

# Sistemas de Propulsión

Grado en Ingeniería Aeroespacial en Vehículos Aeroespaciales  
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicaciones



# Introducción a los motores alternativos

Jorge Saavedra

Grado en Ingeniería Aeroespacial en Vehículos Aeroespaciales  
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicaciones



# Contenidos

1. Introducción
2. Principios básicos de operación
3. Componentes
4. Optimización y desarrollo



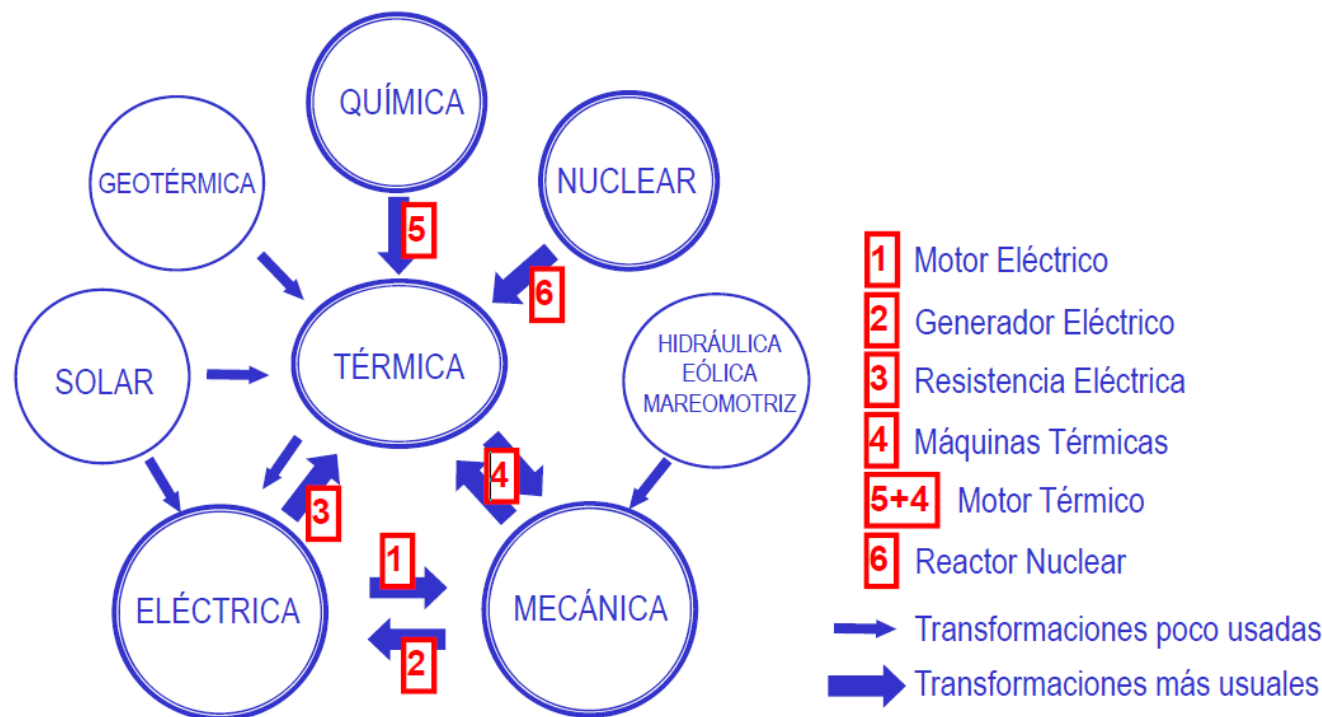
# Contenidos

1. **Introducción**
2. Principios básicos de operación
3. Componentes
4. Optimización y desarrollo

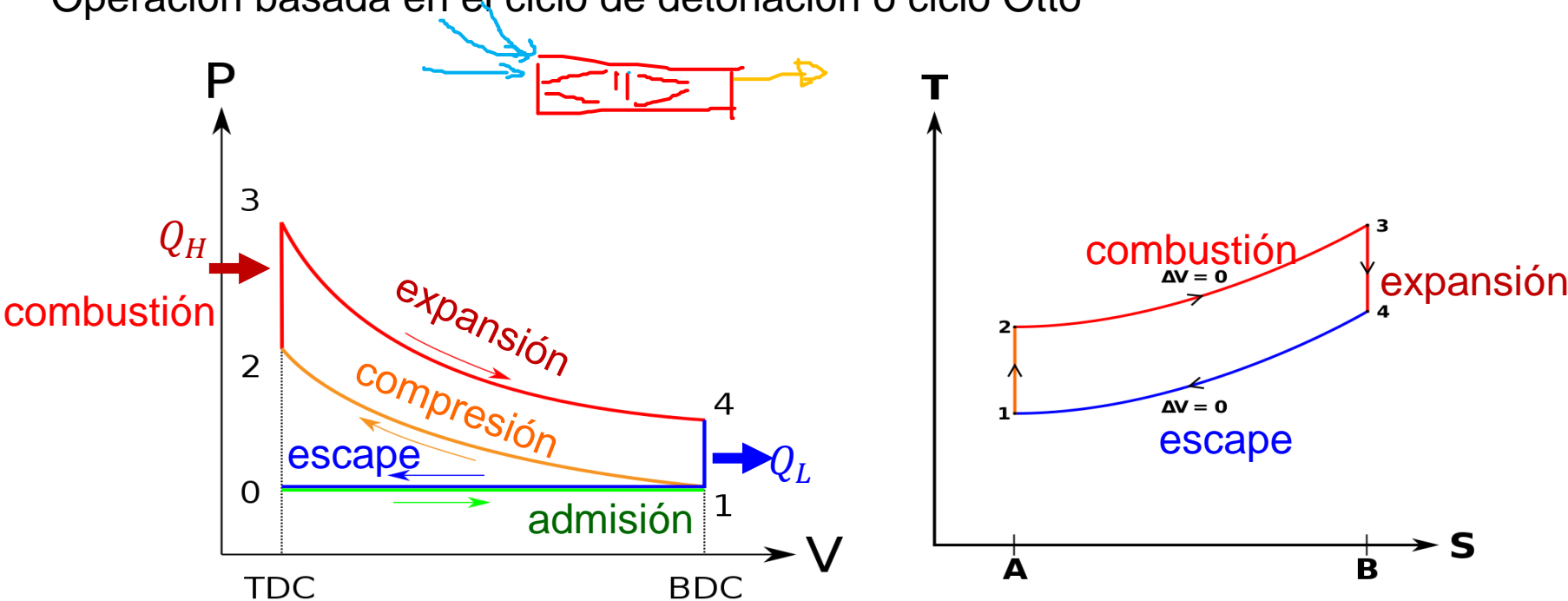


Los motores alternativos son

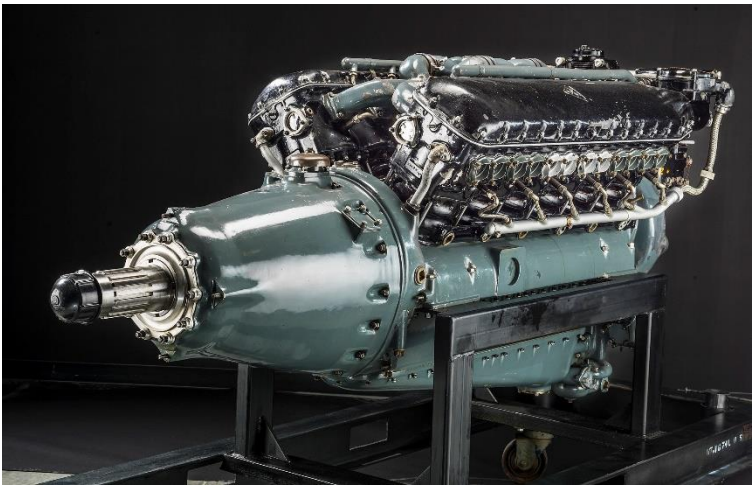
- una máquina de fluido que mediante elementos mecánicos permiten intercambiar energía mecánica con el exterior, a través de la energía disponible en el fluido que atraviesa la máquina
- una máquina térmica cuyos elementos mecánicos permiten intercambiar energía mecánica con el exterior a través de la varción de energía del fluido compresible que atraviesa la máquina.

