

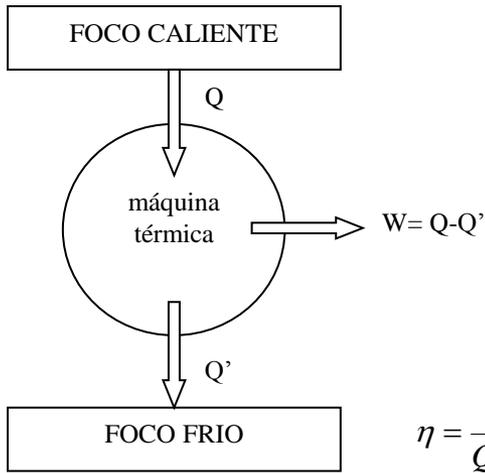
# INGENIERÍA ENERGÉTICA

## BLOQUE I. COMBUSTIBLES CONVENCIONALES

### TEMA 5. MOTORES Y TURBINAS PARA EL TRANSPORTE

1. Introducción
2. Motores de combustión interna alternativos
3. Turbinas de gas

# 1. Introducción



Máquina Térmica → transforma Energía Térmica en Energía Mecánica.

El rendimiento no puede ser nunca del 100% → Restricciones por el 2º Ppio. de la Termodinámica

Operación Cíclica → Rto. máximo definido por los ciclos reversibles como el de Carnot.

Ciclos abiertos → El fluido no completa el ciclo

$$\eta = \frac{W_{NETO}}{Q_{TOTAL\_APORTADO}} = \frac{\sum W_{PRODUCIDO} - \sum (-W_{CONSUMIDO})}{\sum Q_{ABSORBIDO}}$$

## Tipos de Máquinas Térmicas:

### Motores de Combustión Externa (MCE):

Ciclos de potencia con vapor. Ciclos cerrados. Cambio de fase del fluido de trabajo

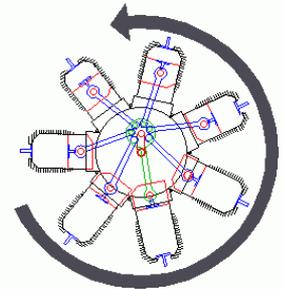
*Turbinas de vapor*

### Motores de Combustión Interna (MCI):

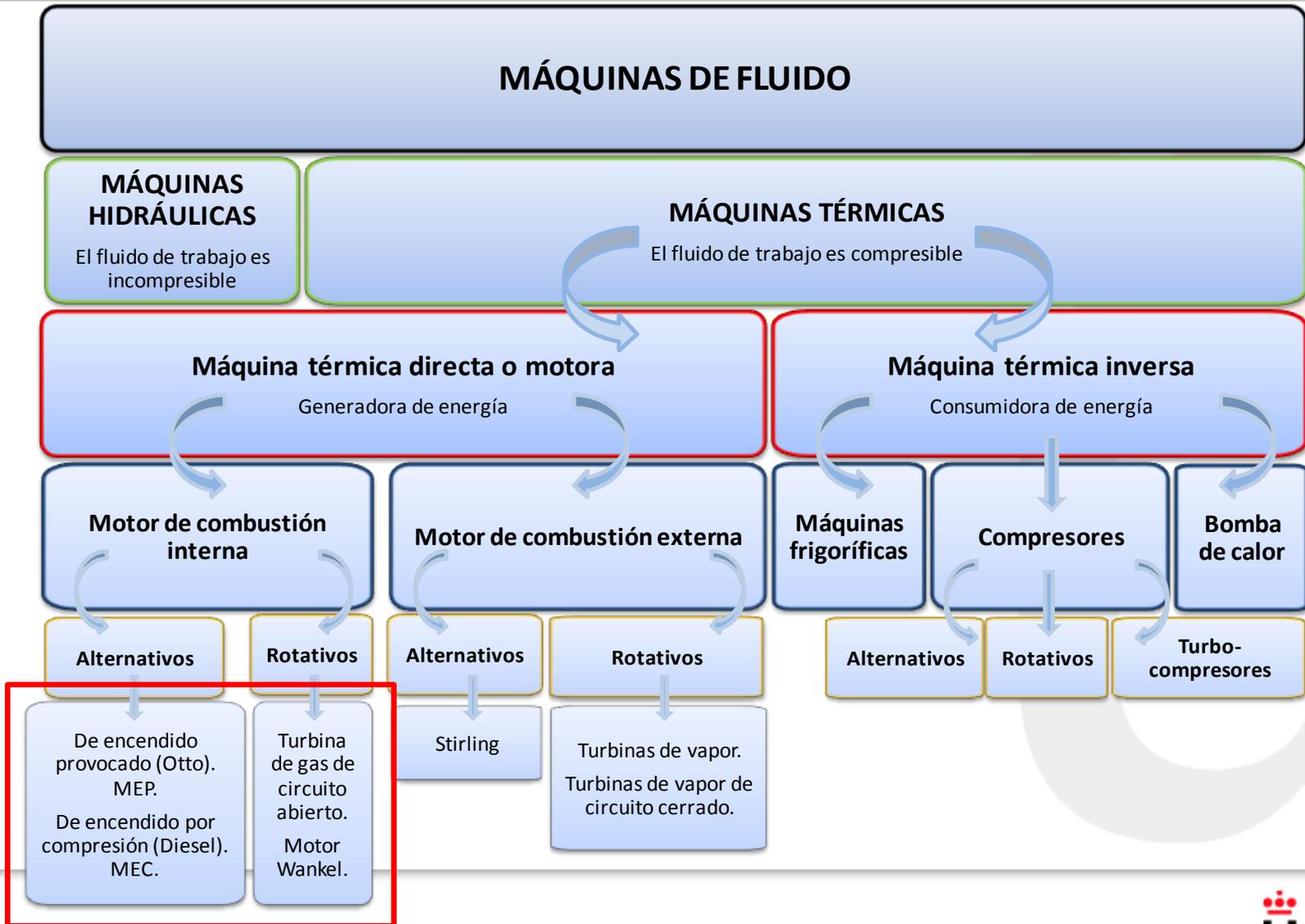
Ciclos de potencia con gases. Son ciclos abiertos.

*Turbinas de Gas*

*Motores de combustión interna alternativos (MCIA)*



# 1. Introducción



# 1. Introducción

## APLICACIONES DE LOS MOTORES TÉRMICOS.

Pequeños motores	Grupos electrógenos, motosierras, motobombas, cortadoras de césped, etc. (MEP)
Motocicletas	Motor de encendido provocado (MEP)
Automóviles	Motor de encendido provocado (MEP) Motor de encendido por compresión (MEC)
Camiones	Motor de encendido por compresión (MEC)
Maquinaria agrícola y de construcción	Motor de encendido por compresión (MEC)
Propulsión marina	Comercial y militar: MEC, turbina de vapor y de gas Turismo: MEP
Producción eléctrica	Turbina de vapor MEC Turbina de gas
Turbosobrealimentación de motores de combustión interna alternativos	Turbina de gas
Cogeneración	MEC Turbina de gas Turbina de vapor
Propulsión aeronáutica	MEP Turbina de gas

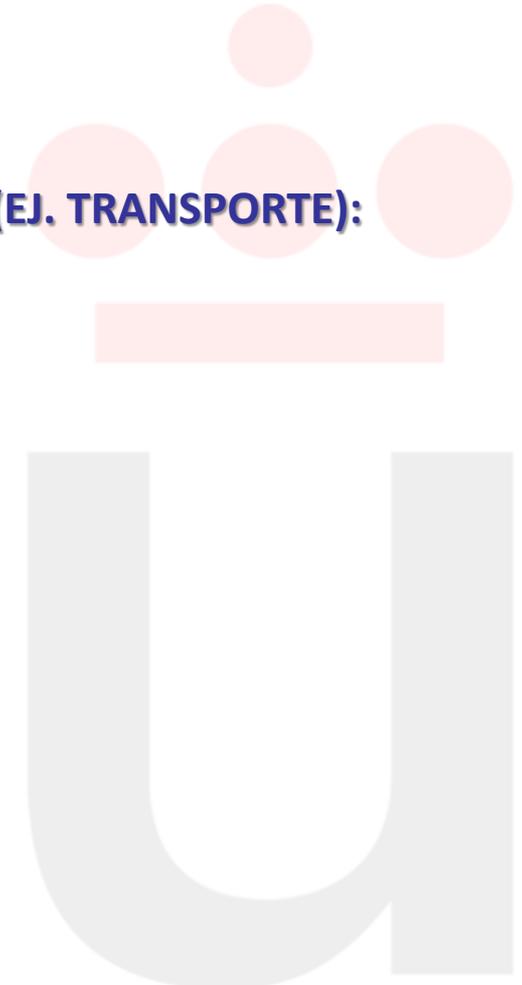
# 1. Introducción

## FACTORES QUE INFLUYEN EN LA ELECCIÓN DEL TIPO DE MOTOR (EJ. TRANSPORTE):

- Coste.
- Condiciones de utilización.
- Fiabilidad.
- Emisiones contaminantes.

## COMPARACIÓN DE MOTORES:

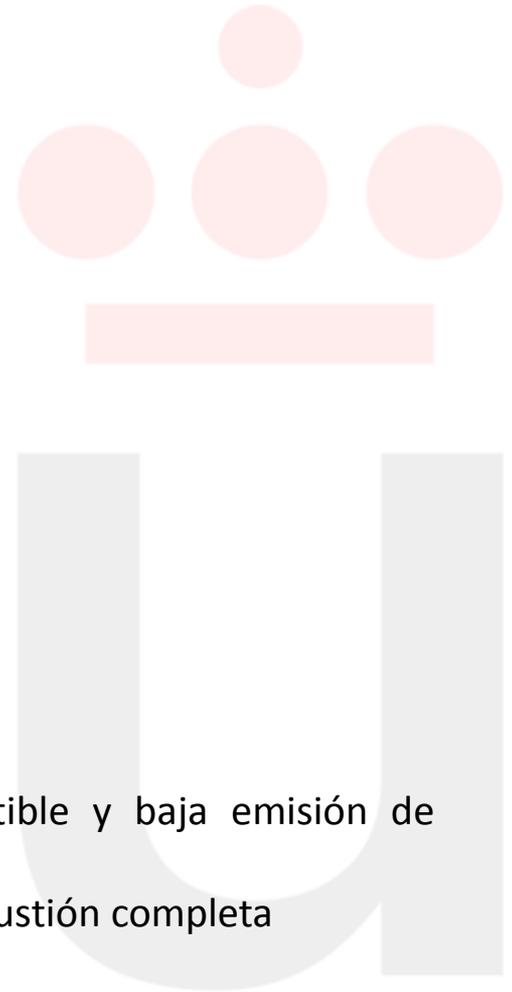
- Potencia.
- Emisión de contaminantes.
- Consumo de combustible.



# 1. Introducción

## Motores Otto (MEP) y Diesel (MEC)

- Consumo de combustible:  
MEC consume un 25-30% menos que un MEP
- Rendimiento a plena carga:  
MEP (~30%), MEC (~40%).
- Relación peso/potencia:  
Mayor para los MEC.
- Tipo de combustible  
Mayor sensibilidad a las propiedades de los combustibles en MEP.
- Emisión de contaminantes (contaminantes/km):  
Mayor para los MEP (carburación).
- Desarrollos actuales:
  - MEP (inyección): mayores potencias, economía de combustible y baja emisión de contaminantes.
  - Motores de carga estratificada: ↓ emisiones → favorece combustión completa



# 1. Introducción

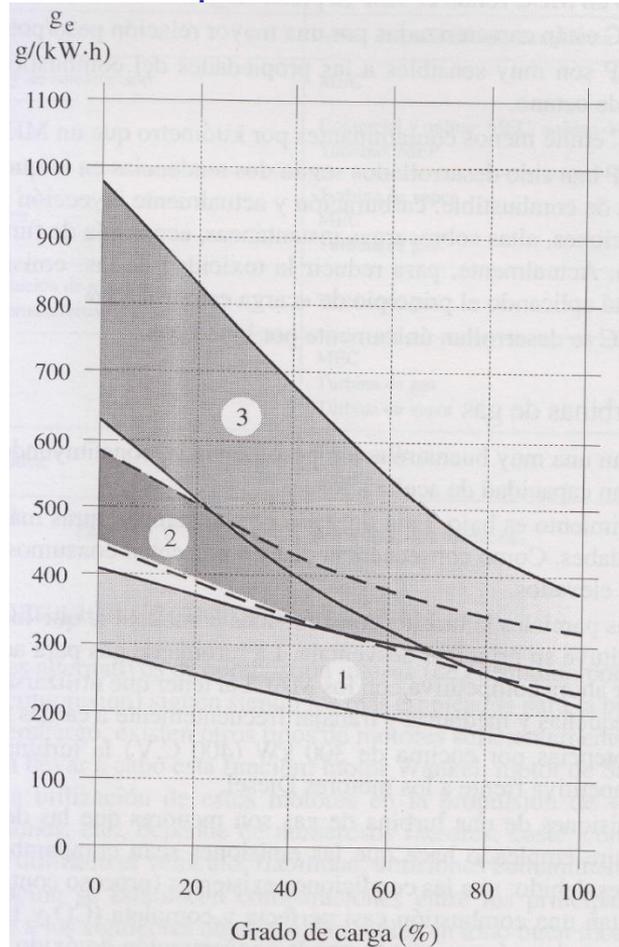
## Turbinas de gas

- Consumo específico de combustible:  
Mayores que los MCI (principalmente a cargas parciales).
- Rendimiento:  
Menor que MCI, sobre todo a cargas parciales → aplicación a vehículos de pequeño tamaño no competitiva.
- Relación peso/potencia:  
Menor que los MCI (muy ligeros y gran capacidad de aceleración).
- Emisión de contaminantes (contaminantes/km):  
Menor que los MCI y comparable a los MCI → combustible gaseoso => buena mezcla => combustión completa. Altas temperaturas => NOx
- Desarrollos actuales:
  - Para aviones comerciales y militares → bajo peso, elevada potencia, dimensiones reducidas
  - Competitivas con los MCI para potencias superiores a 350-400 CV.

