

# Motores térmicos para ingeniería mecánica

Carlos Guardiola  
Santiago Ruiz  
Benjamín Pla  
David Blanco-Rodríguez

APUNTES

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA



Colección Apuntes

# **Motores Térmicos** para Ingeniería Mecánica

Carlos Guardiola  
Santiago Ruiz  
Benjamín Pla  
David Blanco-Rodríguez

**EDITORIAL**  
**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA**

*Colección Apuntes*

Primera edición 2014

© Carlos Guardiola  
Santiago Ruiz  
Benjamín Pla  
David Blanco-Rodríguez

© de la presente edición: Editorial Universitat Politècnica de València  
[www.lalibreria.upv.es](http://www.lalibreria.upv.es) / ref 6159\_01\_01\_01

Queda prohibida la reproducción, distribución, comercialización, transformación, y en general, cualquier otra forma de explotación, por cualquier procedimiento, de todo o parte de los contenidos de esta obra sin autorización expresa y por escrito de sus autores.

# ÍNDICE

<b>1. Estudio de escalonamientos.....</b>	<b>1</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>Ecuación fundamental de las turbomáquinas.....</b>	<b>3</b>
<b>Estudio de escalonamientos de acción.....</b>	<b>9</b>
<b>Estudio de escalonamientos de reacción.....</b>	<b>12</b>
<b>Comparación acción-reacción .....</b>	<b>15</b>
<b>Escalonamientos de velocidad .....</b>	<b>16</b>
<b>Resumen.....</b>	<b>17</b>
<b>2. Tecnología de turbinas de vapor .....</b>	<b>19</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>19</b>
<b>Disposiciones constructivas .....</b>	<b>21</b>
<b>Elementos constructivos.....</b>	<b>28</b>
<b>Regulación y control.....</b>	<b>39</b>
<b>Rangos característicos.....</b>	<b>43</b>
<b>Resumen.....</b>	<b>43</b>
<b>3. Tecnología de turbinas de gas.....</b>	<b>45</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>45</b>
<b>Ciclo real turbina de gas.....</b>	<b>51</b>
<b>Aumento de la T3 .....</b>	<b>54</b>
<b>Revisión tecnológica .....</b>	<b>60</b>
<b>Resumen.....</b>	<b>67</b>
<b>4. Introducción a los motores de combustión.....</b>	<b>69</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>69</b>
<b>MEP/MEC .....</b>	<b>71</b>

4T/2T.....	73
Parámetros fundamentales y curvas características .....	75
<b>5. Balance energético. Lubricación y refrigeración.....</b>	<b>79</b>
Introducción. Balance energético .....	79
Pérdidas mecánicas.....	81
Lubricación.....	84
Refrigeración .....	87
Resumen.....	91
Anexo: Determinación de pérdidas mecánicas.....	93
<b>6. Renovación de la carga. Distribución y sintonizado.....</b>	<b>97</b>
Introducción .....	97
Renovación de la carga en 4T .....	100
Renovación de la carga en 2T .....	113
Resumen.....	115
<b>7. Sobrealimentación en motores.....</b>	<b>117</b>
Introducción. Justificación de la sobrealimentación.....	117
Efectos de la sobrealimentación sobre el motor .....	119
Tipos de sobrealimentación .....	121
Acoplamiento motor-turbogrupo .....	124
Tendencias en MEP y MEC.....	129
Resumen.....	130
<b>8. Combustión.....</b>	<b>131</b>
Introducción .....	131
Combustión homogénea en MEP.....	137
Combustión estratificada en MEP.....	145
Proceso de combustión en MEC.....	147
Resumen.....	158

<b>9. Emisiones y normativas de emisiones.....</b>	<b>161</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>161</b>
<b>Emisiones reguladas y soluciones activas .....</b>	<b>164</b>
<b>Post-tratamiento (soluciones pasivas) .....</b>	<b>169</b>
<b>Medida de emisiones, normativas y su evolución histórica .....</b>	<b>174</b>
<b>Emisiones no reguladas: CO2.....</b>	<b>176</b>
<b>Resumen.....</b>	<b>178</b>
<b>10. Control de motores.....</b>	<b>181</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>181</b>
<b>Sistemas controlados en los MCIA.....</b>	<b>183</b>
<b>Sensores.....</b>	<b>185</b>
<b>Control electrónico .....</b>	<b>187</b>
<b>Resumen.....</b>	<b>196</b>
<b>11. Semejanza de motores .....</b>	<b>199</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>199</b>
<b>Bases que definen la semejanza.....</b>	<b>200</b>
<b>Consecuencias de la semejanza .....</b>	<b>205</b>
<b>Efectos de la subdivisión de la cilindrada.....</b>	<b>208</b>
<b>Consideraciones finales .....</b>	<b>211</b>
<b>Resumen.....</b>	<b>214</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>215</b>



## CONTENIDO

- Introducción
- Ecuación fundamental de las turbomáquinas
  - Aplicaciones de la EFT: compresores y turbinas
- Estudio de escalonamientos de acción
- Estudio de escalonamientos de reacción
- Comparación acción-reacción
- Escalonamientos de velocidad
- Síntesis

INTRODUCCIÓN

EFT

ACCIÓN

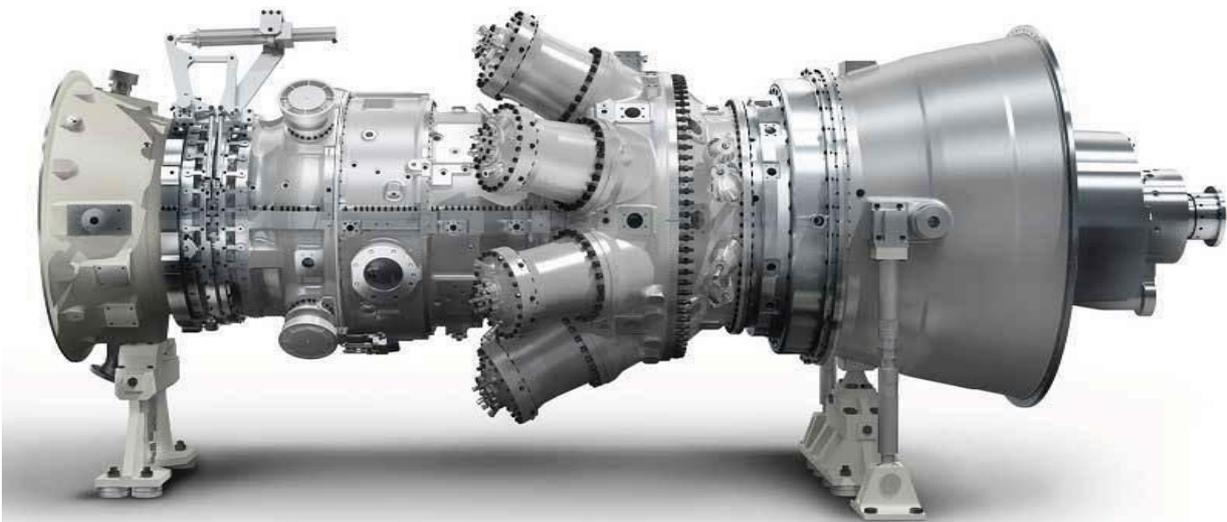
REACCIÓN

VELOCIDAD

R

## INTRODUCCIÓN

- Turbina de gas



Siemens SGT-750

INTRODUCCIÓN

EFT

ACCIÓN

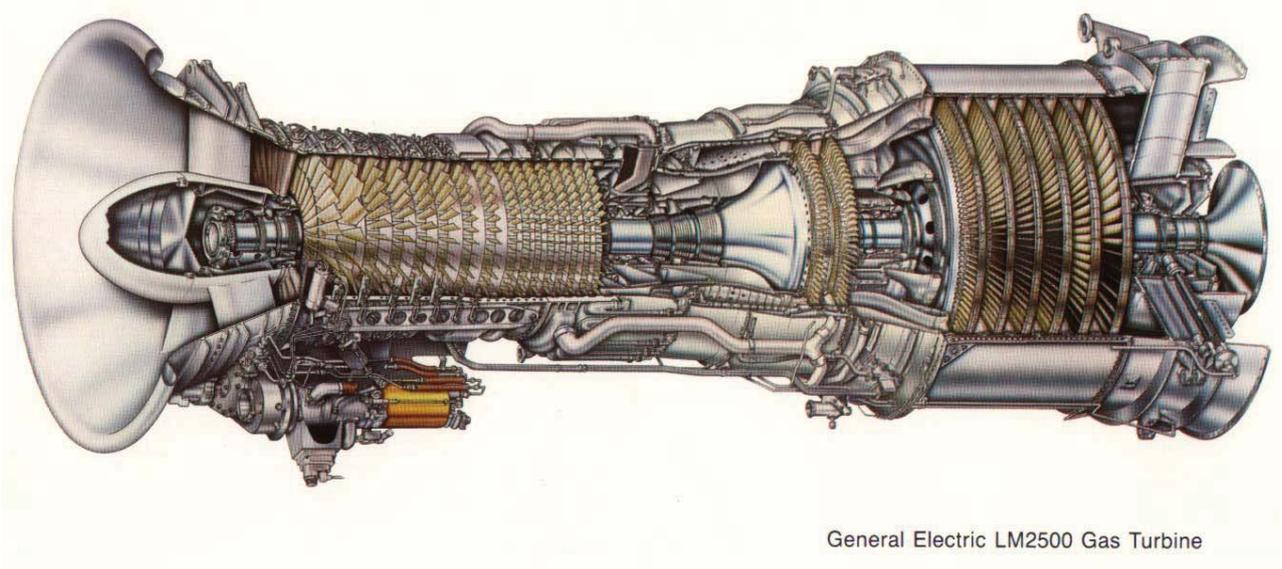
REACCIÓN

VELOCIDAD

R

## INTRODUCCIÓN

### Turbina de gas



General Electric LM2500 Gas Turbine

INTRODUCCIÓN

EFT

ACCIÓN

REACCIÓN

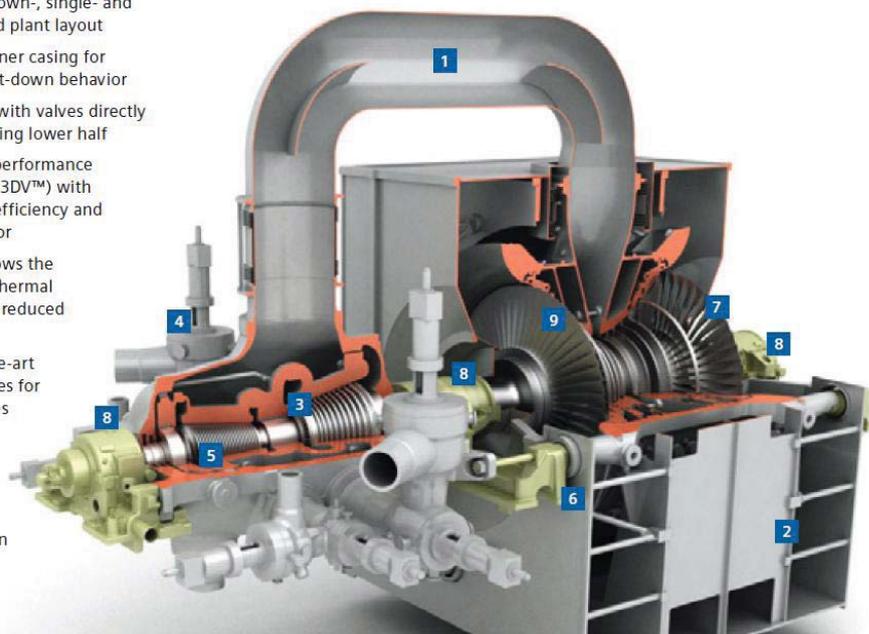
VELOCIDAD

R

## INTRODUCCIÓN

### Turbina de vapor

- 1 Large diameter single crossover pipe to minimize losses
- 2 Exhaust configurations: Down-, single- and double-sided for optimized plant layout
- 3 Spring back seals in the inner casing for excellent start-up and shut-down behavior
- 4 Short maintenance times with valves directly connected to the outercasing lower half
- 5 Fully 3-dimensional high performance variable reaction blading (3DV™) with integral shrouds for high efficiency and excellent damping behavior
- 6 Push rod arrangement allows the LP-inner casing to follow thermal expansion of the shaft for reduced differential expansion
- 7 Broad range of state-of-the-art high-performance LP blades for different exhaust area sizes
- 8 Single fixed bearing between cylinders for simple alignment and stable operation
- 9 Efficient erosion protection measures for LP blades



Siemens Steam Turbine SST-5000 Series

INTRODUCCIÓN

EFT

ACCIÓN

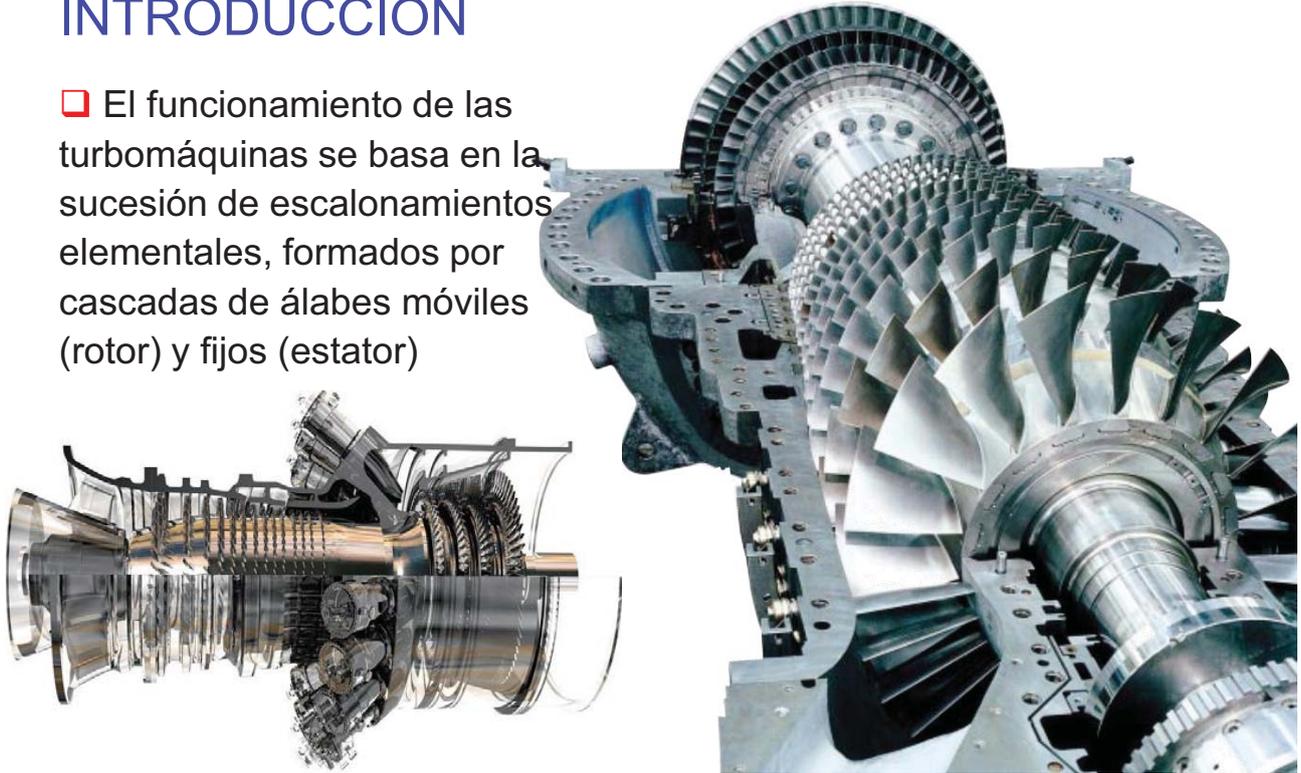
REACCIÓN

VELOCIDAD

R

## INTRODUCCIÓN

El funcionamiento de las turbomáquinas se basa en la sucesión de escalonamientos elementales, formados por cascadas de álabes móviles (rotor) y fijos (estator)



INTRODUCCIÓN

EFT

ACCIÓN

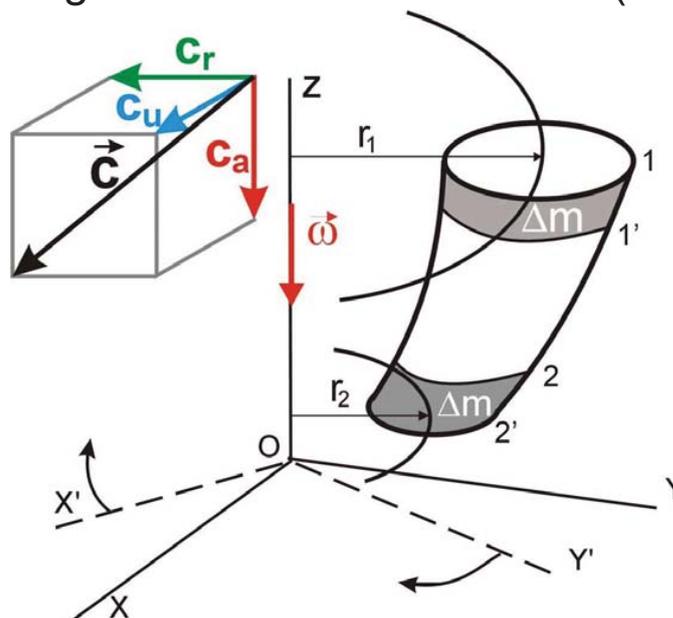
REACCIÓN

VELOCIDAD

R

## DEDUCCIÓN DE LA EFT

Definición geométrica del canal móvil (rotor)



INTRODUCCIÓN

EFT

ACCIÓN

REACCIÓN

VELOCIDAD

R

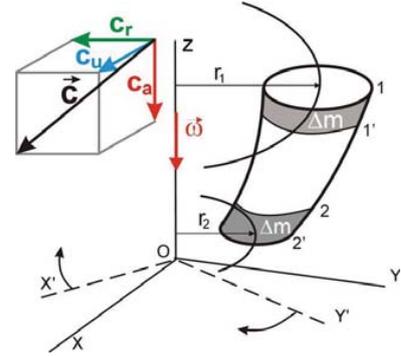
## DEDUCCIÓN DE LA EFT

□ Teorema del momento cinético:

$$\sum \vec{M} = \frac{d}{dt} (\vec{r} \times m \cdot \vec{c})$$

□ Aplicado a un sistema abierto:

$$\sum \vec{M} = \frac{\partial}{\partial t} \int_V \vec{r} \times \rho \cdot \vec{c} \cdot dV + \int_S \vec{r} \times \rho \cdot \vec{c} \cdot \vec{c} \cdot d\vec{S}$$



INTRODUCCIÓN

EFT

ACCIÓN

REACCIÓN

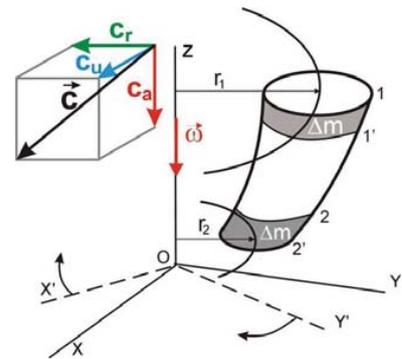
VELOCIDAD

R

## DEDUCCIÓN DE LA EFT

□ Aplicado entre las secciones 1 y 2, y suponiendo el sistema estacionario:

$$\begin{aligned} \sum M_z &= -r_1 \cdot \rho \cdot c_{1u} \cdot c_{1a} \cdot S_1 + r_2 \cdot \rho \cdot c_{2u} \cdot c_{2a} \cdot S_2 \\ &= -r_1 \cdot c_{1u} \cdot \dot{m} + r_2 \cdot c_{2u} \cdot \dot{m} \\ &= \dot{m} \cdot (r_2 \cdot c_{2u} - r_1 \cdot c_{1u}) \end{aligned} \quad (\text{EFT})$$



□  $M_{\text{motor}} = -M_z$

INTRODUCCIÓN

EFT

ACCIÓN

REACCIÓN

VELOCIDAD

R

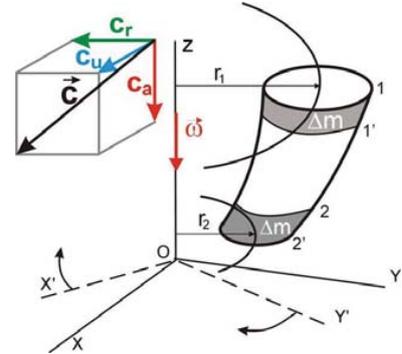
## DEDUCCIÓN DE LA EFT

Formulaciones alternativas de la EFT:

$$M_u = \dot{m} \cdot (r_1 \cdot c_{1u} - r_2 \cdot c_{2u})$$

$$N_u = \dot{m} \cdot (u_1 \cdot c_{1u} - u_2 \cdot c_{2u})$$

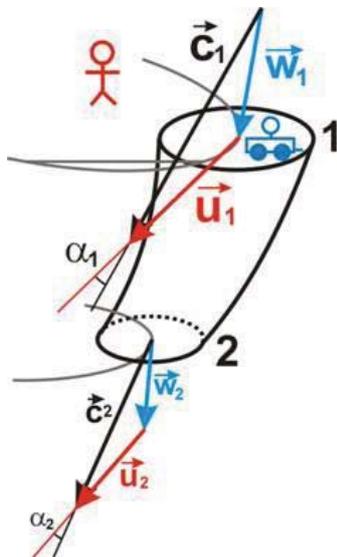
$$W_u = u_1 \cdot c_{1u} - u_2 \cdot c_{2u}$$



INTRODUCCIÓN	EFT	ACCIÓN	REACCIÓN	VELOCIDAD	R
--------------	-----	--------	----------	-----------	---

## TRIÁNGULOS DE VELOCIDADES

Resulta normal reformular la EFT según los triángulos de velocidad en las secciones de entrada y de salida:



$$\vec{c} = \vec{u} + \vec{w}$$

$$u = \omega \cdot r$$

Definiendo el ángulo entre u y c:

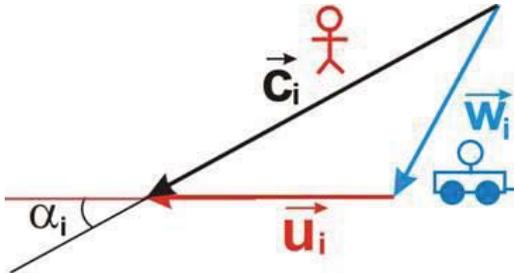
$$\vec{w}_i = \vec{c}_i - \vec{u}_i$$

$$\vec{c}_{iu} = \vec{c}_i \cdot \cos \alpha_i \quad i = 1, 2$$

INTRODUCCIÓN	EFT	ACCIÓN	REACCIÓN	VELOCIDAD	R
--------------	-----	--------	----------	-----------	---

## TRIÁNGULOS DE VELOCIDADES

□ Aplicando el teorema del coseno:



$$w_i^2 = c_i^2 + u_i^2 - 2u_i \cdot c_i \cdot \cos \alpha_i \quad i = 1, 2$$

$$u_i \cdot c_{iu} = u_i \cdot c_i \cdot \cos \alpha_i = \frac{1}{2} (c_i^2 + u_i^2 - w_i^2)$$

□ Y sustituyendo en la EFT:

$$W_u = \frac{c_1^2 - c_2^2}{2} + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} + \frac{u_1^2 - u_2^2}{2} \quad (\text{EFT2})$$