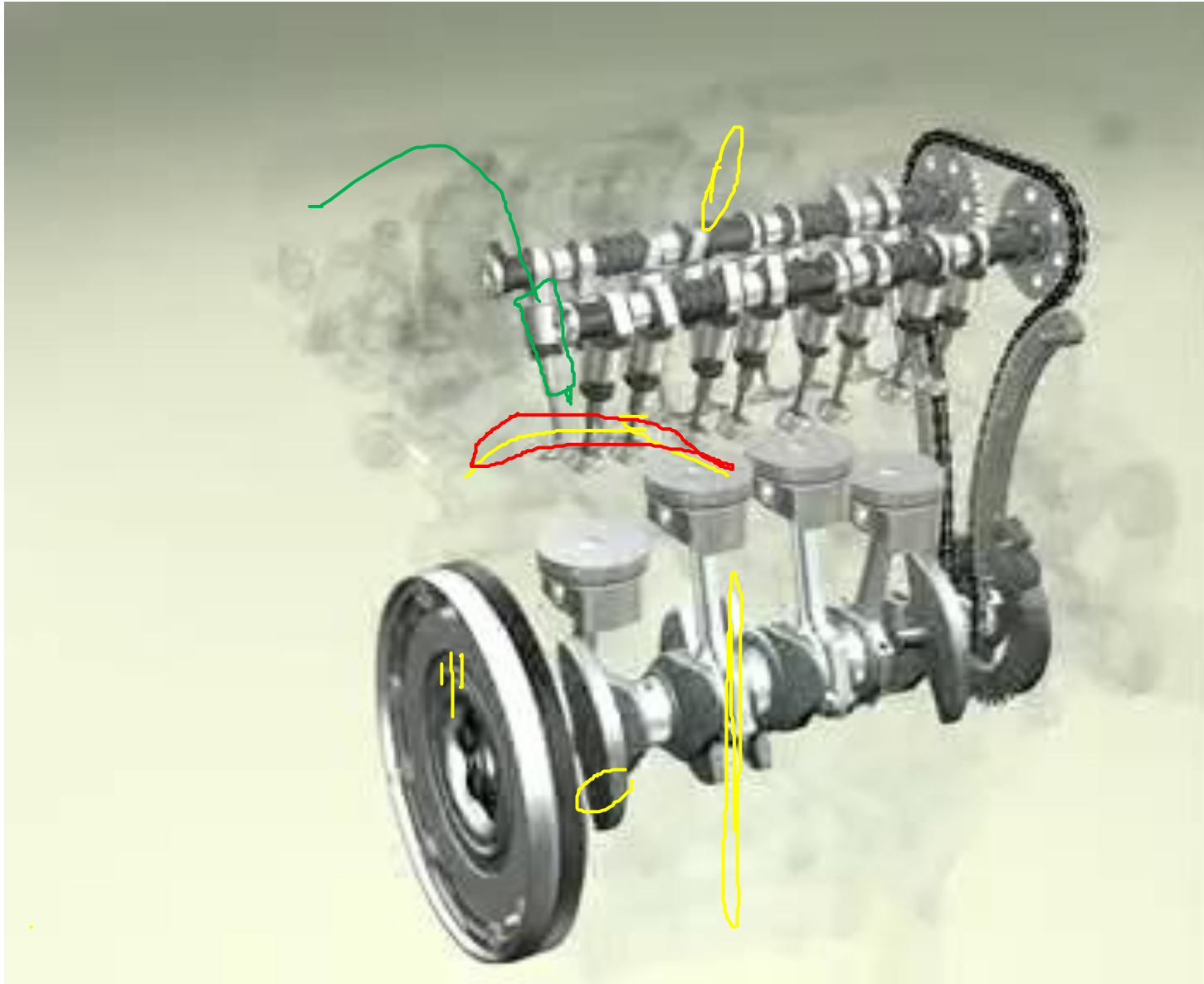


Operación basada en el ciclo de detonación o ciclo Otto



Allison V170-V12  
(P51-D Mustang)





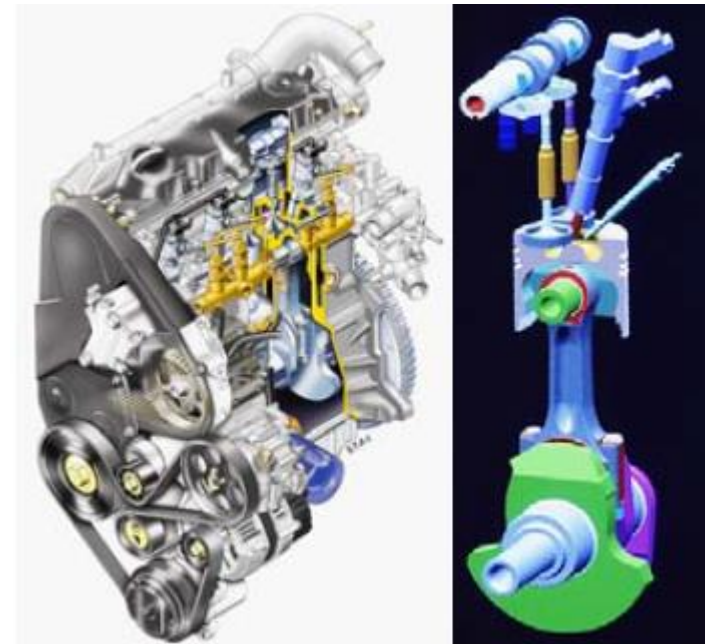
## **Clasificación, según:**

- proceso de combustión
- ciclo de operación
- refrigeración
- Admisión de combustible
- presión de admisión
- número y disposición de cilindros



➤ proceso de combustión

## Motor de encendido por compresión MEC



## Clasificación

- proceso de combustión

Característica	MEP	MEC
Formación de la mezcla	Durante la admisión +	Final de la compresión
Encendido de la mezcla	Mediante chispa eléctrica	Autoinflamación
Regulación de la carga	Cuantitativa ( $\pm$ mezcla) +	Cualitativa ( $\pm$ combustible)
Combustibles	Ligeros (gasolina, GLP, GN, etanol, biogas)	Más pesados (gasoil, fueloil, biocombustibles)
Fluido operante	Aire + combustible	Aire
Relación de compresión AUTO	7.5 - 11 +	12 - 24
Régimen de giro máximo	Automoción: 7500 Competición: 18000	Automoción: 5000 Pesado: 2200 Grandes 2T: 80
Rendimiento	0.2 - 0.3 +	0.35 - 0.5
Dosado	$\approx 1$	< 0.95 (global)
Potencia específica (KW/l)	Automoción: 70-90 (Bugatti Veyron) Competición: 230 (Ferrari F1 2004)	Automoción: 35 (II) – 65 (ID) Grandes 2T : 3 (Barco) Competición: 90 (Audi R10 Tdi)

## Clasificación

- ciclo de operación

De 4 Tiempos, 4T, 4 Stroke



De 2 Tiempos, 2T, 2 Stroke



Clasificación

➤ ciclo de operación

Motor de 4 tiempos

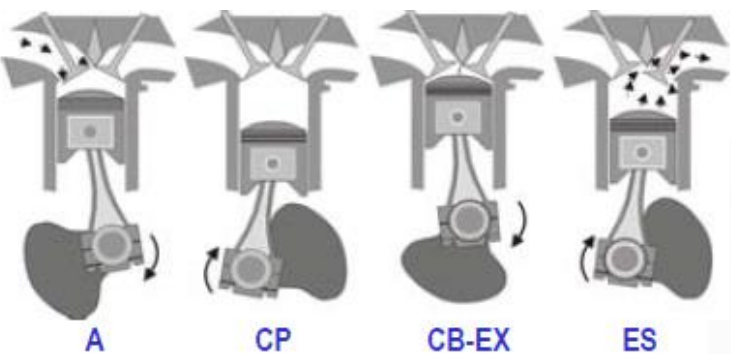
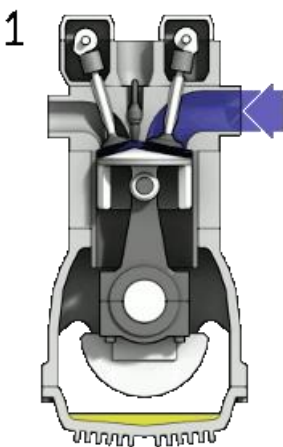
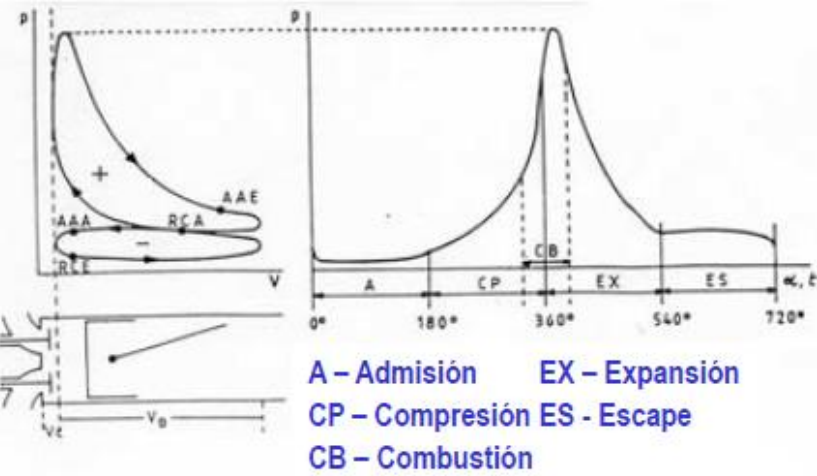
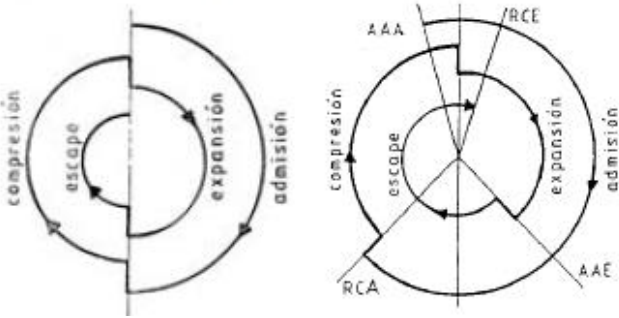


Diagrama del indicador

4 stroke

Diagrama de distribución

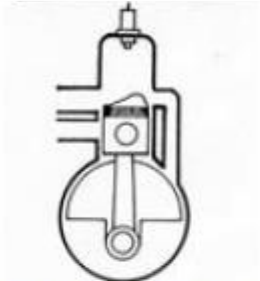


A – Admisión    EX – Expansión  
CP – Compresión    ES - Escape  
CB – Combustión