# 1. Introducción

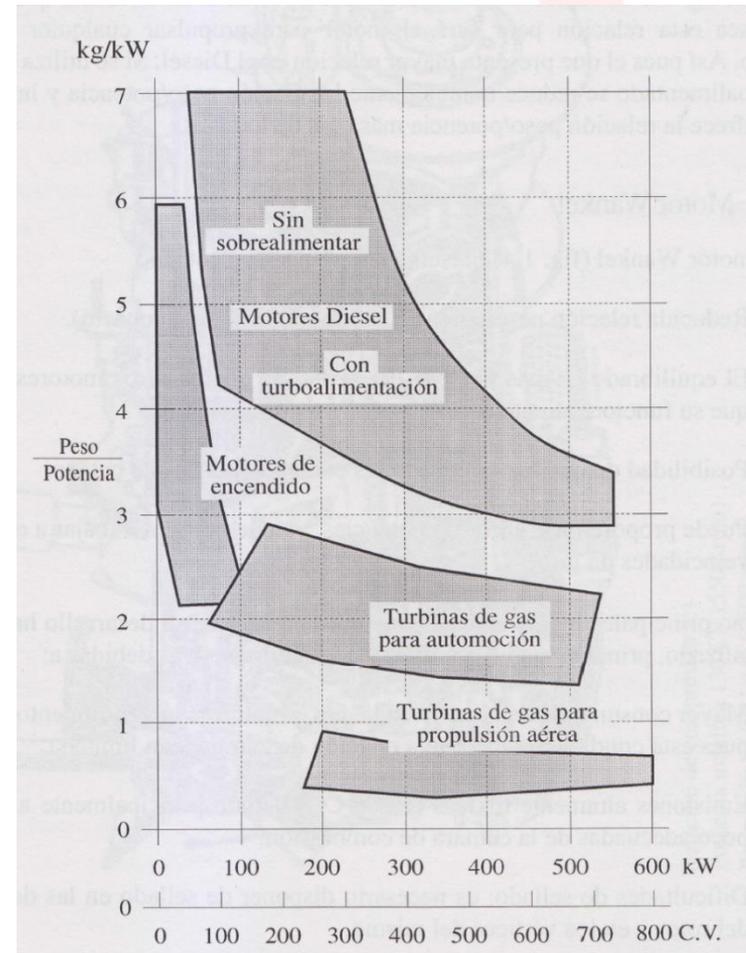
## COMPARACIÓN DE MOTORES:

Consumo específico de combustible:



1: MEC. 2: MEP. 3: Turbina de gas.

Relación peso/potencia:



## 2. Motores de combustión interna alternativos (MCIA)

El origen del aumento de T para realizar la transformación en W no es un intercambio de calor, sino un proceso de combustión en el propio fluido de trabajo.

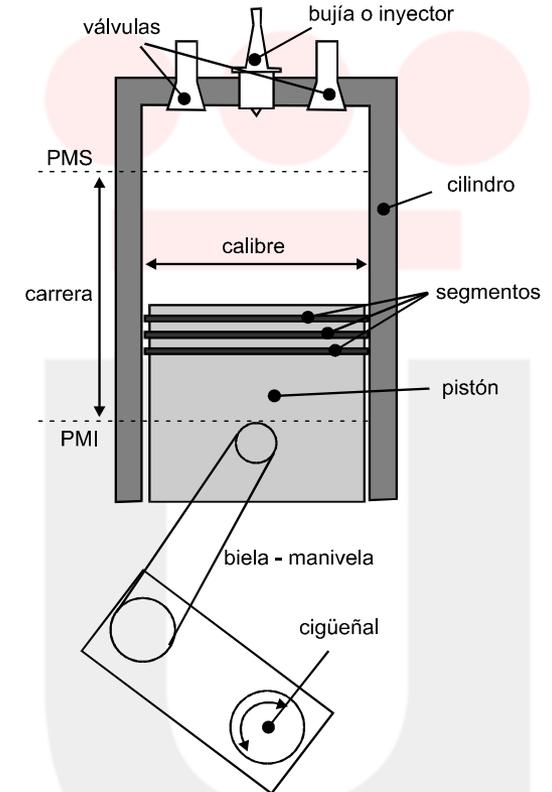
### Parámetros básicos y constituyentes de los motores:

Calibre	Puntos Muertos Superior e Inferior
Carrera	Relación de compresión
Cilindrada	Válvulas de admisión y Escape
Bujía	Inyector
Biela	Cigüeñal

### Dos tipos básicos de motores:

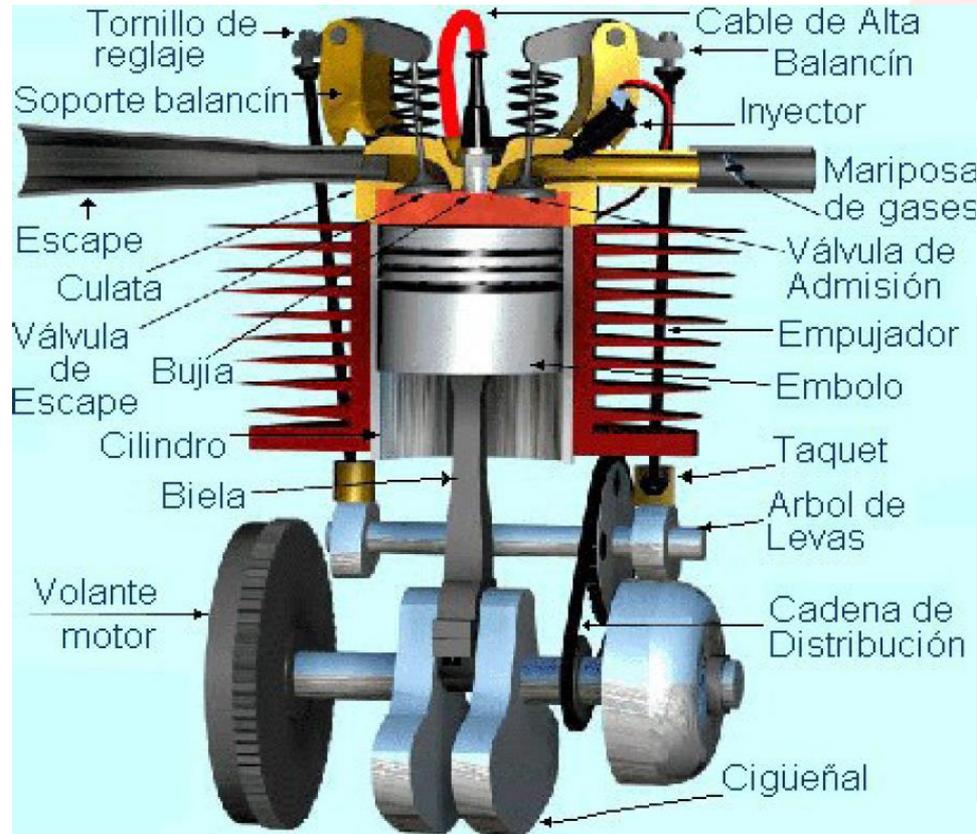
- Encendido provocado (por chispa) – MEP (ciclo de Otto)
- Encendido por compresión – MEC (ciclo de Diésel)

Caracterización: Número de transformaciones – Tiempos



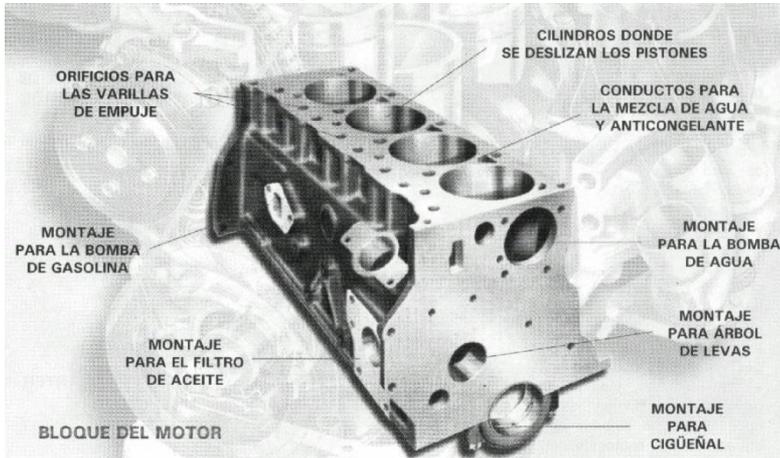
## 2. Motores de combustión interna alternativos (MCIA)

Esquema sencillo de un motor de  
encendido provocado (MEP)