INTRODUCCIÓN	EFT	ACCIÓN	REACCIÓN	VELOCIDAD	R
--------------	-----	--------	----------	-----------	---

## ECUACIÓN DE LA ENERGÍA

□ Puede combinarse el Primer Principio con la EFT; generalmente se estudian dos casos:

➤ Sistema de referencia fijo



➤ Sistema de referencia móvil (o no inercial)



□ En ambos casos se supondrá una evolución **adiabática**

INTRODUCCIÓN	EFT	ACCIÓN	REACCIÓN	VELOCIDAD	R
--------------	-----	--------	----------	-----------	---

## ECUACIÓN DE LA ENERGÍA

- ❑ Sistema de referencia fijo:

$$\text{♀} \quad W_u = h_1 - h_2 + \frac{c_1^2 - c_2^2}{2} = h_{10} - h_{20} \quad (\text{EEF})$$

- ❑ Sistema de referencia móvil (EFT2+EEF):

$$\text{♂} \quad h_1 + \frac{w_1^2}{2} + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2} = h_2 + \frac{w_2^2}{2} \quad (\text{EEM})$$

- ❑ O definiendo la **entalpía de parada relativa** Trabajo fuerzas

$$\text{♂} \quad h_{10r} + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2} = h_{20r} \quad \text{Trabajo fuerzas centrífugas (radiales)}$$

INTRODUCCIÓN	EFT	ACCIÓN	REACCIÓN	VELOCIDAD	R
--------------	-----	--------	----------	-----------	---

## ECUACIÓN DE LA ENERGÍA

- ❑ Se aplicará a diversas máquinas **elementales** la EFT y la ecuación de la energía

- ❑ Reconsiderando la EFT:

$$W_u = \frac{c_1^2 - c_2^2}{2} + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} + \frac{u_1^2 - u_2^2}{2}$$

↓
↓
↓

Variación energía cinética (acción)      Expansión/comp. en el rotor (reacción)      Trabajo fuerzas centrífugas (radiales)

INTRODUCCIÓN	EFT	ACCIÓN	REACCIÓN	VELOCIDAD	R
--------------	-----	--------	----------	-----------	---

## ECUACIÓN DE LA ENERGÍA

$$W_u = \frac{c_1^2 - c_2^2}{2} + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} + \frac{u_1^2 - u_2^2}{2}$$

### Tipologías

	$W_u$	$\frac{c_1^2 - c_2^2}{2}$	$\frac{w_2^2 - w_1^2}{2}$	$\frac{u_1^2 - u_2^2}{2}$
Turbina axial acción	>0	>0	<0	=0
Turbina axial reacción	>0	>0	>0	=0
Turbina radial	>0	>0	>0	>0
Compresor axial	<0	<0	<0	=0
Compresor radial	<0	<0	<0	<0

ROTOR GEOM.  
CONVERGENTE

>0

CENTRÍPETA

>0

ROTOR GEOM.  
DIVERGENTE

<0

CENTRÍFUGO

<0

INTRODUCCIÓN

EFT

ACCIÓN

REACCIÓN

VELOCIDAD

R

## ACTIVIDAD

Dibuja los triángulos de velocidad y las evoluciones termodinámicas para los 5 tipos de escalonamientos

### Recordar de Máquinas Térmicas

➤ Entalpía de parada

➤ Grado de reacción

➤ Definiciones de rendimiento

$$h_0 = h + \frac{c^2}{2} \quad R = \frac{h_1 - h_2}{h_{00} - h_{20}}$$

$$\eta_{u,TE} = \frac{W_u}{\Delta h_s} \quad \eta_{u,TT} = \frac{W_u}{\Delta h_s - \frac{c_2^2}{2}}$$

INTRODUCCIÓN

EFT

ACCIÓN

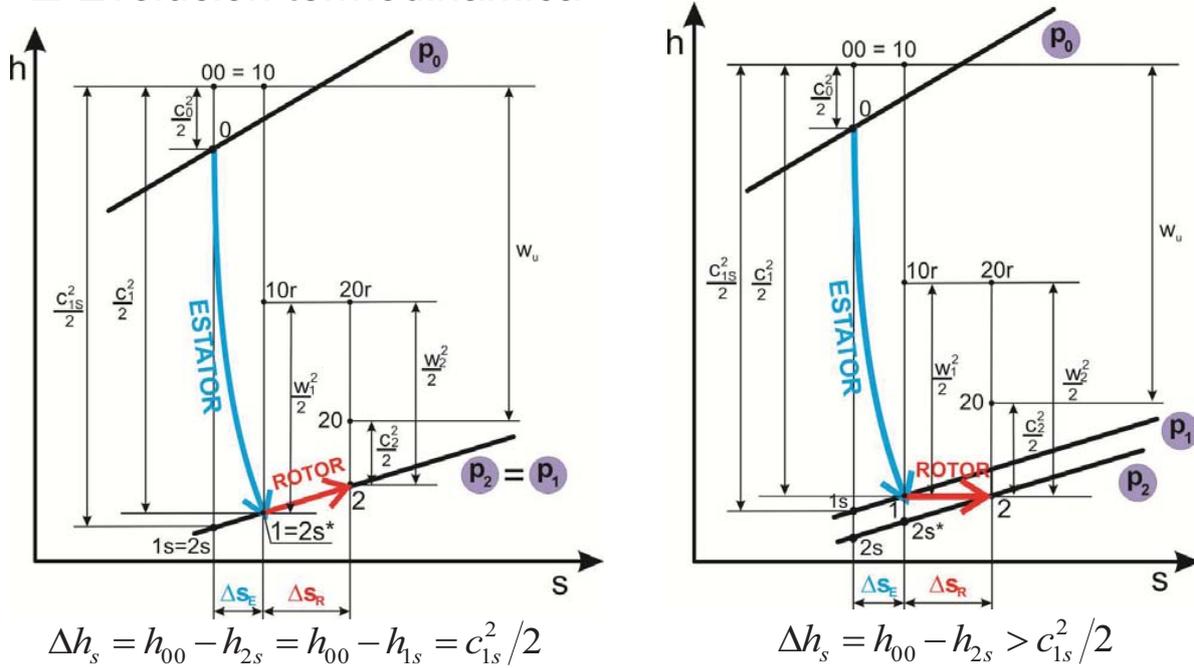
REACCIÓN

VELOCIDAD

R

# ESCALONAMIENTO DE ACCIÓN

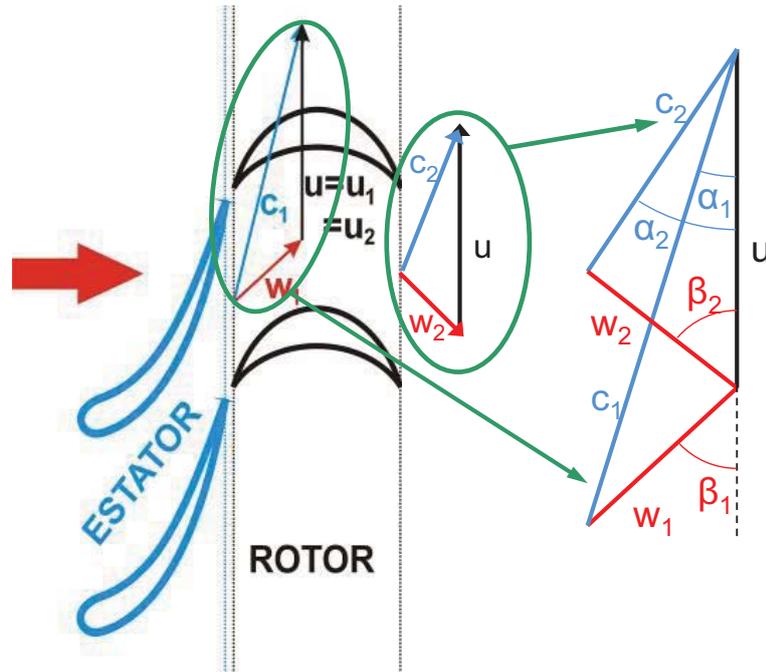
## Evolución termodinámica



INTRODUCCIÓN	EFT	ACCIÓN	REACCIÓN	VELOCIDAD	R
--------------	-----	--------	----------	-----------	---

# ESCALONAMIENTO DE ACCIÓN

## Triángulos de velocidad



INTRODUCCIÓN	EFT	ACCIÓN	REACCIÓN	VELOCIDAD	R
--------------	-----	--------	----------	-----------	---

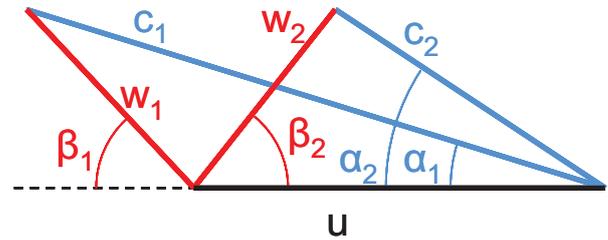
## ESCALONAMIENTO DE ACCIÓN

### □ Triángulos de velocidad

- A partir de la EFT:

$$W_u = u_1 \cdot c_{1u} - u_2 \cdot c_{2u}$$

$$W_u = u \cdot (c_{1u} - c_{2u})$$



- Del triángulo de velocidades:

$$c_1 \cdot \cos\alpha_1 - c_2 \cdot \cos\alpha_2 = w_1 \cdot \cos\beta_1 + w_2 \cdot \cos\beta_2$$

$$W_u = u \cdot w_1 \cdot \cos\beta_1 \left[ 1 + \frac{w_2 \cdot \cos\beta_2}{w_1 \cdot \cos\beta_1} \right]$$

INTRODUCCIÓN	EFT	ACCIÓN	REACCIÓN	VELOCIDAD	R
--------------	-----	--------	----------	-----------	---

## ESCALONAMIENTO DE ACCIÓN

### □ Se definen los siguientes coeficientes

- Geometría

- Si álabe simétrico:  $k=1$

$$k = \frac{\cos\beta_2}{\cos\beta_1}$$

- Pérdida de velocidad en el rotor:

- Si  $p_2=p_1$   $\psi = \frac{w_2}{w_1}$

$$\psi = \frac{w_2}{w_{2s}}$$

- Pérdida de velocidad en el estator

$$\varphi = \frac{c_1}{c_{1s}}$$

- Relación cinemática:

$$\sigma = \frac{u}{c_{1s}} \quad \sigma^* = \frac{u}{c_1}$$

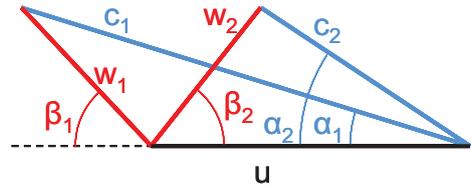
INTRODUCCIÓN	EFT	ACCIÓN	REACCIÓN	VELOCIDAD	R
--------------	-----	--------	----------	-----------	---

## ESCALONAMIENTO DE ACCIÓN

❑ Considerando que

$$w_1 \cos \beta_1 = c_1 \cos \alpha_1 - u$$

se puede escribir:



$$W_u = u \cdot w_1 \cdot \cos \beta_1 \left[ 1 + \frac{w_2 \cdot \cos \beta_2}{w_1 \cdot \cos \beta_1} \right]$$

$$W_u = c_{1s}^2 \sigma (\varphi \cos \alpha_1 - \sigma) (1 + \psi k)$$

❑ Por otra parte, el salto disponible es  $\Delta h_s = c_{1s}^2 / 2$

$$\eta_{u,TE} = \frac{W_u}{\Delta h_s} = 2\sigma (\varphi \cos \alpha_1 - \sigma) (1 + \psi k)$$

INTRODUCCIÓN	EFT	ACCIÓN	REACCIÓN	VELOCIDAD	R
--------------	-----	--------	----------	-----------	---

## ESCALONAMIENTO DE ACCIÓN

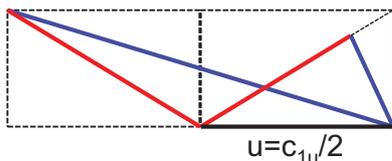
❑ Efecto de la relación cinemática sobre el rendimiento

$$\frac{\partial \eta_{u,TE}}{\partial \sigma^*} = 0$$

$$\eta_{u,max} = \frac{\varphi^2}{2} (1 + \psi \cdot k) \cos^2 \alpha_1$$

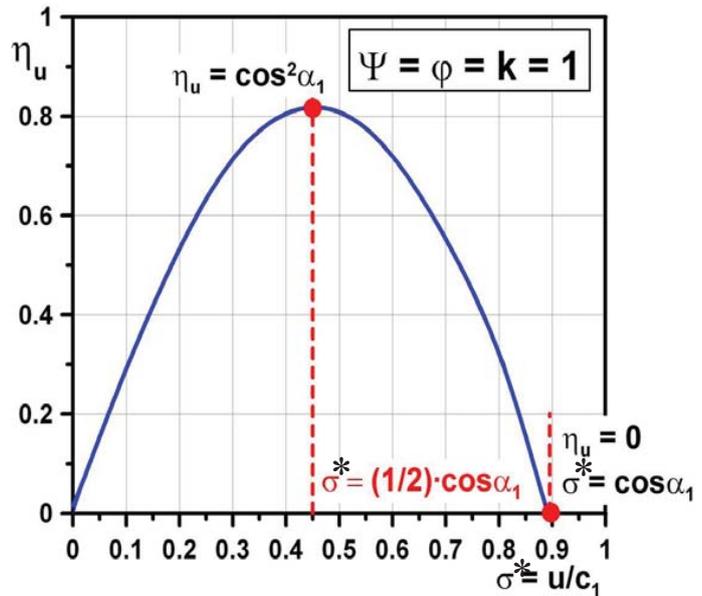
$$\sigma^* = \cos \alpha_1$$

$$\sigma = \varphi \cdot \cos \alpha_1$$



Aunque valores reducidos de  $\alpha_1$  permiten aumentar el rendimiento, debe considerarse que:

- $\downarrow \alpha_1 \Rightarrow \downarrow k$ ;  $\downarrow \alpha_1 \Rightarrow \downarrow c_{1a} \Rightarrow \uparrow \text{Área}$



➤ Parámetros de diseño habituales:

$$\alpha_1 = 16 \div 18^\circ, \beta_1 = \beta_2, \alpha_2 \approx 90^\circ$$

INTRODUCCIÓN	EFT	ACCIÓN	REACCIÓN	VELOCIDAD	R
--------------	-----	--------	----------	-----------	---

## ESCALONAMIENTO DE ACCIÓN

### Balance de pérdidas

$$W_u = \Delta h_s + y_E + y_R + y_2$$

#### Estator

$$y_E = \frac{c_{1s}^2}{2} - \frac{c_1^2}{2} = \frac{c_{1s}^2}{2} \cdot (1 - \varphi^2) = \frac{c_1^2}{2} \cdot \frac{(1 - \varphi^2)}{\varphi^2}$$

#### Rotor

$$y_R = \frac{w_{2s}^2}{2} - \frac{w_2^2}{2} \Big|_{p_1=p_2} = \frac{w_1^2}{2} \cdot (1 - \psi^2) = \frac{w_2^2}{2} \cdot \frac{(1 - \psi^2)}{\psi^2}$$

#### Velocidad de salida

$$y_2 = y_s = \frac{c_2^2}{2}$$

$$\eta_{u,TT} = \frac{\Delta h_s - y_E - y_R - y_2}{\Delta h_s - y_2}$$

$$\eta_{u,TE} = \frac{\Delta h_s - y_E - y_R - y_2}{\Delta h_s}$$

INTRODUCCIÓN

EFT

ACCIÓN

REACCIÓN

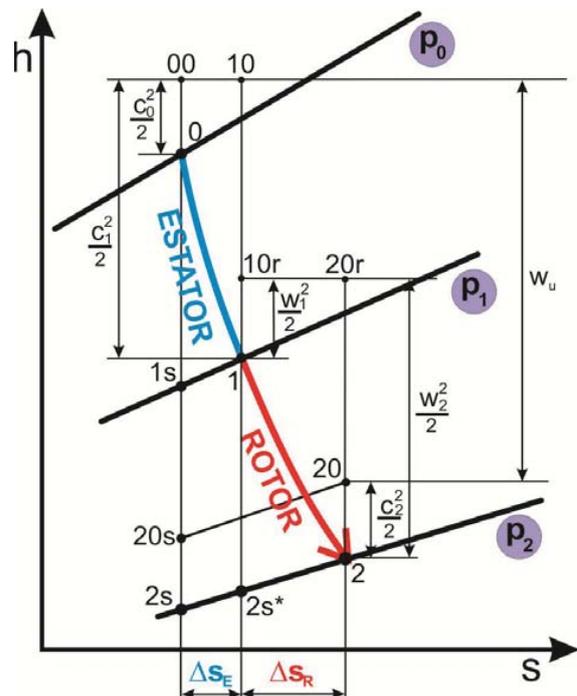
VELOCIDAD

R

## ESCALONAMIENTO DE REACCIÓN

Los escalonamientos de reacción desarrollados industrialmente suelen tener **grados de reacción** del orden de **0,5** por lo que parte de la expansión se realiza en el **estator** y parte de la expansión se realiza en el **rotor**

Se supondrá en lo que sigue una máquina axial



INTRODUCCIÓN

EFT

ACCIÓN

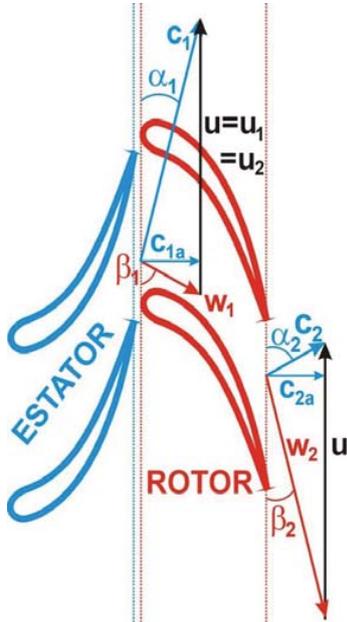
REACCIÓN

VELOCIDAD

R

# ESCALONAMIENTO DE REACCIÓN

**Hipótesis**



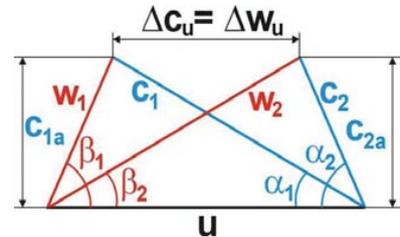
1. Se emplea (por simplicidad) el mismo perfil para los álabes fijos que para los móviles:

$$\Rightarrow \alpha_2 = \beta_1 \quad \alpha_1 = \beta_2$$

2. Se incrementa progresivamente la altura del álabes para mantener la velocidad axial de circulación  $\Rightarrow C_{1a} = C_{2a}$

➤ Con estas hipótesis los triángulos de entrada y salida son iguales, por tanto:

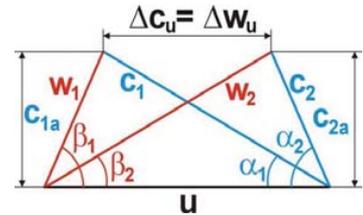
$$\Rightarrow C_1 = W_2, \quad C_2 = W_1$$



INTRODUCCIÓN	EFT	ACCIÓN	REACCIÓN	VELOCIDAD	R
--------------	-----	--------	----------	-----------	---

# ESCALONAMIENTO DE REACCIÓN

Del análisis del triángulo de velocidad:



$$R = \frac{h_1 - h_2}{h_{00} - h_{20}} = \frac{\frac{w_2^2}{2} - \frac{w_1^2}{2}}{W_u} = \frac{\frac{w_2^2}{2} - \frac{w_1^2}{2}}{u \cdot \Delta c_u} = \frac{w_2^2 - w_1^2}{2 \cdot u \cdot \Delta w_u}$$

Como

$$\left. \begin{aligned} w_2^2 &= w_{2u}^2 + C_a^2 \\ w_1^2 &= w_{1u}^2 + C_a^2 \end{aligned} \right\} w_2^2 - w_1^2 = w_{2u}^2 - w_{1u}^2$$

$$R = \frac{w_{2u}^2 - w_{1u}^2}{2 \cdot u \cdot (w_{2u} - w_{1u})} = \frac{w_{2u} + w_{1u}}{2 \cdot u} = 0,5$$

INTRODUCCIÓN	EFT	ACCIÓN	REACCIÓN	VELOCIDAD	R
--------------	-----	--------	----------	-----------	---

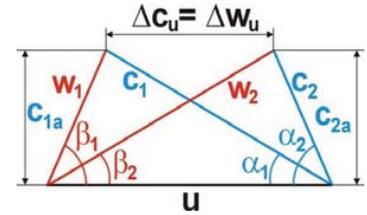
## ESCALONAMIENTO DE REACCIÓN

□ Por su parte el trabajo resulta:

$$W_u = u \cdot [c_{1u} - c_{2u}]$$

$$c_{2u} = u - c_{1u}$$

$$c_{1u} = c_1 \cdot \cos \alpha_1 = \varphi \cdot c_{1s} \cdot \cos \alpha_1$$



$$W_u = u \cdot [2 \cdot \varphi \cdot c_{1s} \cdot \cos \alpha_1 - u]$$

INTRODUCCIÓN

EFT

ACCIÓN

REACCIÓN

VELOCIDAD

R

## ESCALONAMIENTO DE REACCIÓN

□ El rendimiento se puede resolver a través de un balance

$$\eta_{u,TT} = \frac{W_u}{W_u + y_E + y_R}$$

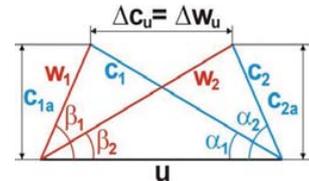
➤ Pérdidas en el estator

$$y_E = \frac{c_{1s}^2}{2} - \frac{c_1^2}{2} = \frac{c_1^2}{2} \left( \frac{1 - \varphi^2}{\varphi^2} \right)$$

➤ Pérdidas en el rotor

$$y_R = \frac{w_{2s}^2}{2} - \frac{w_2^2}{2} = \frac{w_2^2}{2} \left( \frac{1 - \varphi^2}{\varphi^2} \right) = y_E$$

$$\eta_{u,TT} = \frac{1}{1 + 2y_E/W_u} = \frac{1}{1 + \frac{(1 - \varphi^2)/\varphi^2}{\sigma^* (2 \cos \alpha_1 - \sigma^*)}}$$



INTRODUCCIÓN

EFT

ACCIÓN

REACCIÓN

VELOCIDAD

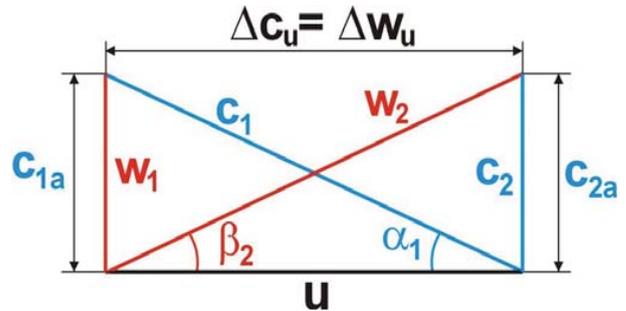
R

## ESCALONAMIENTO DE REACCIÓN

□ Efecto de la relación cinemática sobre el rendimiento

$$\frac{\partial \eta_{u,TT}}{\partial \sigma^*} = 0 \quad \begin{matrix} \sigma = \varphi \cdot \cos \alpha_1 \\ \sigma^* = \cos \alpha_1 \end{matrix} \rightarrow \boxed{\eta_{u,max} = \frac{\cos^2 \alpha_1}{\cos^2 \alpha_1 + \xi_E}}$$

En un escalonamiento de reacción con  $R = 0,5$ , manteniendo  $c_a$  y con la relación cinemática de máximo rendimiento, los triángulos de velocidad son rectángulos e iguales en la entrada y salida del rotor.