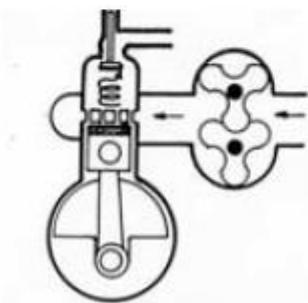
Clasificación

- ciclo de operación

Motor de 2 tiempos

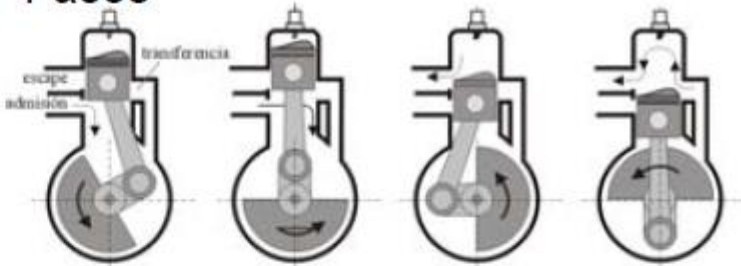


Barrido por cárter

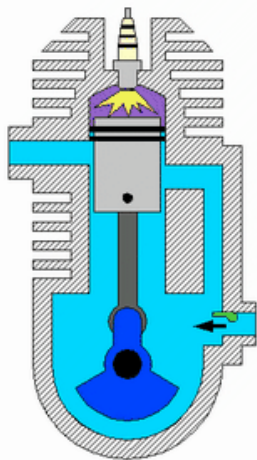
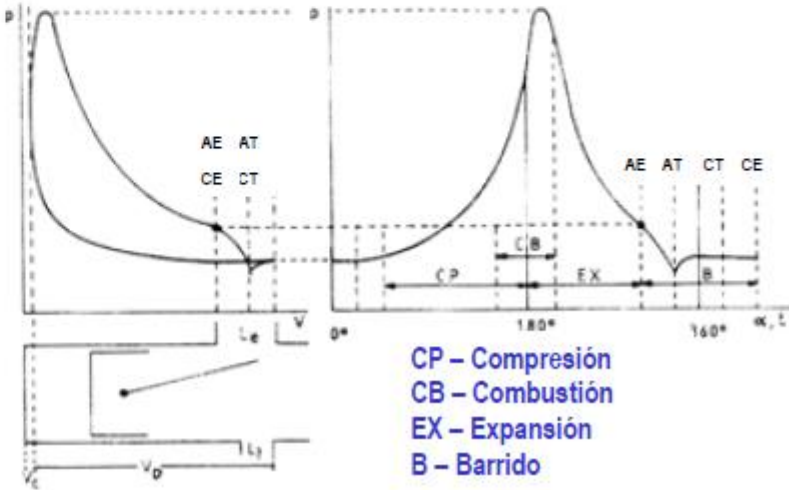


Barrido independiente

➤ Fases



➤ Diagrama del indicador

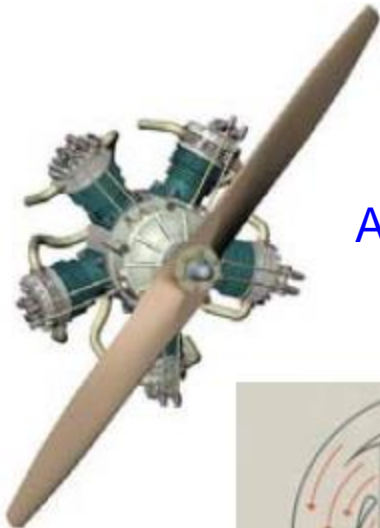


2 stroke

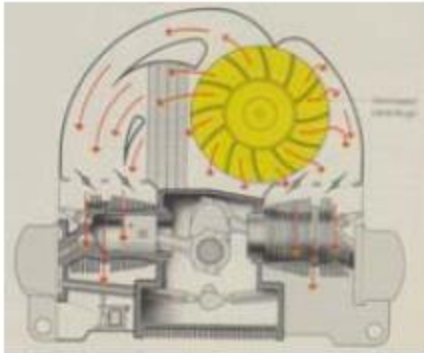


## Clasificación

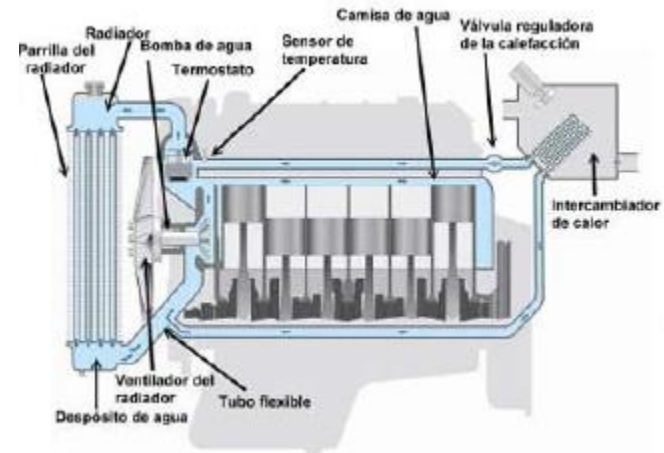
➤ refrigeración



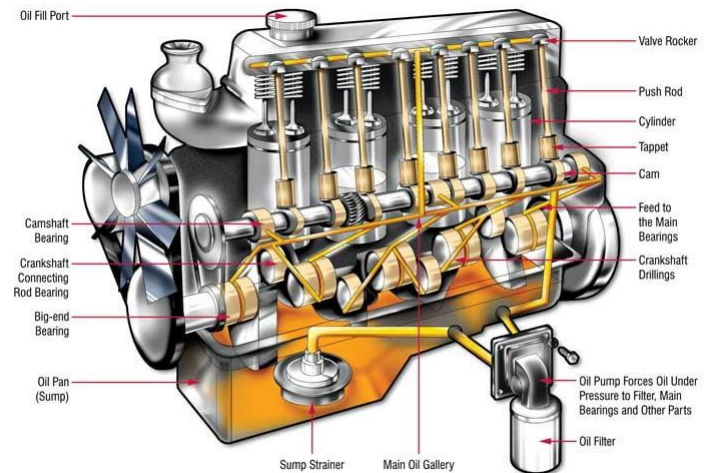
Aire



Agua



Aceite



## Clasificación

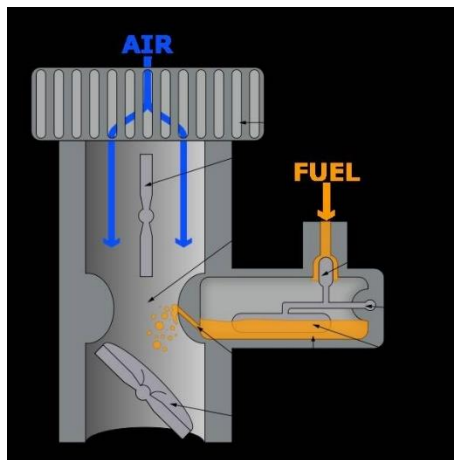
- Admisión de combustible



carburetor



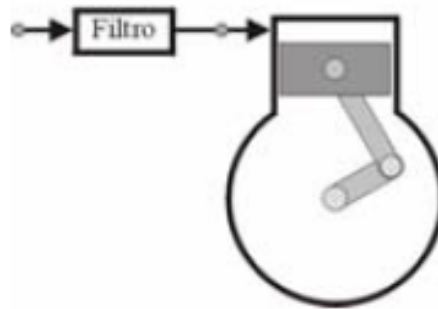
Inyección directa



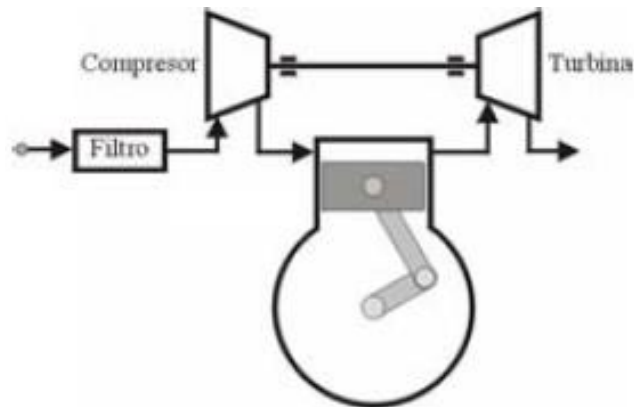
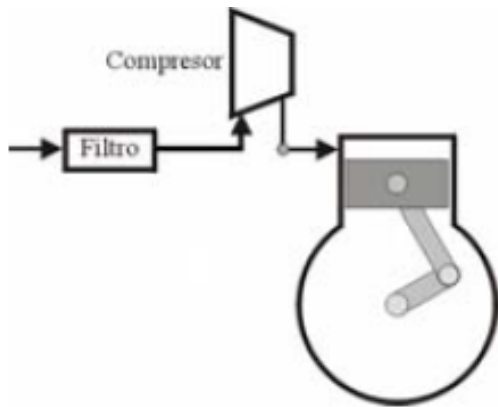
## Clasificación