## 2. Motores de combustión interna alternativos (MCIA)

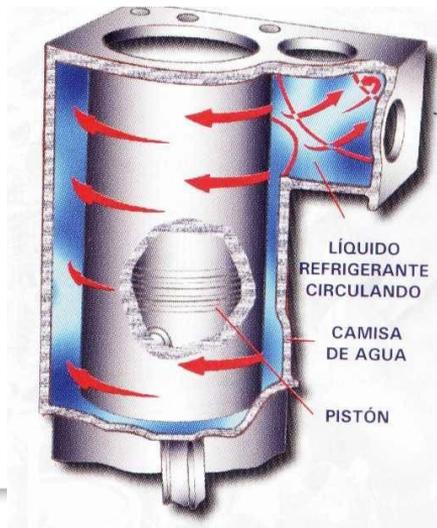
### BLOQUE DEL MOTOR



### CULATA

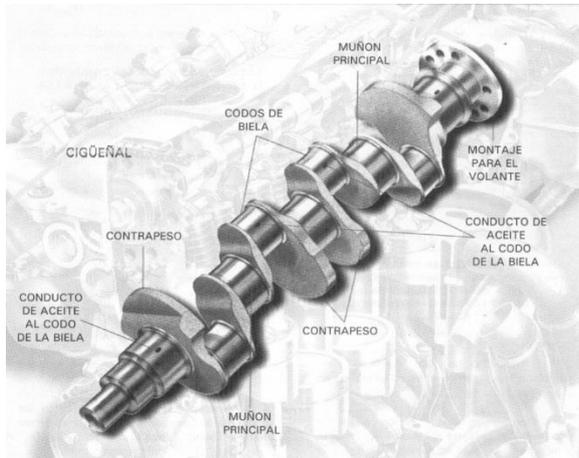


### CILINDRO Y PISTÓN



## 2. Motores de combustión interna alternativos (MCIA)

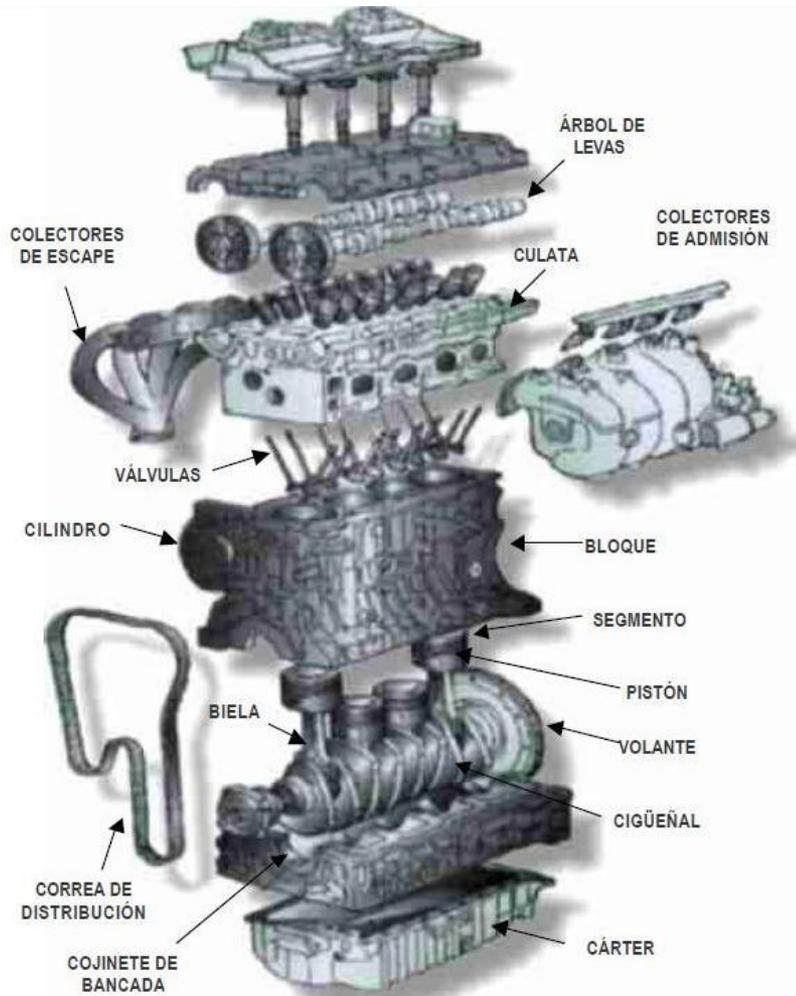
### CIGÜEÑAL



### ÁRBOL DE LEVAS

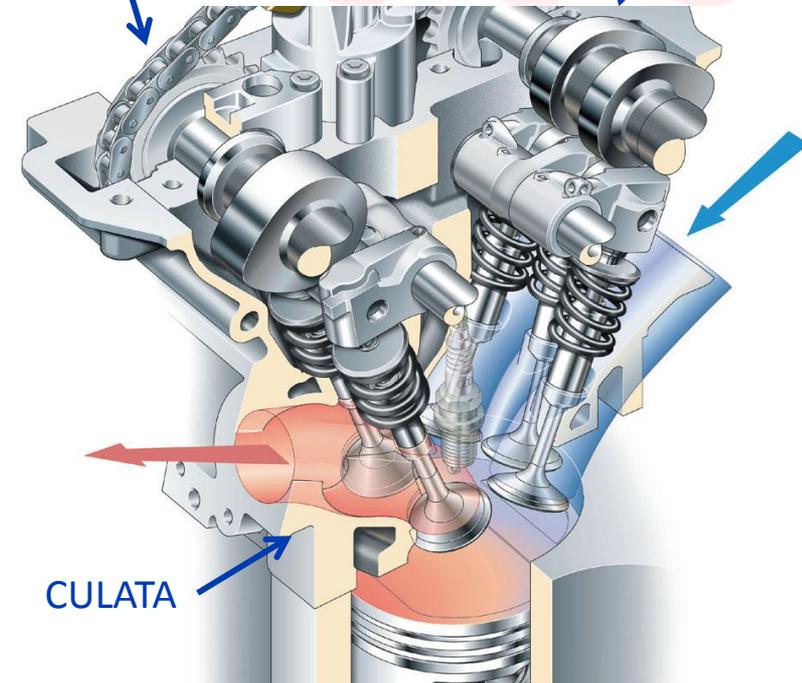


## 2. Motores de combustión interna alternativos (MCIA)



CORREA O CADENA DE DISTRIBUCIÓN

ÁRBOL DE LEVAS

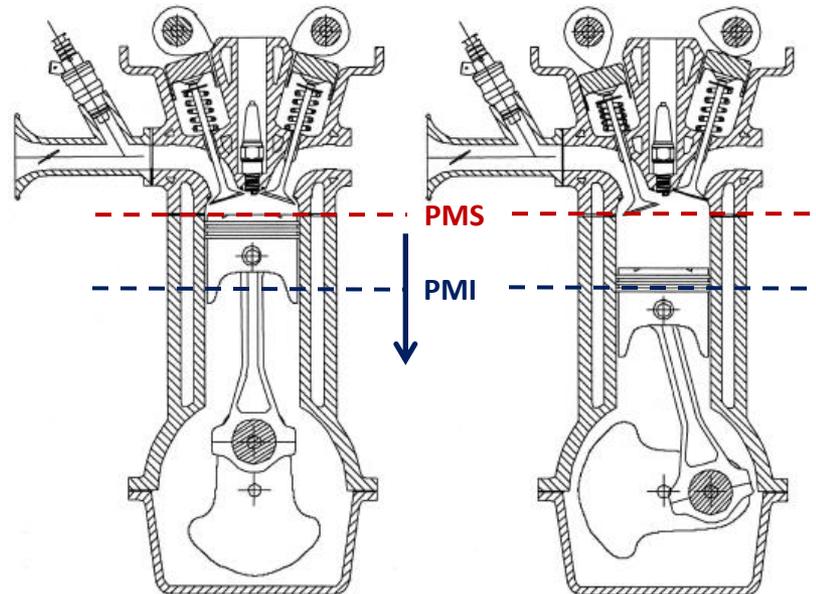


## 2. Motores de combustión interna alternativos (MCIA)

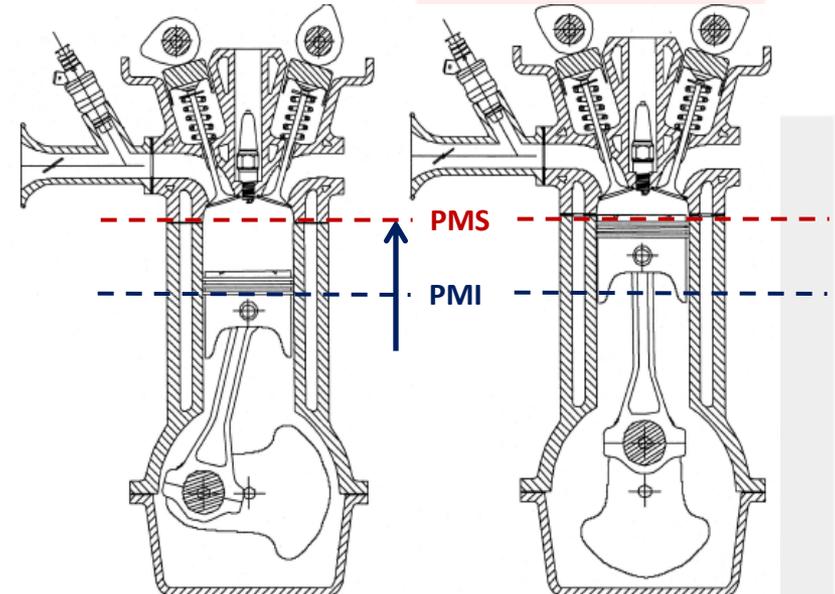
### Ciclo de cuatro tiempos

- Se completa en cuatro carreras del pistón.
- Un ciclo equivale a dos revoluciones del cigüeñal.
- Fases: admisión – compresión – combustión y expansión - escape

Carrera de admisión



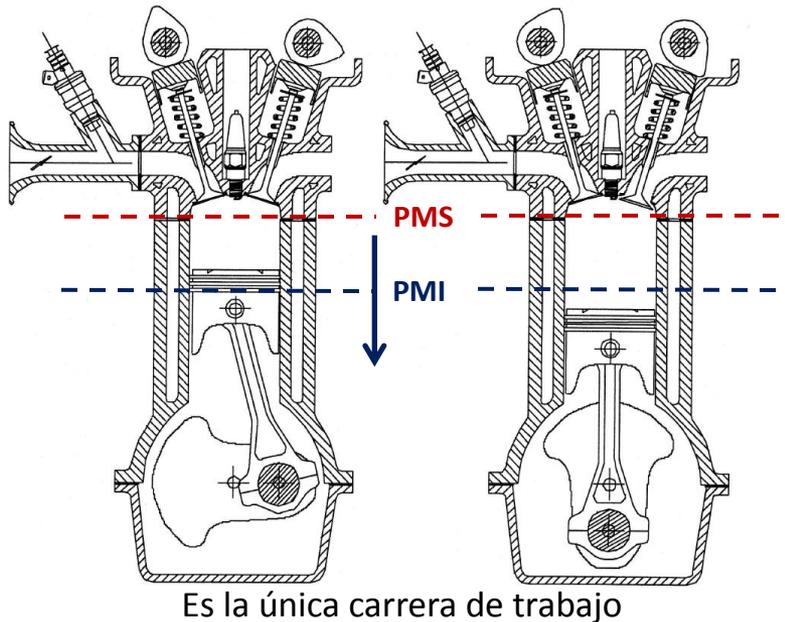
Carrera de compresión



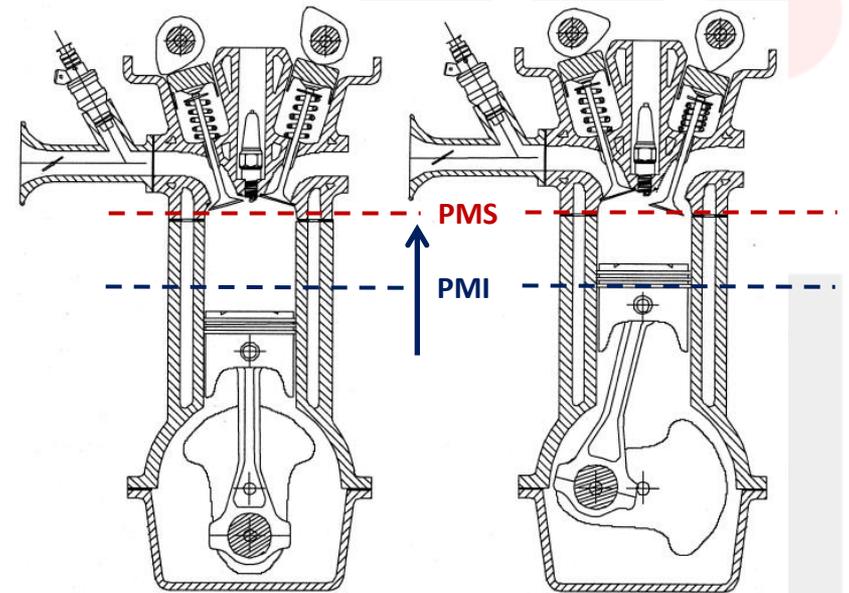
## 2. Motores de combustión interna alternativos (MCIA)

### Ciclo de cuatro tiempos

#### Carrera de combustión-expansión



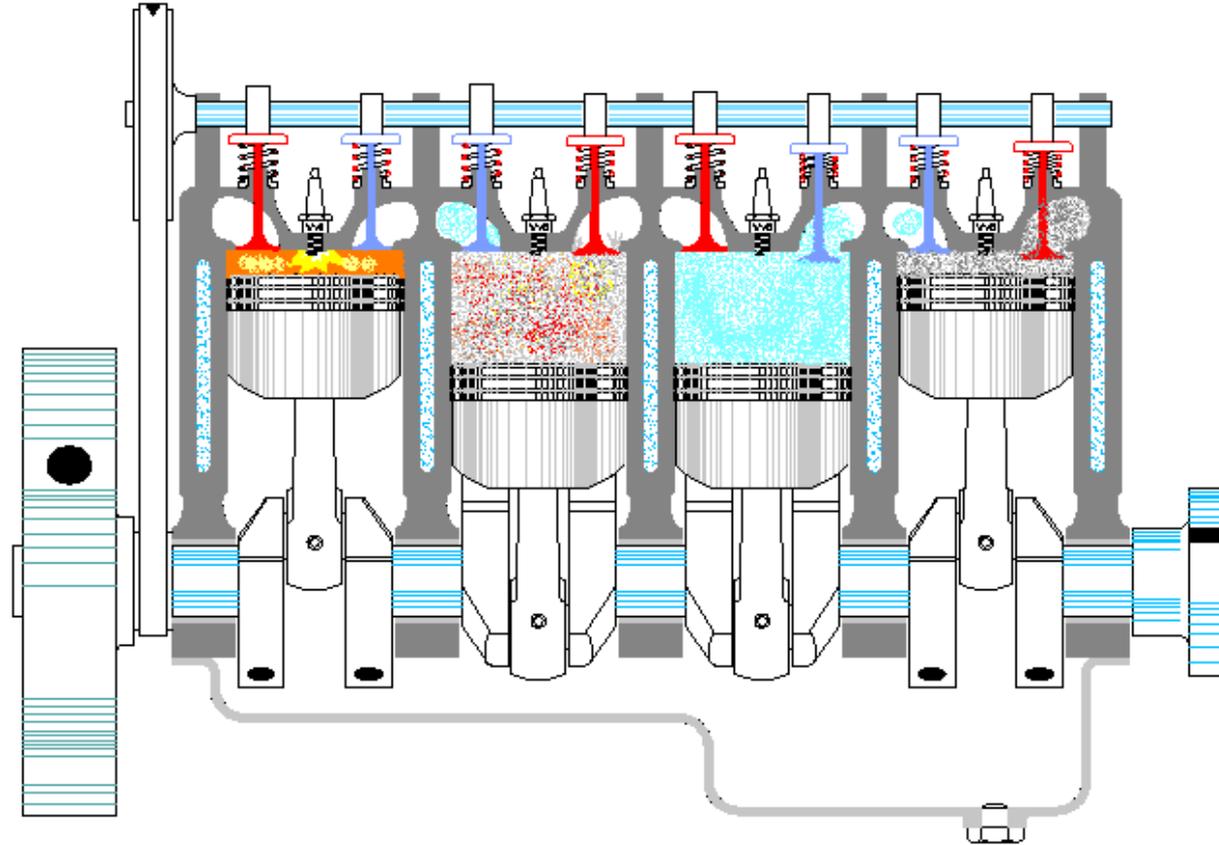
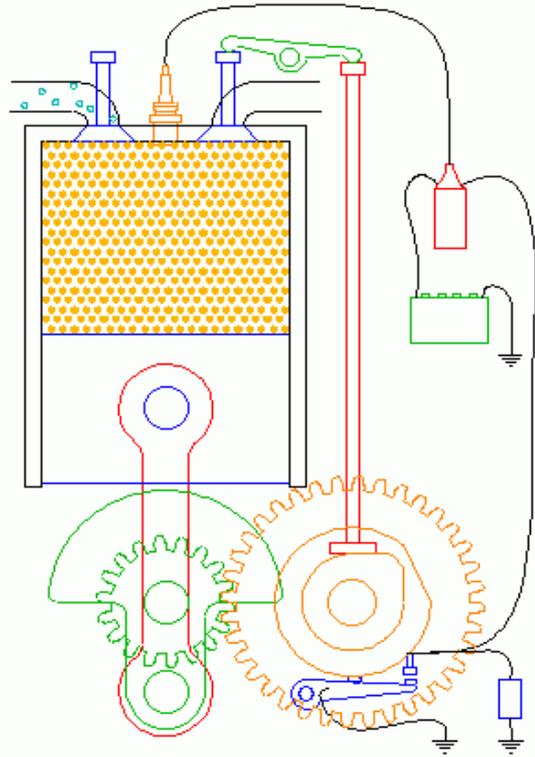
#### Carrera de escape



- Proceso de renovación de la carga: carrera de admisión y escape.
- Proceso termodinámico básico: compresión, combustión y expansión.