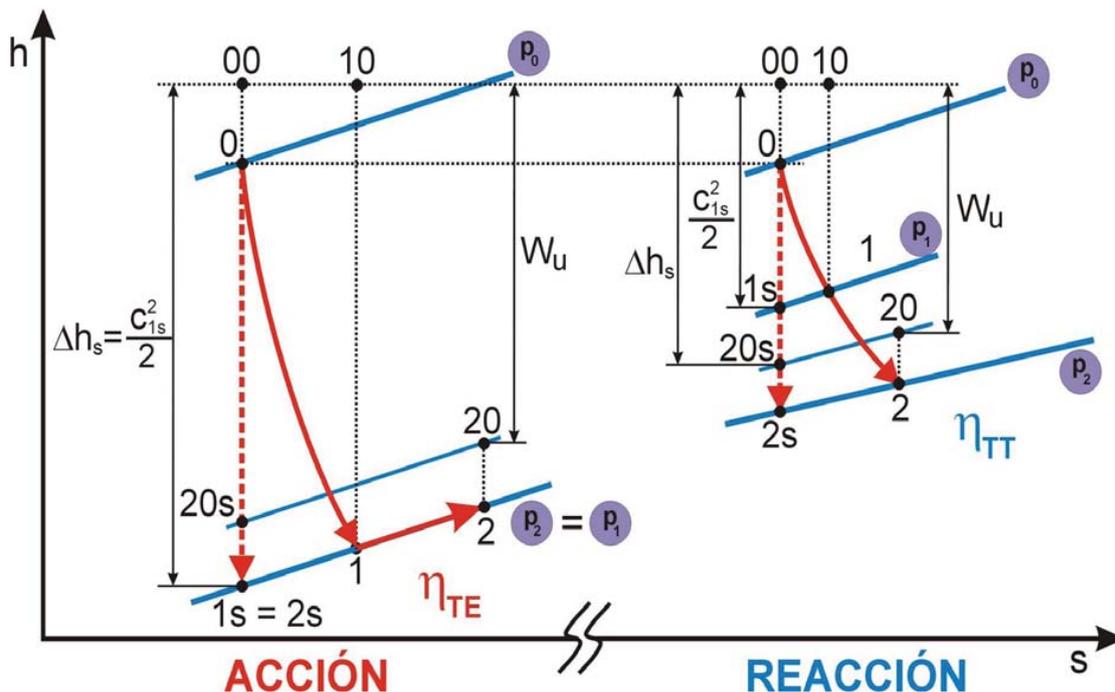


➤ Teóricamente,  $\alpha_1 = 0^\circ \rightarrow$  más favorable

➤  $\alpha_1$  diseño suele estar comprendido entre  $20^\circ \div 30^\circ$

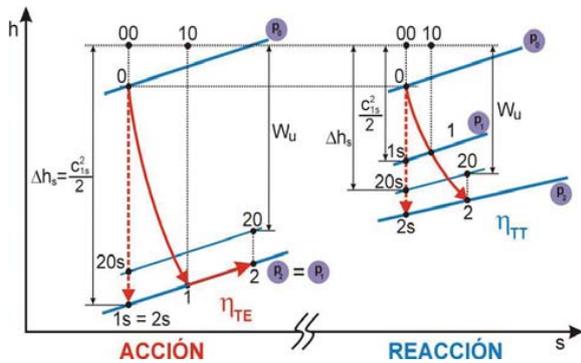
INTRODUCCIÓN	EFT	ACCIÓN	REACCIÓN	VELOCIDAD	R
--------------	-----	--------	----------	-----------	---

## COMPARACIÓN ACCIÓN-REACCIÓN



INTRODUCCIÓN	EFT	ACCIÓN	REACCIÓN	VELOCIDAD	R
--------------	-----	--------	----------	-----------	---

# COMPARACIÓN ACCIÓN-REACCIÓN



	Acción	Reacción
$\sigma^*(\eta_{u,max})$	$\frac{1}{2} \cdot \cos\alpha_1$	$\cos\alpha_1$
$\sigma(\eta_{u,max})$	$\frac{1}{2} \cdot \varphi \cdot \cos\alpha_1$	$\varphi \cdot \cos\alpha_1$
$\Delta h_s$	$\frac{1}{2} \cdot C_{1s}^2$	$\approx 2 \cdot \frac{C_{1s}^2}{2}$
$u(\eta_{u,max})$	$\sqrt{2\Delta h_s} \cdot \frac{1}{2} \cdot \varphi \cdot \cos\alpha_1$	$\sqrt{\Delta h_s} \cdot \varphi \cdot \cos\alpha_1$

- Un escalonamiento de **acción** necesita un régimen de giro más bajo que el de **reacción** para el mismo salto  $\Delta h_s$ .
- Un escalonamiento de **acción** absorbe un salto del orden del **doble** que el de **reacción** para la misma **velocidad periférica**.

$$u_{\text{reac}} \cong \sqrt{2} \cdot u_{\text{acc}}$$

$$\Delta h_{s,\text{reac}} \cong \frac{1}{2} \cdot \Delta h_{s,\text{acc}}$$

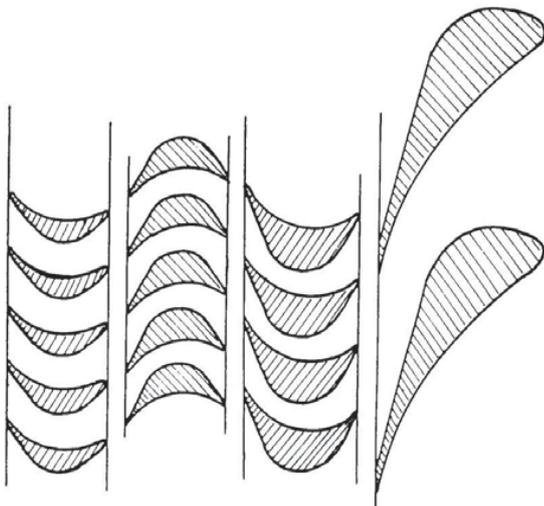
INTRODUCCIÓN	EFT	<b>ACCIÓN</b>	<b>REACCIÓN</b>	VELOCIDAD	R
--------------	-----	---------------	-----------------	-----------	---

# ESCALONAMIENTO DE VELOCIDAD

Con el fin de bajar la relación cinemática para un salto entálpico dado, es posible trabajar con escalonamientos de velocidad (rueda Curtis)

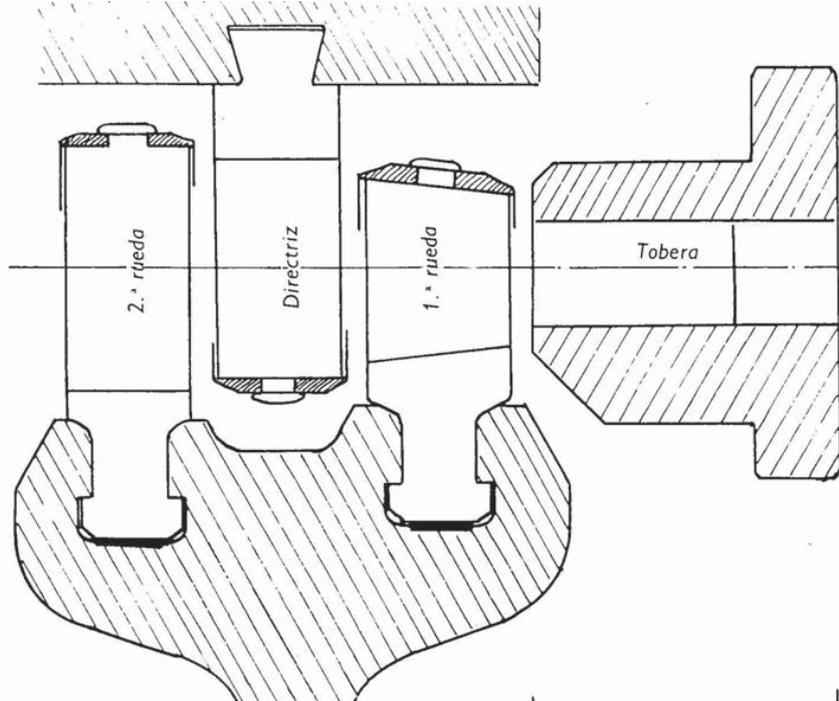
$$u_{\eta_{\max}} = \frac{C_{1s}}{2 \cdot j} \cdot \cos\alpha_1$$

(j escalonamientos de velocidad con álabes simétricos y sin pérdidas)



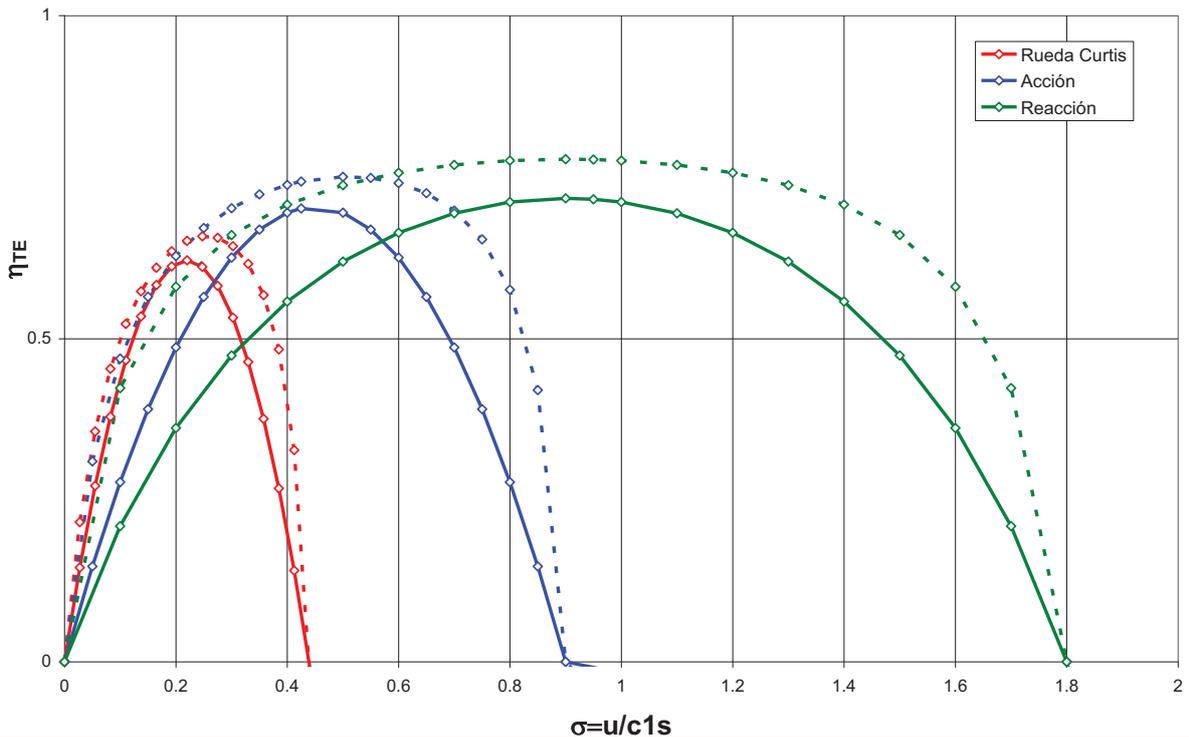
INTRODUCCIÓN	EFT	ACCIÓN	REACCIÓN	<b>VELOCIDAD</b>	R
--------------	-----	--------	----------	------------------	---

# ESCALONAMIENTO DE VELOCIDAD



INTRODUCCIÓN	EFT	ACCIÓN	REACCIÓN	<b>VELOCIDAD</b>	R
--------------	-----	--------	----------	------------------	---

## RESUMEN: COMPARACIÓN DE ESCALONAM.



INTRODUCCIÓN	EFT	ACCIÓN	REACCIÓN	VELOCIDAD	<b>R</b>
--------------	-----	--------	----------	-----------	----------

## RESUMEN

- ❑ La unidad fundamental de las turbomáquinas es el escalonamiento, formado por una parte fija (estator) y una parte móvil (rotor).
- ❑ El cuerpo de una turbomáquina es la sucesión de escalonamientos formados por cascadas de álabes móviles y fijos.
- ❑ El Teorema de Euler -también conocido como “Ecuación Fundamental de las Turbomáquinas (EFT)”- explica el principio de funcionamiento de éstas.
- ❑ El grado de reacción es el parámetro utilizado para caracterizar el tipo de escalonamiento de una turbomáquina.
- ❑ Para un mismo salto entálpico, el escalonamiento de acción necesita un régimen de giro más bajo que un salto de reacción.
- ❑ Para una misma velocidad periférica, el escalonamiento de acción absorbe un salto entálpico del orden del doble que el de reacción.
- ❑ Para un salto entálpico dado, un salto de velocidad (rueda Curtis) permite bajar la relación cinemática.

INTRODUCCIÓN	EFT	ACCIÓN	REACCIÓN	VELOCIDAD	R
--------------	-----	--------	----------	-----------	---

## BIBLIOGRAFÍA

- ❑ S.L. Dixon  
“Mecánica de fluidos: Termodinámica de las turbomáquinas”
- ❑ C. Mataix  
“Turbomáquinas térmicas”
- ❑ JM. Muñoz, M. Valdés y M. Muñoz,  
“Turbomáquinas térmicas: fundamentos del diseño termodinámico”
- ❑ J.I. Nogueira y A. Lecuona  
“Turbomáquinas: proceso, análisis y tecnología”

## CONTENIDO

- Introducción
- Disposiciones constructivas
  - Subdivisión del salto en varios escalonamientos
  - Subdivisión en varios cuerpos
- Elementos constructivos
- Regulación y control
- Rangos característicos

INTRODUCCIÓN

DISPOSICIONES

ELEMENTOS

REGULACIÓN

RANGOS

R

## INTRODUCCIÓN – ALGUNOS FABRICANTES

- Siemens
- General electric
- Alstom
- Skoda
- Toshiba
- Mitsubishi

INTRODUCCIÓN

DISPOSICIONES

ELEMENTOS

REGULACIÓN

RANGOS

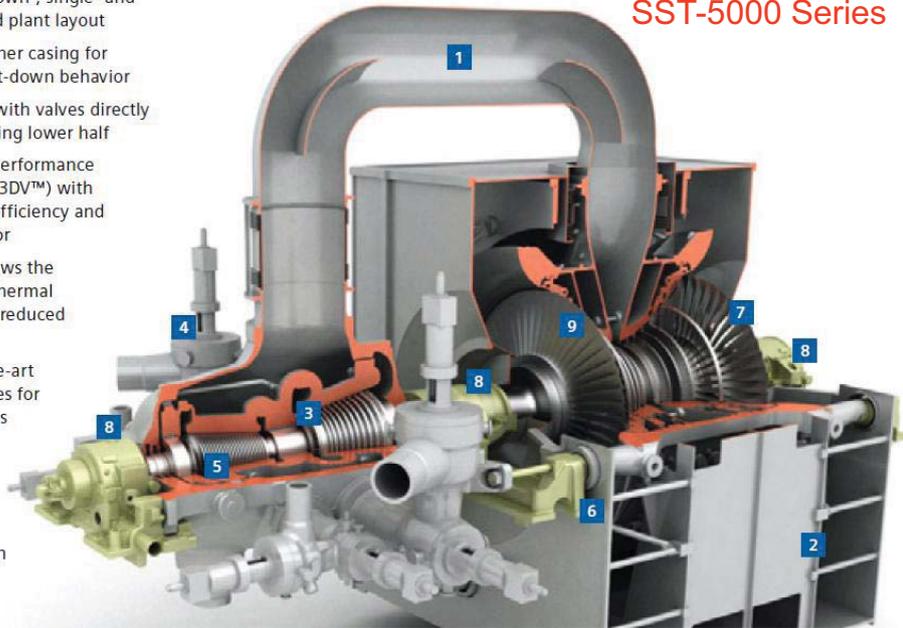
R

## INTRODUCCIÓN - EJEMPLO

- 1 Large diameter single crossover pipe to minimize losses
- 2 Exhaust configurations: Down-, single- and double-sided for optimized plant layout
- 3 Spring back seals in the inner casing for excellent start-up and shut-down behavior
- 4 Short maintenance times with valves directly connected to the outer casing lower half
- 5 Fully 3-dimensional high performance variable reaction blading (3DV™) with integral shrouds for high efficiency and excellent damping behavior
- 6 Push rod arrangement allows the LP-inner casing to follow thermal expansion of the shaft for reduced differential expansion
- 7 Broad range of state-of-the-art high-performance LP blades for different exhaust area sizes
- 8 Single fixed bearing between cylinders for simple alignment and stable operation
- 9 Efficient erosion protection measures for LP blades

Siemens Steam Turbine

SST-5000 Series



INTRODUCCIÓN

DISPOSICIONES

ELEMENTOS

REGULACIÓN

RANGOS

R

## INTRODUCCIÓN

### Aspectos a resaltar

- El salto total se divide en varios escalonamientos
- Las turbinas suelen dividirse en varios cuerpos (AP, MP, BP)
- Pueden existir varios cuerpos de baja presión
- Elementos constructivos principales:
  - Álabes, directrices y toberas
  - Carcasa
  - Válvulas de control
  - Cojinetes
  - Sellos

INTRODUCCIÓN

DISPOSICIONES

ELEMENTOS

REGULACIÓN

RANGOS

R

## DISPOSICIONES CONSTRUCTIVAS

### □ División en varios escalonamientos

Justificación termodinámica

Ejemplo:

80 bar, 550°C → 0.08 bar

$\Delta h_s = 1368$  kJ/kg

$\alpha_1 = 17^\circ$ ;  $\Phi = 1$

$u_{acc} = 790.1$  m/s

$u_{reacc} = 1118.5$  m/s

	Acción	Reacción
$\sigma^*(\eta_{u,max})$	$\frac{1}{2} \cdot \cos \alpha_1$	$\cos \alpha_1$
$\sigma(\eta_{u,max})$	$\frac{1}{2} \cdot \Phi \cdot \cos \alpha_1$	$\Phi \cdot \cos \alpha_1$
$\Delta h_s$	$\frac{1}{2} \cdot C_{1s}^2$	$\approx 2 \cdot \frac{C_{1s}^2}{2}$
$u(\eta_{u,max})$	$\sqrt{2\Delta h_s} \cdot \frac{1}{2} \cdot \Phi \cdot \cos \alpha_1$	$\sqrt{\Delta h_s} \cdot \Phi \cdot \cos \alpha_1$

Resistencia de materiales por fuerza centrífuga →  $u_{max} \sim 400$  m/s

**CONCLUSIÓN:** El salto total debe dividirse en varios escalonamientos consecutivos que trabajen con saltos parciales. A mayor número de saltos:  $\downarrow u \rightarrow \uparrow \eta$

INTRODUCCIÓN	<b>DISPOSICIONES</b>	ELEMENTOS	REGULACIÓN	RANGOS	R
--------------	----------------------	-----------	------------	--------	---

## DISPOSICIONES CONSTRUCTIVAS

### □ Selección de escalonamientos de acción o reacción

**Rendimiento:** mejor en [reacción](#) (menor velocidad fluido)

**Velocidad periférica:** a igualdad de  $u$ , el número de escalonamientos de [acción](#) para un  $\Delta h_s$  es menor

**Pérdidas intersticiales:** casi nulas en [acción](#) (compensada en presiones). Reacción precisa cierres laberínticos

**Empuje axial:** menor en los escalonamientos de [acción](#), al estar el rotor compensado en presiones

**Admisión parcial:** un escalonamiento de [acción](#) puede trabajar con admisión parcial (control cuantitativo) por estar el rotor compensado en presión

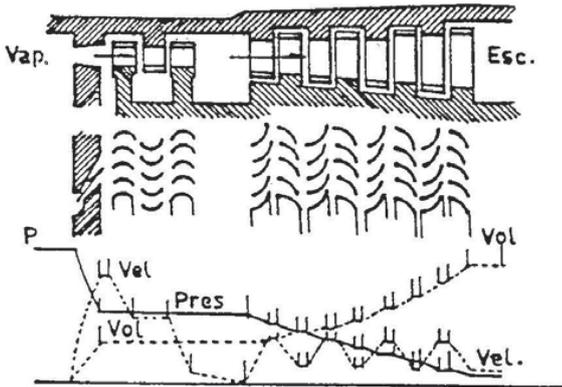
**Temperatura de entrada a los álabes:** menor en [acción](#)

INTRODUCCIÓN	<b>DISPOSICIONES</b>	ELEMENTOS	REGULACIÓN	RANGOS	R
--------------	----------------------	-----------	------------	--------	---

## DISPOSICIONES CONSTRUCTIVAS

### □ División en varios escalonamientos

Configuración habitual: escalonamiento inicial de acción (o rueda curtis) + varios escalonamientos de reacción



El escalonamiento inicial permite:

- Bajar fuertemente la temperatura y presión de entrada al rotor
- Aplicar técnicas de regulación cuantitativa