- presión de admisión

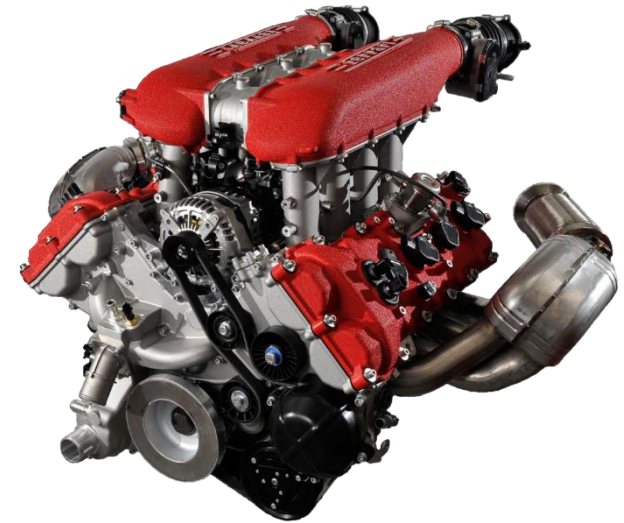
Aspiración natural



Sobrealimentado



Ferrari 458 Italia

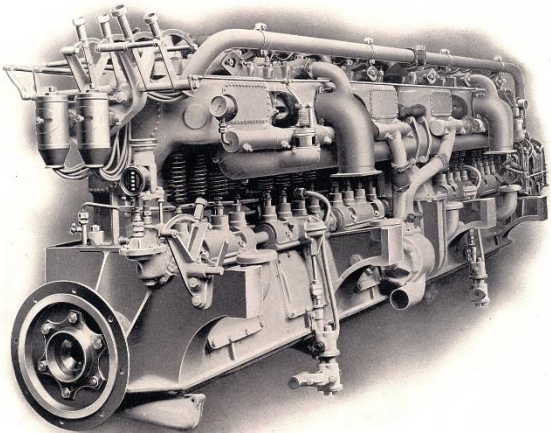




Clasificación

- número y disposición de cilindros

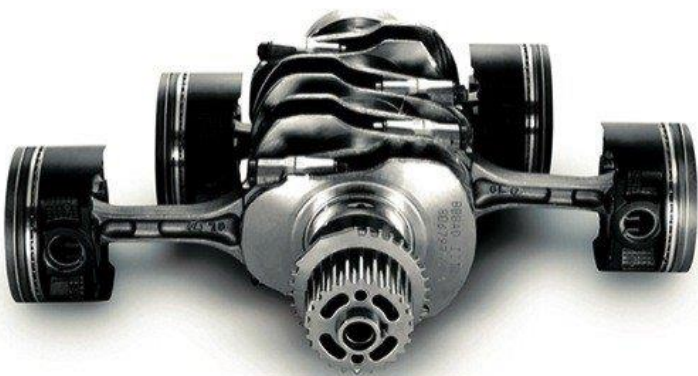
En línea



En V



Pistones opuestos



## Clasificación

- número y disposición de cilindros

En L



En estrella



Campos de aplicación

	4T	2T
MEP	<ul style="list-style-type: none"><li>Pequeñas aplicaciones</li><li>Turismos y motocicletas</li><li>Embarcaciones de recreo</li><li>Pequeñas avionetas</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Ciclomotores</li><li>Pequeñas herramientas</li><li>Modelismo</li></ul>
MEC	<ul style="list-style-type: none"><li>Turismos</li><li>Vehículos industriales (medio y gran tamaño)</li><li>Maquinaria agrícola</li><li>Motores estacionarios industriales</li><li>Embarcaciones tamaño pequeño-medio</li><li>Maquinaria de obras públicas</li><li>Ferrocarriles</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Maquinaria de obras públicas</li><li>Ferrocarriles</li><li>Grandes embarcaciones</li><li>Grandes motores estacionarios</li></ul>



# Contenidos

1. Introducción
2. Principios básicos de operación
3. Componentes
4. Optimización y desarrollo



### Parámetros geométricos

Diámetro del pistón

$D$

Carrera del pistón

$S$

Relación carrera diámetro

$S/D$

Sección del pistón

$$A_p = \frac{\pi D^2}{4}$$

Cilindrada unitaria

$$V_d = A_p S$$

Número de cilindros

$z$

Cilindrada total

$$V_T = z V_d$$

Volumen de la cámara de combustión

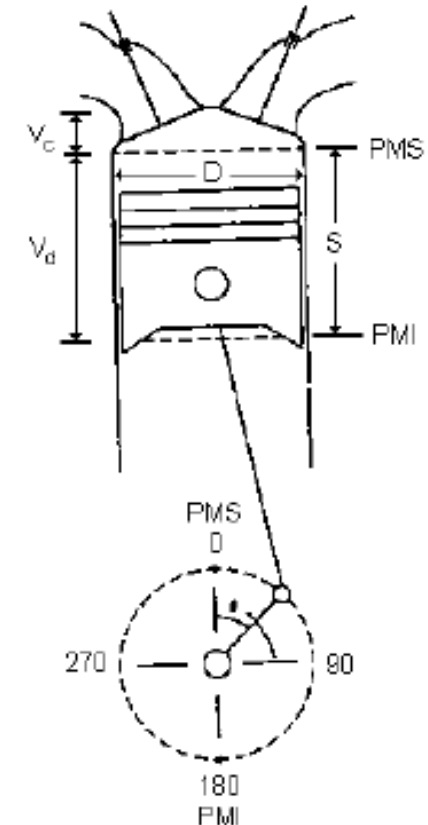
$V_c$

Relación de compresión

$$r = \frac{V_d + V_c}{V_c}$$

Número de ciclos por vuelta

$i$



Gastos y dosado

El **gasto másico de referencia** por unidad de tiempo (o por cilindro y ciclo) es el asociado al volumen total desplazado por el motor en condiciones de referencia

$$m_{ref} = \rho_{ref} V_T n i \text{ [g/s]}$$

El **gasto de aire** es la masa admitida por el motor expresada como:

$$\dot{m}_a \left[ \frac{g}{s} \right] \quad m_{a,cc} \left[ \frac{g}{cc} \right] \quad \dot{m}_a' = \frac{\dot{m}_a}{A_p} \left[ \frac{g}{sm^2} \right]$$

El **rendimiento volumétrico** es un indicador del llenado del cilindro

$$\eta_V = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_{ref}} = \frac{\dot{m}_a}{\rho_{ref} V_T n i}$$

Gasto de combustible

$$\dot{m}_f \left[ \frac{g}{s} \right] \quad m_{f,cc} \left[ \frac{mg}{cc} \right]$$

Dosado

Absoluto  $F = \dot{m}_f / \dot{m}_a \quad \lambda = \dot{m}_a / \dot{m}_f$

Relativo  $F_r = F / F_e$

F <sub>e</sub>	Etanol	1 / 9
	GN	1 / 17
	Gasolina	1 / 14,6
	Gasoil	1 / 14,5
	Fueloil	1 / 13,8

F <sub>R</sub>	MEP	≈ 1
	MEC	< 0,95 (global)

### Grado de carga

Mide el par (o potencia) que está dando un motor en relación al par (o potencia) máximo a ese régimen de giro

$$\alpha = \frac{N_{e\alpha}}{N_{e\max}} = \frac{M_{e\alpha}}{M_{e\max}}$$

En MEP mariposa del acelerador ( $m_a$ ) 

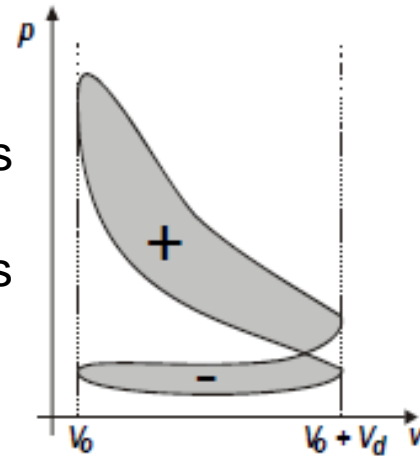
En MEC combustible inyectado ( $m_f$ )

## Parámetros indicados

Se refieren al ciclo cerrado real del motor

Se suelen calcular por integración entre los puntos muertos inferiores (según definición)

No tienen en cuenta el trabajo de bombeo, los rozamientos mecánicos, ni el accionamiento de auxiliares



**Trabajo indicado** ( $W_i$ ) Es el trabajo producido en el ciclo cerrado (área dentro del diagrama p-V)

**Potencia indicada** ( $N_i$ ) Es el trabajo indicado por unidad de tiempo

$$N_i = i W_i n$$

**Rendimiento indicado** ( $\eta_i$ ) Es la relación entre la potencia indicada desarrollada por el motor y la potencia térmica consumida

$$\eta_i = \frac{N_i}{\dot{m}_f H_E}$$



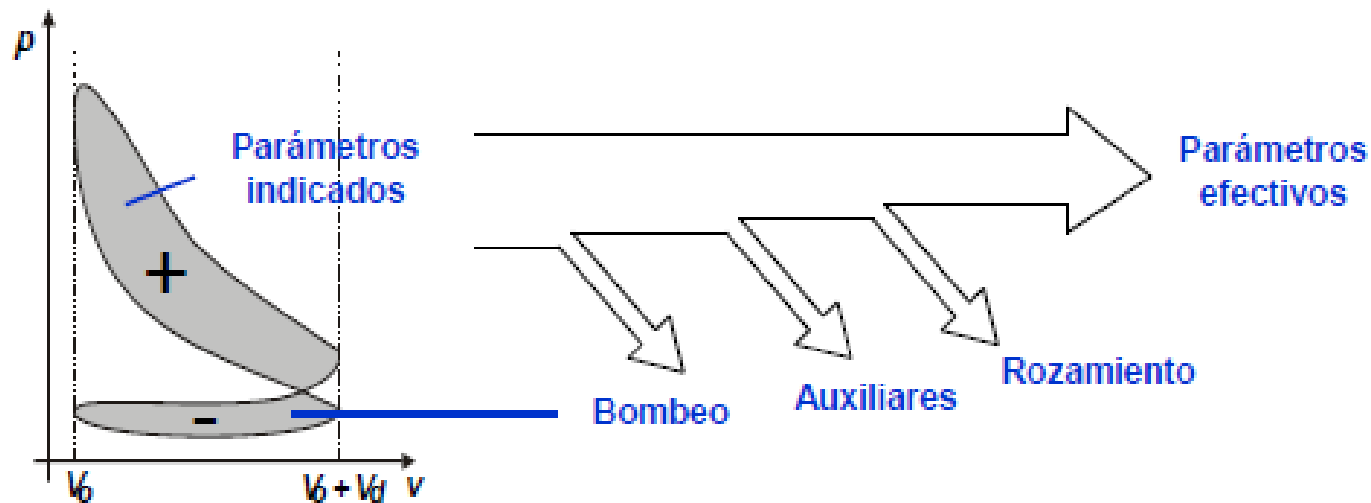
## Parámetros efectivos

Se refieren al eje motor y tienen en cuenta:

El ciclo cerrado (parámetros indicados)

La pérdida de energía mecánica por el lazo de bombeo, rozamientos y el accionamiento de auxiliares (según norma)

Se suelen referir a todos los cilindros



**Consumo específico efectivo ( $g_{ef}$ ):** Combustible consumido por unidad de tiempo referido a la potencia mecánica desarrollada

$$g_{ef} = \frac{\dot{m}_f}{N_e}$$

### Parámetros efectivos

**Consumo específico efectivo** ( $g_{ef}$ ): Combustible consumido por unidad de tiempo referido a la potencia mecánica desarrollada

$$g_{ef} = \frac{\dot{m}_f}{N_e}$$

Valores típicos(consumo mínimo): referido a gasolina/gasoil

	$g_{ef,min}$ [g/kWh]	$\eta_{e,max}$ [%]
MEP 2T ciclomotor	350	25
MEP 4T motocicleta	270	32
MEP 4T automóvil	240	35
MEC IDI 4T automóvil	240	35
MEC DI 4T automóvil – SOB	200	42
MEC DI 4T vehículo pesado -SOB	190	45
MEC DI 2T lento – SOB	156	54

### Parámetros efectivos

**Trabajo efectivo** ( $W_e$ ): Es el trabajo en el eje del motor. Es igual al trabajo indicado menos el de pérdidas mecánicas

$$W_e = W_i - W_{pm}$$

**Potencia efectiva** ( $N_e$ ): Es el trabajo efectivo por unidad de tiempo

$$N_e = N_i - N_{pm}$$

**Par efectivo** ( $M_e$ ): Es el par obtenido en el eje motor

$$M_e = \frac{N_e}{\omega} = \frac{N_e}{2\pi n}$$

**Rendimiento efectivo** ( $\eta_e$ ): Relación entre la potencia efectiva desarrollada y la potencia térmica consumida por el motor

$$\eta_e = \frac{N_e}{\dot{m}_f H_C}$$

El rendimiento efectivo máximo sólo se alcanza en determinadas condiciones de funcionamiento

Valores máximos

MEP 0.25-0.35

MEC 0.30-0.55

## Parámetros efectivos

**Rendimiento efectivo** ( $\eta_e$ ): Relación entre la potencia efectiva desarrollada y la potencia térmica consumida por el motor

$$\eta_e = \frac{N_e}{\dot{m}_f H_C}$$

El rendimiento efectivo máximo sólo se alcanza en determinadas condiciones de funcionamiento

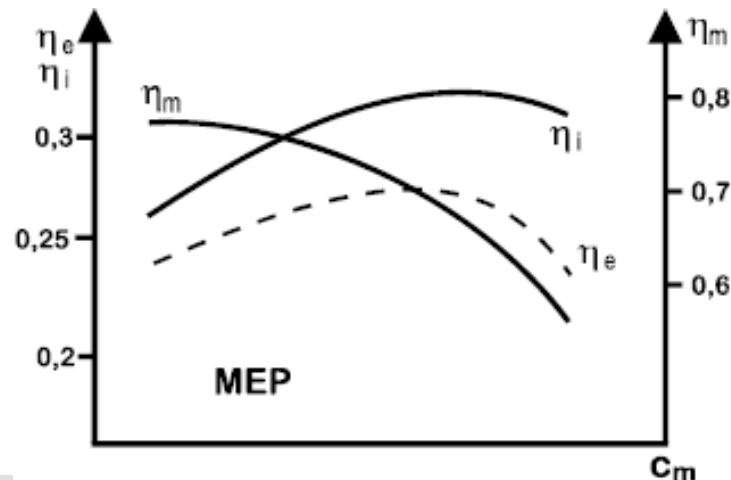
Valores máximos:

MEP 0.25-0.35

MEC 0.30-0.55

**Rendimiento mecánico** ( $\eta_m$ ): Se define a partir de los parámetros indicado y efectivo

$$\eta_m = \frac{N_e}{N_i} = \frac{p_{me}}{p_{mi}} = \frac{\eta_e}{\eta_i}$$



### Parámetros efectivos

A partir de la expresión del rendimiento efectivo podemos escribir

$$N_e = \eta_e \dot{m}_f H_C$$

Expresando el gasto de combustible en función del dosado

$$F = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a} \rightarrow \dot{m}_f = F \dot{m}_a$$

O bien del dosado relativo

$$F_R = \frac{F}{F_e} \rightarrow \dot{m}_f = F_R F_e \dot{m}_a$$

La potencia efectiva se puede expresar como:

$$N_e = \eta_e \dot{m}_f H_C = \eta_e F_R F_e \dot{m}_a H_C$$

Finalmente la potencia efectiva en función del rendimiento volumétrico, se expresa como:

$$N_e = \eta_e \eta_V F_R F_e \rho_{ref} V_T n i H_C$$

Para un motor dado ( $\rho_{ref}, V_T, i, H_C, F_r, F_c$ ), la potencia depende principalmente de:

Régimen de giro  $n$

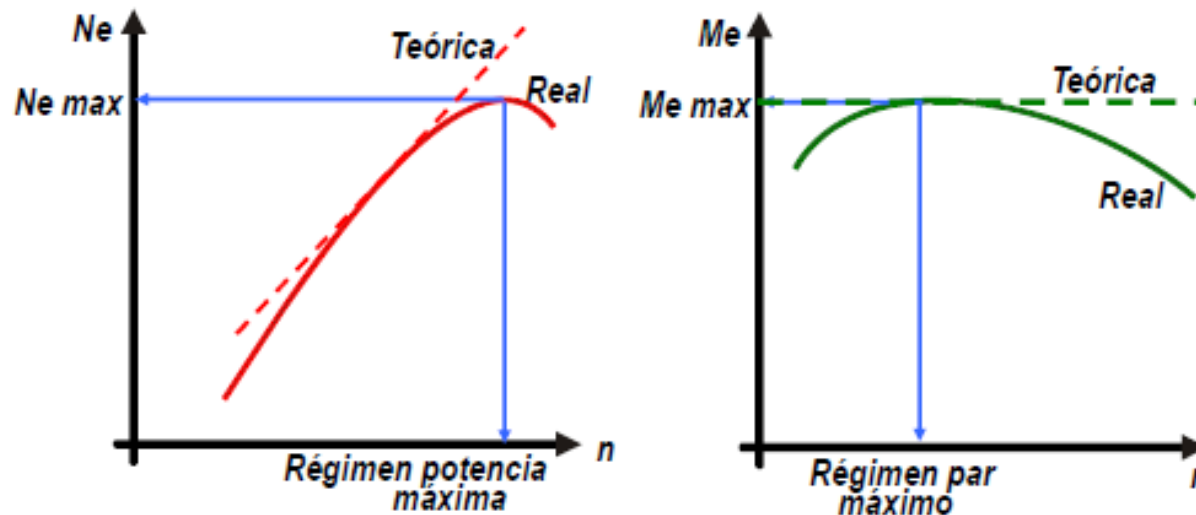
Rendimiento efectivo  $\eta_e$

Llenado del motor  $\eta_V$

### Curvas características

Definición: representación gráfica de parámetros en función del régimen ( $c_m$ ) o del grado de carga ( $\alpha$ )