## 2. Motores de combustión interna alternativos (MCIA)

### Funcionamiento de un motor de cuatro tiempos (MEP)



## 2. Motores de combustión interna alternativos (MCIA)

### Ciclo de cuatro tiempos

Diagrama P-V real

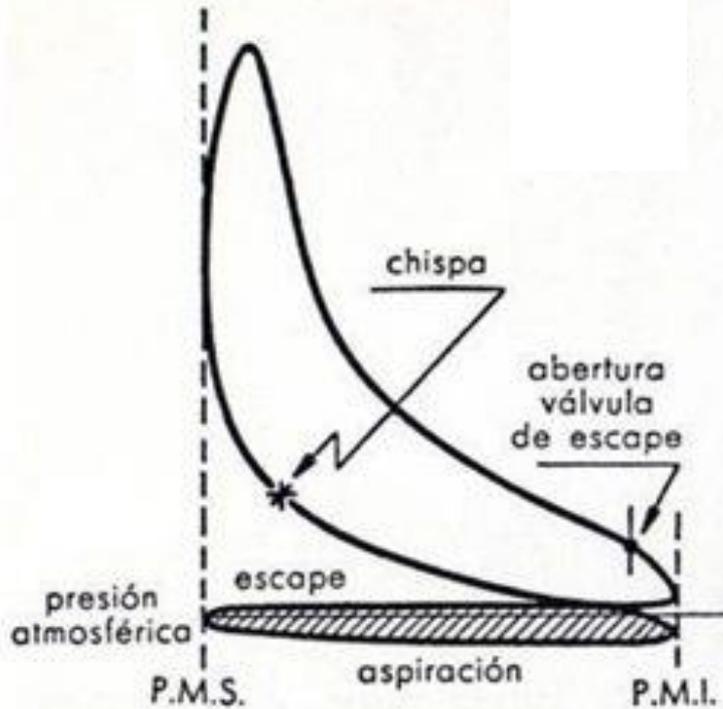
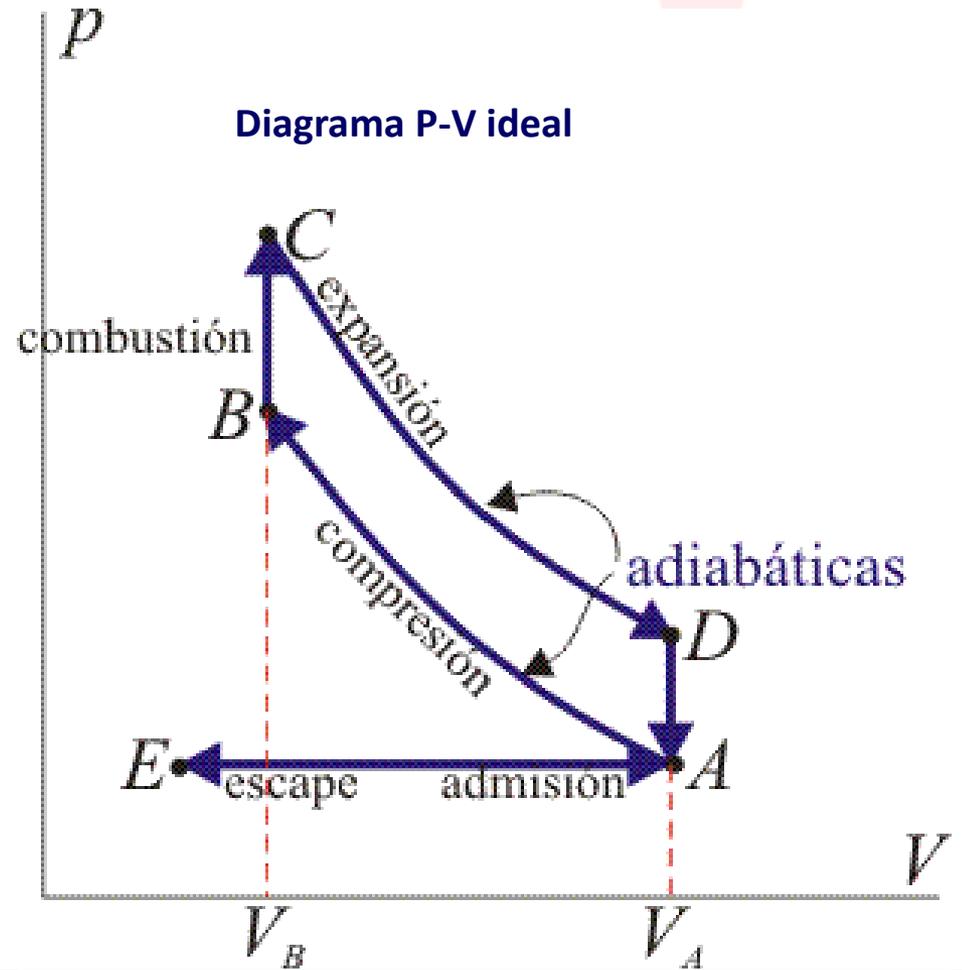
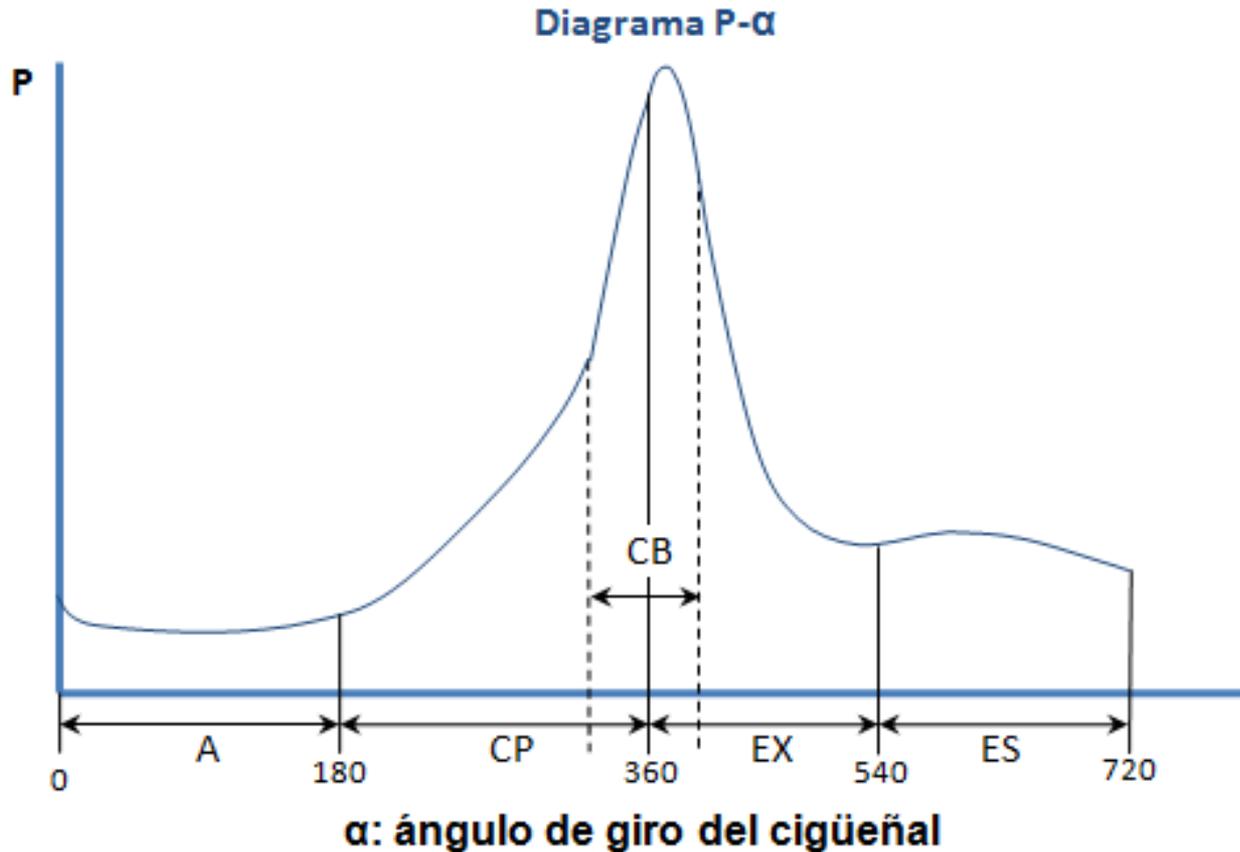


Diagrama P-V ideal



## 2. Motores de combustión interna alternativos (MCIA)

### Ciclo de cuatro tiempos

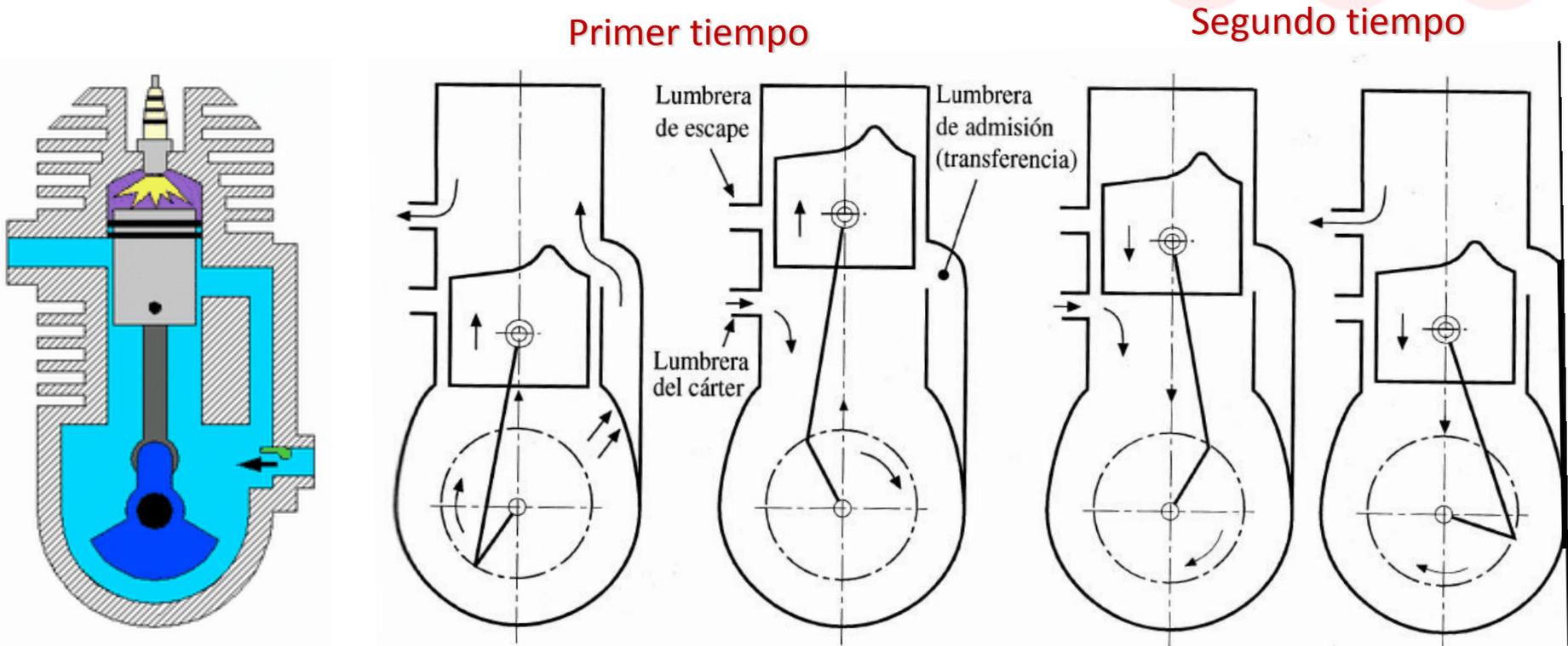


A: Admisión; CP: compresión; EX: Expansión; ES: Escape; CB: Combustión

## 2. Motores de combustión interna alternativos (MCIA)

### Ciclo de dos tiempos

- Se cumple en dos carreras del pistón.
- Un ciclo equivale a una revolución del cigüeñal.
- Fases: 1<sup>er</sup> tiempo (compresión y admisión); 2<sup>o</sup> tiempo (explosión y escape)



## 2. Motores de combustión interna alternativos (MCIA)

### Ciclo de dos tiempos

#### CARACTERÍSTICAS BÁSICAS

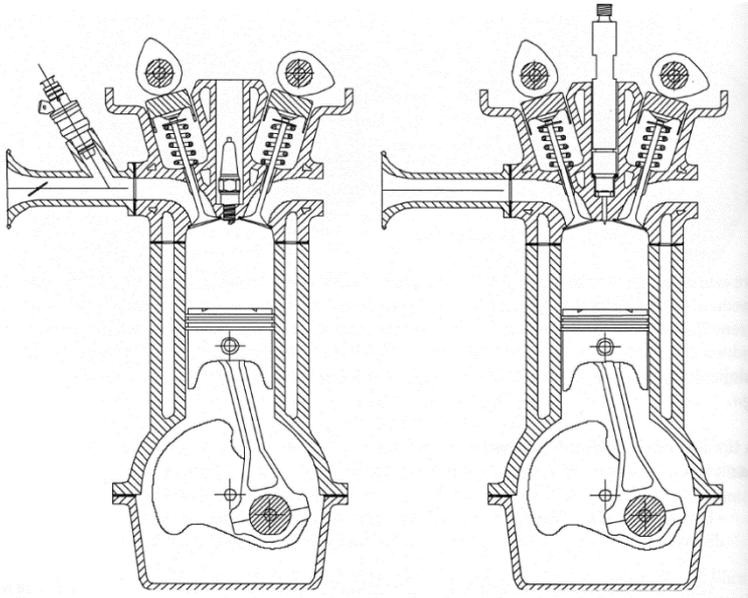
- Mayor potencia por unidad de tamaño (cilindrada) para un mismo régimen de giro que un 4T.
- Imperfecta renovación de la carga → reduce la potencia. Peor en MEP con carburador.
- Se emplea en:
  - Pequeñas cilindradas: simplicidad mecánica y menor coste.
  - Grandes cilindradas (MEC): mayor potencia por unidad de tamaño.

#### DIFERENCIAS CON EL MOTOR DE 4 TIEMPOS

- Ambas caras del pistón realizan una función.
- Lumbreras en lugar de válvulas.
- Cáster del cigüeñal estanco y empleo como cámara de pre-compresión.
- Lubricación incorporando aceite al combustible.
- Mayor eficacia termodinámica, menor eficiencia económica y más contaminación.
- Menor freno motor.

## 2. Motores de combustión interna alternativos (MCIA)

### Tipos de motores: encendido



Motor de cuatro tiempos de  
encendido por chispa (MEP; izq.) y de  
encendido por compresión (MEC; dcha.)



Ciclo de referencia (teórico)

- MEP → Otto
- MEC → C. Diesel

## 2. Motores de combustión interna alternativos (MCIA)

### Comparación básica de los MEP y MEC

	MEP	MEC
Combustión	- V cte. (teórico) - Gasolina	- P cte. (teórico) - Diesel
Introducción de combustible	- Carburación - Inyección	- Inyección
Encendido	- Chispa	- Autoignición
Ciclos	- 4T - 2T	- 4T - 2T (↓ consumo)
Relación de compresión	6-11	14-24
Peso	- Menor peso	- Mayor peso

## 2. Motores de combustión interna alternativos (MCIA)

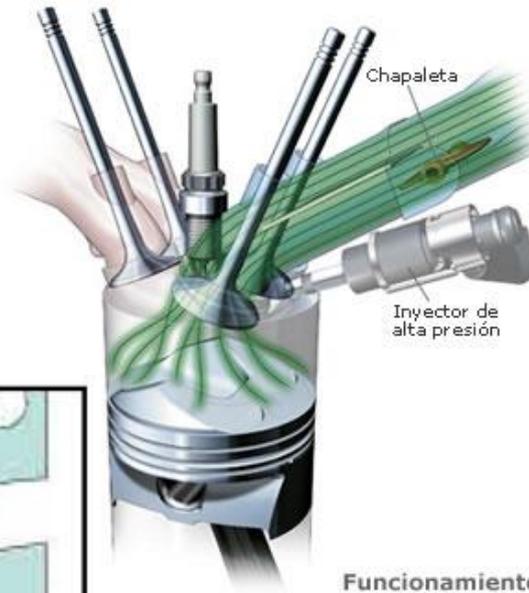
### Valores típicos de presión (bar) y relación de compresión

	Motores para automoción		Motores estacionarios y marinos	
	Otto	Diesel	Otto (a gas)	Diesel
Final aspiración	se supone 1 bar en todos los casos			
Final compresión	9-14	35-45	10-20	30-40
Durante la combustión	40-55	60-75	20-40	60-70
Final expansión	4-5	3	3-4	3-4
Relación de compresión	7-10	14-23	6-10	12-14