El resto del diseño se basa en el rendimiento

INTRODUCCIÓN

**DISPOSICIONES**

ELEMENTOS

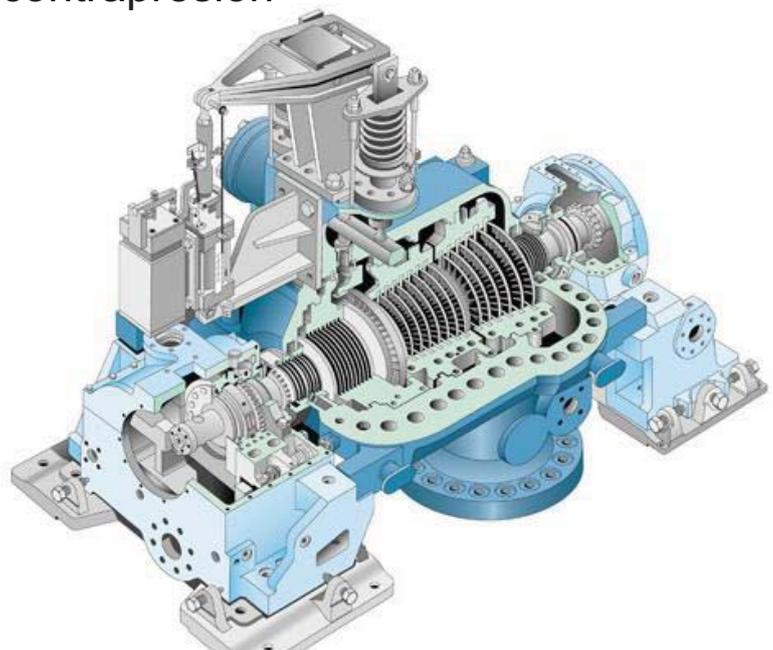
REGULACIÓN

RANGOS

R

## DISPOSICIONES CONSTRUCTIVAS

### □ Ejemplo. Turbina de contrapresión



INTRODUCCIÓN

**DISPOSICIONES**

ELEMENTOS

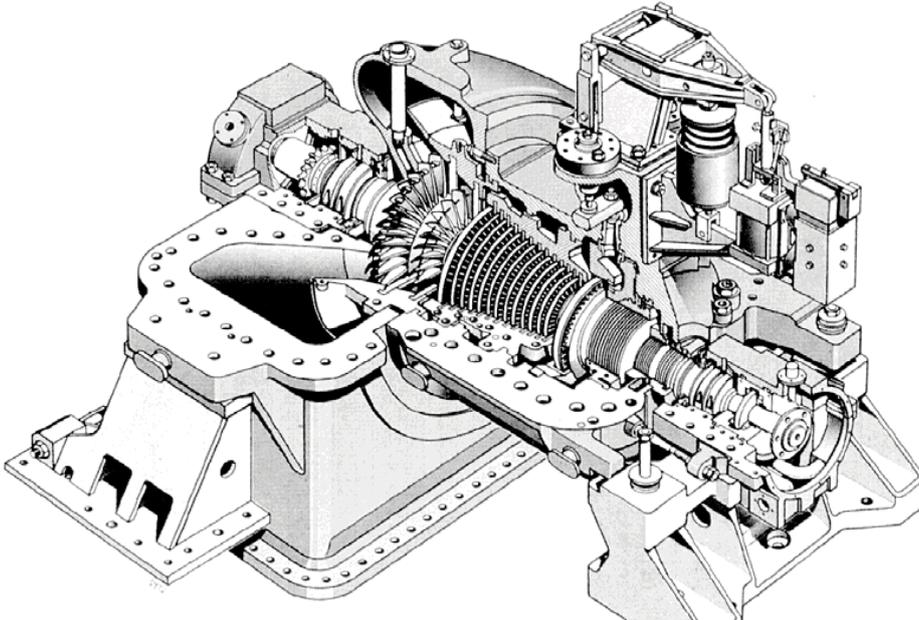
REGULACIÓN

RANGOS

R

## DISPOSICIONES CONSTRUCTIVAS

### ❑ Ejemplo. Turbina de condensación



INTRODUCCIÓN

**DISPOSICIONES**

ELEMENTOS

REGULACIÓN

RANGOS

R

## DISPOSICIONES CONSTRUCTIVAS

### ❑ Disposición en varios cuerpos

#### Justificación termodinámica

$$D_{\text{media,max}} = \frac{60 \cdot u}{\pi \cdot n} = \frac{u}{\pi \cdot f/p} = \frac{400}{\pi \cdot 50/1} = 2.55 \text{ m}$$

$$A_{\text{max}} \approx 0.9 \cdot \pi \cdot \left( \frac{(D+L)^2}{4} - \frac{(D-L)^2}{4} \right) = 0.9 \cdot \pi \cdot \left( \frac{3.5^2}{4} - \frac{1.5^2}{4} \right) = 7.1 \text{ m}^2$$

$$\dot{m}_{\text{max}} = A_{\text{max}} \cdot c_{2a} \cdot \rho_2 \approx 7.1 \cdot 300 \cdot \frac{1}{18} = 134 \text{ kg/s}$$

$$N_e = \dot{m}_{\text{max}} \cdot \Delta h_s = 134 \cdot 1368 = 161 \text{ MW}$$

Un único cuerpo de dimensiones medias no permite trasegar el caudal de vapor para grandes potencias

A mayor sección de escape, menor velocidad ( $c_{2a}$ ) → aumenta rendimiento

**Consecuencia: división del sistema en varios cuerpos en BP**

$$u_{\text{media,max}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot D_{\text{media,max}}}{60 \cdot 2}$$

$$n = 60 \cdot f \cdot p$$



INTRODUCCIÓN

**DISPOSICIONES**

ELEMENTOS

REGULACIÓN

RANGOS

R

## DISPOSICIONES CONSTRUCTIVAS

### □ Disposición en varios cuerpos

- La limitación anterior es especialmente importante en la parte de baja presión ( $\downarrow p$ )
- Suelen combinarse un cuerpo de alta (y otro de media) con varios de baja presión
- La subdivisión en cuerpos de alta y de baja permite:
  - Reducir la longitud del eje
  - Reducir gradientes de presión y temperatura
  - Compensar parcialmente los empujes axiales (cuerpos de alta y media en sentidos opuestos, montaje en baja en mariposa)

INTRODUCCIÓN

**DISPOSICIONES**

ELEMENTOS

REGULACIÓN

RANGOS

R

- |   |   |
|---|---|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1 Symmetric double-flow high-pressure turbine with low wall thickness</li> <li>2 Full three-dimensional high performance variable reaction blading</li> <li>3 Thrust bearing</li> <li>4 Up to three double-flow low-pressure turbines</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>5 Shrunk-on disk rotor</li> <li>6 Effective erosion protection measures</li> <li>7 High level arrangement with downward exhaust</li> </ol> |
|---|---|



Turbina para central nuclear

INTRODUCCIÓN

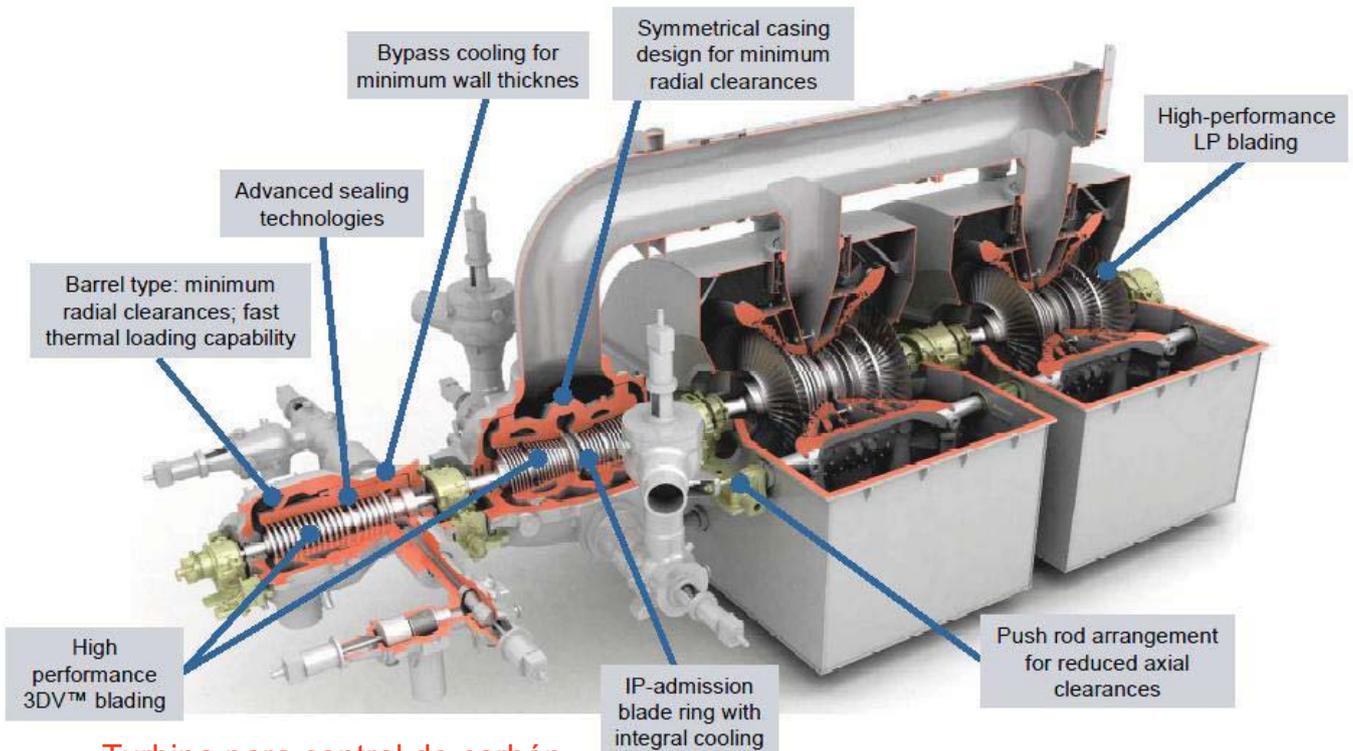
**DISPOSICIONES**

ELEMENTOS

REGULACIÓN

RANGOS

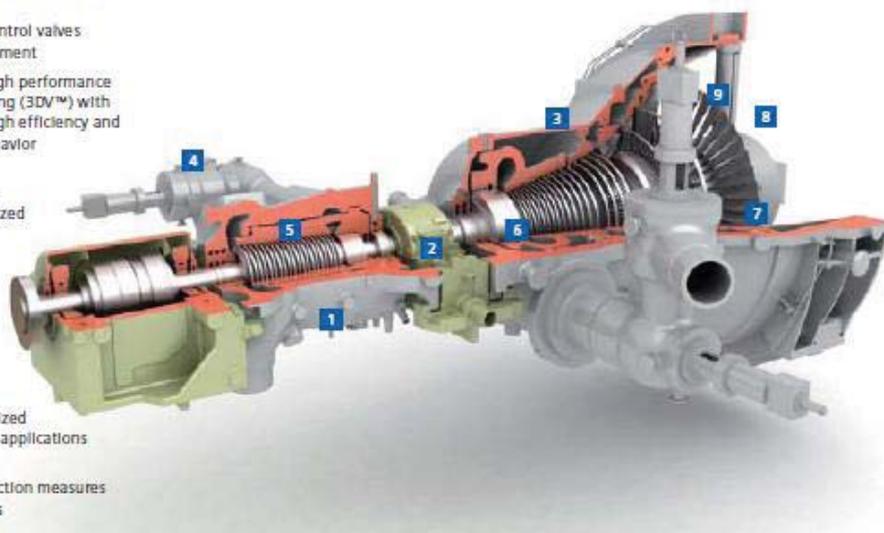
R



Turbina para central de carbón

INTRODUCCIÓN	<b>DISPOSICIONES</b>	ELEMENTOS	REGULACIÓN	RANGOS	R
--------------	----------------------	-----------	------------	--------	---

- 1 Factory assembled barrel-type high pressure casing for even expansion and optimized radial clearances
- 2 Combined journal-thrust bearing between high pressure and intermediate pressure section for reduced differential expansion
- 3 Compact combined intermediate pressure/low pressure section with straight-flow design for maximum efficiency
- 4 Combined stop and control valves in single valve arrangement
- 5 Fully 3-dimensional high performance variable reaction blading (3DV™) with integral shrouds for high efficiency and excellent damping behavior
- 6 Welded intermediate pressure/low pressure shaft design for optimized material application
- 7 Broad range of state-of-the-art high-performance low pressure blades for different exhaust area sizes
- 8 Axial exhaust and standard blades optimized for high back pressure applications (e.g. dry condenser)
- 9 Efficient erosion protection measures for low pressure blades



Turbina para central de ciclo combinado

INTRODUCCIÓN	<b>DISPOSICIONES</b>	ELEMENTOS	REGULACIÓN	RANGOS	R
--------------	----------------------	-----------	------------	--------	---

## DISPOSICIONES CONSTRUCTIVAS



Disposición típica para centrales de ciclo combinado y para pequeñas potencias

El condensador se puede poner al mismo nivel (más barato)



Disposición típica para centrales de ciclo de vapor (incluyendo nucleares)

Montaje en mariposa: compensación del empuje en BP

Condensador debajo de la turbina

INTRODUCCIÓN	<b>DISPOSICIONES</b>	ELEMENTOS	REGULACIÓN	RANGOS	R
--------------	----------------------	-----------	------------	--------	---

## DISPOSICIONES CONSTRUCTIVAS

### □ Ejemplos de diseño

#### ALSTOM

Rango de potencia (MW)	Configuración
120-175	(AP)+(BP)
210-275	(AP)+(BP)
300	(AP)+(MP)+(2·BP)
500-595	(AP)+(MP)+(2·BP)
600-729	(AP)+(MP)+2·(2·BP)

#### TOSHIBA

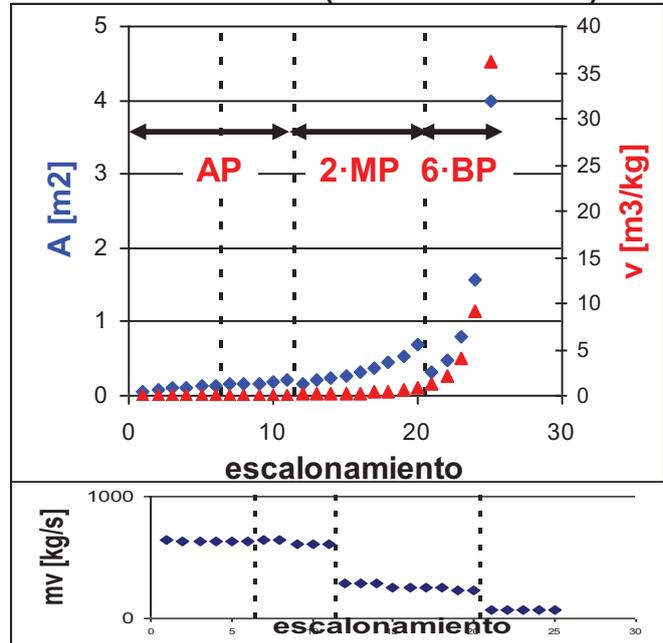
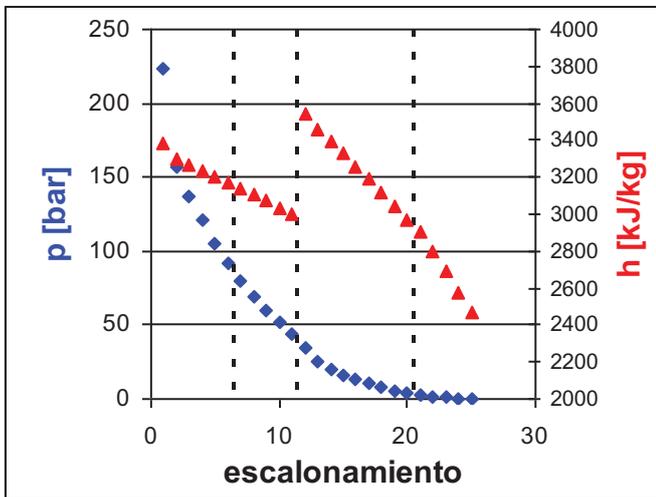
Rango de potencia (MW)	Configuración
150	(AP+BP)
300	(AP+MP)+(2·BP)
500	(AP+MP)+(2·BP)
700	(AP+MP)+2·(2·BP)
1000	(AP)+(MP)+2·(2·BP)

Quando hay varios cuerpos pueden estar montados en 1 eje (*tandem compound*) o 2 ejes (*cross compound*)

INTRODUCCIÓN	<b>DISPOSICIONES</b>	ELEMENTOS	REGULACIÓN	RANGOS	R
--------------	----------------------	-----------	------------	--------	---

## DISPOSICIONES CONSTRUCTIVAS

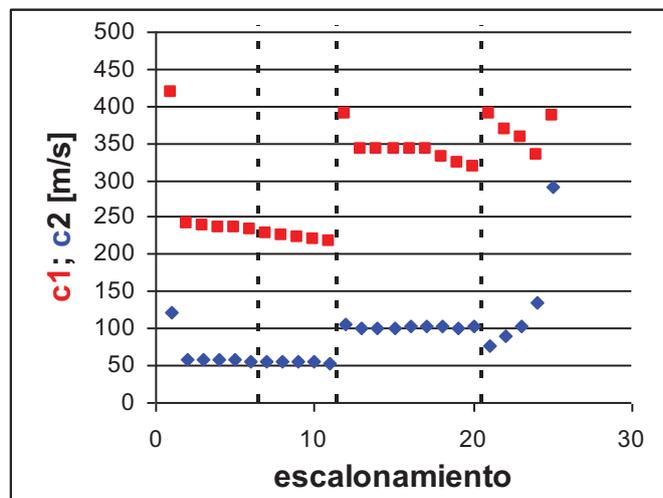
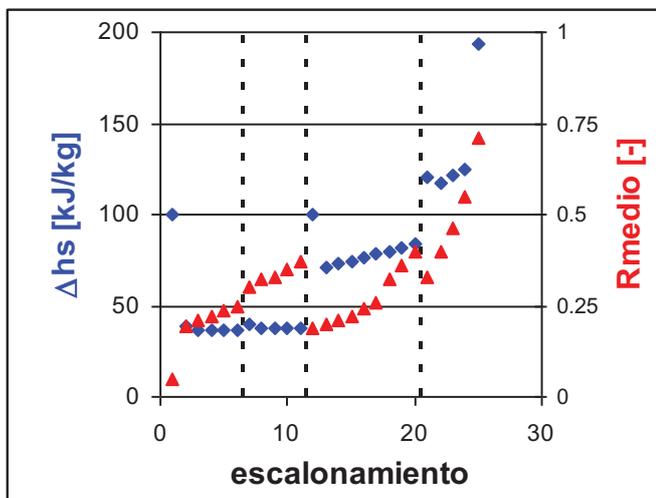
□ Ejemplos de diseño. Turbina de 800 MW (K-800-240-3):



INTRODUCCIÓN	<b>DISPOSICIONES</b>	ELEMENTOS	REGULACIÓN	RANGOS	R
--------------	----------------------	-----------	------------	--------	---

## DISPOSICIONES CONSTRUCTIVAS

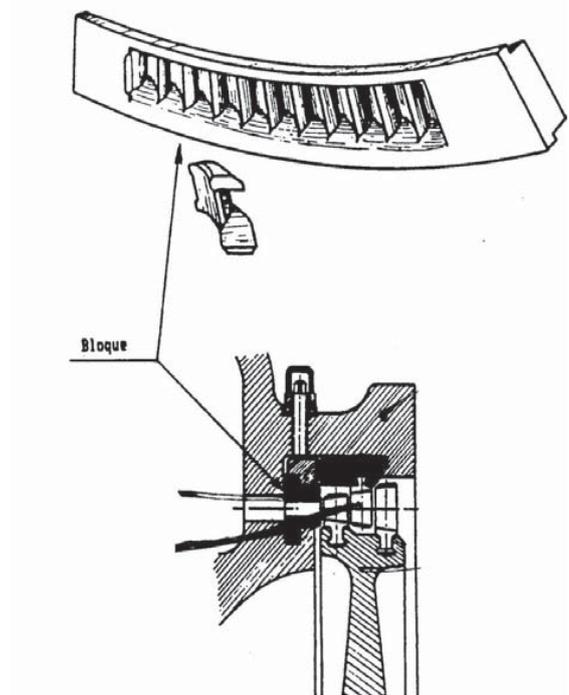
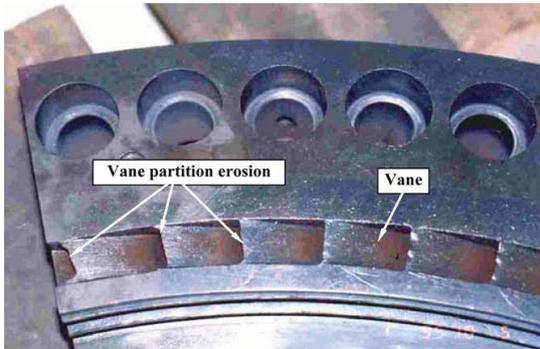
□ Ejemplos de diseño. Turbina de 800 MW (K-800-240-3):



INTRODUCCIÓN	<b>DISPOSICIONES</b>	ELEMENTOS	REGULACIÓN	RANGOS	R
--------------	----------------------	-----------	------------	--------	---

## ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS

### ❑ Directrices y toberas



INTRODUCCIÓN

DISPOSICIONES

**ELEMENTOS**

REGULACIÓN

RANGOS

R

## ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS

### ❑ Directrices y toberas. Montaje en diafragma



INTRODUCCIÓN

DISPOSICIONES

**ELEMENTOS**

REGULACIÓN

RANGOS

R

## ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS

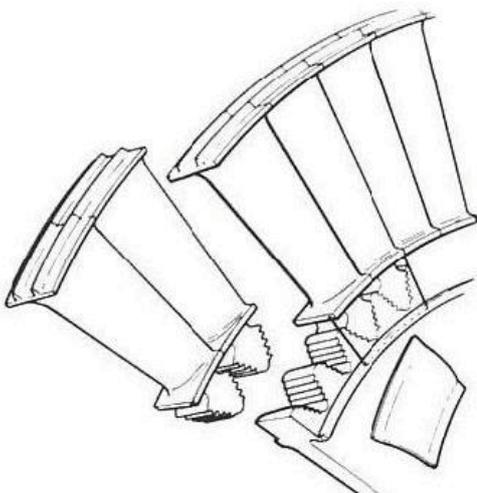
### ❑ Álabes del rotor



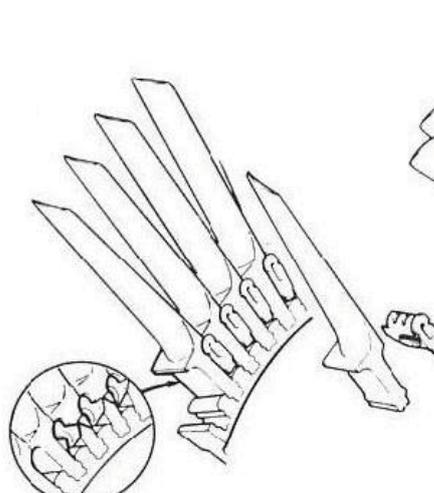
INTRODUCCIÓN	DISPOSICIONES	<b>ELEMENTOS</b>	REGULACIÓN	RANGOS	R
--------------	---------------	------------------	------------	--------	---

## ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS

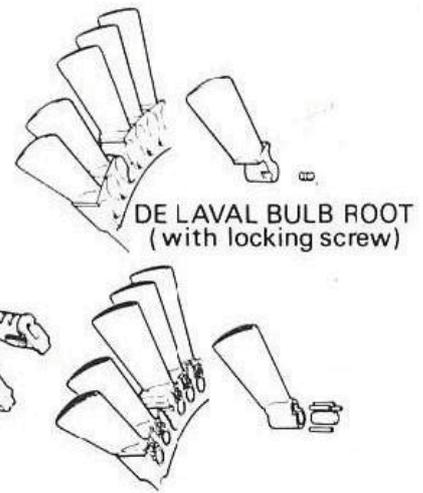
### ❑ Álabes del rotor. Fijación



FIR TREE ROOT  
(with locking plate)



FIR TREE ROOT  
(with shank seals)

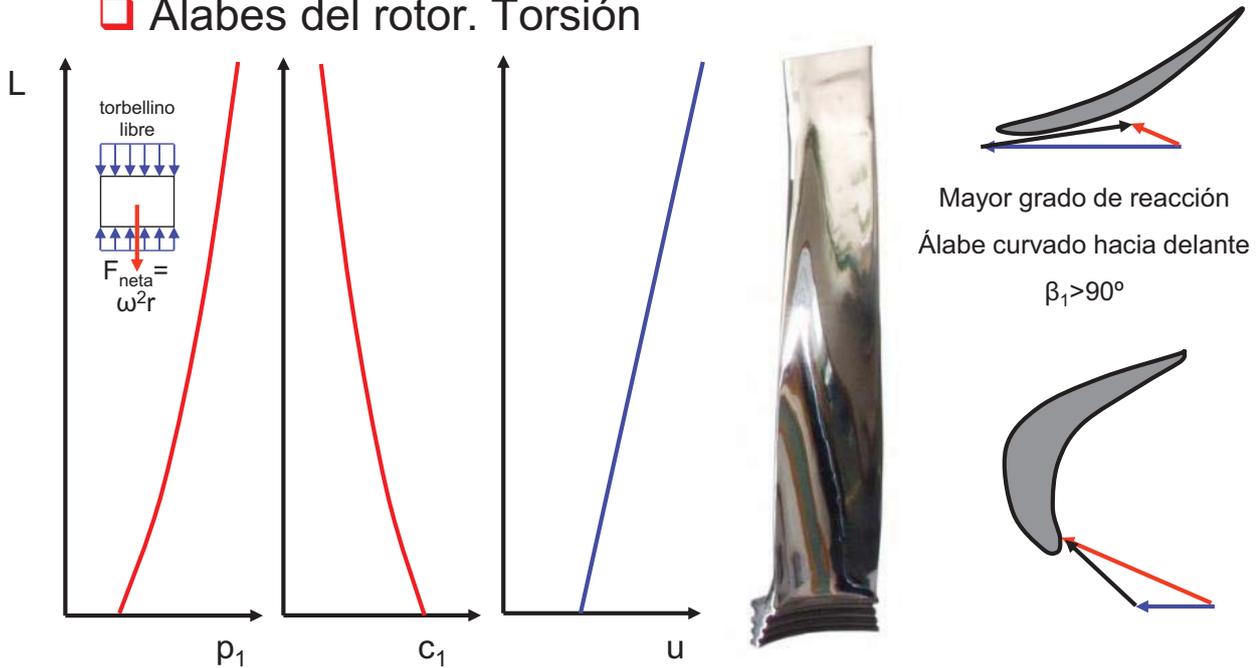


B.M.W. HOLLOW BLADE  
(with retaining pins)

