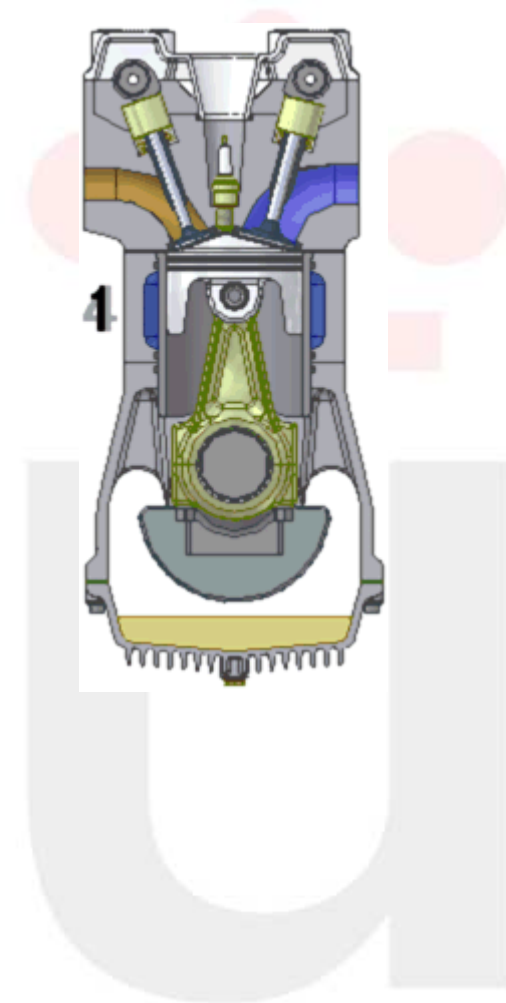


## Bloque I: Termotecnia

### Tema 2. Máquinas Térmicas I

1. Tipos de máquinas térmicas
2. Parámetros básicos de los motores
3. Ciclo Otto Aire-Estándar
4. Ciclo Diesel Aire-Estándar

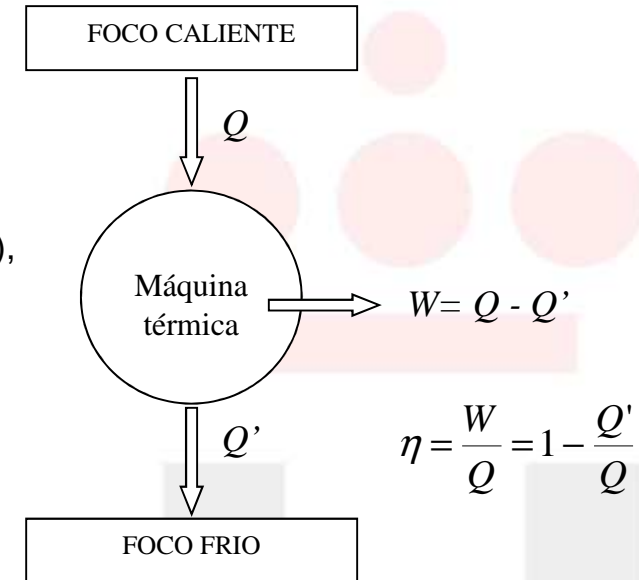


# Tema 2. Motores de Combustión Interna

## Máquina térmica

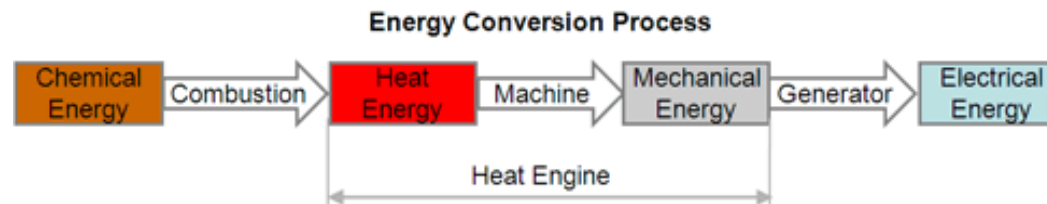
### Características generales

- Transforma calor en trabajo.
- El calor se transfiere a un agente de transformación (gas o vapor), que realiza un ciclo termodinámico, gracias al cual se produce trabajo.
- El calor residual no aprovechado se cede a un foco frío.
- El rendimiento no puede ser nunca del 100%.



## Ejemplo

Las plantas de generación de potencia emplean máquinas térmicas donde el calor aportado por el foco caliente normalmente procede de la combustión de un combustible fósil o de una reacción nuclear o de la energía solar. El foco frío suele ser el medio ambiente y el agente de transformación más habitual es el agua, seguido por los propios gases de combustión.



# Tema 2. Motores de Combustión Interna

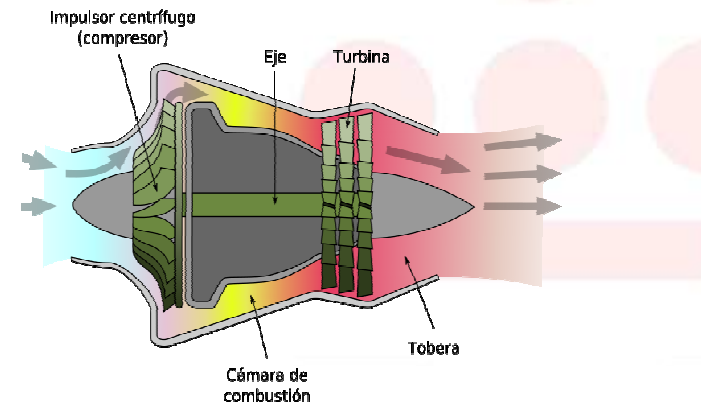
## Tipos de Máquinas Térmicas

### Máquinas de Combustión Interna:

Ciclos de potencia con gases.

*Turbinas de Gas*

*Motores de Combustión Interna Alternativos*

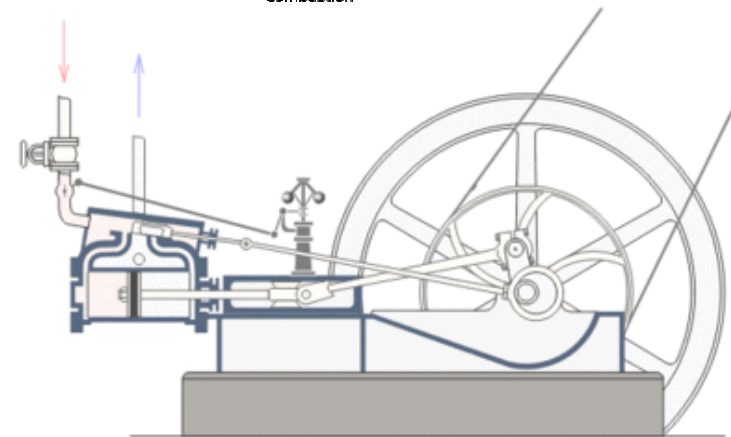


### Máquinas de Combustión Externa:

Ciclos de potencia con vapor.