# 2. Motores de combustión interna alternativos (MCIA)

## Desarrollos actuales: Carga estratificada

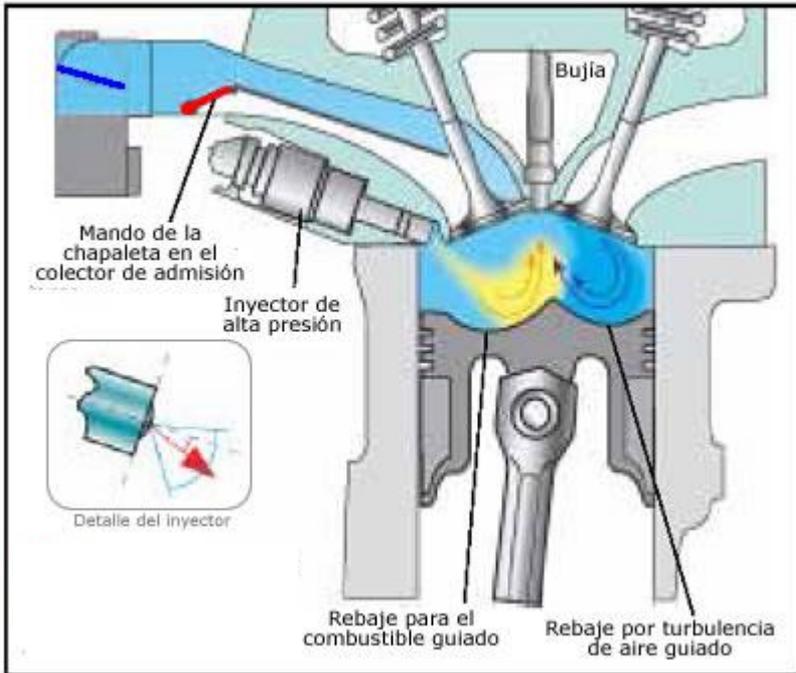
Modo de carga homogénea



Modo de carga estratificada

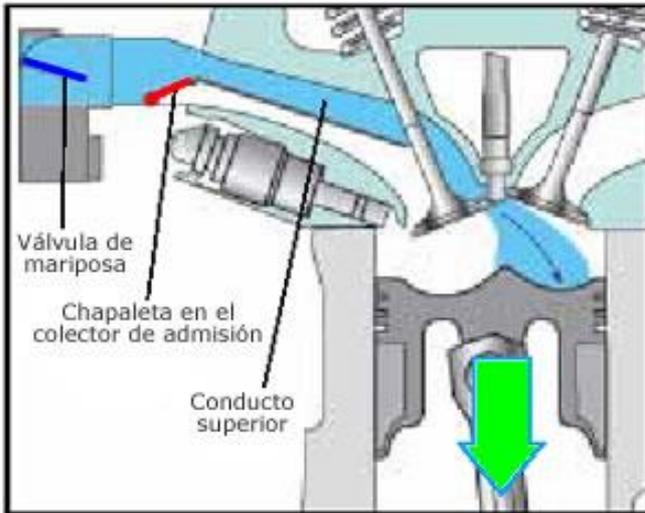


Funcionamiento del motor FSI

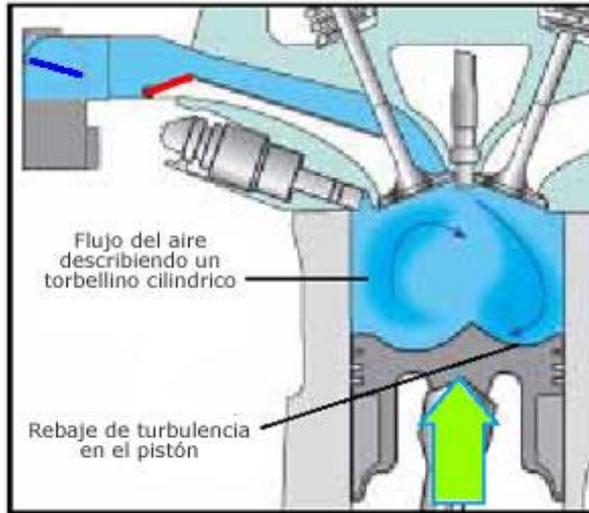


## 2. Motores de combustión interna alternativos (MCIA)

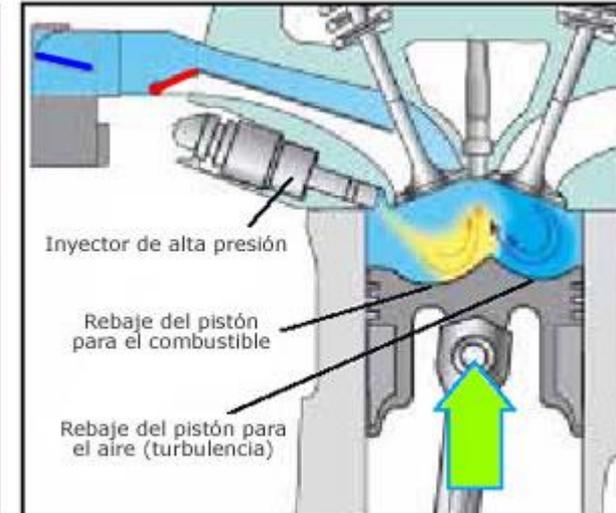
Admisión



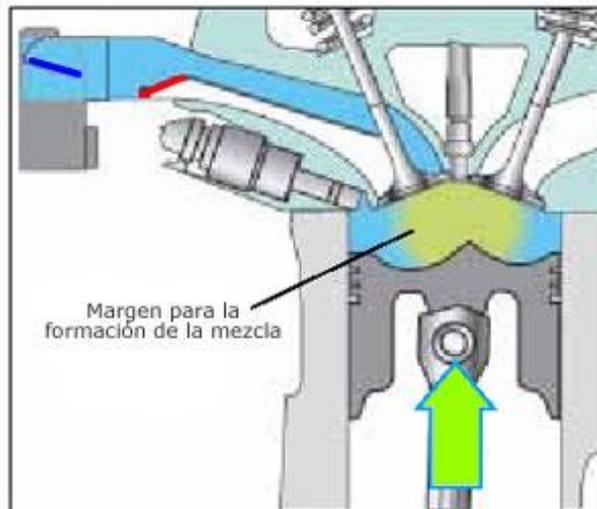
Flujo de aire



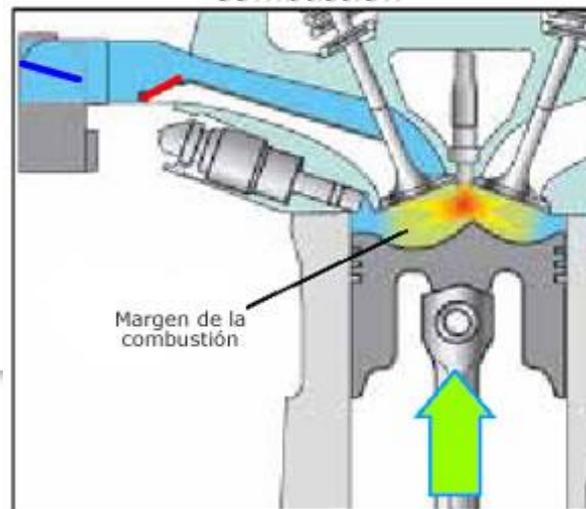
Inyección



Formación de la mezcla



Combustión



Formación de la mezcla y momento de encendido muy precisos.

Inyección a la subida

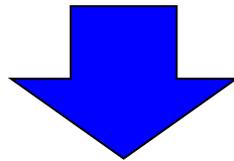
$\lambda$  entre 1,6 y 3.

Disminución de pérdidas de calor en las paredes y aumento del rendimiento térmico.

## 2. Motores de combustión interna alternativos (MCIA)

Análisis detallado de los motores de combustión alternativos:

- Combustión en el cilindro
- Irreversibilidades como rozamiento; gradientes de P y T
- Pérdidas de calor → transferencia gas-sólido
- Trabajo de carga y descarga del cilindro



Análisis simplificado → análisis aire – estándar

## 2. Motores de combustión interna alternativos (MCIA)

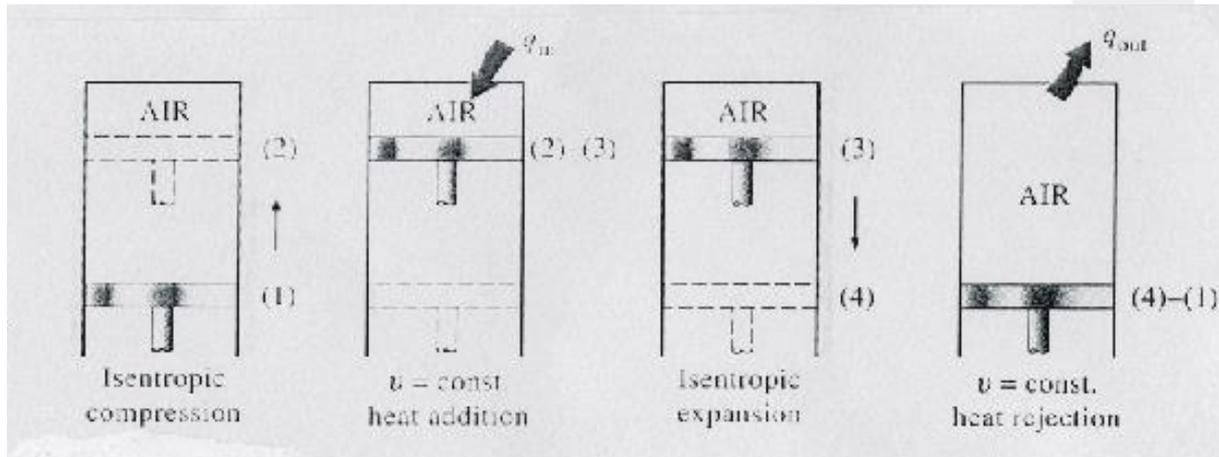
### Ciclo Otto

Para motores de encendido por chispa o provocado

Nikolaus August Otto - 1876

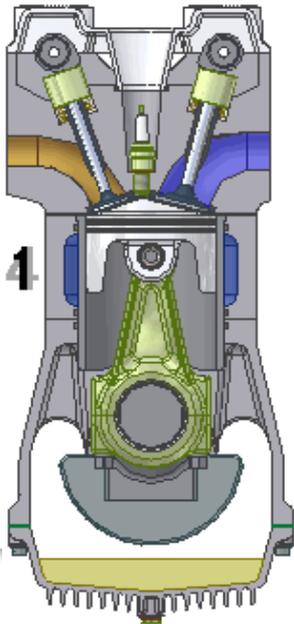
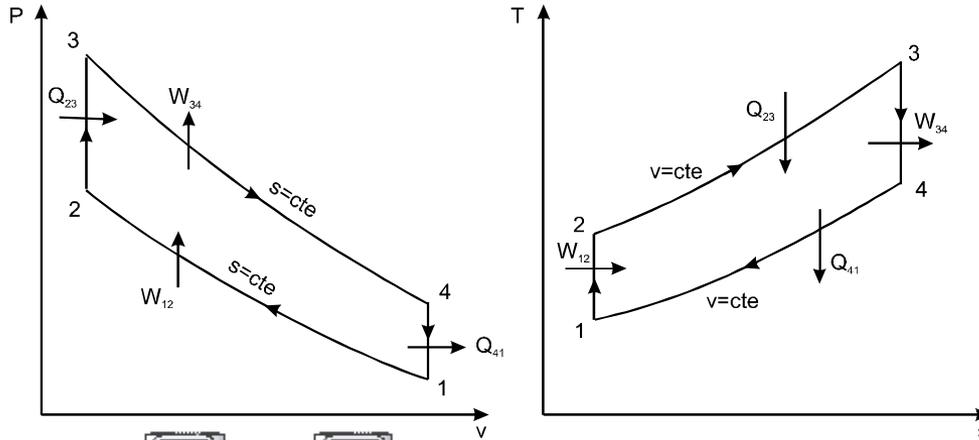
#### ANÁLISIS AIRE-ESTÁNDAR

- Fluido de trabajo aire (gas ideal). No cambia composición ni cantidad.
- Sustitución de la combustión por absorción de  $Q$  de fuente externa a  $V$  cte.
- Desaparecen las etapas de admisión y escape  $\rightarrow$  cesión de  $Q$  en PMI
- Todos los procesos son reversibles.



# 2. Motores de combustión interna alternativos (MCIA)

## Ciclo Otto Aire-Estándar



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

**Absorción de Q (2-3):** El aire absorbe Q a volumen constante de forma instantánea (Ignición de la mezcla)

**Expansión (3-4):** Isoentrópica. Es la carrera de trabajo (PMS → PMI)

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

Rendimiento térmico definido como:

$$\eta = \frac{W_{NETO}}{Q_{ABS}} = \frac{W_{REALIZADO} - W_{RECIBIDO}}{Q_{ABS}} = \frac{W_{34} - W_{12}}{Q_{23}}$$

1<sup>er</sup> Principio de la Termodinámica

$$\Delta u = \Delta q + \Delta w$$

$$\Delta u = (Q_{recibido} - Q_{cedido}) + (W_{recibido} - W_{realizado}) = 0 \text{ (ciclo } \Rightarrow \text{ estado inicial = estado final)}$$

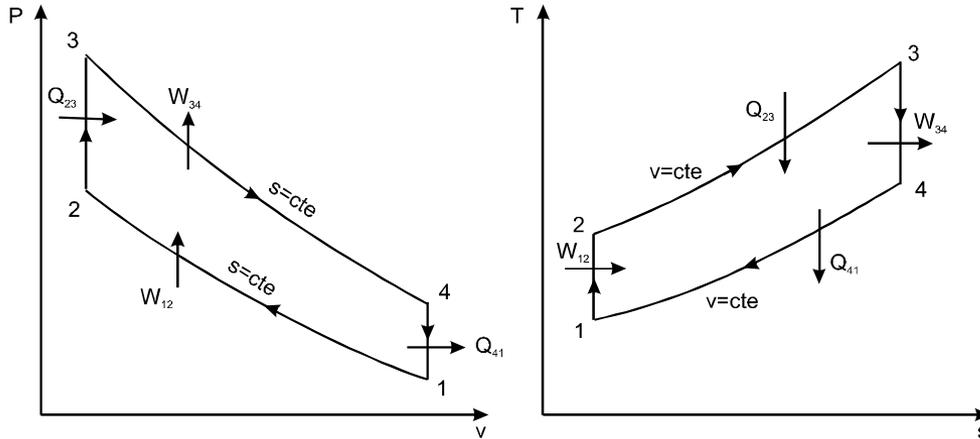
$$(Q_{23} - Q_{41}) + (W_{12} - W_{34}) = 0; \quad W_{34} - W_{12} = Q_{23} - Q_{41}$$

$$\eta = \frac{w_{NETO}}{q_{ABS}} = \frac{w_{REALIZADO} - w_{RECIBIDO}}{q_{ABS}} = \frac{w_{34} - w_{12}}{q_{23}} = \frac{q_{23} - q_{41}}{q_{23}}$$

$$\eta = 1 - \frac{q_{41}}{q_{23}} = 1 - \frac{mC_v(T_4 - T_1)}{mC_v(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \left( \frac{(T_4/T_1) - 1}{(T_3/T_2) - 1} \right)$$

# 2. Motores de combustión interna alternativos (MCIA)

## Ciclo Otto Aire-Estándar



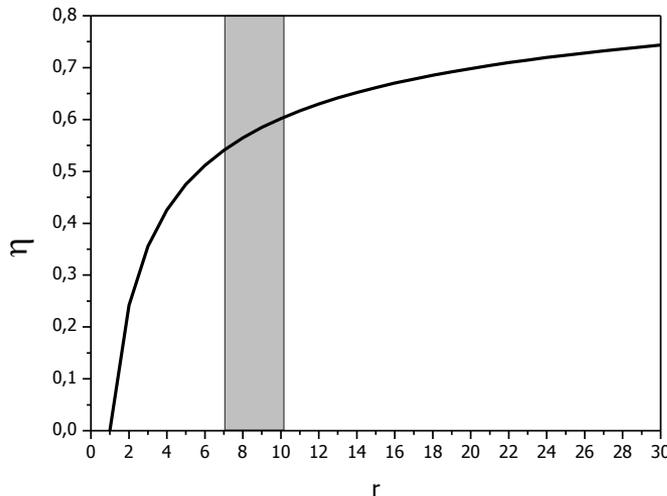
Como 1-2 y 3-4 son procesos isoentrópicos se pueden aplicar las ecuaciones de las adiabáticas.

Además  $v_1=v_4$  y  $v_2=v_3$ .

