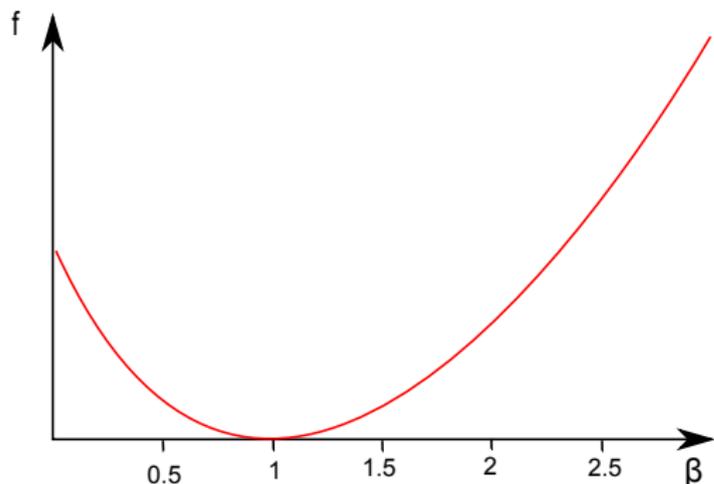
$$\eta = 1 - \frac{\left( \frac{\beta^\gamma}{r^{\gamma-1}} - \tau \right)}{(1 - \tau r^{\gamma-1}) + \gamma(\beta - 1)} \rightarrow \eta = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}} \left[ \frac{\beta^\gamma - \tau r^{\gamma-1}}{(1 - \tau r^{\gamma-1}) + \gamma(\beta - 1)} \right]$$

## Rendimientos Otto vs Diésel dual ideales - Método Analítico

Condición para que rendimiento dual sea mayor :  $\frac{\beta^\gamma - \tau r^{\gamma-1}}{(1 - \tau r^{\gamma-1}) + \gamma(\beta - 1)} < 1$

$$\rightarrow \beta^\gamma - \tau r^{\gamma-1} < 1 - \tau r^{\gamma-1} + \gamma(\beta - 1) \quad \rightarrow \quad \beta^\gamma - \gamma\beta + \gamma - 1 < 0$$

Grificando  $f(\beta) = \beta^\gamma - \gamma\beta + \gamma - 1$

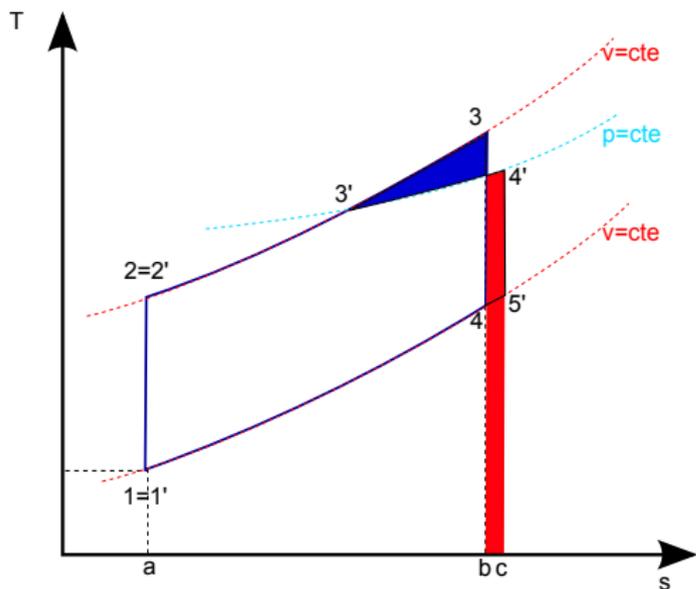


$f$  siempre mayor que 0  $\rightarrow$  bajo estas hipótesis el rendimiento siempre es mayor para Otto.

## Rendimientos Otto vs Diésel dual ideales - Método Gráfico

## Hipótesis:

- igual  $r$
- $Q_H$  el mismo
- igual punto 1



$$ds \geq \frac{\delta Q}{T}$$

proceso reversible  $\rightarrow ds = \frac{\delta Q}{T}$

$$Q_{rev} = \int T ds \rightarrow \text{área bajo la curva}$$

$$\eta = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

$$Q_{L_O} = \text{área } \{a14b\}$$

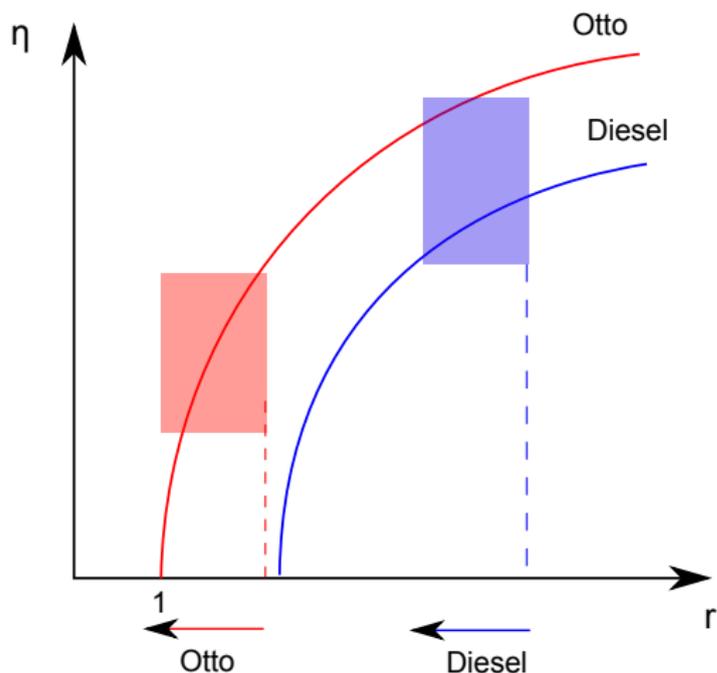
$$Q_{L_D} = \text{área } \{a15'c\}$$

$$Q_{L_D} > Q_{L_O}$$

$$Q_{H_D} = Q_{H_O}$$

$$\rightarrow \eta_{OTTO} > \eta_{DUAL}$$

# Rendimientos Otto vs Diésel - Relaciones de compresión típicas



- En la práctica, la relación de compresión de los motores Diésel es mayor que la de los Otto, obteniendo rendimientos superiores.
- La relación de compresión de los motores Otto está limitada por el octanaje de la nafta.