(Tiene lugar un cambio de fase del fluido de trabajo)

*Turbinas de vapor*

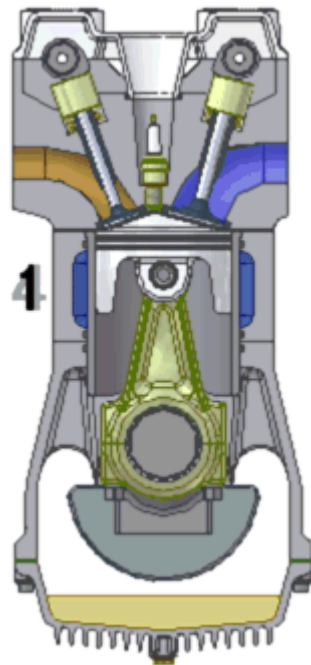


# Tema 2. Motores de Combustión Interna

## Máquinas de Combustión Interna

## Ciclos de potencia de gas

Su funcionamiento se fundamenta en que el estado térmico que posibilita la conversión  $Q \rightarrow W$  se produce en el fluido y no por transmisión de calor. Toda la energía (Calor) se involucra en la transformación.



**Motores alternativos:** Transmisión de  $W$  mediante desplazamiento de un émbolo

### Parámetros básicos de los motores:

Calibre	Punto muerto superior e Inferior
Carrera	Relación de compresión
Cilindrada	Válvula de admisión
Bujía	Inyector
Biela	Cigüeñal

### Tipos básicos de motores:

- Encendido por chispa (ciclo de Otto)
- Encendido por compresión (ciclo de Diesel)

**Caracterización:** Número de transformaciones – Tiempos

### Cuatro tiempos:

- Carrera de admisión
- Carrera de compresión
- Carrera de trabajo
- Carrera de escape

# Tema 2. Motores de Combustión Interna

## Parámetros básicos de los motores

**Calibre:** diámetro del cilindro,

**Punto muerto superior (PMS):** posición del pistón en la que el volumen ocupado por el gas en el cilindro es mínimo.

**Punto muerto inferior (PMI):** posición del pistón en la cual el volumen ocupado por el gas en el cilindro es máximo.

**Carrera:** distancia que recorre el pistón en una dirección.

**Cilindrada:** volumen desplazado por el pistón cuando se mueve desde el PMI al PMS.

**Relación de compresión,  $r$ :** relación entre los volúmenes ocupado por el gas cuando el pistón está en PMI y PMS.

**Válvula de admisión:** válvula para la entrada de la mezcla aire-combustible o aire, según el tipo de motor, al cilindro al principio del ciclo.

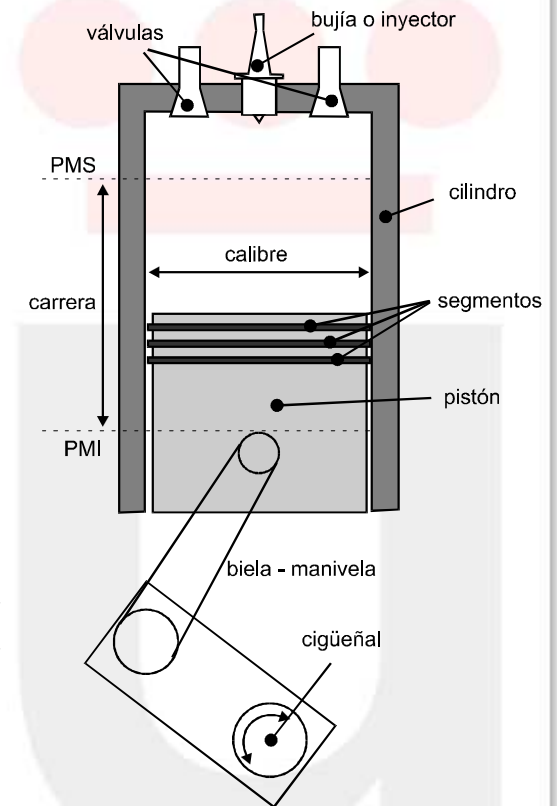
**Válvula de escape:** válvula que permite la evacuación de los gases de combustión al final del ciclo.

**Bujía o inyector:** dispositivo para generar la chispa en los motores de encendido por chispa o para inyectar el combustible a elevada presión en los motores de encendido por compresión.

**Biela - manivela:** dispositivo para transformar el movimiento alternativo del pistón en otro rotativo de un eje o cigüeñal.

**Cigüeñal:** eje con movimiento rotativo al que se une el sistema biela - manivela.

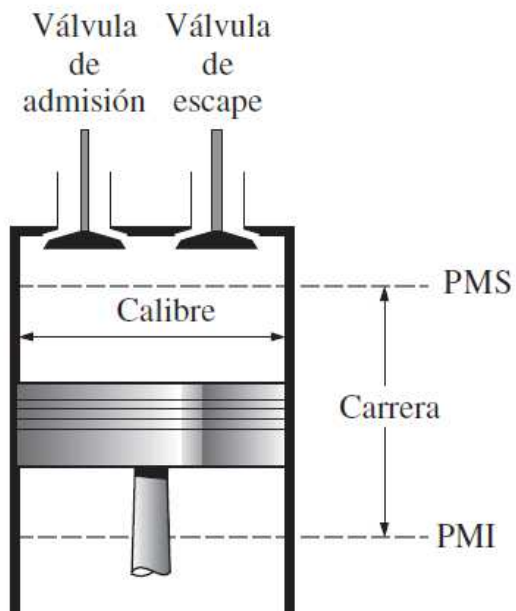
## Ciclos de potencia de gas



# Tema 2. Motores de Combustión Interna

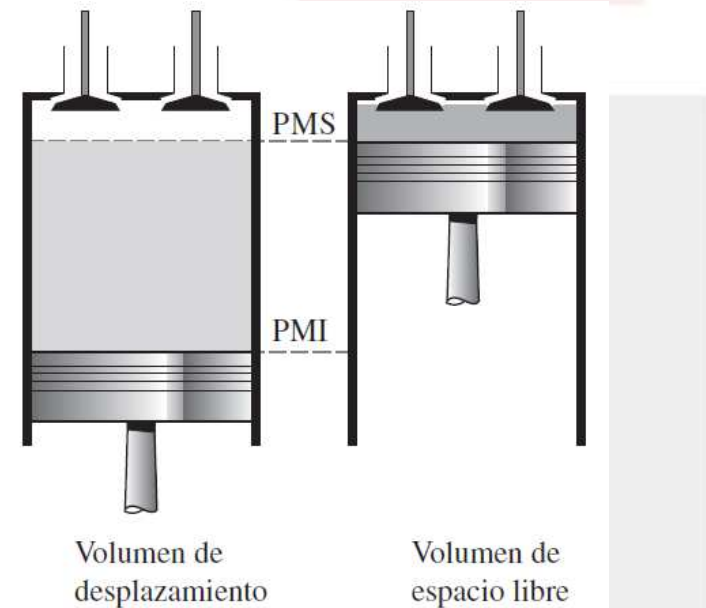
## Relación de compresión

$$r = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{V_{PMI}}{V_{PMS}}$$



## Presión media efectiva

$$PME = \frac{W_{net}}{V_{\max} - V_{\min}} = \frac{w_{net}}{v_{\max} - v_{\min}}$$



## Tema 2. Motores de Combustión Interna

### Tipos fundamentales de motores

### Ciclos de potencia de gas

Motor	Combustión	Ciclo	Características
Encendido Chispa (ECH)	Bujía (chispa)	Otto	Ligeros Menor coste Gran potencia (300 CV) Mayor consumo combustible
Encendido compresión (ECOM)	Cámara combustión ( Aumento $p$ y $T$ )	Diesel	Pesados Más caros Menos potencia Menor consumo combustible

**Caracterización:** Número de transformaciones – Tiempos

En cada etapa o tiempo, el pistón realiza una carrera en el cilindro, produciéndose así un movimiento alternativo del mismo. Este movimiento alternativo se convierte en rotativo mediante un mecanismo de biela - manivela.