INTRODUCCIÓN	DISPOSICIONES	<b>ELEMENTOS</b>	REGULACIÓN	RANGOS	R
--------------	---------------	------------------	------------	--------	---

## ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS

### Álabes del rotor. Torsión

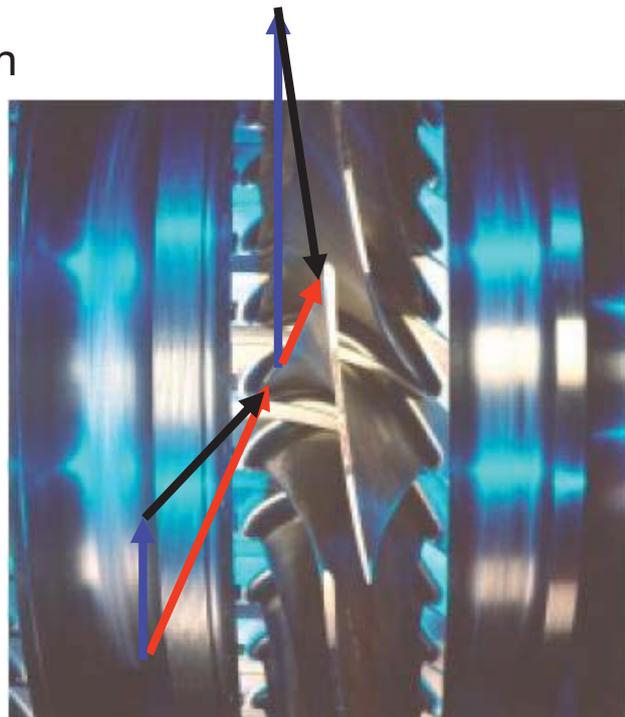
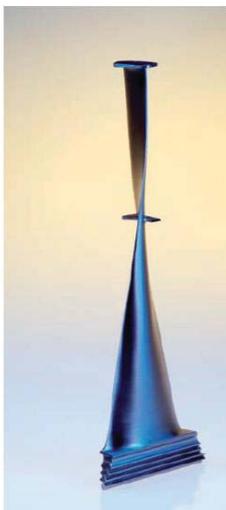


INTRODUCCIÓN	DISPOSICIONES	<b>ELEMENTOS</b>	REGULACIÓN	RANGOS	R
--------------	---------------	------------------	------------	--------	---

## ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS

### Álabes del rotor. Torsión

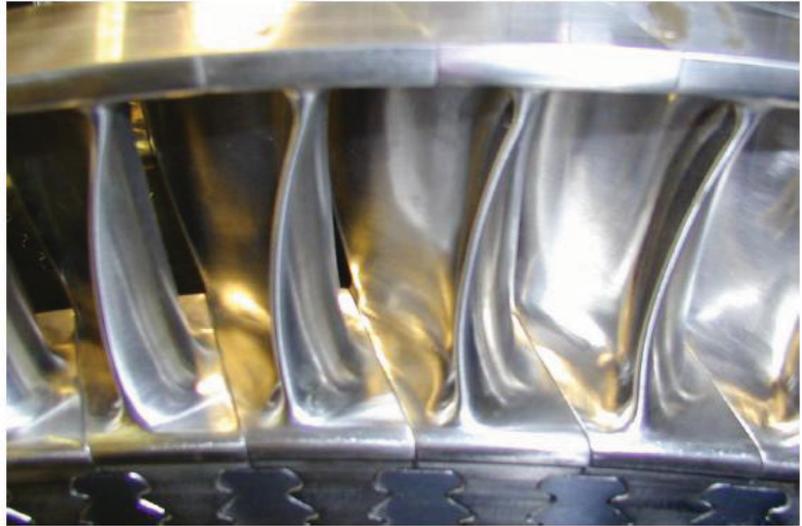
Large last stage blade



INTRODUCCIÓN	DISPOSICIONES	<b>ELEMENTOS</b>	REGULACIÓN	RANGOS	R
--------------	---------------	------------------	------------	--------	---

## ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS

Álabes del rotor. Torsión



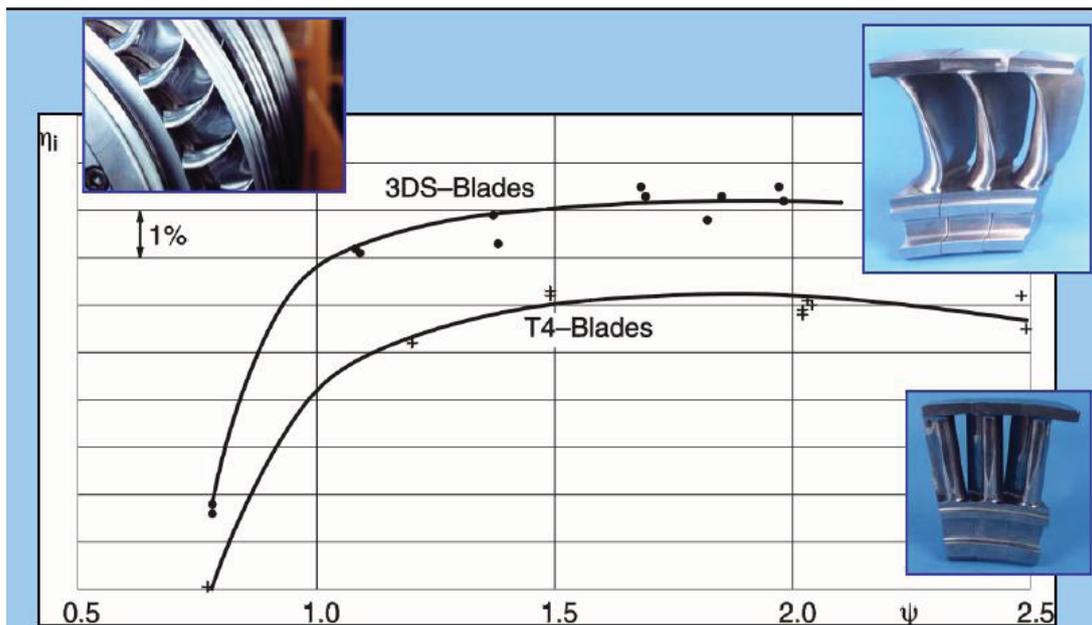
**Stationary blade**

**Rotating Blade**

INTRODUCCIÓN	DISPOSICIONES	ELEMENTOS	REGULACIÓN	RANGOS	R
--------------	---------------	-----------	------------	--------	---

## ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS

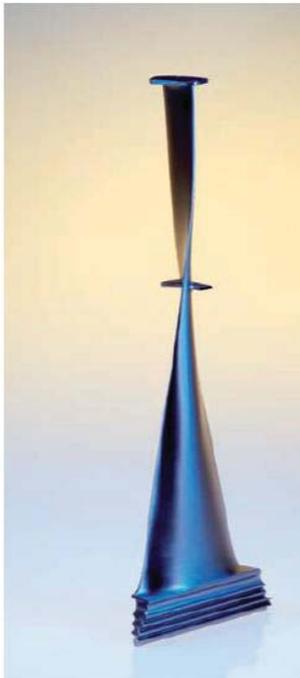
Álabes del rotor. Torsión



INTRODUCCIÓN	DISPOSICIONES	ELEMENTOS	REGULACIÓN	RANGOS	R
--------------	---------------	-----------	------------	--------	---

## ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS

Large last stage blade



INTRODUCCIÓN

DISPOSICIONES

ELEMENTOS

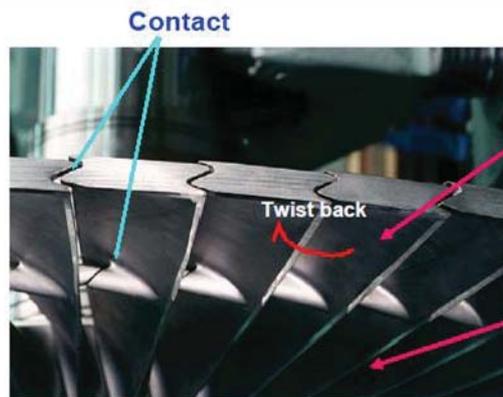
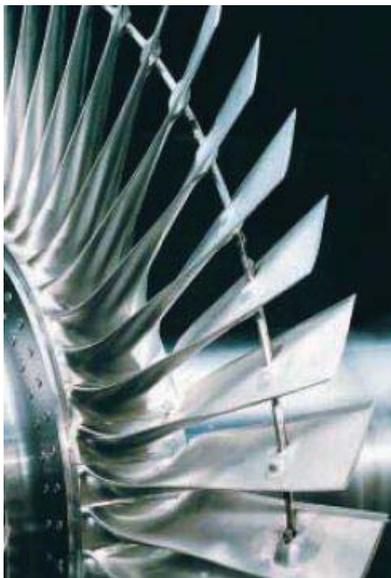
REGULACIÓN

RANGOS

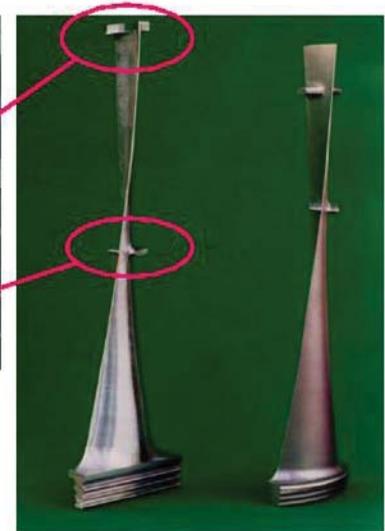
R

## ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS

- ❑ Álaves del rotor. Absorción de vibraciones



Larger damping is generated by the contact at the shrouds and snubbers, which is caused by the twist-back deformation due to centrifugal force



ISB

Conventional  
Grouped Blade

INTRODUCCIÓN

DISPOSICIONES

ELEMENTOS

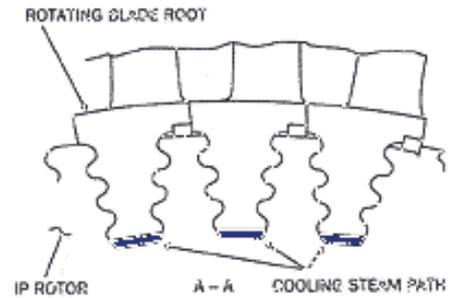
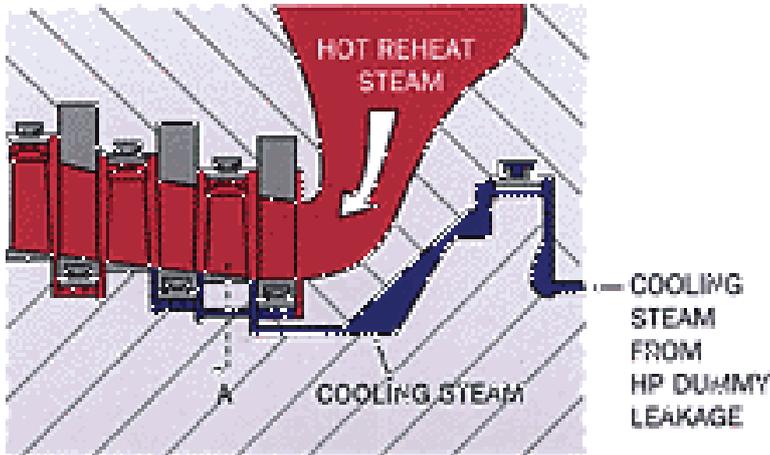
REGULACIÓN

RANGOS

R

## ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS

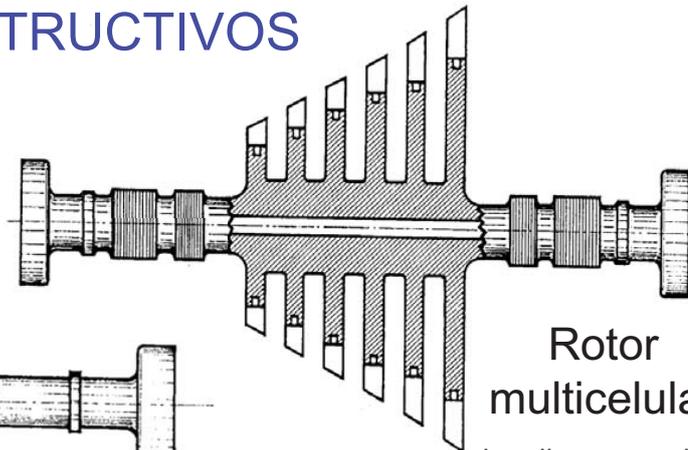
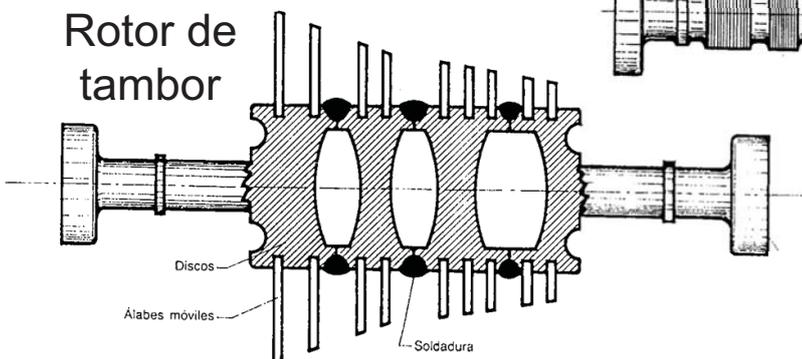
### ☐ Álabes. Refrigeración



INTRODUCCIÓN	DISPOSICIONES	ELEMENTOS	REGULACIÓN	RANGOS	R
--------------	---------------	-----------	------------	--------	---

## ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS

### ☐ Rotor



los discos pueden estar mecanizados o pueden ser postizos





INTRODUCCIÓN

DISPOSICIONES

**ELEMENTOS**

REGULACIÓN

RANGOS

R

## ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS

### Rotor. Montaje en disco



INTRODUCCIÓN

DISPOSICIONES

**ELEMENTOS**

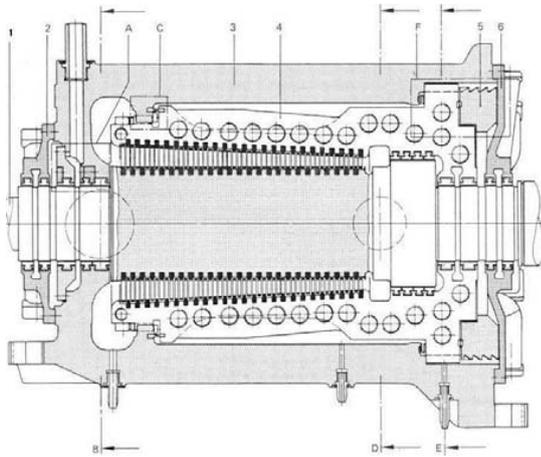
REGULACIÓN

RANGOS

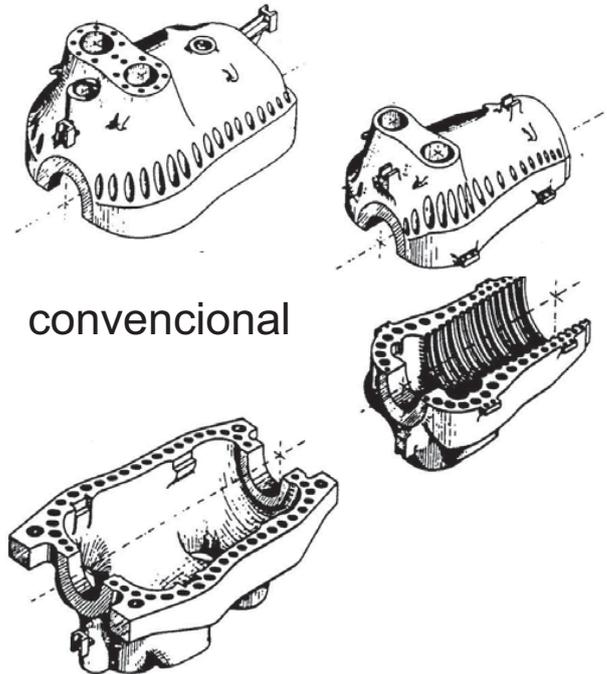
R

# ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS

## ❑ Carcasa de alta presión



de barril

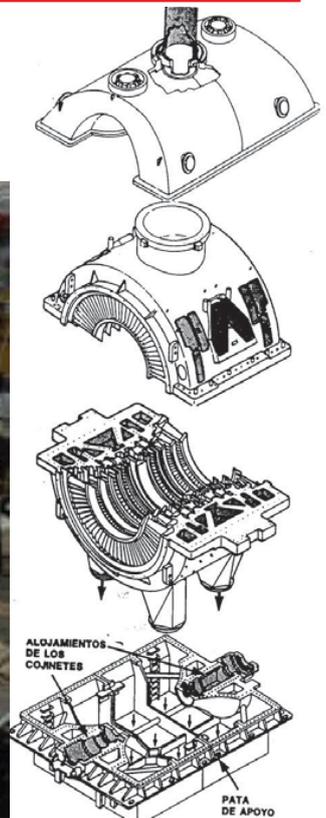


convencional

INTRODUCCIÓN	DISPOSICIONES	ELEMENTOS	REGULACIÓN	RANGOS	R
--------------	---------------	-----------	------------	--------	---

# ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS

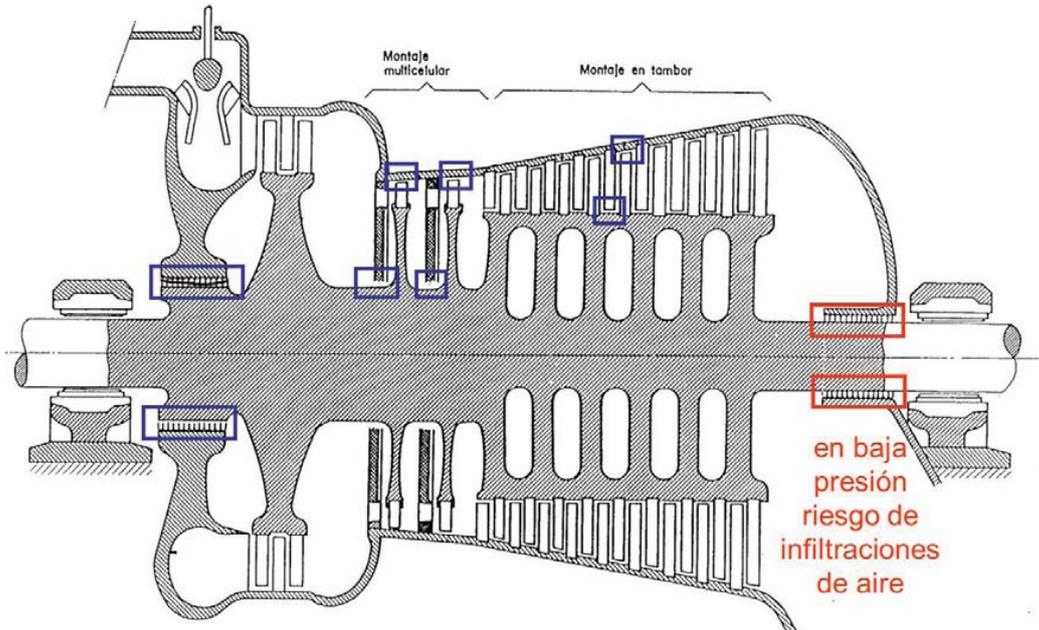
## ❑ Carcasa de baja presión



INTRODUCCIÓN	DISPOSICIONES	ELEMENTOS	REGULACIÓN	RANGOS	R
--------------	---------------	-----------	------------	--------	---

## ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS

### ❑ Sellos. Pérdidas intersticiales



INTRODUCCIÓN

DISPOSICIONES

**ELEMENTOS**

REGULACIÓN

RANGOS

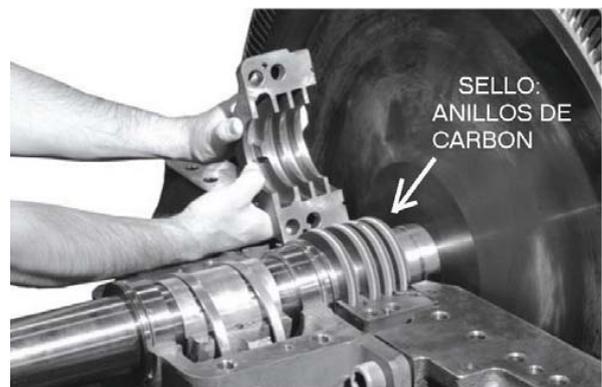
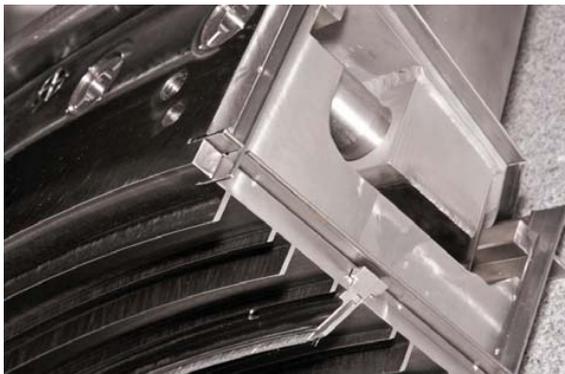
R

## ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS

### ❑ Sellos. Pérdidas intersticiales



cepillos



INTRODUCCIÓN

DISPOSICIONES

**ELEMENTOS**

REGULACIÓN

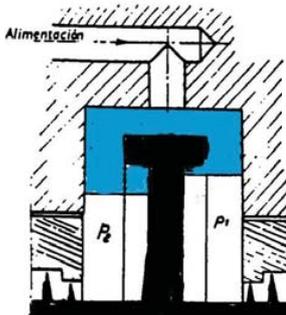
RANGOS

R

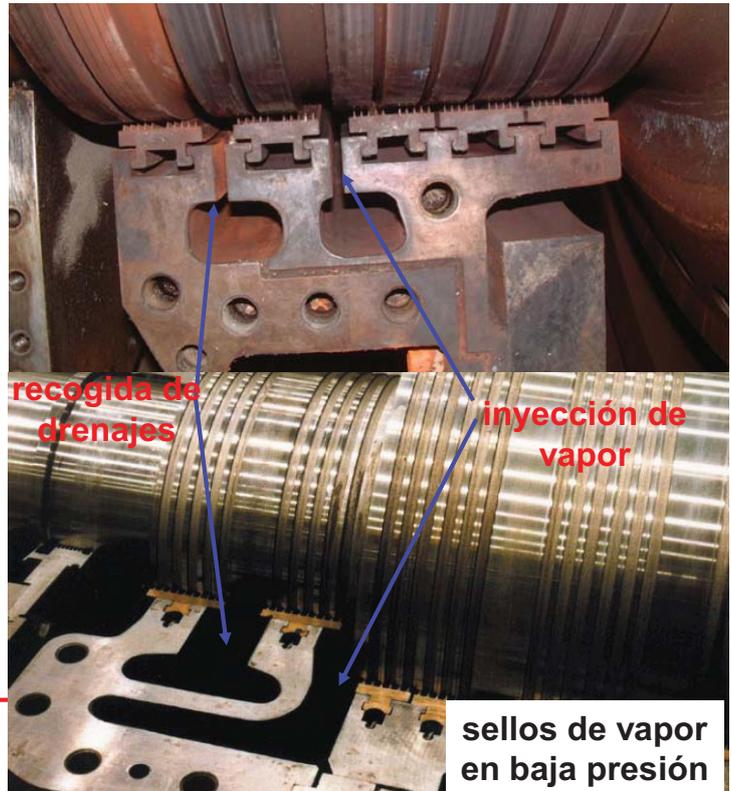
## ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS

### ❑ Sellos.

Pérdidas intersticiales

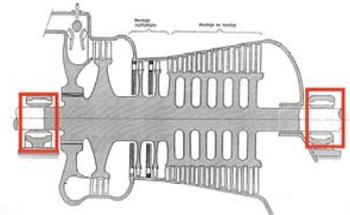


cierre de agua (collar giratorio)



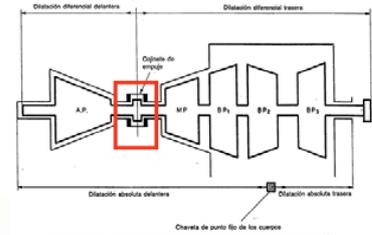
## ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS

### ❑ Cojinetes



## ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS

### ❑ Cojinete de empuje



INTRODUCCIÓN

DISPOSICIONES

ELEMENTOS

REGULACIÓN

RANGOS

R

## ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS

### ❑ Sistema de lubricación

#### ➤ Presión:

- Circuito hidráulico: ~200 bar
- Circuito de lubricación: ~1.5 bar

#### ➤ El sistema hidráulico para control puede ser independiente

#### ➤ El sistema de lubricación tiene también función refrigerante

### ❑ Virador: mantiene el rotor en movimiento (~3 rpm) con la turbina en paro para evitar deformaciones

INTRODUCCIÓN

DISPOSICIONES

ELEMENTOS

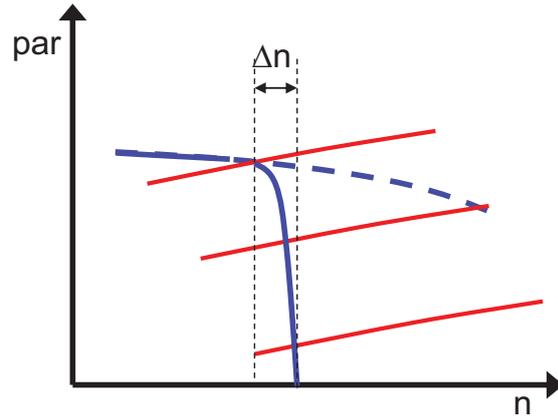
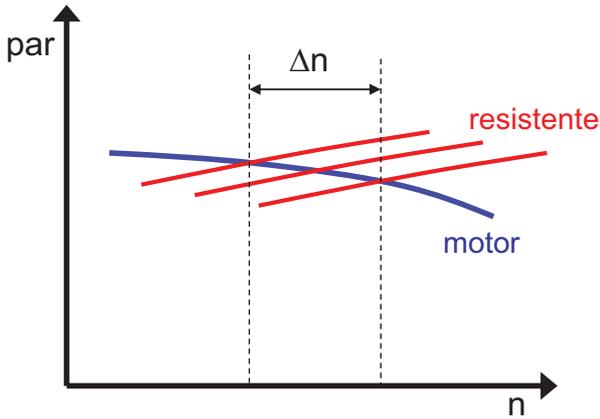
REGULACIÓN

RANGOS

R

# REGULACIÓN

- ❑ Necesidad de regulación
  - Estatismo ante variaciones en la carga de la turbina



INTRODUCCIÓN	DISPOSICIONES	ELEMENTOS	REGULACIÓN	RANGOS	R
--------------	---------------	-----------	------------	--------	---

# REGULACIÓN

❑ Potencia turbina:  $N = \eta \Delta h_s m_v$       dos conceptos de regulación

**CUALITATIVA**      laminar el vapor antes de la turbina

$\downarrow \Delta h_s$

**CUANTITATIVA**      Alimentar parcialmente la corona

$\downarrow m_v$

INTRODUCCIÓN	DISPOSICIONES	ELEMENTOS	REGULACIÓN	RANGOS	R
--------------	---------------	-----------	------------	--------	---

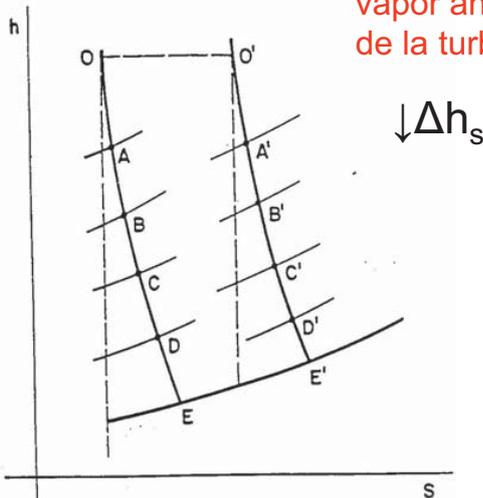
## REGULACIÓN

□ Potencia turbina:  $N = \eta \Delta h_s m_v$

dos conceptos  
de regulación

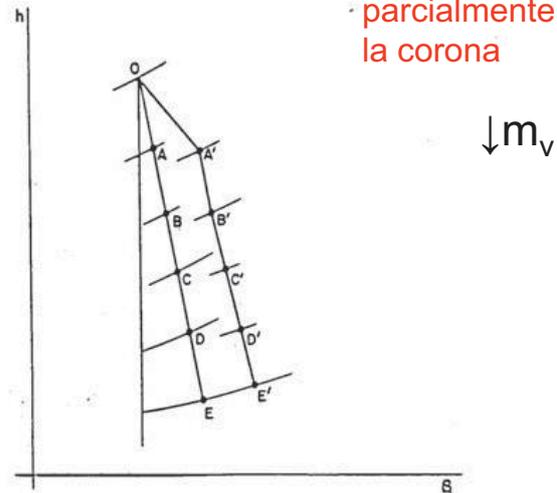
### CUALITATIVA

laminar el  
vapor antes  
de la turbina



### CUANTITATIVA

Alimentar  
parcialmente  
la corona



INTRODUCCIÓN

DISPOSICIONES

ELEMENTOS

REGULACIÓN

RANGOS

R

## REGULACIÓN

□ Potencia turbina:  $N = \eta \Delta h_s m_v$

dos conceptos  
de regulación

### CUALITATIVA

- Aumento de la entropía por laminación  $\rightarrow$  disminución de  $\Delta h_s$
- Disminución de la densidad  $\rightarrow$  disminución de  $m_v$
- Las temperaturas de funcionamiento se mantienen  $\rightarrow$  regulación **más rápida**

Resultado: disminuye la potencia pero también el rendimiento

### CUANTITATIVA

- Disminución de la sección de paso  $\rightarrow$  disminución de  $m_v$
- Se mantiene  $\Delta h_s$
- Requiere que el rotor del 1er escalonamiento está compensado en presiones  $\rightarrow$  **acción**

Resultado: disminuye la potencia; el rendimiento ligeramente por modificación de los  $\Delta$  velocidades

INTRODUCCIÓN

DISPOSICIONES

ELEMENTOS

REGULACIÓN

RANGOS

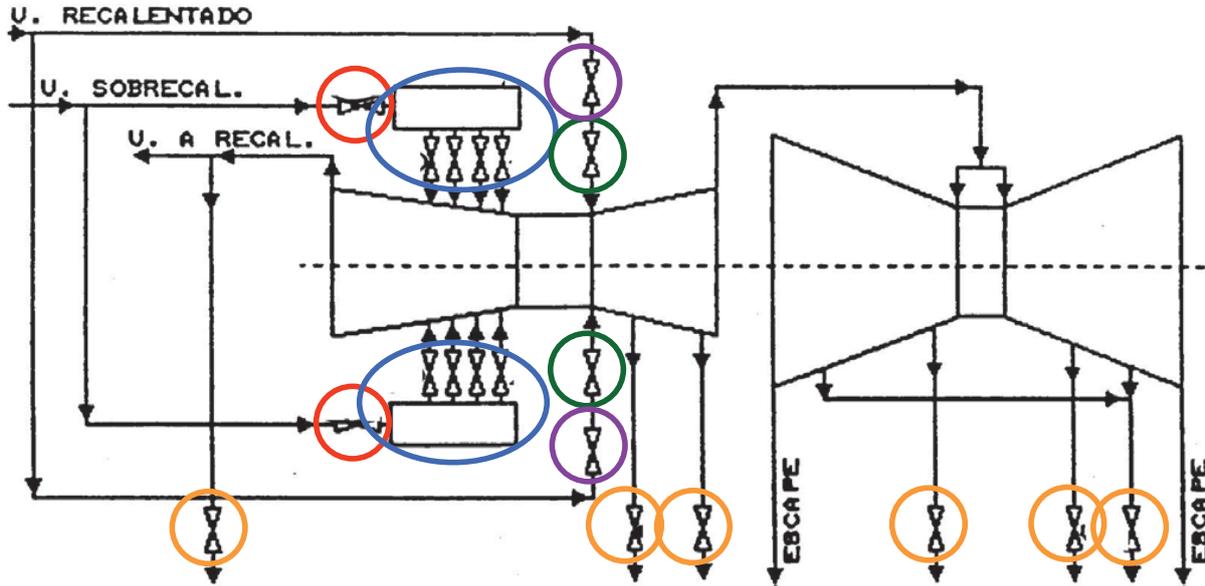
R

# REGULACIÓN

## ☐ Válvulas

- Válvula de parada
- Válvulas de control
- Válvula de interceptación de rec.
- Válvula moderadora de rec.
- Válvula de retención de extracción

- (ON/OFF)
- (Prop.)
- (ON/OFF)
- (Prop.)
- (ON/OFF)



INTRODUCCIÓN	DISPOSICIONES	ELEMENTOS	REGULACIÓN	RANGOS	R
--------------	---------------	-----------	------------	--------	---

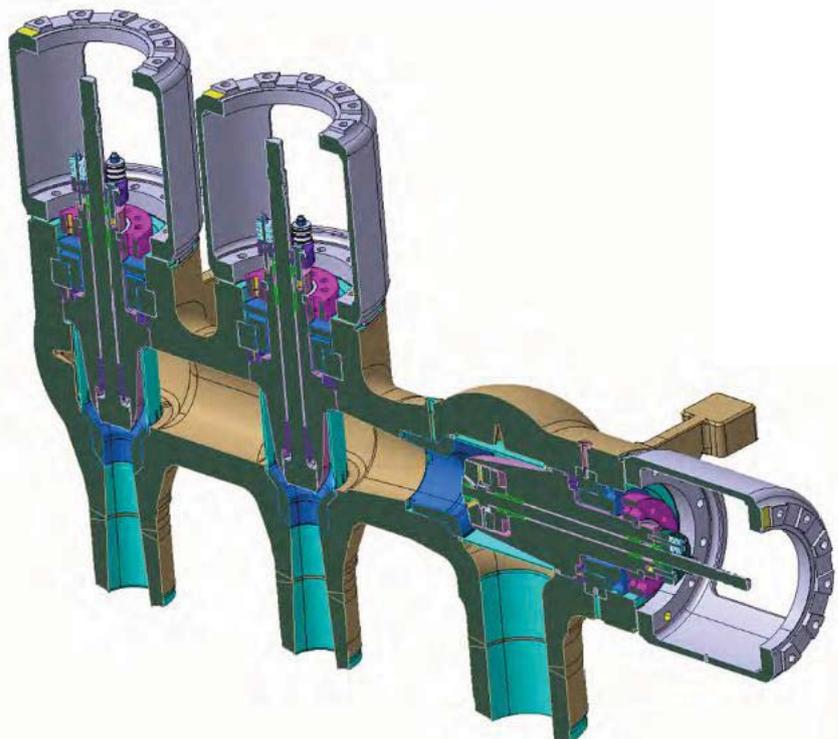
# REGULACIÓN

## ☐ Válvulas

Stop valve balanced type

Control valves valve unbalanced type

Nota: la regulación cuantitativa no es continua, en la práctica se lamina parcialmente en una de las válvulas de admisión parcial (regulación mixta)

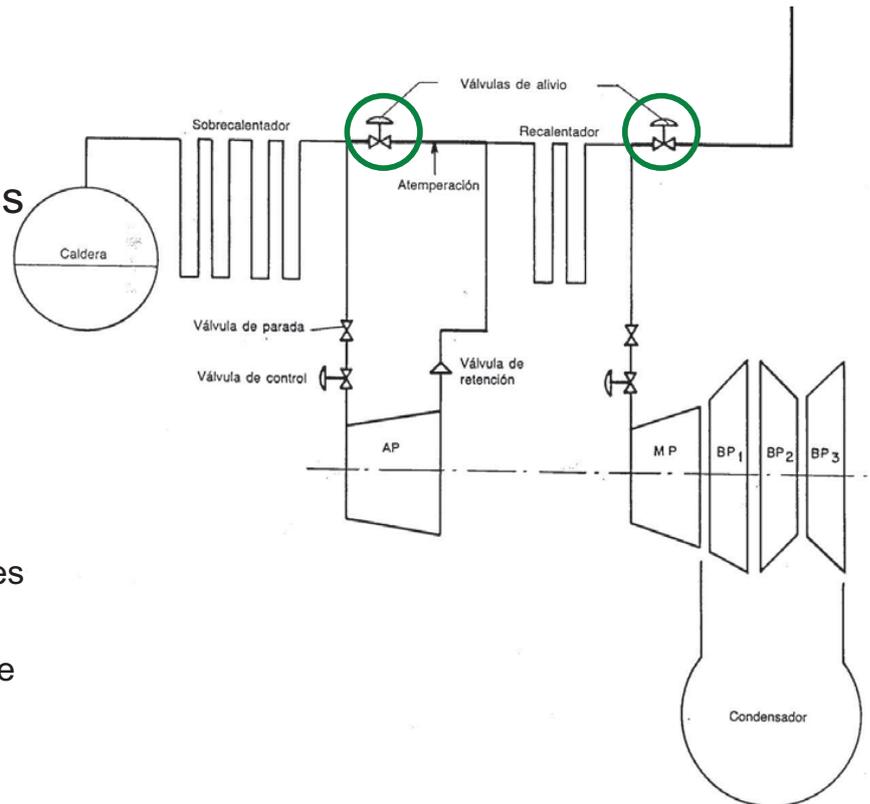


INTRODUCCIÓN	DISPOSICIONES	ELEMENTOS	REGULACIÓN	RANGOS	R
--------------	---------------	-----------	------------	--------	---

## REGULACIÓN

### Arranque y protección: válvulas de bypass

- Permiten una puesta en carga gradual  
(debe vigilarse el gradiente de temperaturas: dilataciones y fatiga)
- Descargan la turbina ante cualquier disparo de seguridad



INTRODUCCIÓN

DISPOSICIONES

ELEMENTOS

REGULACIÓN

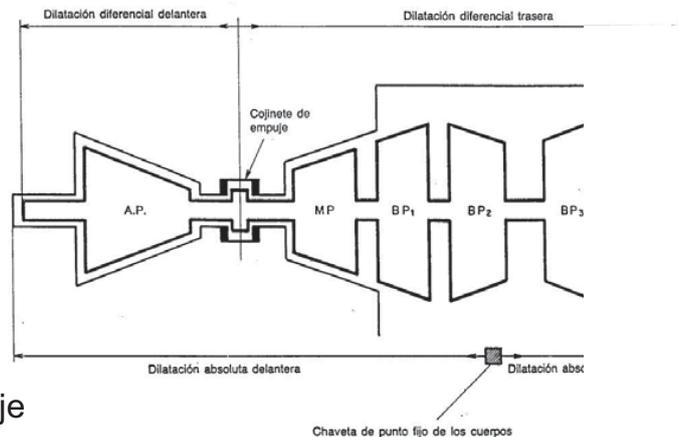
RANGOS

R

## REGULACIÓN

### Sensores habituales

- Excentricidad
- Vibraciones
- Juego diferencial
- Régimen de giro
- Desplazamiento axial del eje
- Dilatación de la carcasa
- Posición de las válvulas
- Presiones y temperaturas de aceite
- Presión, temperatura y caudal de vapor
- Presión y temperatura escape
- Presión y temperatura extracciones
- Presión y temperatura vapor de cierres



INTRODUCCIÓN

DISPOSICIONES

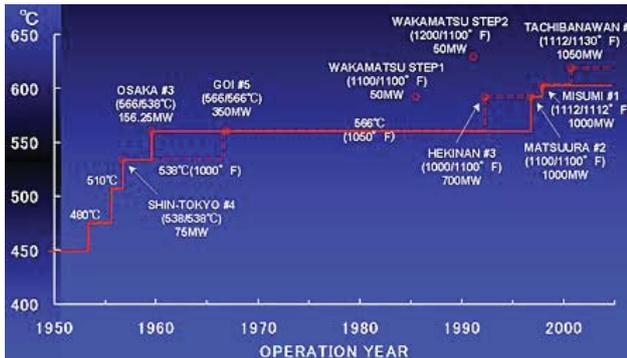
ELEMENTOS

REGULACIÓN

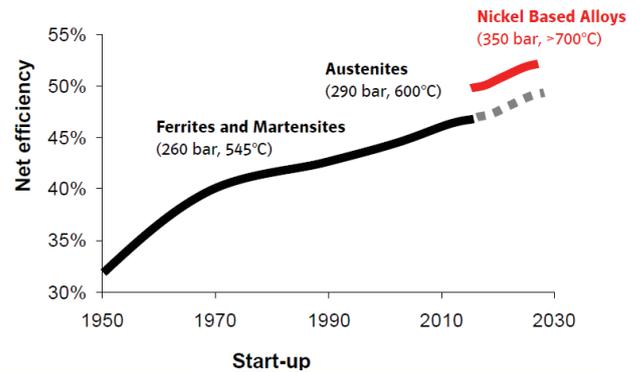
RANGOS

R

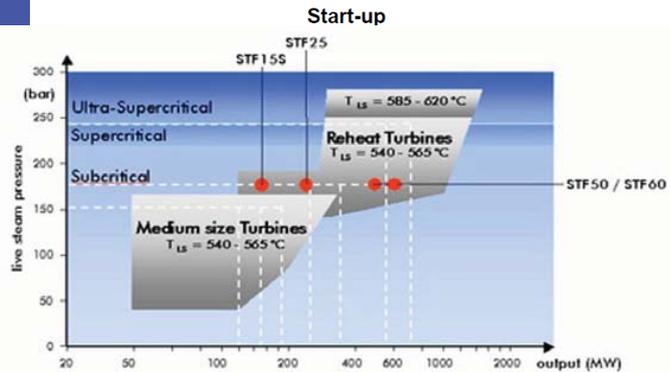
## RANGOS ACTUALES



## Development of Efficiency in Coal Fired PP in Germany



Hay una planta piloto en construcción con 365 bar/705 °C de vapor vivo y 73 bar / 720°C de recalentado



INTRODUCCIÓN

DISPOSICIONES

ELEMENTOS

REGULACIÓN

RANGOS

R

## RESUMEN (I)

- ❑ El salto entálpico de una TV está dividido en una sucesión o cascada de escalonamientos, con el fin de mantener acotada la velocidad de giro
- ❑ Las TV suelen dividirse en varios cuerpos: AP, MP, BP. Dependiendo de la potencia, puede darse el caso de la subdivisión en varios cuerpos de baja presión (BP), con el fin de mantener acotada la velocidad de circulación del vapor
- ❑ Existen dos principios de regulación aplicables a las TV:
  - Regulación cuantitativa
  - Regulación cualitativa
- ❑ Las TV están construidas mediante dos tipos de escalonamientos: de **acción** y de **reacción**.