Curvas características  $M_e$  y  $N_e$  en un MEP

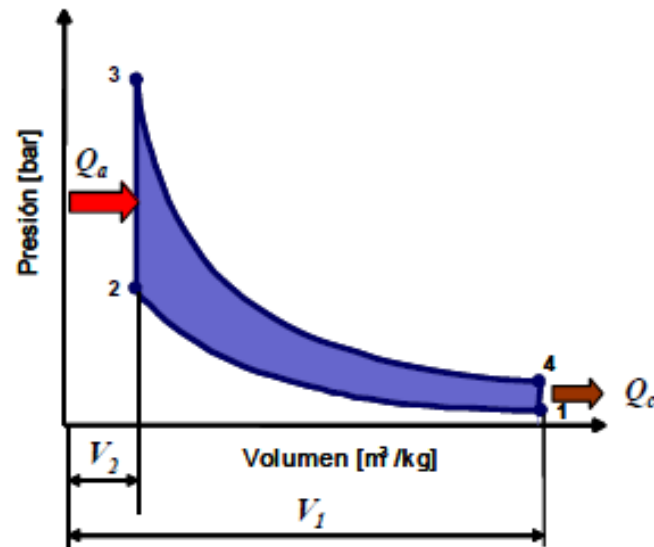


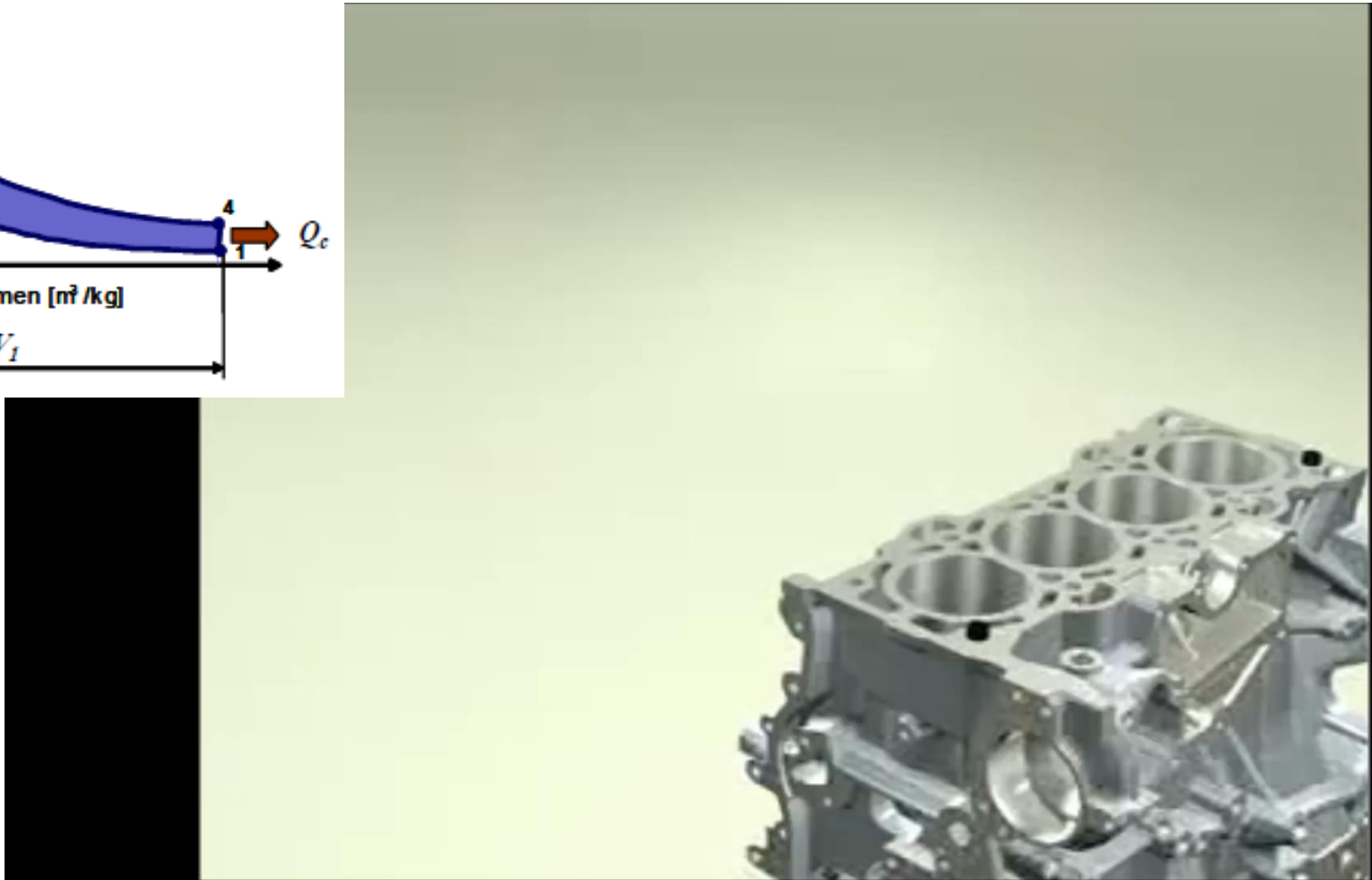
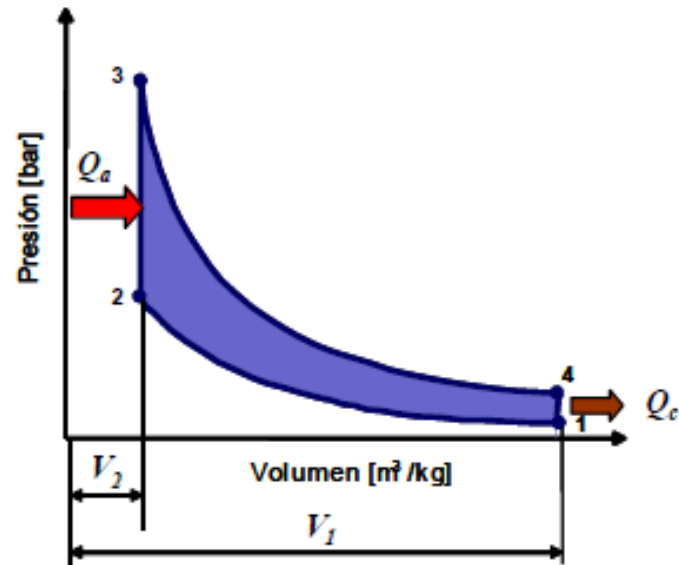
### Curvas características

Conservación de la energía (primer principio de la termodinámica)

$$dU_c = -dQ + dFQL - p dV - R_c T_c dm_{bb}$$

Energía interna sensible    Calor transmitido a las paredes    Calor liberado    Trabajo    Fugas por blow-by







# Contenidos

1. Introducción
2. Principios básicos de operación
3. Componentes
4. Optimización y desarrollo



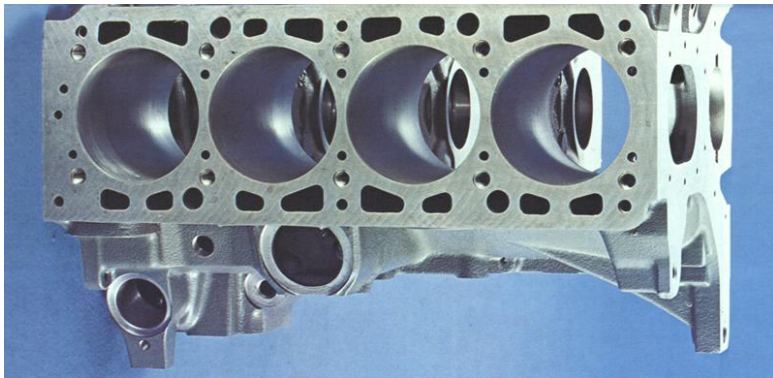
#### Camisa de Cilindro



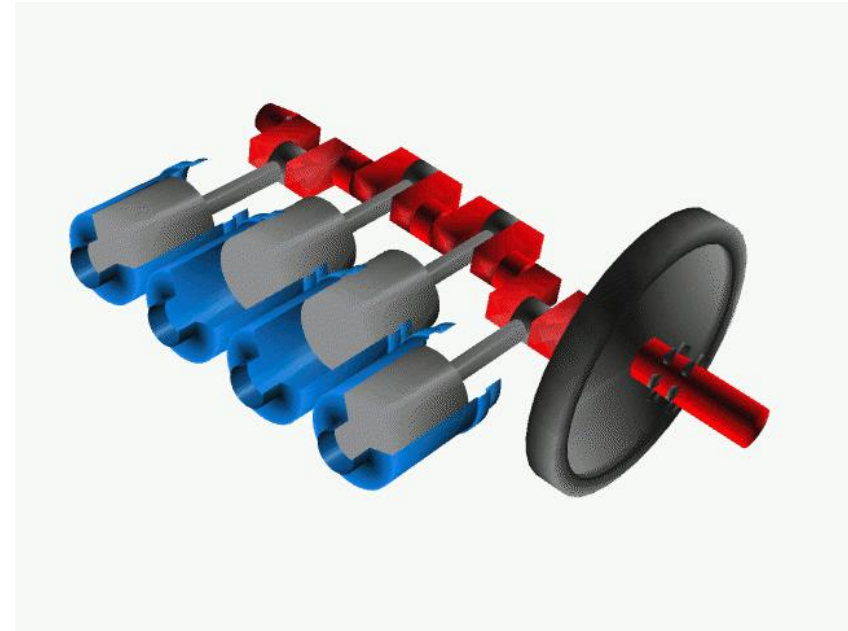
#### Pistón



#### Biela



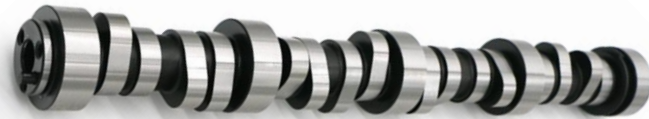
## Cigüeñal (Crankshaft)