## Tema 2. Motores de Combustión Interna

### Motor de cuatro tiempos

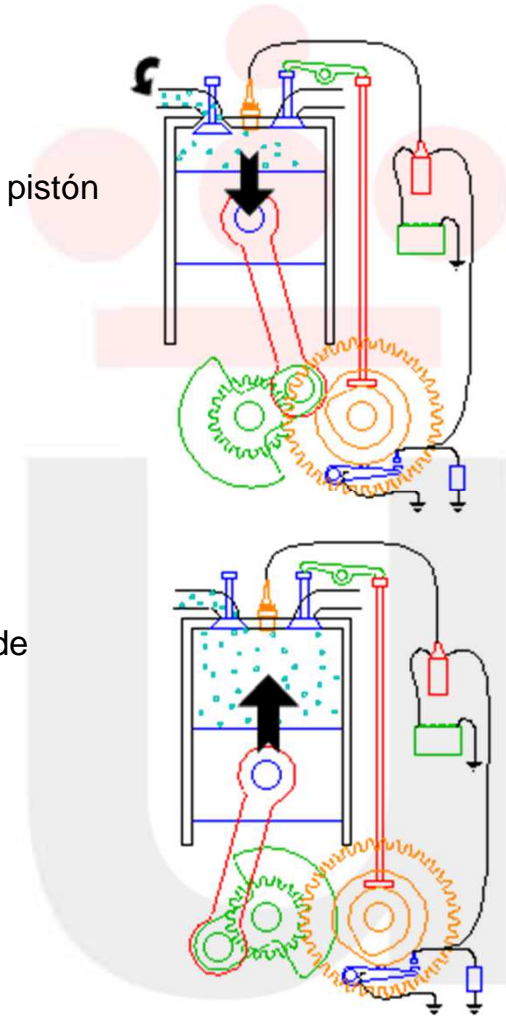
**Carrera de admisión:** con la válvula de admisión abierta y la de escape cerrada, el pistón realiza una carrera desde el PMS al PMI para aspirar una carga de gas al cilindro.

Motores de encendido por chispa (gas es una mezcla de aire y combustible)

Motores de encendido por compresión (aire)

**Carrera de compresión:** con ambas válvulas cerradas, el pistón realiza la carrera de compresión desde el PMI al PMS, aumentando la temperatura y presión del gas.

**El pistón ejecuta 4 carreras por ciclo**



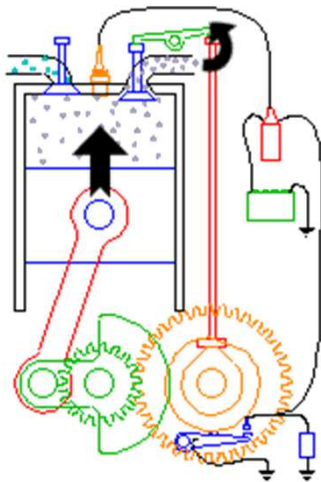


## Tema 2. Motores de Combustión Interna

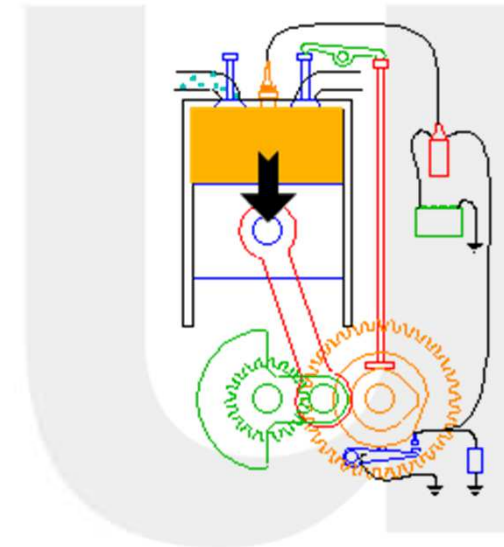
### Motor de cuatro tiempos

**Carrera de trabajo:** con ambas válvulas cerradas, se inicia el proceso de combustión, obteniéndose una mezcla de gases a temperatura y presión elevadas que se expanden, realizando un trabajo sobre el pistón que realiza una carrera hacia el PMI.

Motores de encendido por chispa, toda la mezcla de aire y combustible reacciona de forma violenta y rápida (combustión se inicia cerca del final de la carrera de compresión mediante una chispa producida en la bujía).  
Motores de encendido por compresión, la combustión se produce a medida que se inyecta el combustible en el cilindro de forma progresiva y controlada al final de la carrera de compresión, y continúa durante los primeros instantes de la carrera de trabajo



**Carrera de escape:** con la válvula de escape abierta y la de admisión cerrada, el pistón realiza otra carrera desde el PMI al PMS, evacuándose los gases de combustión al exterior.



# Tema 2. Motores de Combustión Interna

## Motor de cuatro tiempos

Admisión, Compresión, Trabajo y Escape: Requieren que el pistón *aporte un trabajo* al gas contenido en el cilindro.

Combustión: Los gases de combustión comunican su energía al pistón, forzándolo a ejecutar una carrera desde el PMS al PMI.

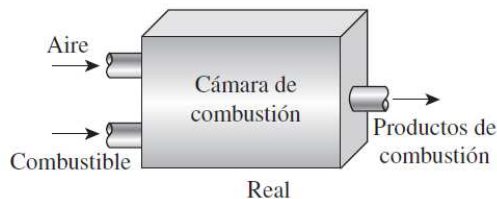
Producción de trabajo en el motor  
(Superior a la suma de trabajo requerido en etapas anteriores)

Trabajo neto POSITIVO

## Análisis de los motores de combustión alternativos

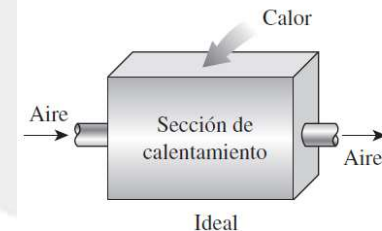
- Combustión en el cilindro
- Irreversibilidades: rozamiento, gradientes de  $p$  y  $T$
- Calor transferido gas-líquido
- Trabajo de carga y descarga del cilindro