INTRODUCCIÓN

DISPOSICIONES

ELEMENTOS

REGULACIÓN

RANGOS

R

## RESUMEN (II)

❑ A la hora del diseño, se deben tener en cuenta los siguientes comportamientos entre ambos tipos de escalonamientos. El escalonamiento de reacción presenta un mejor rendimiento (menor velocidad fluido), mientras que el escalonamiento de acción presenta ventajas en lo relativo a:

- Menor velocidad periférica para un mismo salto entálpico
- Menor temperatura de entrada al rotor
- Menores pérdidas intersticiales y empuje axial al estar compensado el rotor en presiones
- Permite admisión parcial (control cuantitativo)

❑ Una solución habitual suele ser disponer un primer escalonamiento de acción (o de velocidad) y el resto de reacción

INTRODUCCIÓN	DISPOSICIONES	ELEMENTOS	REGULACIÓN	RANGOS	R
--------------	---------------	-----------	------------	--------	---

## BIBLIOGRAFÍA

- ❑ J. Arregle et al.  
"Procesos y tecnología de máquinas y motores térmicos"
- ❑ C.Mataix  
"Turbomáquinas térmicas"
- ❑ Mohamed Mohamed El-Wakil  
"Powerplant technology"
- ❑ P. Kiameh  
"Power generation handbook : selection, applications, operation, and maintenance"

## CONTENIDO

### Introducción

- Turbinas de gas
- Estudio de mercado

### Ciclo real turbina de gas

### Aumento de la $T_3$

### Revisión tecnológica

- Protección frente a bombeo
- Cámara de combustión y quemadores
- Filtro de aire
- Cojinetes
- Virador
- Sistema de levantamiento
- Mantenimiento

INTRODUCCIÓN

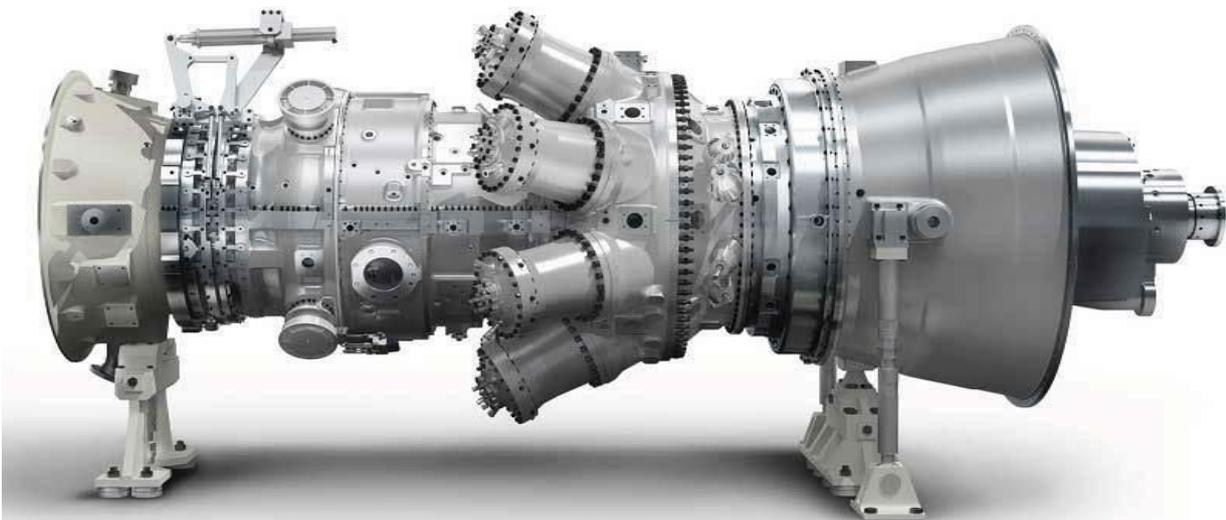
CICLO REAL

AUMENTO  $T_3$ REVISIÓN  
TECNOLÓGICA

R

## INTRODUCCIÓN

### Turbina de gas



Siemens SGT-750

INTRODUCCIÓN

CICLO REAL

AUMENTO  $T_3$ REVISIÓN  
TECNOLÓGICA

R

## INTRODUCCIÓN

### ❑ Tipos de turbinas de gas

- **Turbinas industriales de gran potencia tipo 'frame'**
  - 3-300 MW y con rendimientos de hasta el 40 %.
- Turbinas aeroderivadas
  - 2.5-50 MW, con unos rendimientos de entre 35 y 45 %
- Turbinas industriales
  - 2.5-5 MW, y rendimiento por debajo del 30%.
- Turbinas pequeñas
  - 0.5-2.5 MW, y rendimientos entre 15 y 25 %
- Microturbinas
  - 20-350 kW



INTRODUCCIÓN	CICLO REAL	AUMENTO $T_3$	REVISIÓN TECNOLÓGICA	R
--------------	------------	---------------	----------------------	---

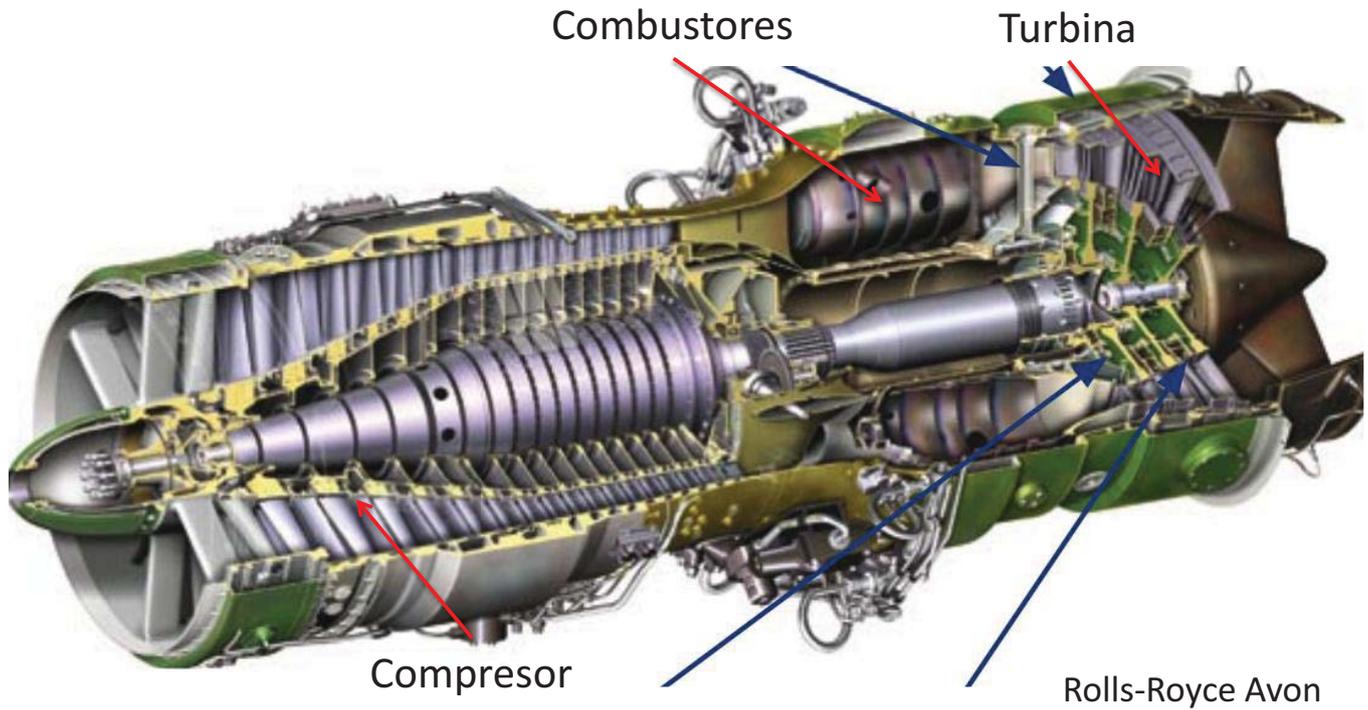
## INTRODUCCIÓN

### ❑ Algunos fabricantes

- Siemens
- General Electric
- Rolls Royce
- Alstom
- Pratt & Whitney

INTRODUCCIÓN	CICLO REAL	AUMENTO $T_3$	REVISIÓN TECNOLÓGICA	R
--------------	------------	---------------	----------------------	---

# TURBINA DE GAS



<b>INTRODUCCIÓN</b>	CICLO REAL	AUMENTO $T_3$	REVISIÓN TECNOLÓGICA	R
---------------------	------------	---------------	----------------------	---

# TURBINA DE GAS

Eje de la Siemens SGT5-8000H



<b>INTRODUCCIÓN</b>	CICLO REAL	AUMENTO $T_3$	REVISIÓN TECNOLÓGICA	R
---------------------	------------	---------------	----------------------	---

## TURBINA DE GAS

Siemens SGT5-8000H



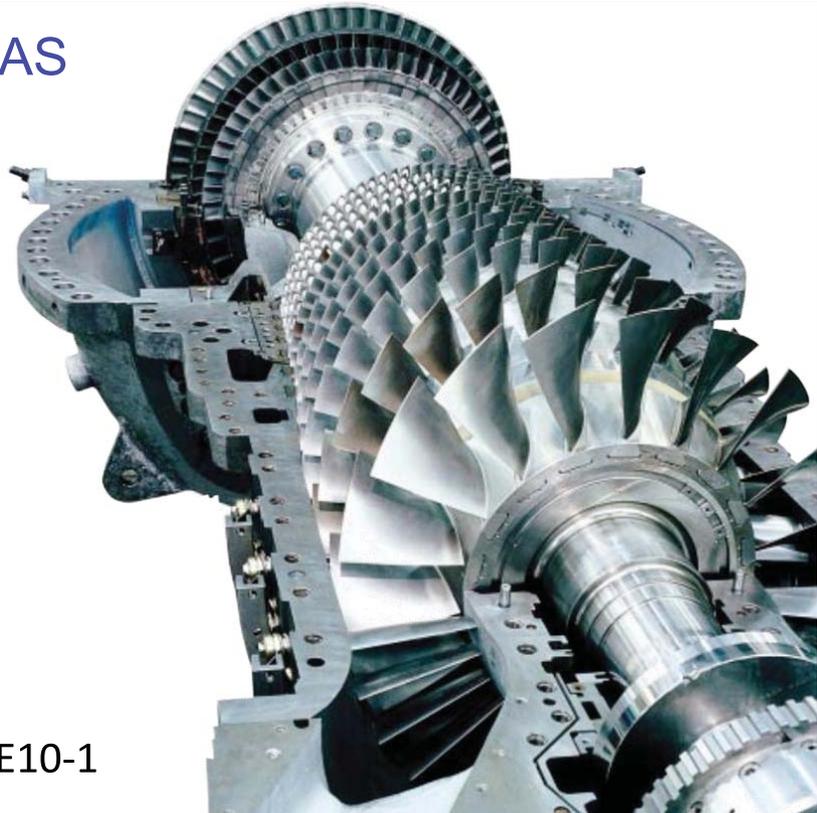
INTRODUCCIÓN

CICLO REAL

AUMENTO  $T_3$ REVISIÓN  
TECNOLÓGICA

R

## TURBINA DE GAS



Interior de la GE10-1

INTRODUCCIÓN

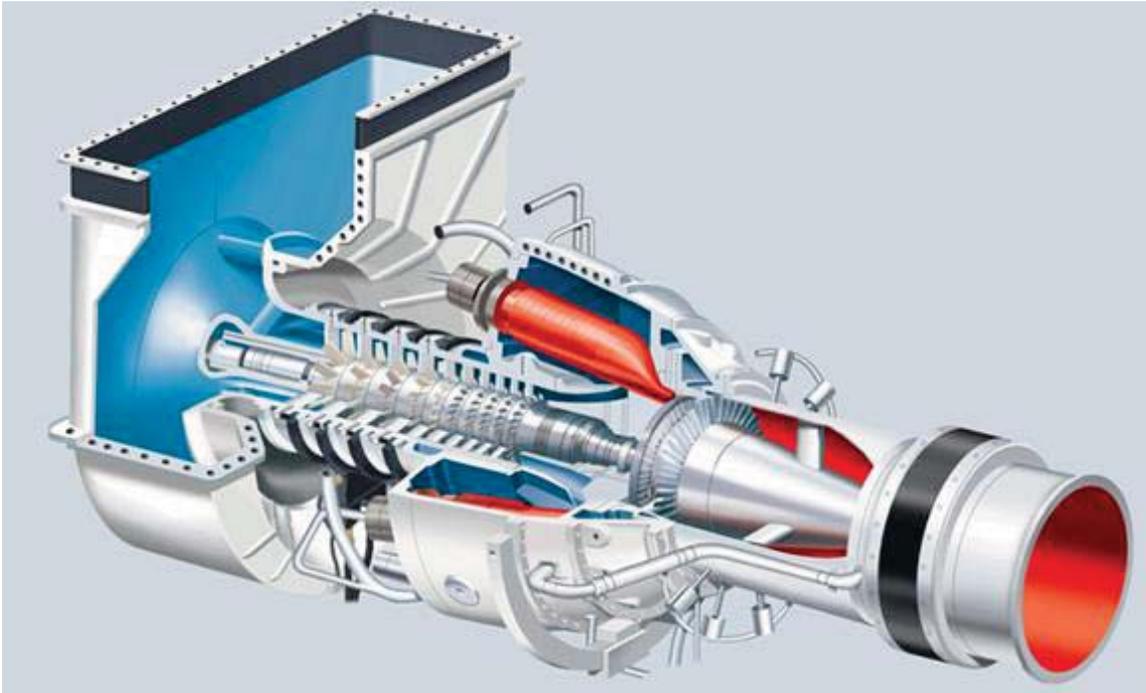
CICLO REAL

AUMENTO  $T_3$ REVISIÓN  
TECNOLÓGICA

R

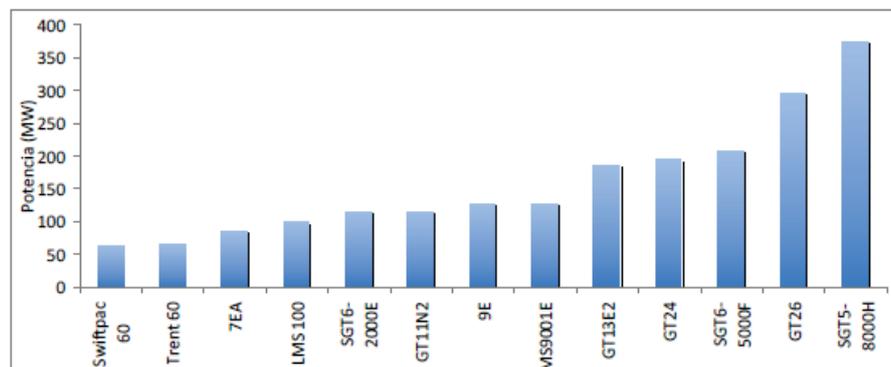
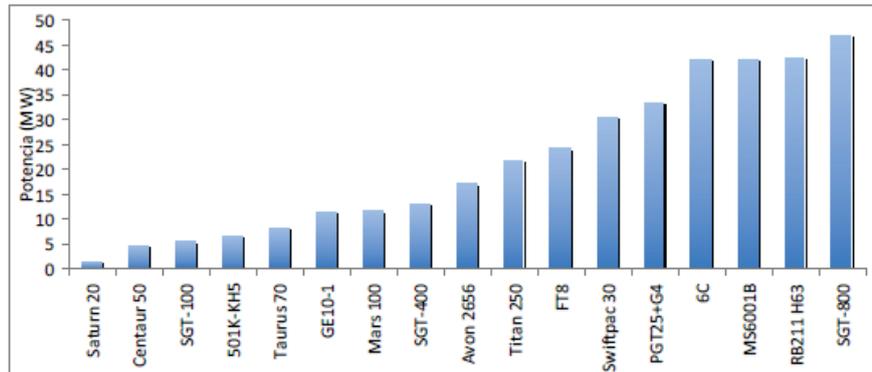
# TURBINA DE GAS

Siemens SGT-100



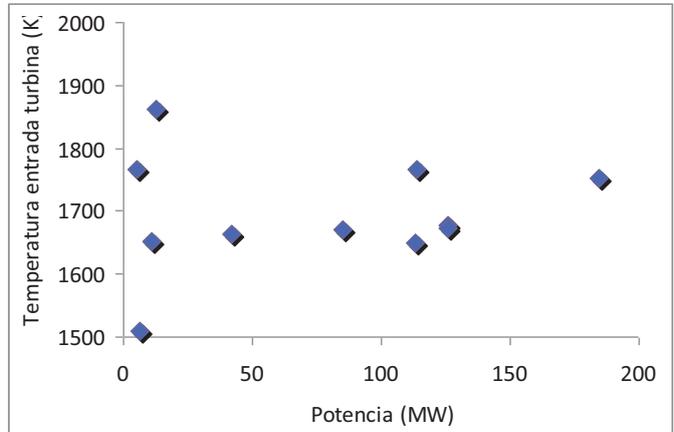
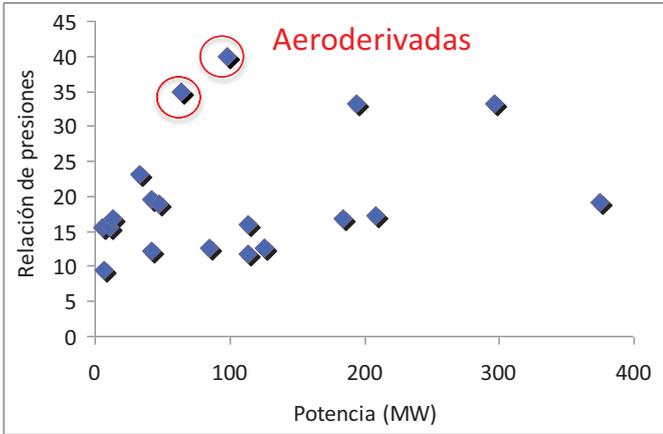
<b>INTRODUCCIÓN</b>	CICLO REAL	AUMENTO $T_3$	REVISIÓN TECNOLÓGICA	R
---------------------	------------	---------------	----------------------	---

## ESTUDIO DE MERCADO

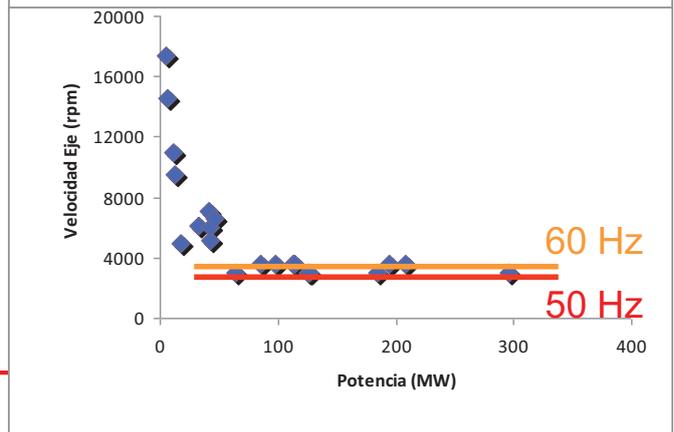
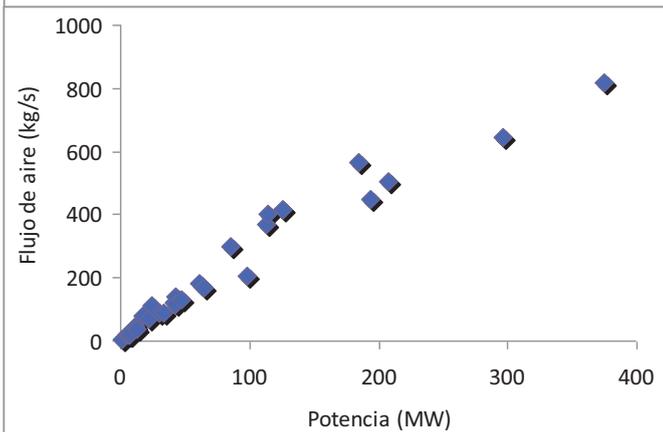
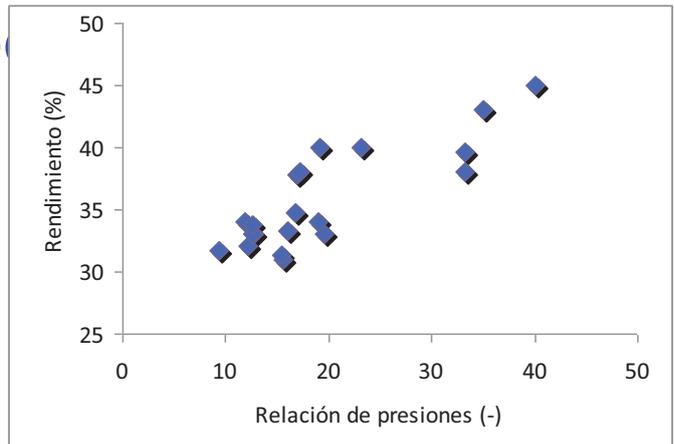
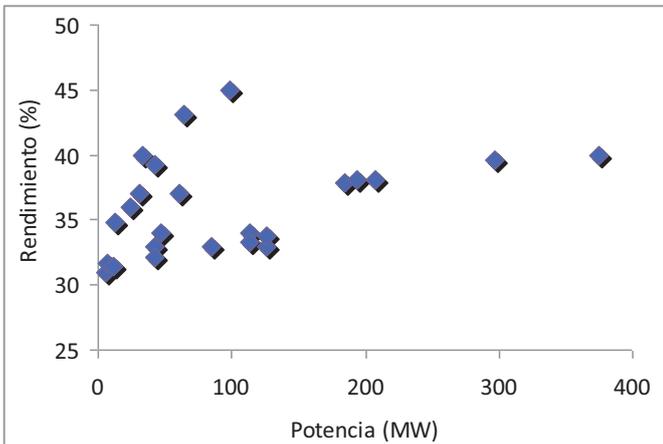


<b>INTRODUCCIÓN</b>	CICLO REAL	AUMENTO $T_3$	REVISIÓN TECNOLÓGICA	R
---------------------	------------	---------------	----------------------	---

# ESTUDIO DE MERCADO



<b>INTRODUCCIÓN</b>	CICLO REAL	AUMENTO $T_3$	REVISIÓN TECNOLÓGICA	R
---------------------	------------	---------------	----------------------	---



## CICLO REAL TURBINA DE GAS

### Compresor

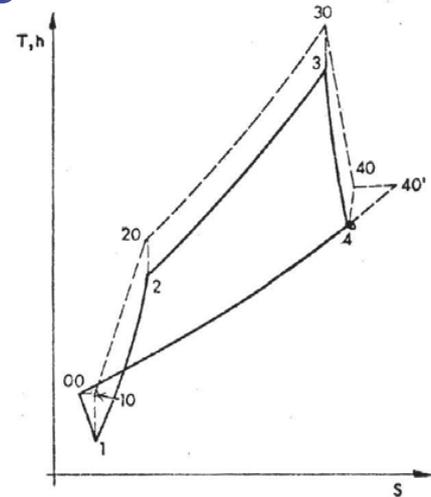
$$\dot{W}_C = \dot{m}_a \cdot (h_{20} - h_{10})$$

$$\eta_C = \frac{h_{20s} - h_{10}}{h_{20} - h_{10}} \quad \eta_C = 0.8 \sim 0.9$$

### Turbina

$$\dot{W}_T = \dot{m}_T \cdot (h_{30} - h_{40}) = (\dot{m}_a + \dot{m}_f) \cdot (h_{30} - h_{40}) = \dot{m}_a \cdot (1 + F) \cdot (h_{30} - h_{40})$$

$$\eta_T = \frac{h_{30} - h_{40}}{h_{30} - h_{40s}} \quad \eta_T = 0.8 \sim 0.93$$



INTRODUCCIÓN

**CICLO REAL**
AUMENTO  $T_3$ REVISIÓN  
TECNOLÓGICA

R

## CICLO REAL TURBINA DE GAS

### Cámara de combustión

- Aporte de calor
- Aporte de masa
- Pérdida de carga

$$\dot{Q}_{cc} = \dot{m}_a \cdot (h_{30} - h_{20}) + \dot{m}_f \cdot (h_{30} - h_f) \approx \dot{m}_a \cdot ((1 + F)h_{30} - h_{20}) \approx \dot{m}_a \cdot (h_{30} - h_{20})$$

$$\eta_{cc} = \frac{\dot{Q}_{cc}}{\dot{m}_f \cdot H_c} \approx \frac{(1 + F)h_{30} - h_{20}}{F \cdot H_c} \quad 95 \sim 98\%$$

$$\varepsilon_{cc} = \frac{P_{20} - P_{30}}{P_{20c}} \quad 4 \sim 8\%$$

INTRODUCCIÓN

**CICLO REAL**
AUMENTO  $T_3$ REVISIÓN  
TECNOLÓGICA

R

## CICLO REAL TURBINA DE GAS

### Balance global

$$\eta_e = \eta_m \frac{\dot{W}_T - \dot{W}_C}{\dot{m}_f \cdot H_c} \approx \eta_m \frac{(1+F) \cdot (h_{30} - h_{40}) - (h_{20} - h_{10})}{h_{30} - h_{20}}$$

Si se admiten únicamente las irreversibilidades en compresor y turbina (y se aceptan ciertas hipótesis simplificativas):

$$w_{CG} = \frac{c_p \cdot T_{10}}{\eta_c} \cdot (\delta - 1) \cdot \left( \frac{\theta}{\delta} \eta_c \eta_T - 1 \right) \quad \eta_{CG} = \frac{\frac{\theta}{\delta} \eta_c \eta_T - 1}{\left( \frac{\theta - 1}{\delta - 1} \right) \eta_c - 1}$$

$$\theta = \frac{T_3}{T_1} \quad \delta = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