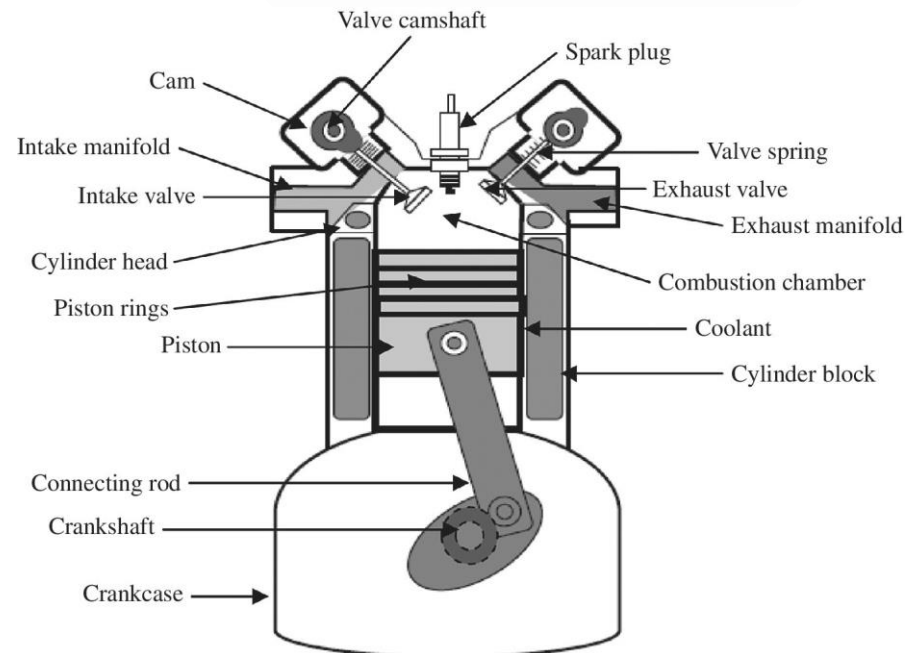
## Válvulas de admisión escape



## Eje de levas (cam shaft) Shaft-less valves\*



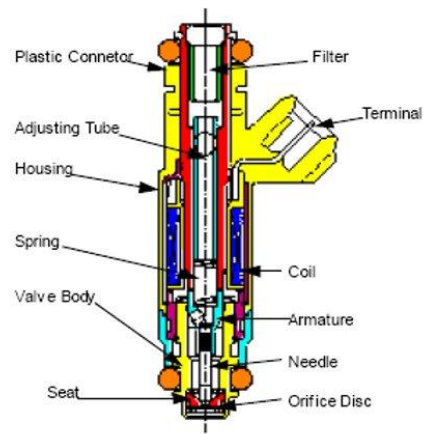
## Bujía



Carburador



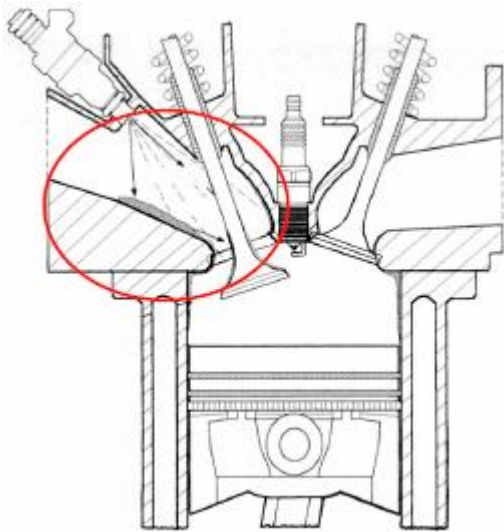
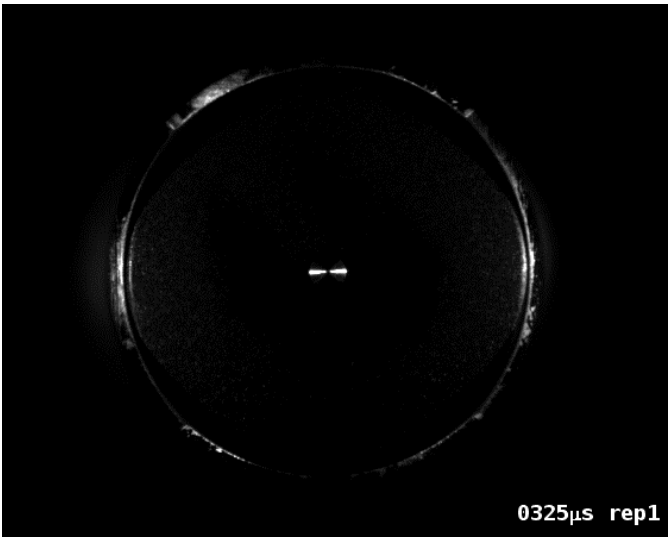
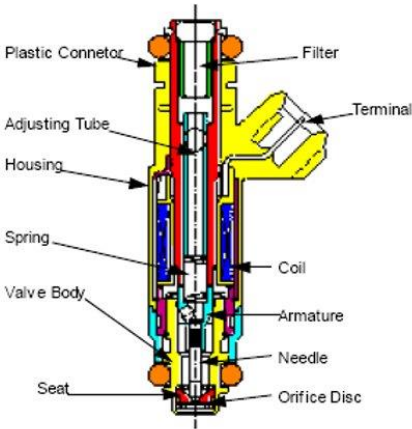
Inyector