Gran complejidad



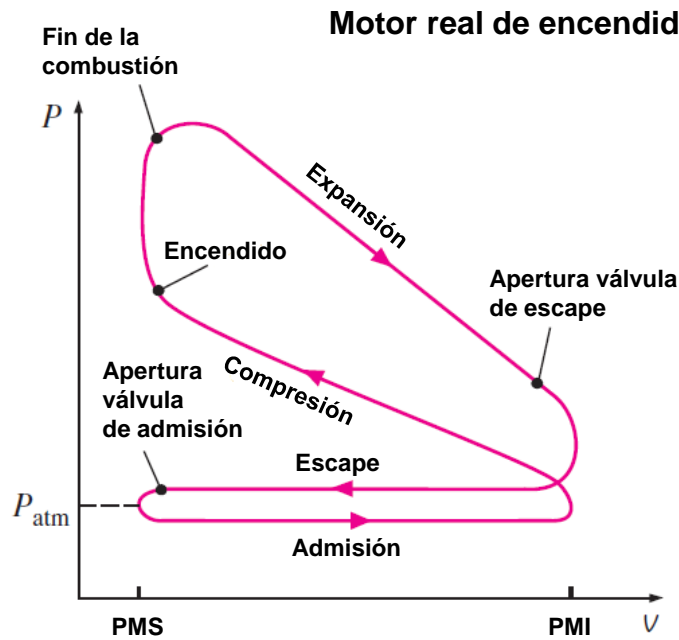
## Suposiciones de aire estándar

- Fluido: aire como gas ideal
- La combustión se trata como una absorción calorífica
- No hay admisión ni escape (el ciclo se completa con la cesión de  $Q$  en PMI)
- No hay irreversibilidades

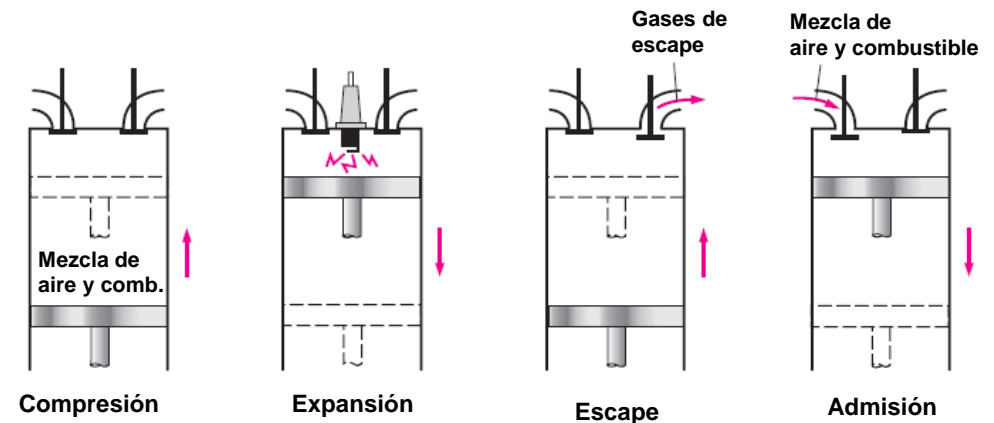


# Tema 2. Motores de Combustión Interna

## Ciclo Otto Aire-Estándar: Motores encendido con chispa (gasolina)



### Ciclos de potencia de gas



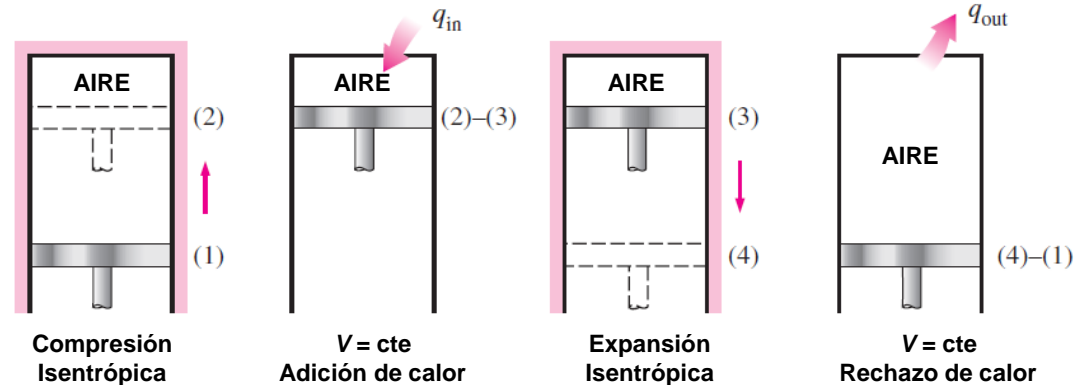
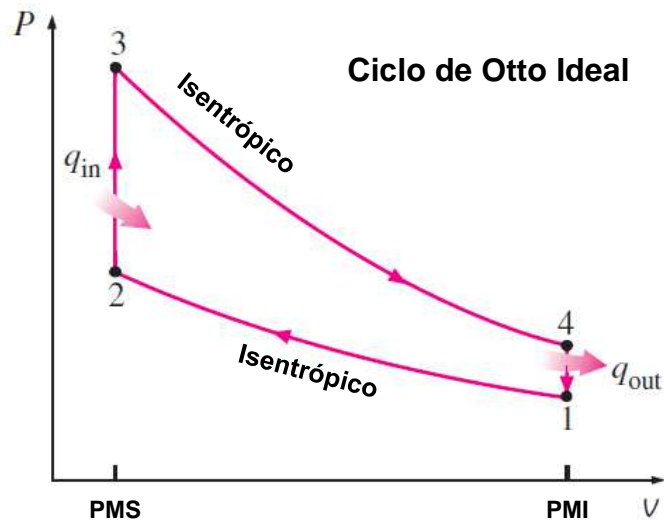
Obliga a trabajar al cigüeñal

Trabajo Útil

En la mayoría de las máquinas de encendido por chispa el émbolo ejecuta cuatro tiempos (dos ciclos mecánicos) dentro del cilindro y el cigüeñal completa dos revoluciones por cada ciclo termodinámico.

# Tema 2. Motores de Combustión Interna

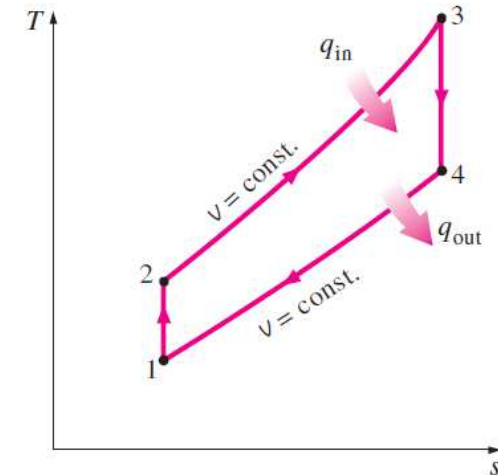
## Ciclo Otto Aire-Estándar: Motores encendido con chispa (gasolina)



Suposiciones de aire estándar

Cuatro procesos reversibles internamente:

- 1-2 Compresión isentrópica
- 2-3 Adición de calor a volumen constante
- 3-4 Expansión isentrópica
- 4-1 Rechazo de calor a volumen constante