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\gamma-1} = \frac{1}{r^{\gamma-1}} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{\gamma-1} = \frac{T_4}{T_3} \quad \text{donde } \gamma = C_p / C_v$$

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\gamma-1}} = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}}$$

$r$  (o  $r_v$ ) se define como la relación de compresión  $V_1/V_2$ : a mayor relación de compresión, mayor rendimiento.



Asíntota en el Rto. predicho en el ciclo de Carnot (máximo termodinámico)

Condiciones habituales:

$$r = 7 - 10$$

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

$$\lambda = 0,9 - 1,1$$

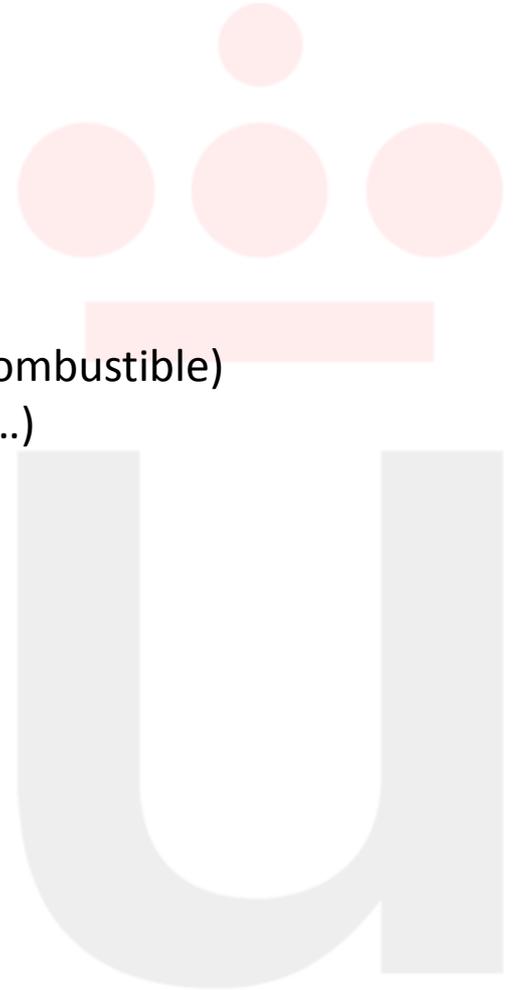
$$\eta = 25 - 30\%$$

## 2. Motores de combustión interna alternativos (MCIA)

### Ciclo Otto Aire-Estándar

#### Aumento de la potencia

- Incrementar cilindrada
- Incrementar la presión (mayor cantidad de aire y combustible)
- Mejorar la fluidodinámica (duplicación de válvulas...)
- Mejorar combustión (diseño motor)
- Reducir la inercia (peso del motor)
- Uso de sistemas de inyección

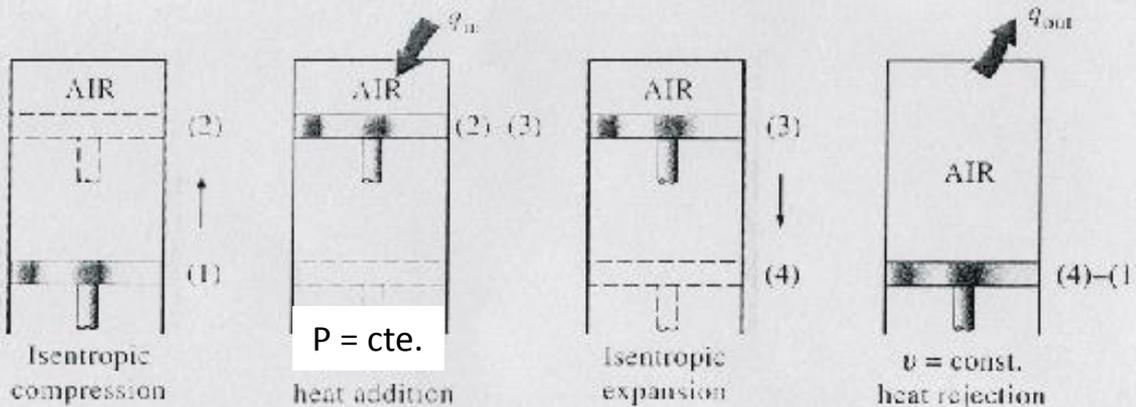
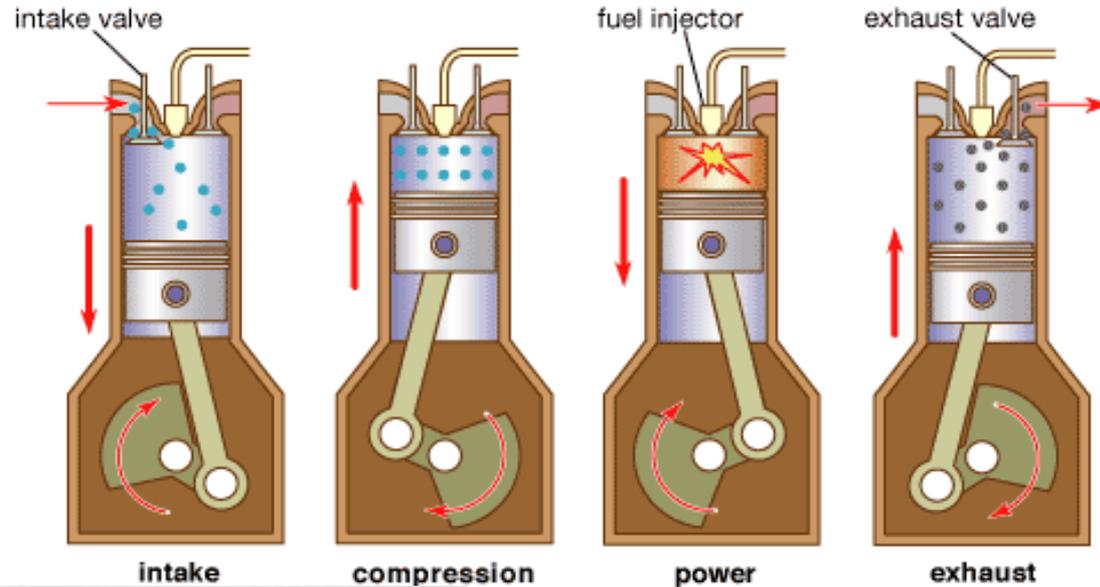


# 2. Motores de combustión interna alternativos (MCIA)

## Ciclo Diésel

### ANÁLISIS AIRE-ESTÁNDAR

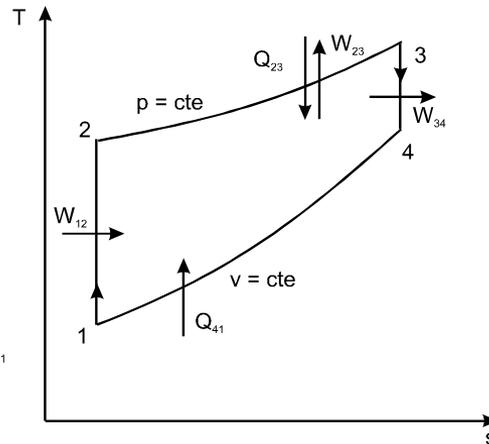
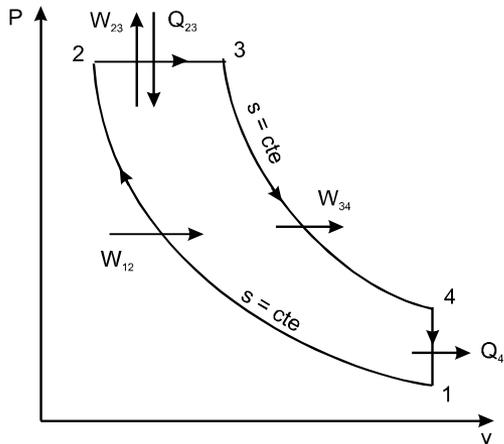
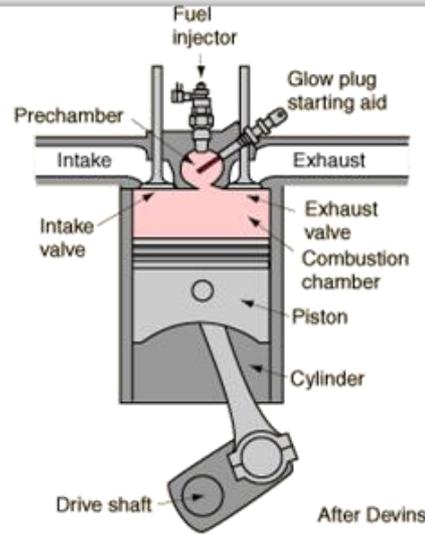
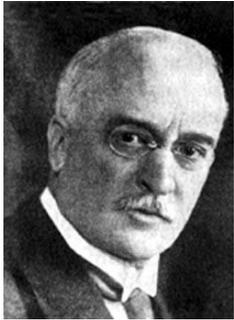
- Fluido de trabajo aire (gas ideal).
- Sustitución de la combustión por absorción de  $Q$  de fuente externa a  $P$  cte.
- Desaparecen las etapas de admisión y escape.
- Todos los procesos son reversibles.



# 2. Motores de combustión interna alternativos (MCIA)

## Ciclo Diésel aire-estándar

### Rudolf Diesel - 1892



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

**Absorción de Q (2-3):** El aire absorbe Q a presión constante de forma que el pistón ha de recorrer parcialmente la carrera de trabajo (PMS →)

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

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

# 2. Motores de combustión interna alternativos (MCIA)

## Ciclo Diésel aire-estándar

### Rendimiento Térmico del ciclo

$$\eta = \frac{W_{NETO}}{Q_{TOTAL\_APORTADO}} = \frac{\sum W_{PRODUCIDO} - \sum (W_{CONSUMIDO})}{\sum Q_{ABSORBIDO}}$$

$$\eta_{DIESEL} = \frac{W_{EXP} - (W_{COMP})}{Q_{ABS}} = \frac{Q_{ABS} - (Q_{CED})}{Q_{ABS}} = 1 - \frac{(Q_{CED})}{Q_{ABS}} = 1 - \frac{(Q_{41})}{Q_{23}}$$

$$\Delta U = Q - W = 0 \rightarrow Q = W$$

$$Q_{41} = C_V \cdot (T_1 - T_4) \quad (> 0) \text{ (J / kg)}$$

$$Q_{23} = C_P \cdot (T_3 - T_2) \quad (> 0) \text{ (J / kg)}$$

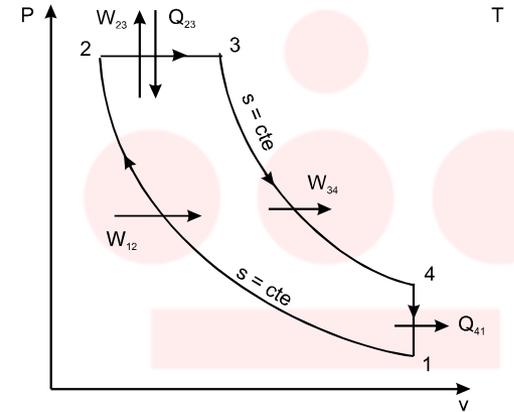
$$\eta_{DIESEL} = 1 - \frac{C_V (T_4 - T_1)}{C_P (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{\gamma \cdot (T_3 - T_2)}$$