Air intake



# inyector

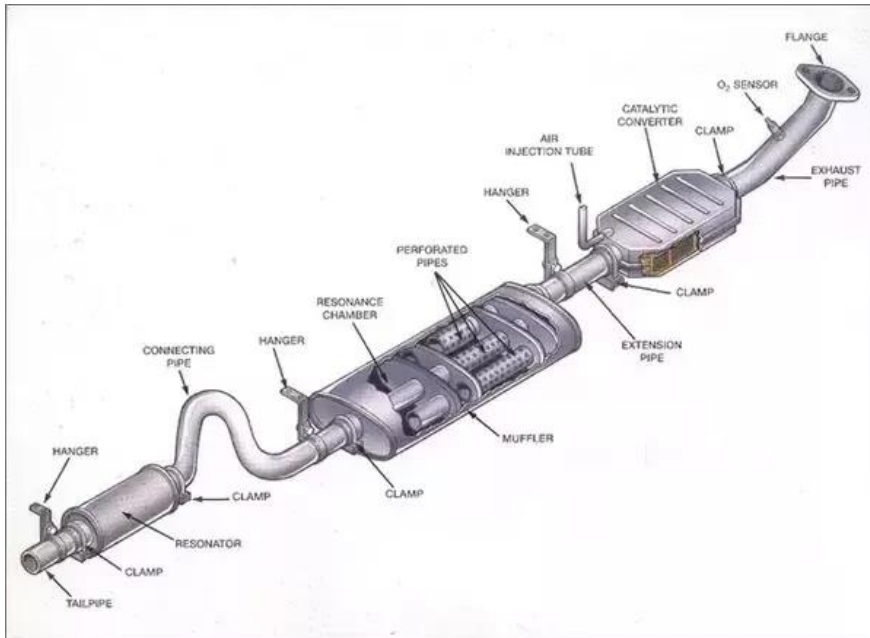




## Turbocharger



## Supercharger



## Sistema de escape

# Contenidos

1. Introducción
2. Principios básicos de operación
3. Componentes
4. Optimización y desarrollo



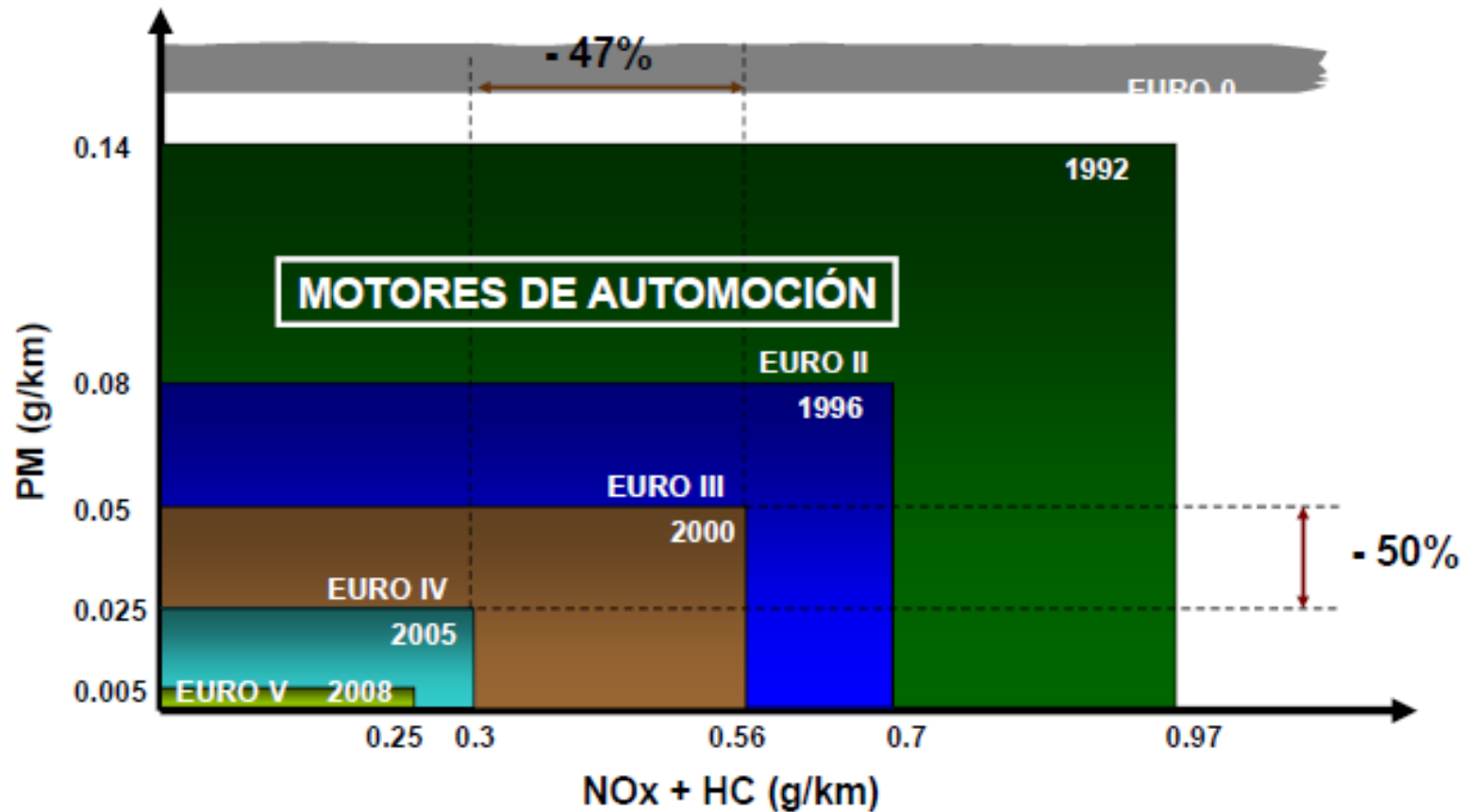


### Desafíos actuales

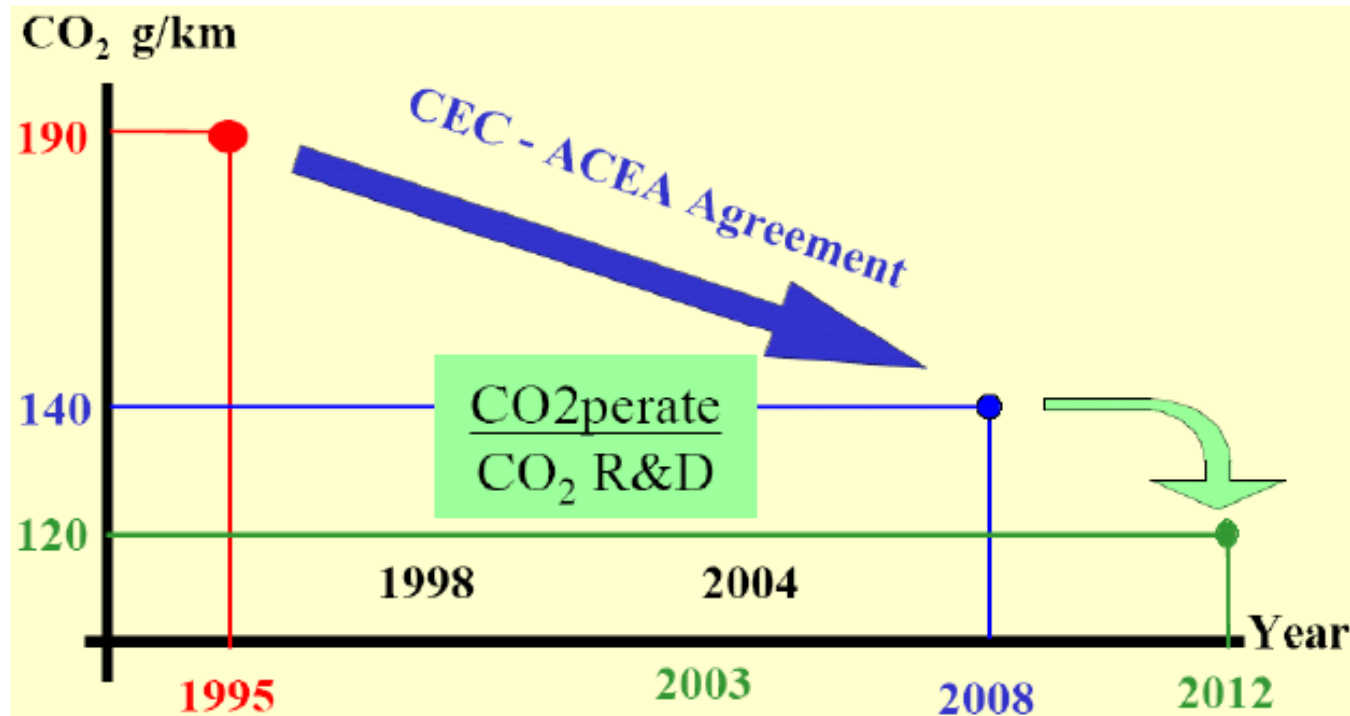
- Optimización energética  $\leftrightarrow$  reducción de contaminantes
  - Límites de emisiones muy severos (hasta cero emisiones)
  - Desarrollo de motores condicionado por emisiones
  - Estrategias para reducir emisiones empeoran rendimiento y encarecen el motor
  - En futuro inmediato  $\rightarrow$  reducción de  $\text{CO}_2 \rightarrow$  mejora rendimiento
- Estado del arte
  - Los motores no aprovechan el potencial de optimización energética
  - El rendimiento de motores ha mejorado, a pesar de los límites de emisiones

### Normativas europeas de emisión de contaminantes

## Normativas europeas de emisión de contaminantes



## Normativas europeas de emisión de contaminantes



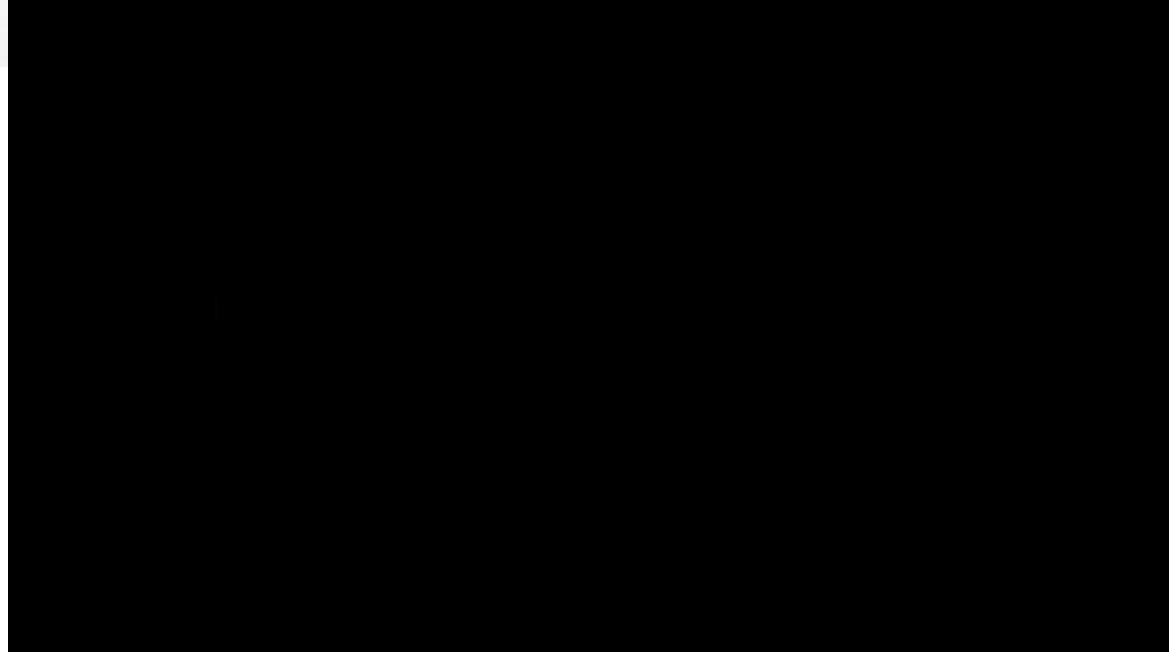
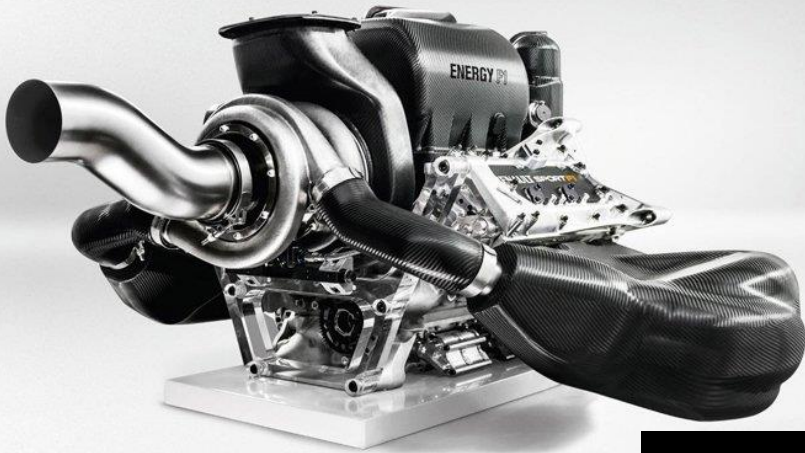
### Estrategias de optimización

- Optimización del sistema de inyección
  - Aumento de presión de inyección
  - Reducción de diámetro de orificios
  - Inyectores con doble corona de orificios y accionamiento independiente
  - Doble inyector
  - Inyectores de geometría continuamente variable
- Accionamiento flexible de válvulas
  - Adecuación a condiciones de funcionamiento
    - Bajo-alto régimen de giro
    - Arranque en frío
    - Freno motor
  - Control de la carga en MEP
  - Desactivación de cilindros
  - Realización de ciclos alternativos
- Relación de compresión variable
  - Adecuación a condiciones de funcionamiento (carga, presión de sobrealimentación, etc)
  - Adaptación al tipo de combustible
  - Combinación con nuevos modos de combustión (HCCI)

### Estrategias de optimización

- Recirculación de gases de escape avanzada
  - Producción de EGR en condiciones de  $p_{adm} > p_{es}$  aprovechando pulsos de presión
  - EGR de baja presión (salida de turbina a entrada de compresor)
  - EGR de muy baja temperatura
  - EGR interno
- Evolución de las técnicas de sobre alimentación
  - Sobrealimentación en doble etapa
  - Combinación de compresor mecánico con turbocompresor
  - Asistencia al compresor en transitorios (motor eléctrico, inyección de aire comprimido en la turbina, etc)
- Post-tratamiento de gases de escape
- Nuevos combustibles
  - Derivados del crudo
    - Adecuación de propiedades a nuevas necesidades
      - Resistencia al autoencendido
      - Menor contenido de azufre (hasta <10ppm), benceno (gasolinas), hidrocarburos pesados y densidad (gasoil)
  - Combustibles alternativos
- Técnicas avanzadas de control
- Nuevos modos de combustión

### Hibridación – Funcionar en punto de óptimo rendimiento



# Contenidos

1. Introducción
2. Principios básicos de operación
3. Componentes
4. Optimización y desarrollo



- “Motores de combustión interna alteranticos”, F. Payri, J.M. Desantes
- “Internal combustion engine fundamentals“, John B. Heywood
- “Fundamentals of internal combustion engines”, H. N. Gupta