# Tema 2. Motores de Combustión Interna

## Ciclo Otto

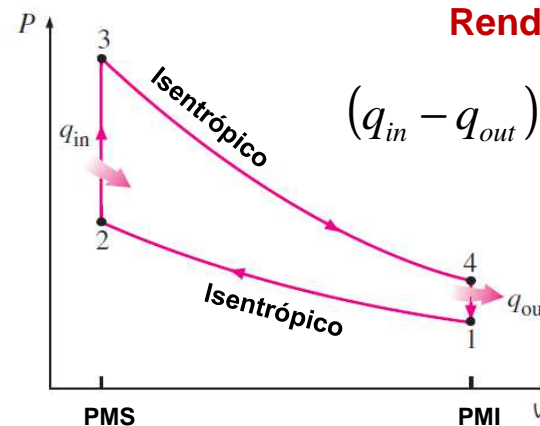
Cuatro procesos reversibles

1-2 Compresión isentrópica

2-3 Adición de calor a volumen constante

3-4 Expansión isentrópica

4-1 Rechazo de calor a volumen constante



$$(q_{in} - q_{out}) + (w_{in} - w_{out}) = \Delta u$$

$$q_{in} = \Delta u_{2 \rightarrow 3} = C_V \cdot (T_3 - T_2)$$

$$q_{out} = \Delta u_{4 \rightarrow 1} = -C_V \cdot (T_1 - T_4)$$

$$\left. \begin{array}{l} q_{in} = q_{2 \rightarrow 3} = C_V \cdot (T_3 - T_2) \quad (\geq 0) \text{ (J/kg)} \\ q_{out} = q_{4 \rightarrow 1} = C_V \cdot (T_4 - T_1) \quad (\leq 0) \text{ (J/kg)} \end{array} \right\} \Rightarrow \eta = 1 - \frac{q_{4 \rightarrow 1}}{q_{2 \rightarrow 3}} = 1 - \frac{C_V (T_4 - T_1)}{C_V (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \left[ \frac{(T_4/T_1) - 1}{(T_3/T_2) - 1} \right]$$

$$\Rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{\gamma-1} \Rightarrow v_3 = v_2 \Rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} \Rightarrow \eta_{Otto} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

$$\frac{T_3}{T_4} = \left( \frac{v_4}{v_3} \right)^{\gamma-1} \Rightarrow v_4 = v_1 \Rightarrow \frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2}$$

# Tema 2. Motores de Combustión Interna

## Ciclo Otto

### Ciclos de potencia de gas

¿Es similar a la eficiencia de un ciclo de Carnot?

$$\eta_{Otto} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \Rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\gamma-1} \quad r = v_1/v_2 \Rightarrow \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{1}{r}\right)^{\gamma-1}$$

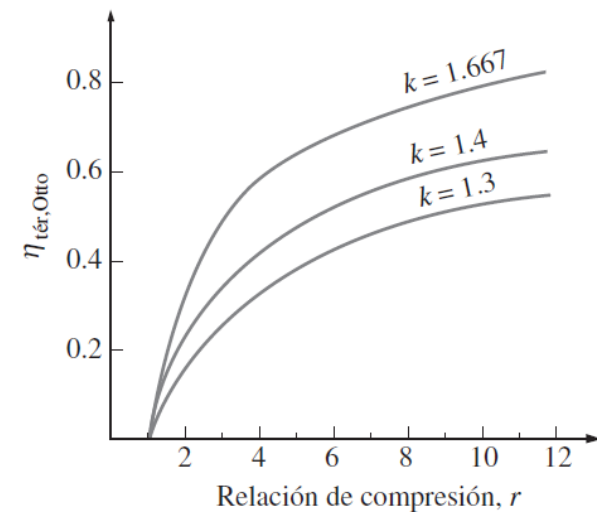
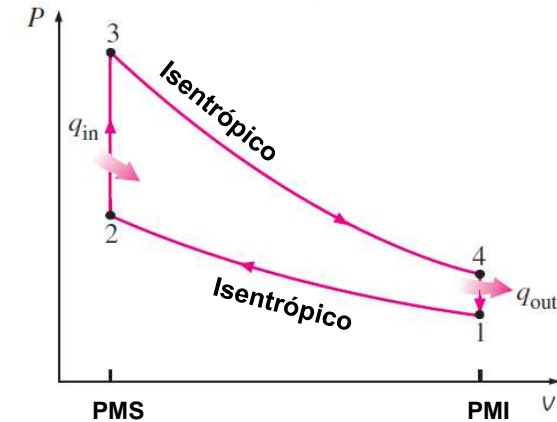
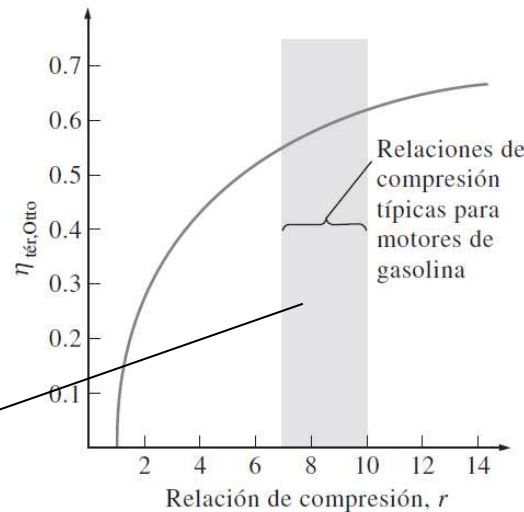
$$\eta_{Otto} = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}}$$

Mayor relación de compresión,  
mayor rendimiento.

Condiciones habituales:

$$r = 7 - 10$$

$$p = 5 - 10 \text{ bar}$$



# Tema 2. Motores de Combustión Interna

## Composición combustible

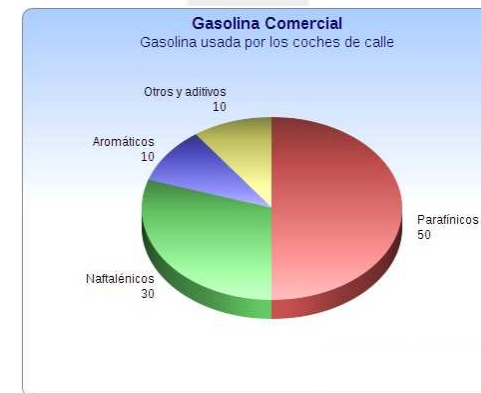
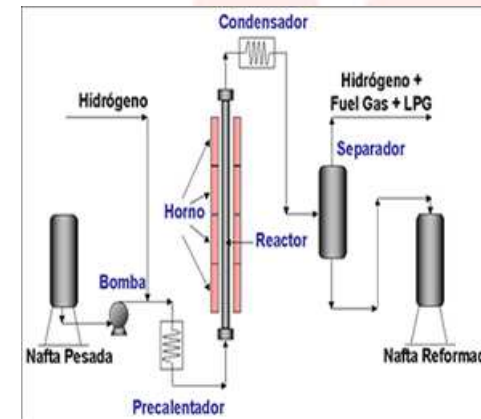
BASE DE HIDROCARBUROS ( $C_4-C_{12}$ ). Obtenido bien por destilación directa ( $30-205^{\circ}C$ ) y/o craqueo catalítico y reformado de naftas.