Relación de combustión ( $\alpha$  ó  $r_c$ ):  $r_c = \frac{V_3}{V_2}$

Relación de compresión ( $r$  ó  $r_v$ ):  $r = \frac{V_1}{V_2}$

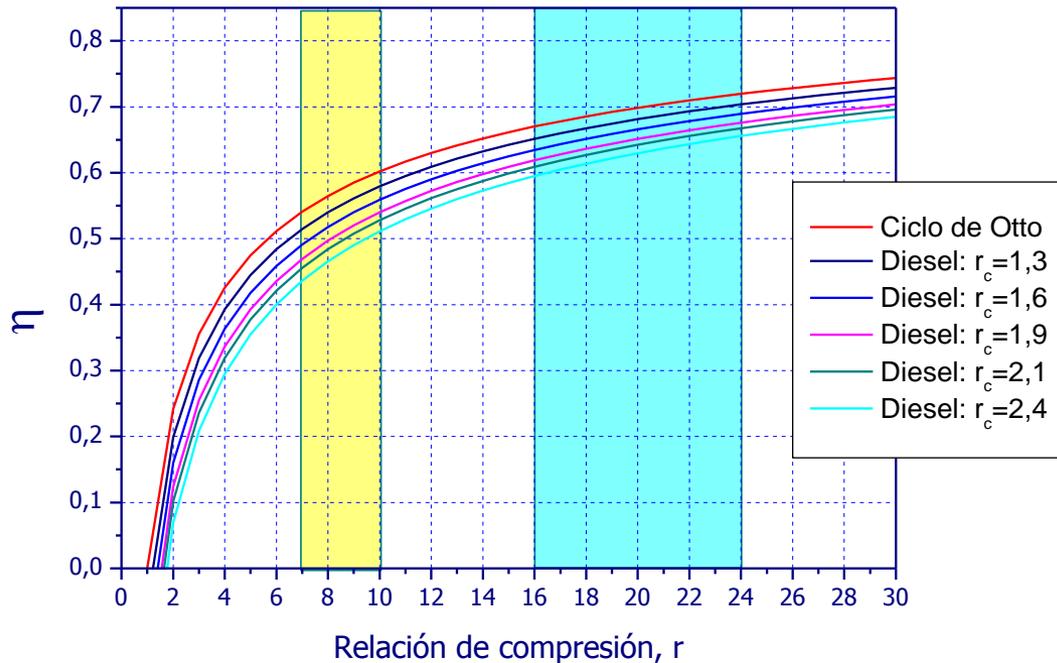
$$\gamma = \frac{C_P}{C_V}$$

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



## 2. Motores de combustión interna alternativos (MCIA)

### Ciclo Diesel aire-estándar



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

$r_c$  = relación de combustión

$r$  = relación de compresión

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)  $\sim 16 - 24$

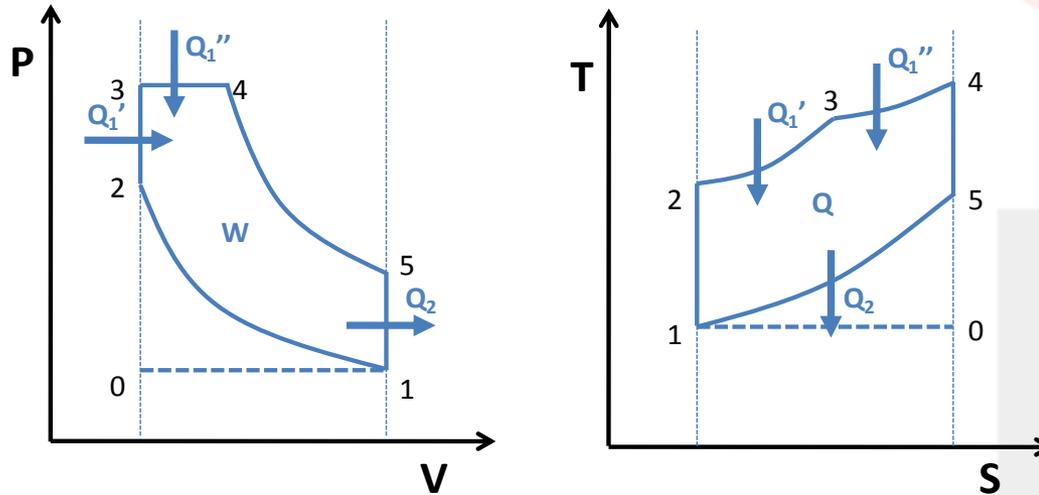
$P$  (Diesel) = 20 – 200 bar

$\lambda = 1,1 - 6$

$\eta = 30 - 45\%$

## 2. Motores de combustión interna alternativos (MCIA)

### Ciclo dual o de Sabathé

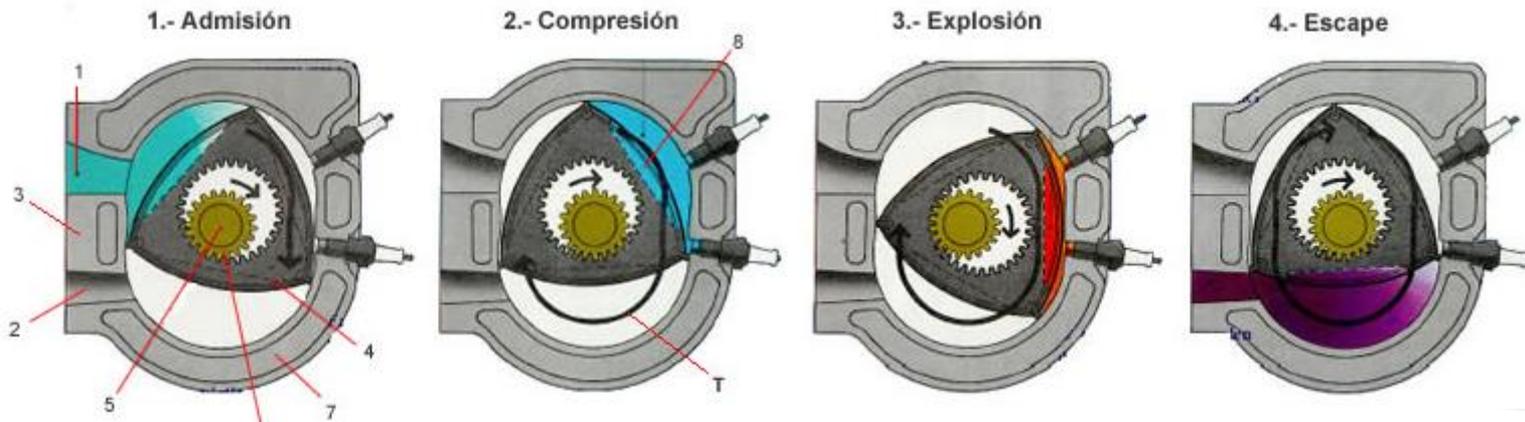
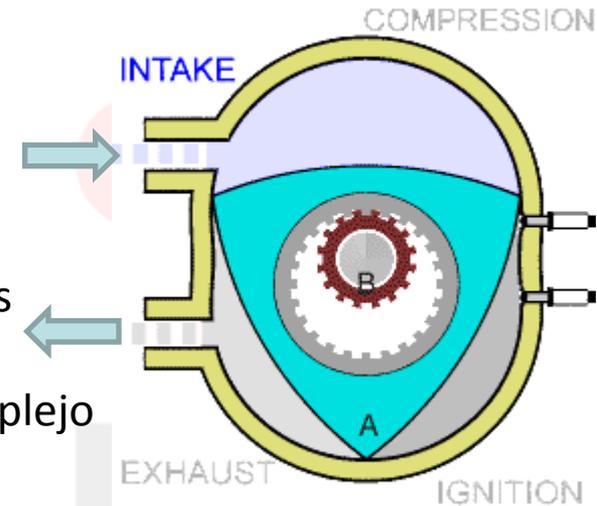


Modela mejor el funcionamiento de los MEC

# 2.1 Motores de combustión interna rotativos (MCIR)

## Motor Wankel

- Combustión interna y rotativo de 4 tiempos
- No hay parones en las partes móviles
- Rotor triangular excéntrico + estator
- Mayor compresión → Mayor potencia
- Menor peso y # piezas móviles; mayor suavidad y vibraciones
- Mayores emisiones ( $\approx 2T$ ); menor eficiencia termod. y estanqueidad por la forma alargada; mantenimiento más complejo
- Poco extendido



## 2.2 Disposiciones de varios cilindros

### Motor en línea (L)

- La más común en automoción, sobre todo L4
- Bastante estable y sencillo

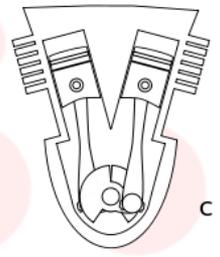
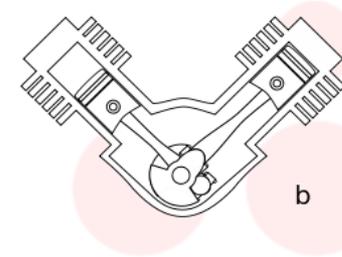
### Motor en V

- Más compactos pero mayor peso.
- Movimiento más suave y continuo
- De 2 a 12 cilindros

### Motores VR y W

### RADIAL O ESTRELLA (L)

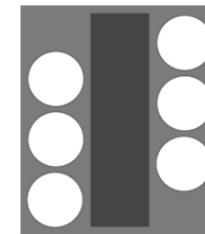
- Varios cilindros (# impar) distribuidos en torno al cigüeñal
- Menos elementos en cigüeñal: ↓ relación peso/potencia
- El fallo de un cilindro es menos problemático



I6



V6



VR6



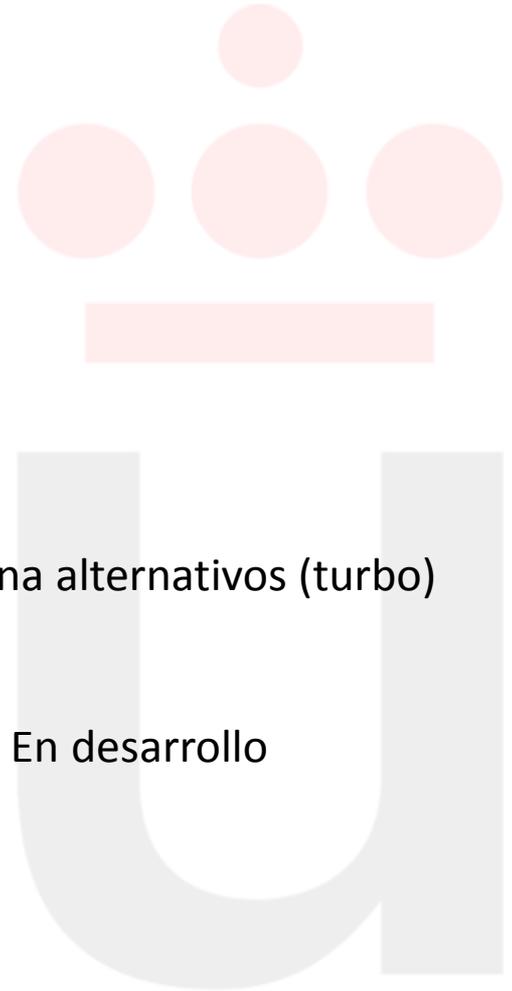
# 3. Turbinas de gas

## Ventajas de la utilización de la turbina de gas

- Potencia específica elevada
- Tiempo reducido de puesta en marcha
- Bajo coste por kW instalado
- Poca necesidad de agua de refrigeración
- Costes de mantenimiento reducido

## Aplicaciones de la turbina de gas

- Turbosobrealimentación de motores de combustión interna alternativos (turbo)
- Producción de energía eléctrica
- Propulsión marina (principalmente en marinas de guerra)
- Propulsión terrestre (locomotoras, camiones, autobuses). En desarrollo
- **Propulsión aeronáutica** → aplicación más importante



# 3. Turbinas de gas

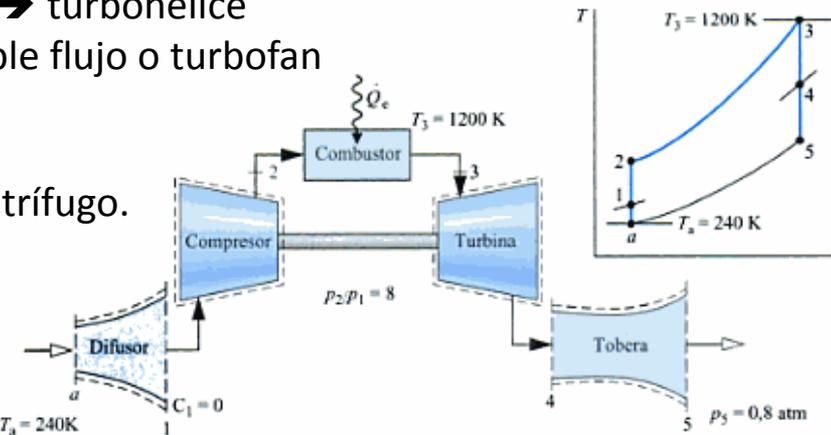
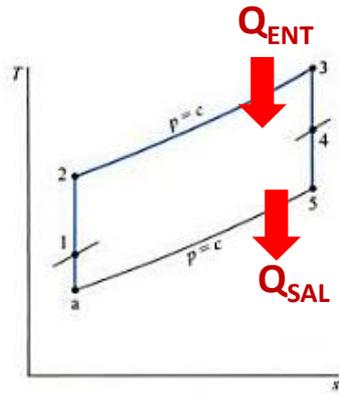
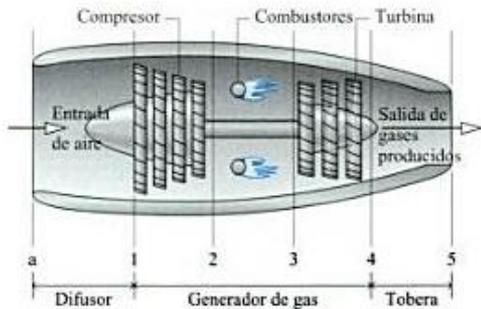
## TURBOPROPULSORES A CHORRO BASADOS EN TURBINA DE GAS

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO → fuerza de reacción experimentada por el sistema en contra de un chorro de fluido a elevada velocidad. Impulsión mediante la aceleración de un fluido en la dirección opuesta al movimiento de la aeronave. Dos posibilidades:

- Aceleración elevada de una masa pequeña de fluido → turborreactores
- Aceleración baja de una masa grande de fluido → turbohélice
- Ambos → turbopropulsor, turborreactor de doble flujo o turbofan

### TURBORREACTOR (TURBOJET)

Es el más antiguo de los motores de reacción. Axial o centrífugo.

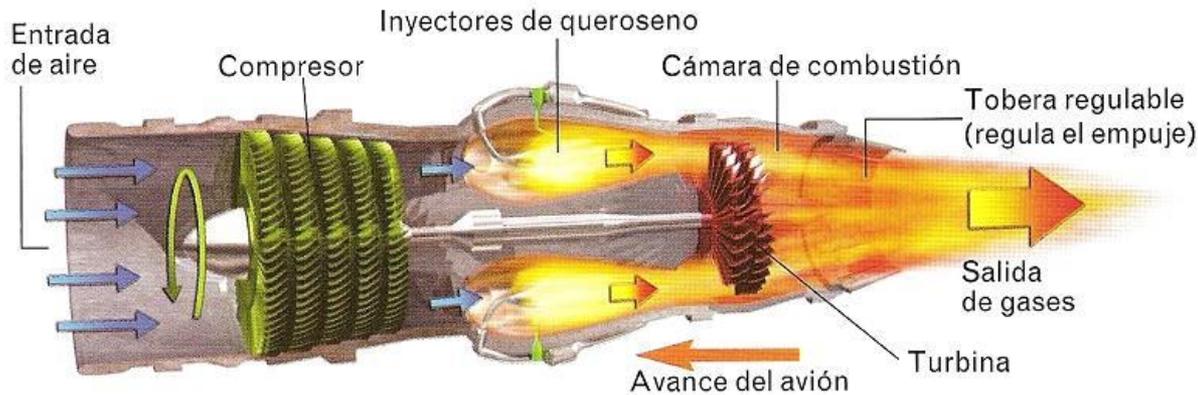


$$W_{\text{neto}} = 0$$

$$\eta_p = \frac{W_p}{Q} = \frac{m(V_{\text{salida}} - V_{\text{entrada}})V_{\text{avión}}}{Q}$$