- ✓ Aromáticos => 34 - 40%
- ✓ Olefinas => 10-15%
- ✓ Parafinas (fundamentalmente lineales)

La reformación catalítica se usa para aumentar el número de octano de la nafta pesada obtenida en la destilación atmosférica del crudo. Transformación de hidrocarburos parafínicos y nafténicos en isoparafínicos y aromáticos. Estas reacciones producen también hidrógeno, un subproducto valioso que se aprovecha en otros procesos de refino.

### ADITIVOS

- ✓ Inhibidores => evitan las reacciones de oxidación y polimerización.
- ✓ Detergentes => limpieza de inyectores y válvulas
- ✓ Antidetonantes





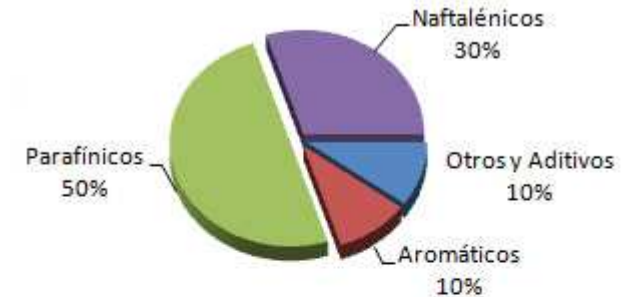
## Tema 2. Motores de Combustión Interna

### Composición combustible

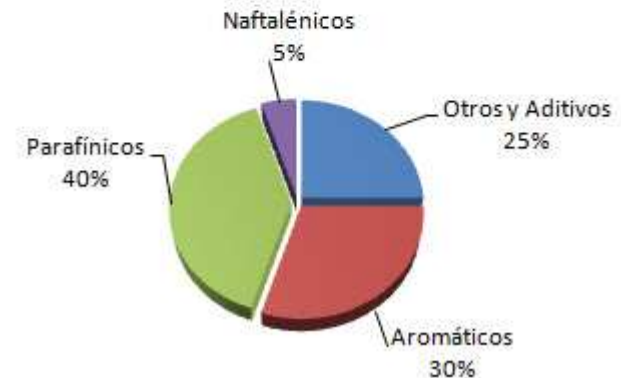
Se le añaden aditivos orientados a mejorar las propiedades de la mezcla para evitar corrosión de las partes metálicas del motor que quedan expuestas a la misma, para mejorar el índice de octano, para mejorar el consumo, etc.

El índice de octano de una gasolina es el poder **antidetonante** de la misma. En los motores de combustión interna, como los de nuestros coches de calle o como el de un **Formula 1**, se puede producir un fenómeno conocido como **detonación** que hace que la mezcla aire combustible se autoinflame espontáneamente antes de que sea alcanzada por el frente de llama que avanza por la cámara de combustión una vez que ha saltado la chispa en la bujía, provocando entonces choques de los varios frentes de llama, que hacen perder rendimiento al motor e incluso podrían llegar a dañarlo. Por tanto un índice de octano alto hace que la posibilidad de que se presente este fenómeno disminuya.

**Gasolina Normal**



**Gasolina Formula 1**



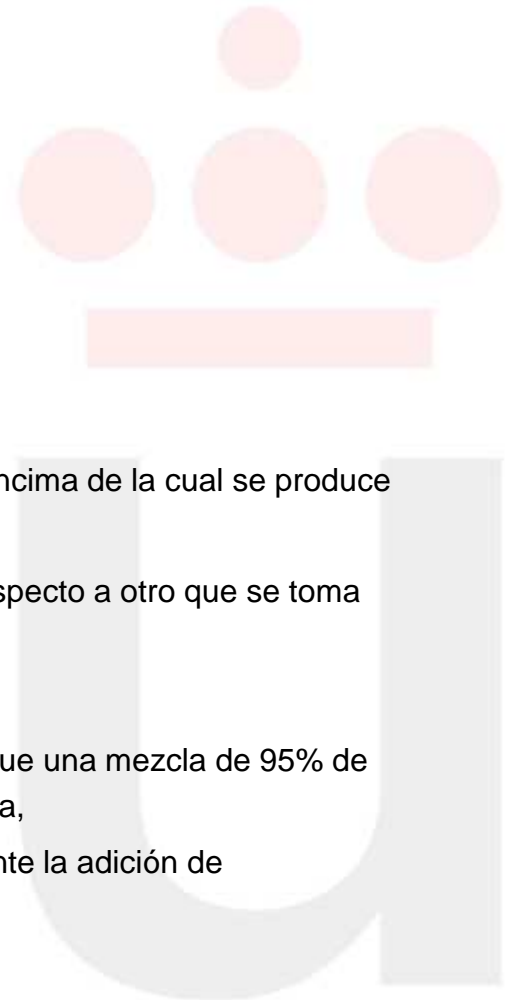


# Tema 2. Motores de Combustión Interna

## Composición combustible

### CARACTERÍSTICAS

- ✓ Volatilidad adecuada al clima y altitud donde se consume.
  - ✓ Ausencia de componentes corrosivos (s), poliolefinas y otros contaminantes
  - ✓ Índice de octano adecuado. Evitar autodetonación de la gasolina
    - Razón crítica de compresión: Valor máximo de la relación de compresión por encima de la cual se produce autodetonación. Depende del tipo de hidrocarburos que componen la gasolina.
    - Índice de octano: Medida de la resistencia a la detonación de un combustible respecto a otro que se toma como referencia.
      - Referencia: Mezcla n-heptano (IO=0) e i-octano (IO=100)
- Ejemplo: IO=95: La gasolina produciría la detonación en el mismo momento que una mezcla de 95% de isooctano y 5% de n-heptano, en las condiciones en las que se hace la medida,
- Se puede aumentar con una composición adecuada en la gasolina y mediante la adición de antidetonantes (TEP, MTBE y TAME).



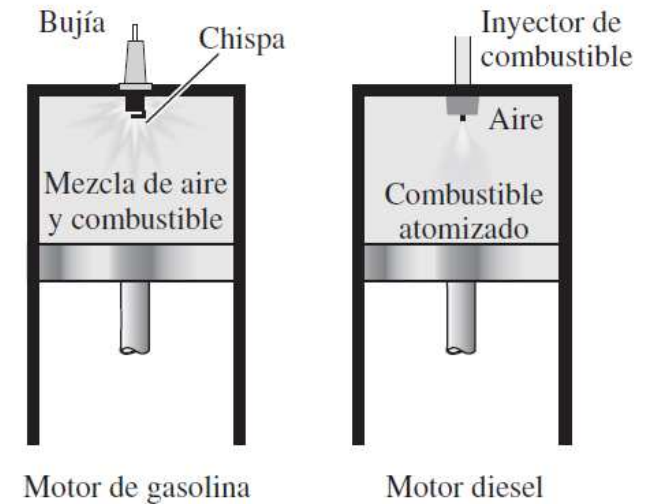
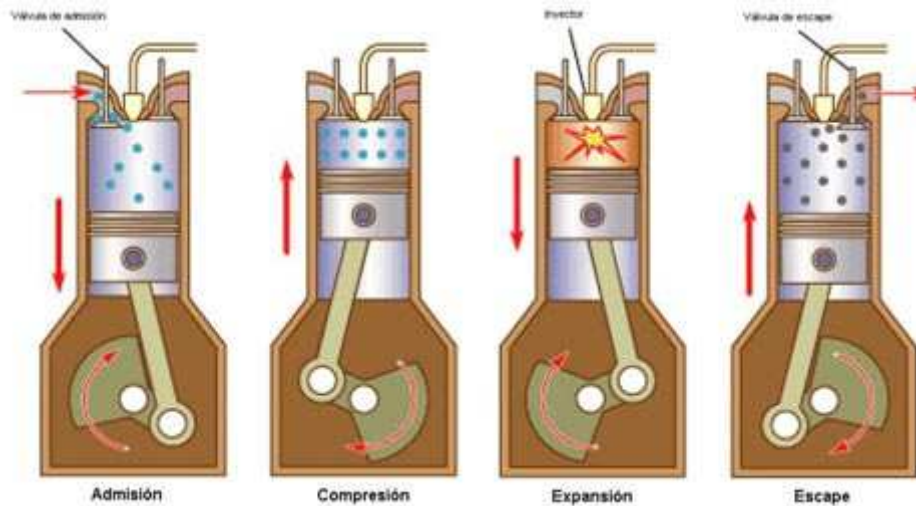
## Tema 2. Motores de Combustión Interna

### Ciclo Diesel Aire-Estándar: Motores encendido por compresión (diesel)

Encendido por COMPRESIÓN:

La explosión del ciclo de Otto (chispa) se sustituye por una combustión progresiva a presión constante.

- Compresión únicamente de aire.
- Posterior inyección del combustible a la misma presión y combustión progresiva al entrar en el cilindro.
- Desplazamiento del pistón simultáneamente a la combustión.



# Tema 2. Motores de Combustión Interna

## Ciclo Diesel

Cuatro procesos reversibles

**Compresión (1-2):** Isoentrópico. El pistón se mueve de PMI a PMS. Carrera de compresión.

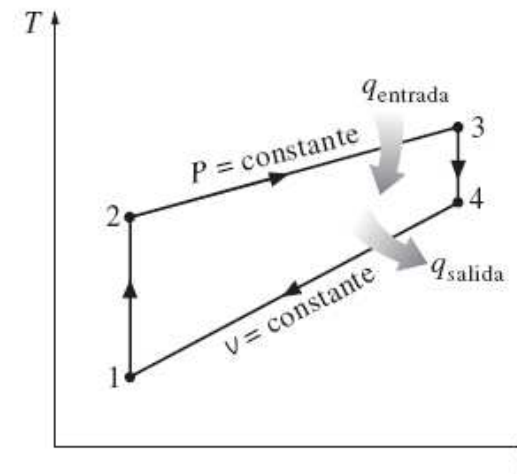
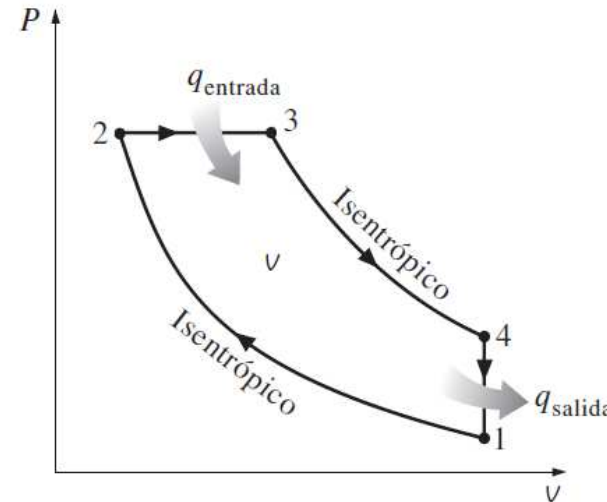
**Absorción de  $Q$  (2-3):** El aire absorbe  $Q$  a presión constante (isobárica) de forma que el pistón ha de recorrer parcialmente la carrera de trabajo (PMS  $\rightarrow$ ). Primer tramo carrera trabajo

**Expansión (3-4).** Isoentrópica. Es el segundo tramo de la carrera de trabajo ( $\rightarrow$  PMI).

**Cesión de  $Q$  (4-1):** El calor es cedido de forma isocórica (escape y admisión)

### Rendimiento térmico

$$\eta_{Diesel} = \frac{W_{net}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}}$$



# Tema 2. Motores de Combustión Interna

## Ciclo Diesel

$$\eta_{Diesel} = \frac{W_{net}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}}$$

Uso de  $C_p$  para la etapa 2-3 y de  $C_v$  para etapa 4-1

$$q_{in} = q_p = h_3 - h_2 = C_p \cdot (T_3 - T_2)$$

$$q_{out} = -\Delta u_{4 \rightarrow 1} = -C_v \cdot (T_1 - T_4)$$



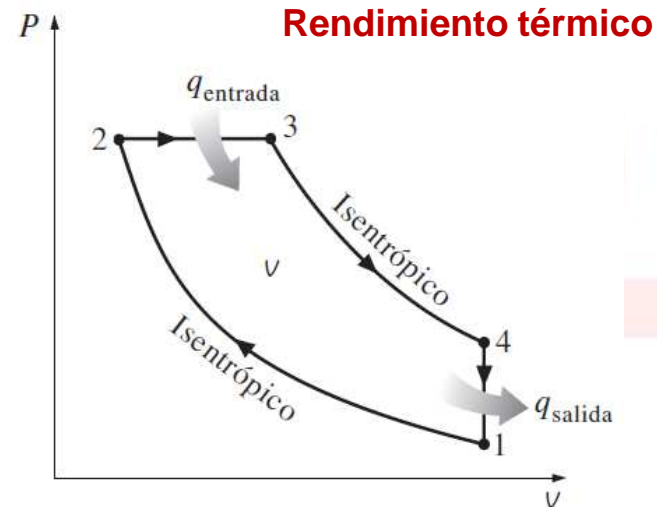
$$q_{in} = C_p \cdot (T_3 - T_2) \quad (> 0) \text{ (J / kg)}$$

$$q_{out} = C_v \cdot (T_4 - T_1) \quad (< 0) \text{ (J / kg)}$$

$$\Rightarrow \eta_{Diesel} = 1 - \frac{C_v(T_4 - T_1)}{C_p(T_3 - T_2)} \Rightarrow \eta_{Diesel} = 1 - \frac{1}{\gamma} \frac{(T_4 - T_1)}{(T_3 - T_2)}$$

$$\Rightarrow \eta_{Diesel} = 1 - \frac{1}{\gamma} \left( \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{T_2(T_3/T_2 - 1)} \right)$$

Debemos determinar  $T_3/T_2$  ?