# 3. Turbinas de gas

## TURBORREACTOR



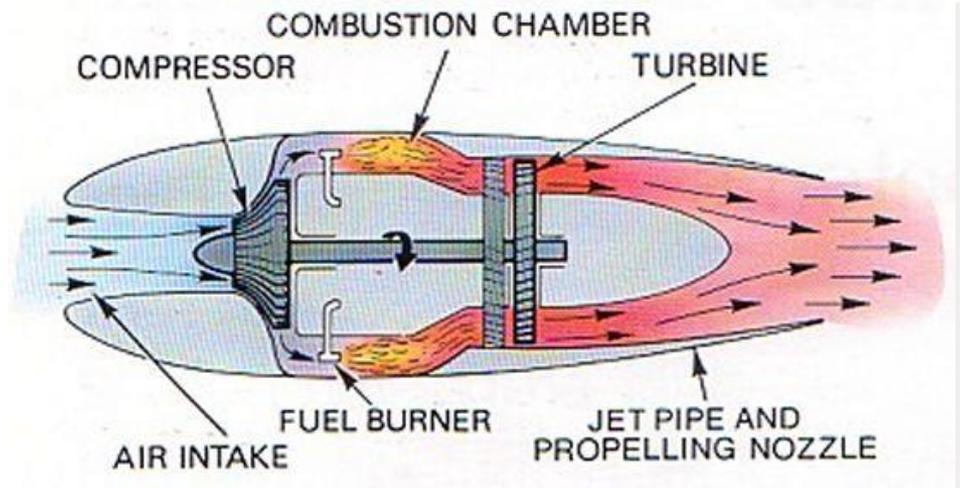
*Turborreactor con compresor axial*

## VENTAJAS

- Diseño simple
- Eficiente a velocidades supersónicas

## INCONVENIENTES

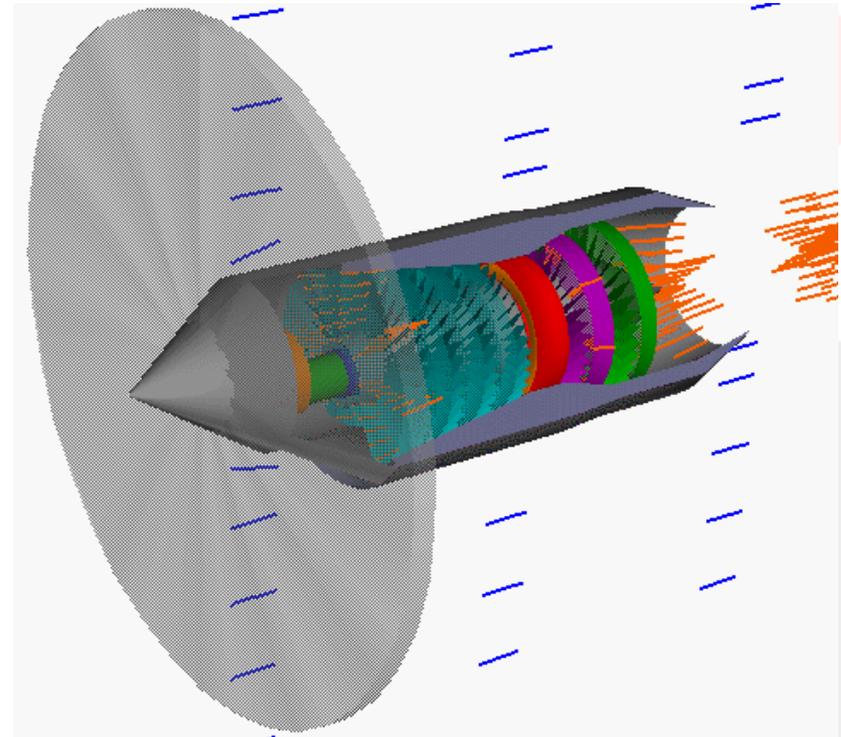
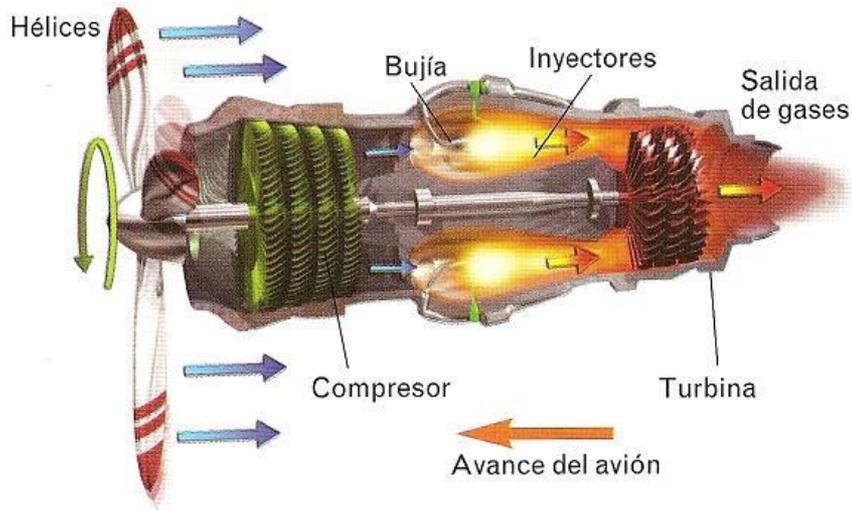
- Baja eficiencia a velocidades subsónicas
- Ruido elevado



*Turborreactor con compresor centrífugo*

# 3. Turbinas de gas

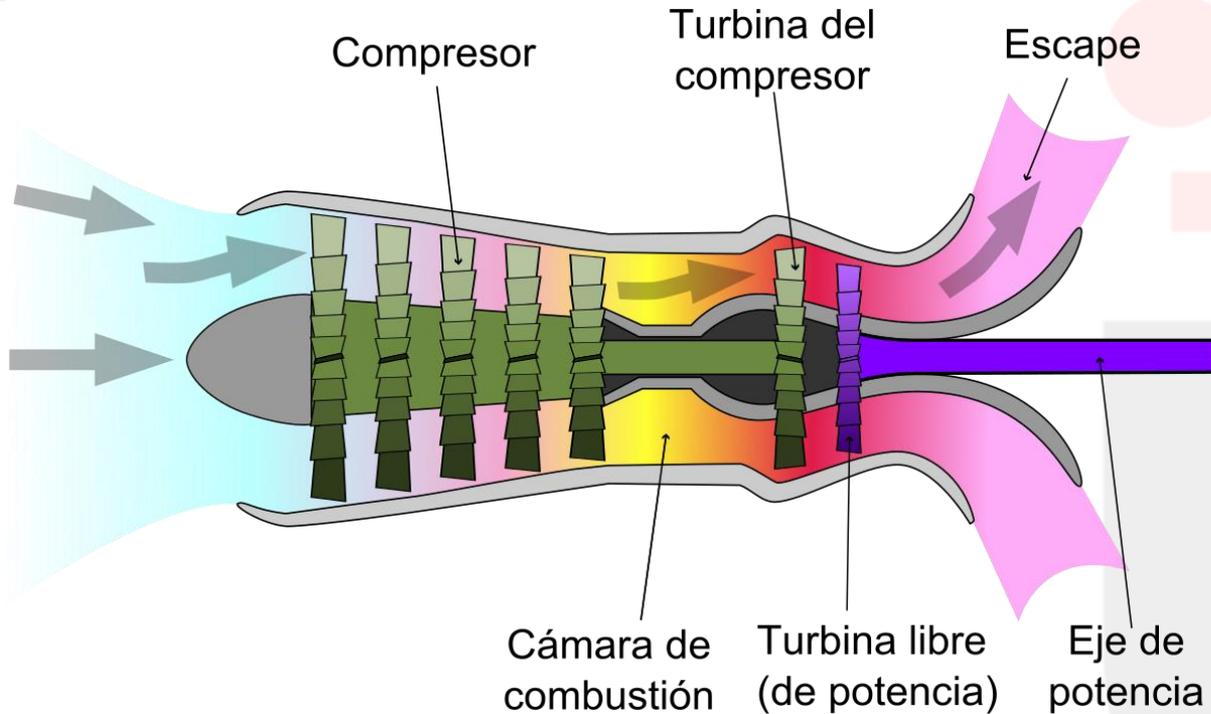
## TURBOHÉLICE



Impulsión → fundamentalmente por el flujo de aire movido por la hélice

# 3. Turbinas de gas

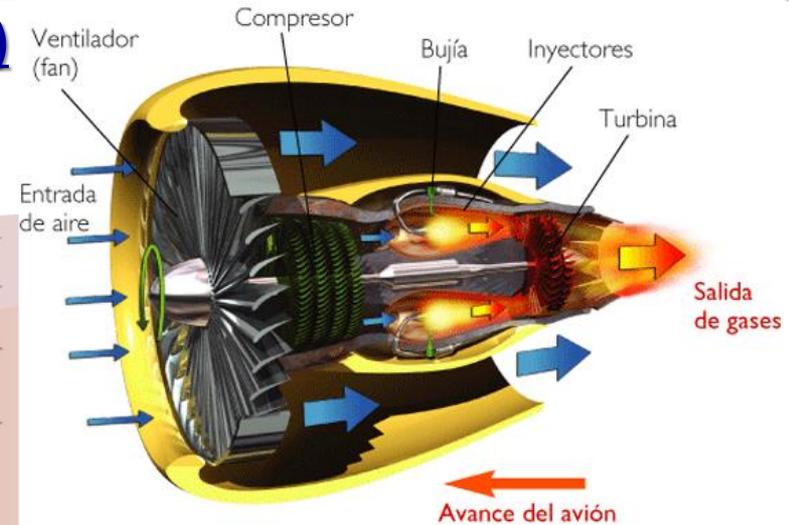
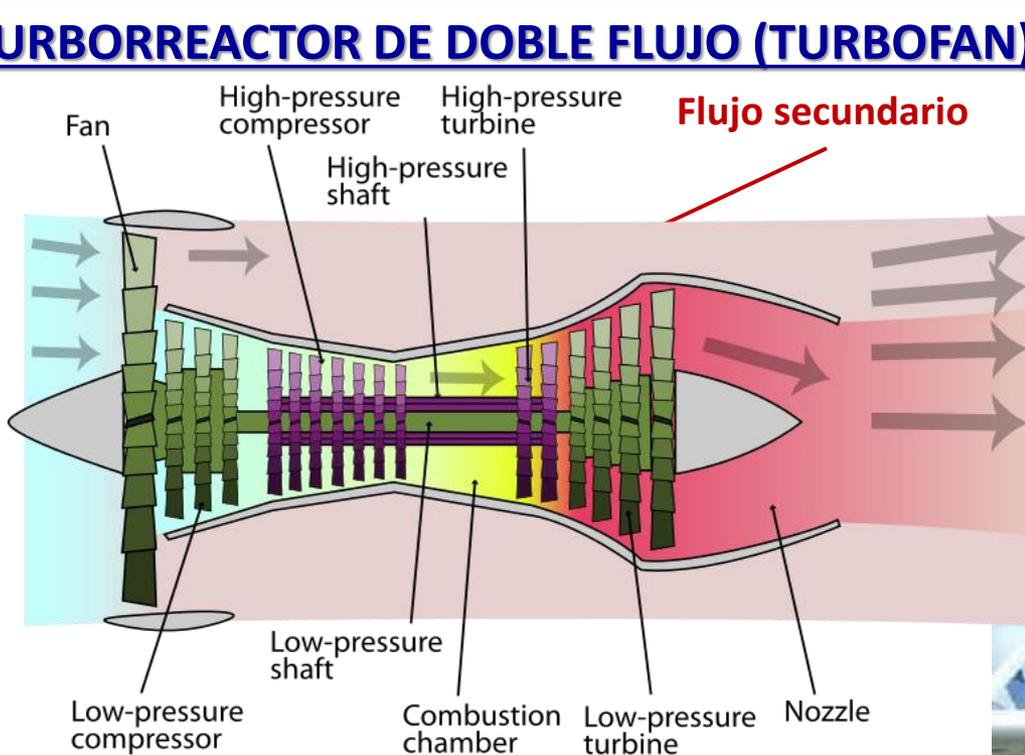
## TURBOEJE



Sin empuje de propulsión  
Empleado en helicópteros

# 3. Turbinas de gas

## TURBORREACTOR DE DOBLE FLUJO (TURBOFAN)



Turbofan Airbus A380



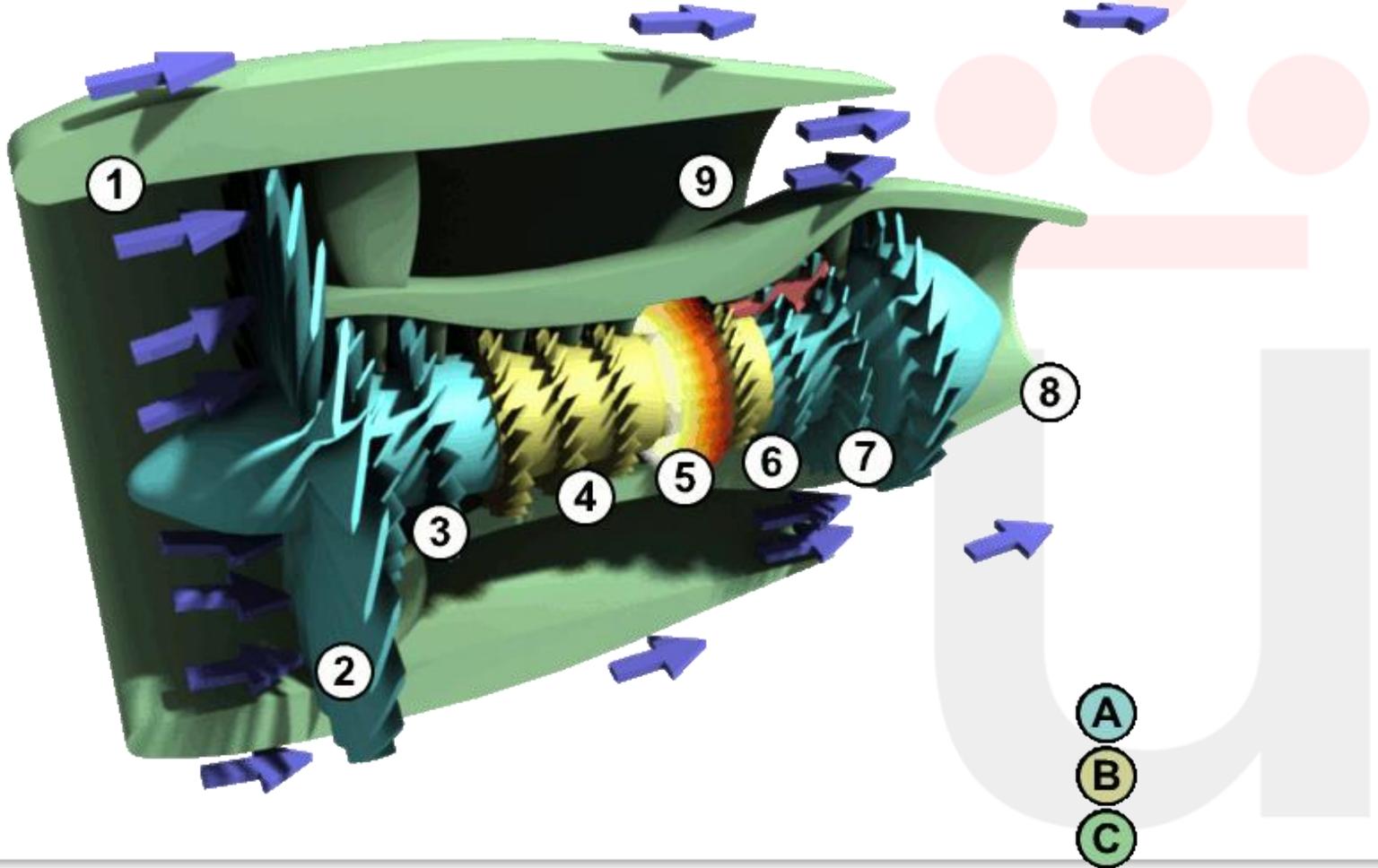
- Aumento de eficiencia a velocidades subsónicas
- Reducción del ruido

$$\text{Relación de by-pass} = \frac{\text{flujo secundario}}{\text{flujo primario}}$$

# 3. Turbinas de gas

## TURBOPROPULSORES A CHORRO BASADOS EN TURBINA DE GAS

### TURBOFAN



# 3. Turbinas de gas

## TURBOPROPULSORES A CHORRO BASADOS EN TURBINA DE GAS

### TURBOFAN

Relación de by-pass elevadas → la mayor parte del empuje proviene del flujo secundario.  
Vuelos comerciales

Relación de by-pass bajas → la mayor parte del empuje proviene del flujo primario.  
Vuelos supersónicos. Utilización de postquemadores: aumenta considerablemente el consumo → utilización en momentos puntuales