## Tema 2. Motores de Combustión Interna

### Ciclo Diesel

#### Rendimiento térmico

$$\left[ \frac{p_3 V_3}{T_3} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \text{ donde } p_3 = p_2 \right] \text{ Definimos una nueva magnitud } \frac{T_3}{T_2} = \frac{V_3}{V_2} = \frac{v_3}{v_2} = r_c$$

Relación de corte de admisión  $r_c$

Ahora debemos determinar  $T_4/T_1$  ?

$$\left[ \frac{p_4 V_4}{T_4} = \frac{p_1 V_1}{T_1} \text{ donde } V_4 = V_1 \right] \left[ \frac{T_4}{T_1} = \frac{p_4}{p_1} \right]$$

Considerando que los procesos 1-2 y 3-4 son isoentrópicos:  $\left[ p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma \right] \left[ p_3 V_3^\gamma = p_4 V_4^\gamma \right]$

Dado que  $V_4 = V_1$  y  $p_3 = p_2$ , al dividir ambas ecuaciones obtenemos:

$$\Rightarrow \left[ \frac{p_4}{p_1} = \left( \frac{V_3}{V_2} \right)^\gamma = r_c^\gamma \right]$$

## Tema 2. Motores de Combustión Interna

### Ciclo Diesel

$$\left. \begin{array}{l} \left[ \frac{T_3}{T_2} = \frac{V_3}{V_2} = r_c \right] \\ \left[ \frac{T_4}{T_1} = \frac{p_4}{p_1} = \left( \frac{V_3}{V_2} \right)^\gamma = r_c^\gamma \right] \end{array} \right\} \Rightarrow \eta_{Diesel} = 1 - \frac{1}{\gamma} \left( \frac{T_1 (T_4 / T_1 - 1)}{T_2 (T_3 / T_2 - 1)} \right) \Rightarrow \eta_{Diesel} = 1 - \frac{1}{\gamma} \frac{T_1 r_c^\gamma - 1}{T_2 r_c - 1}$$

Rendimiento térmico

Dado que el proceso 1-2 es isentrópico (reversible y adiabático):

$$\left[ \frac{T_1}{T_2} = \left( \frac{1}{r} \right)^{\gamma-1} \right]$$

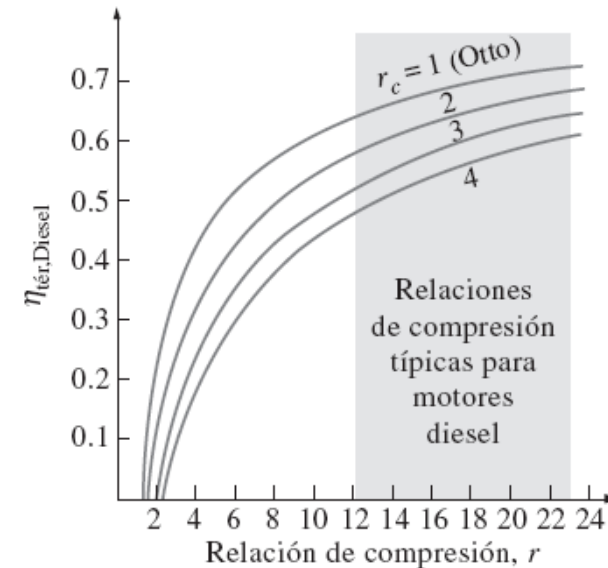
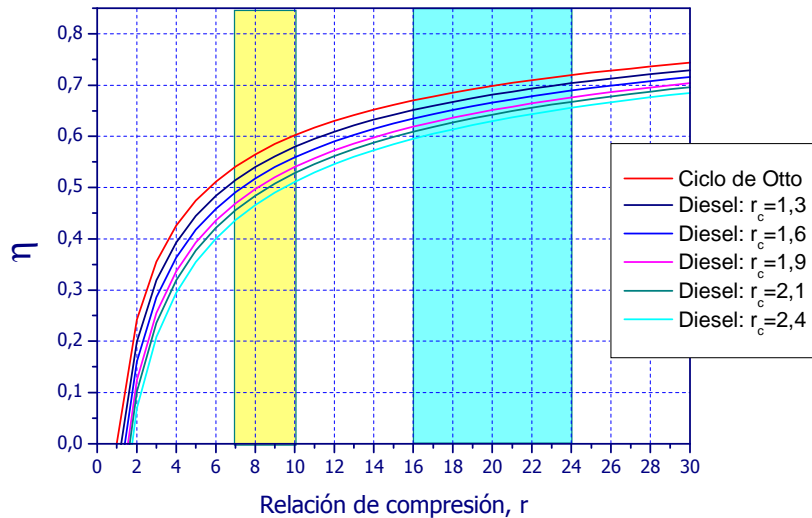
$$\Rightarrow \eta_{Diesel} = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}} \frac{r_c^\gamma - 1}{\gamma(r_c - 1)}$$

$r = V_1 / V_2$  relación de compresión

$r_c = V_3 / V_2$  relación de combustión

# Tema 2. Motores de Combustión Interna

## Rendimiento térmico: Comparación Otto-Diesel



Menor eficacia del ciclo Diesel que el de Otto para la misma relación de compresión.

En la práctica :

$r$  (Otto)  $\sim 7 - 10$

$r$  (Diesel)  $\sim 16 - 24$

$$r_{\text{Diesel}} \rangle r_{\text{Otto}} \Rightarrow \eta_{\text{Diesel}} \rangle \eta_{\text{Otto}}$$

$$\eta_{\text{th,Otto}} = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}}$$

$$\eta_{\text{Diesel}} = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}} \left[ \frac{r_c^\gamma - 1}{\gamma(r_c - 1)} \right]$$

# Tema 2. Motores de Combustión Interna

## Composición combustible

- BASE DE HIDROCARBUROS ( $C_{17}$ - $C_{20}$ ). Obtenido bien por destilación directa (220-390° C), destilación a vacío y otros procesos de conversión: GASÓLEOS
- ADITIVOS

### CARACTERÍSTICAS

- ✓ Viscosidad adecuada
- ✓ Volatilidad adecuada
- ✓ Ausencia de componentes corrosivos (s, límite máximo 350 mg/kg), agua (200 mg/kg) y partículas sólidas (24 mg/kg).
- ✓ Elevada resistencia a la oxidación
- ✓ Punto de enturbiamiento y punto de obstrucción del filtro en frío adecuados
- ✓ Número de cetano adecuado:

*Nº de cetano: porcentaje de n-cetano (n-c16) de una mezcla de n-cetano ( $ic=100$ ) y  $\alpha$ -metil naftaleno ( $ic=0$ ) que provoca el mismo retraso en el encendido que el gasóleo en cuestión. a mayor  $ic$  menor retraso combustión.*

	N.C.
<b>GASÓLEO A</b>	<b>51</b>
<b>GASÓLEO B</b>	<b>46</b>



## Tema 2. Motores de Combustión Interna

### Diferencia entre un Motor a Gasolina y un Motor Diesel

Motores a Gasolina	Motores Diesel
Su costo es más barato.	Su costo es más elevado.
Aprovechan del 22 al 24% de la energía	Son más eficientes, el aprovechamiento de energía puede superar el 35%.
No requieren gran cantidad de aire.	Requieren mayor cantidad de aire, pues la combustión es mejor cuanto mayor es el exceso de aire carburante.
El combustible usado es la gasolina, el cual es muy contaminante.	El combustible requerido es el gasóleo, el cual es menos contaminante.
Consumen más combustible.	Consumen menos combustible (aprox. 30% menos)



# Tema 2. Motores de Combustión Interna

$$\eta_{th,Otto} = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}}$$

$$\eta_{Diesel} = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}} \left[ \frac{r_c^\gamma - 1}{\gamma(r_c - 1)} \right]$$