INTRODUCCIÓN

CICLO REAL

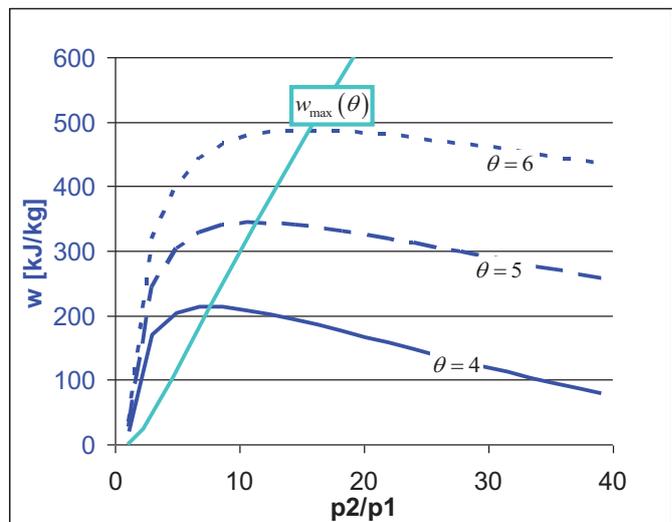
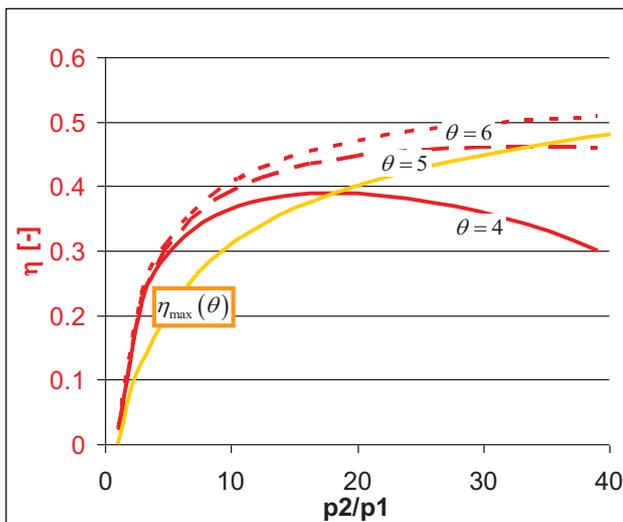
AUMENTO  $T_3$ REVISIÓN  
TECNOLÓGICA

R

## CICLO REAL TURBINA DE GAS

### Efecto de $T_3$

$$\theta = \frac{T_3}{T_1} \quad \delta = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$



$$\eta_c = 0.87 \quad \eta_T = 0.92 \quad c_p = 1 \text{ kJ/kgK} \quad T_1 = 298 \text{ K}$$

INTRODUCCIÓN

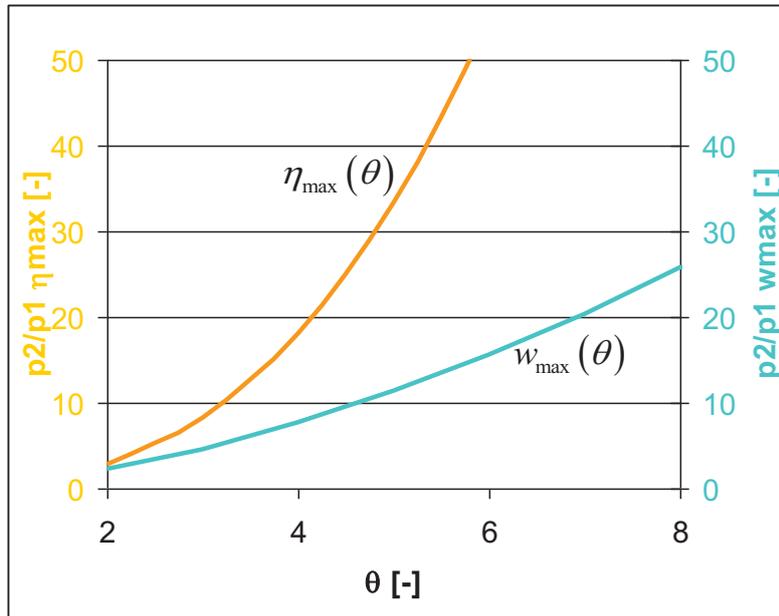
CICLO REAL

AUMENTO  $T_3$ REVISIÓN  
TECNOLÓGICA

R

# CICLO REAL TURBINA DE GAS

❑ Efecto de  $T_3$ . Resumen:

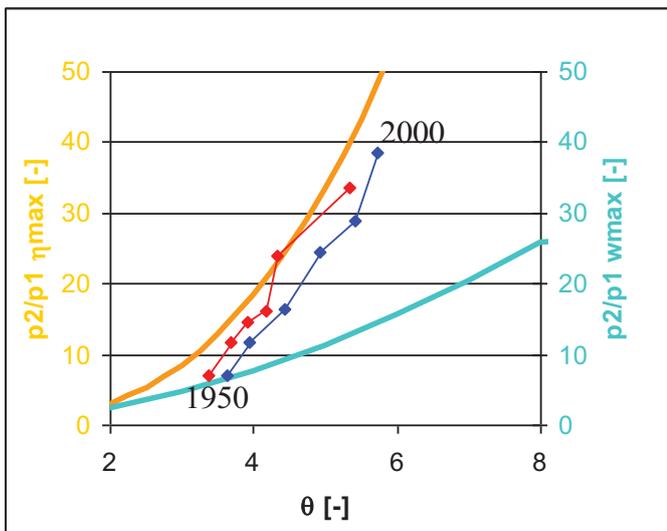


$\eta_c = 0.87$   
 $\eta_T = 0.92$   
 $c_p = 1 \text{ kJ/kgK}$   
 $T_1 = 298 \text{ K}$

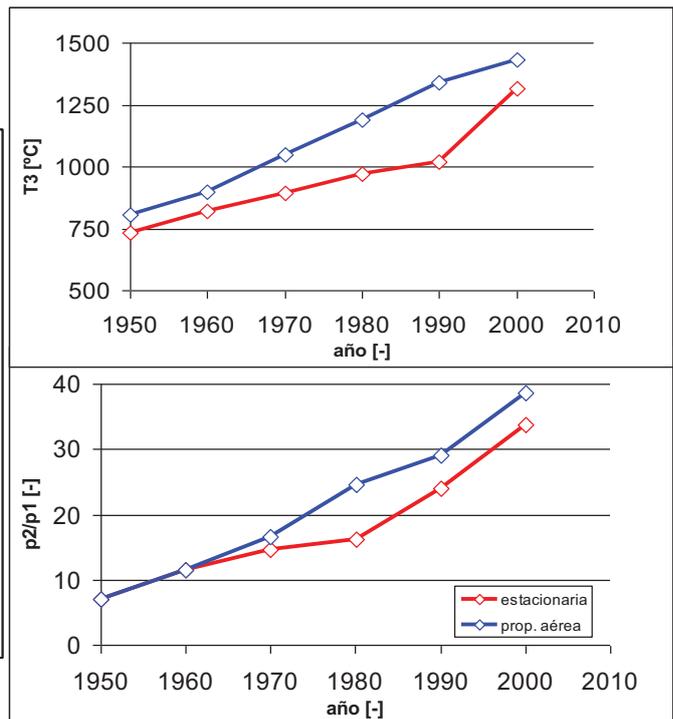
INTRODUCCIÓN	<b>CICLO REAL</b>	AUMENTO $T_3$	REVISIÓN TECNOLÓGICA	R
--------------	-------------------	---------------	----------------------	---

# CICLO REAL TURBINA DE GAS

❑ Evolución de  $p_3$ - $T_3$



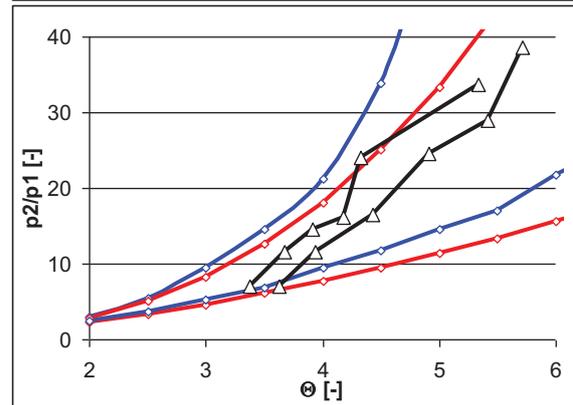
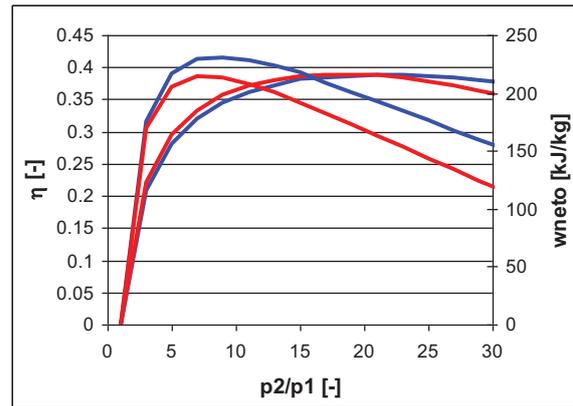
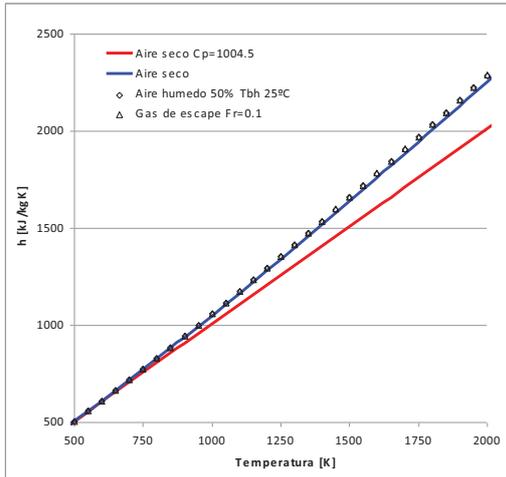
$\eta_c = 0.87$   $\eta_T = 0.92$   $T_1 = 298 \text{ K}$



INTRODUCCIÓN	<b>CICLO REAL</b>	AUMENTO $T_3$	REVISIÓN TECNOLÓGICA	R
--------------	-------------------	---------------	----------------------	---

## CICLO REAL

❑ Considerando la variación de  $c_p$  con  $T$



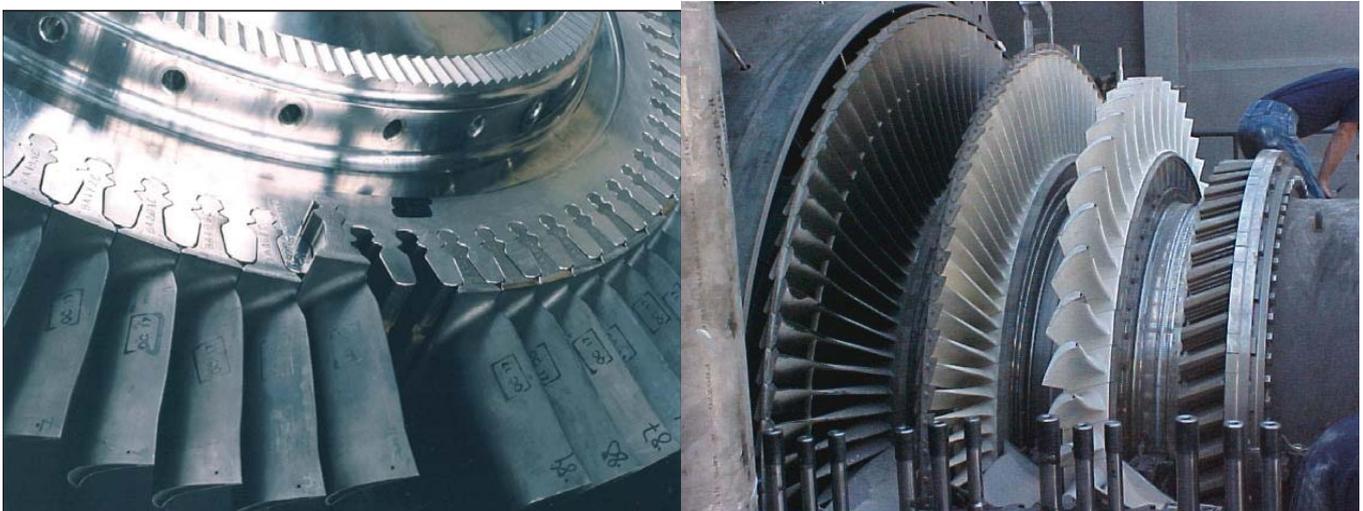
INTRODUCCIÓN

**CICLO REAL**AUMENTO  $T_3$ REVISIÓN  
TECNOLÓGICA

R

## AUMENTO DE $T_3$

❑ Los álabes de la turbina (rotor y estator) están sometidos a grandes esfuerzos térmicos y mecánicos



INTRODUCCIÓN

CICLO REAL

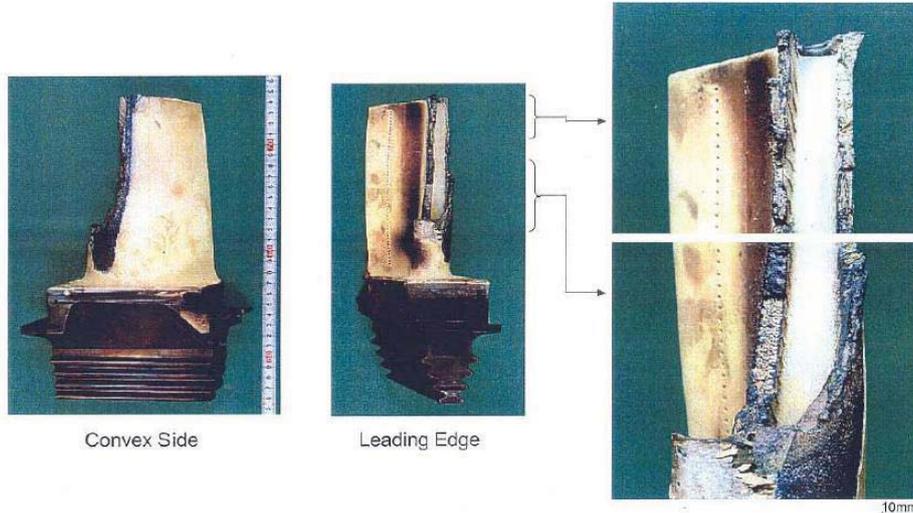
**AUMENTO  $T_3$** REVISIÓN  
TECNOLÓGICA

R

## AUMENTO DE $T_3$

- Los álabes de la turbina (rotor y estator) están sometidos a grandes esfuerzos térmicos y mecánicos

The deformation pattern is typical for the creep rupture.



INTRODUCCIÓN

CICLO REAL

AUMENTO  $T_3$ REVISIÓN  
TECNOLÓGICA

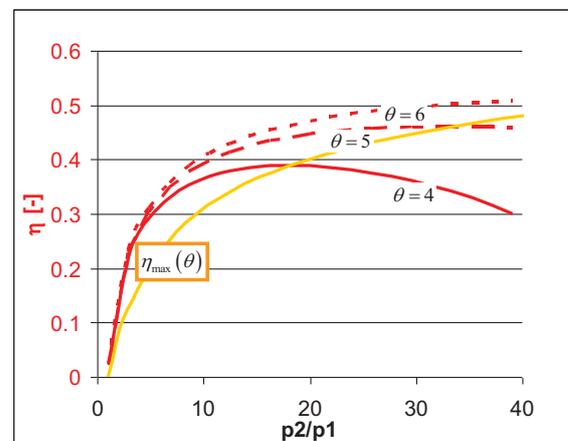
R

## AUMENTO DE $T_3$

- La clave para el rendimiento de la TG es alcanzar la  $T_3$  máxima

- Evolución reciente:

- Materiales
- Refrigeración del álabe



INTRODUCCIÓN

CICLO REAL

AUMENTO  $T_3$ REVISIÓN  
TECNOLÓGICA

R

## AUMENTO DE $T_3$

### ❑ Materiales álabes

#### ALEACIONES

Las aleaciones para turbinas de gas son conocidas comúnmente como superaleaciones debido a alta resistencia a las altas temperaturas. Estas aleaciones se componen de aleaciones con base de Ni (IN 738), con base de Co (FSX-414) o con base Ni-Fe (Inconel 718). El Ni resiste la oxidación y tiene un buen comportamiento a la tracción, sin embargo está sujeto a oxidación con S.

Existen otros conjuntos de aleaciones como las aleaciones basadas en Cr-Mo-V y aleaciones 12 Cr. Otro camino para mejorar los materiales es mejorar el proceso de solidificación del material.

#### CERAMICAS

El problema de los materiales cerámicos está en posibilidad de fabricar piezas con geometría "extrañas". La adición de Al ha mejorado la ductilidad de estos materiales. Pueden llegar a soportar hasta 1650 °C.

#### RECUBRIMIENTOS

La función del recubrimiento o TBC's (thermal barrier coatings) es la de proveer una capa de material que proteja al material que recubre de la oxidación, corrosión y degradación. Va a ser la parte que se desgasta. Al cabo de ciertas horas de operación hay que retirar dichos álabes y reponer dicha capa de recubrimiento.

INTRODUCCIÓN

CICLO REAL

AUMENTO  $T_3$ REVISIÓN  
TECNOLÓGICA

R

## AUMENTO DE $T_3$

### ❑ Materiales álabes

COMPOSICIÓN DE RECUBRIMIENTOS TIPO MCrAlY

RECUBRIMIENTO	FABRICANTE o TG	Ni	Co	Cr	Al	Y	Otros
GT-29	GE	-	64,00%	29,00%	6,50%	0,30%	-
GT-33	GE	32,00%	36,00%	22,00%	10,00%	0,50%	
SICOAT 2231	SIEMENS	32,00%	33,00%	27,00%	7,50%	0,50%	
SICOAT 2253	SIEMENS	54,00%	9,00%	24,00%	10,00%	0,50%	Re 3 %
SICOAT2412	SIEMENS	30,90%	25,20%	21,00%	16,40%	0,20%	Re 2,3 %, Si 4,4 %
RT-122	SIEMENS - WESTINGHOUSE	32,00%	38,00%	21,00%	8,00%	0,70%	

Fuente: EPRI

INTRODUCCIÓN

CICLO REAL

AUMENTO  $T_3$ REVISIÓN  
TECNOLÓGICA

R

## AUMENTO DE $T_3$

### Refrigeración álabes



Refrigeración por  
Convección

Aire de refrigeración circula  
paralelo a los conductos de  
aire de refrigeración



Refrigeración por impacto

El aire de refrigeración circula dentro  
del inserto. A través de perforaciones  
choca con el perfil interior de la pared  
→ Refrigeración más eficaz



Refrigeración por  
película

El aire de refrigeración circula dentro  
del perfil. A través de muchas  
perforaciones circula del lado exterior  
a lo largo de la pared del perfil  
→ Método muy eficaz de refrigeración

El aire de enfriamiento es aire extraído de etapas intermedias del compresor y dirigido hacia los álabes fijos y móviles de la turbina, así como otras partes del rotor, de la carcasa y la cámara de combustión. La función del aire de enfriamiento es reducir la temperatura de metal de dichos componentes.

INTRODUCCIÓN

CICLO REAL

**AUMENTO  $T_3$** 
REVISIÓN  
TECNOLÓGICA

R

## AUMENTO DE $T_3$

### Refrigeración álabes



INTRODUCCIÓN

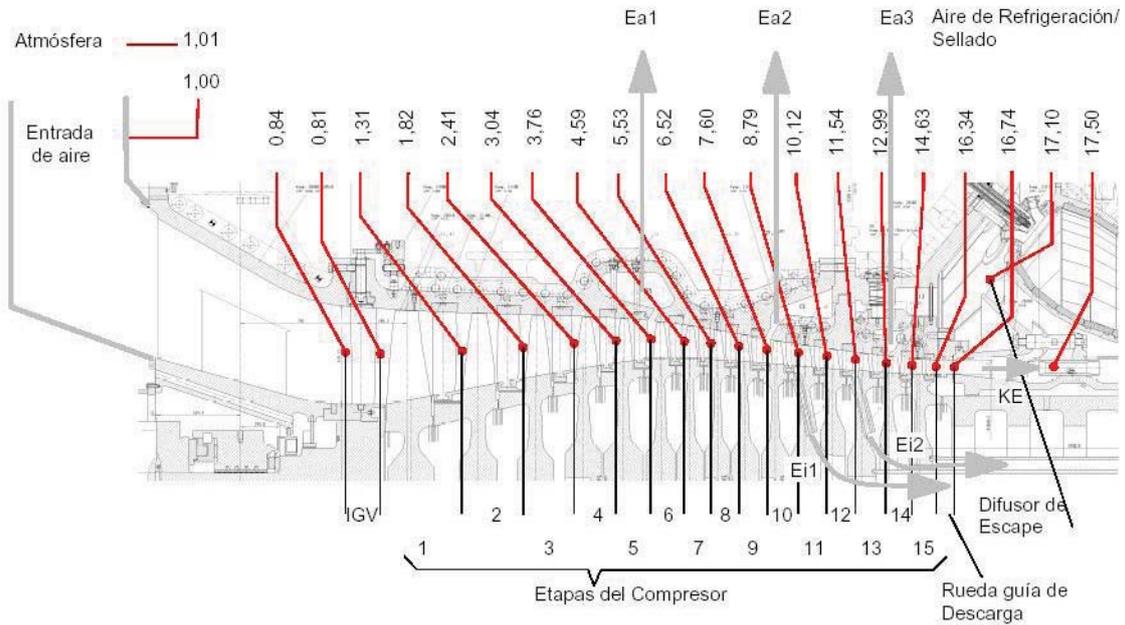
CICLO REAL

**AUMENTO  $T_3$** 
REVISIÓN  
TECNOLÓGICA

R

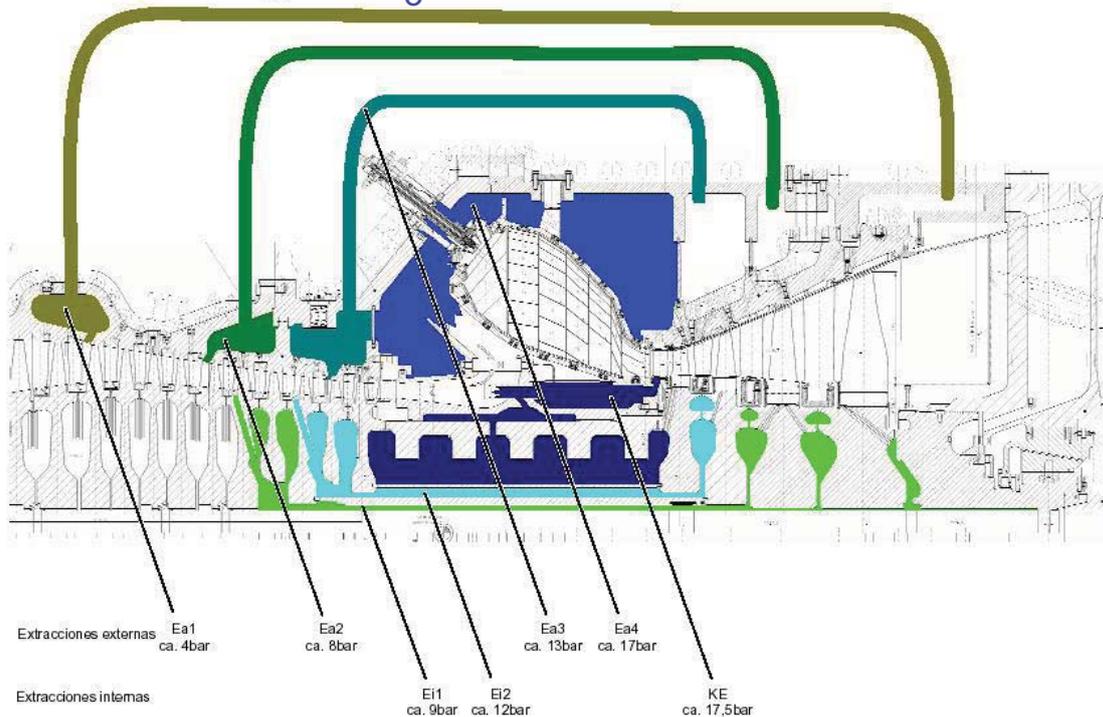
# AUMENTO DE $T_3$

❑ Extracción de aire para refrigeración de los álabes

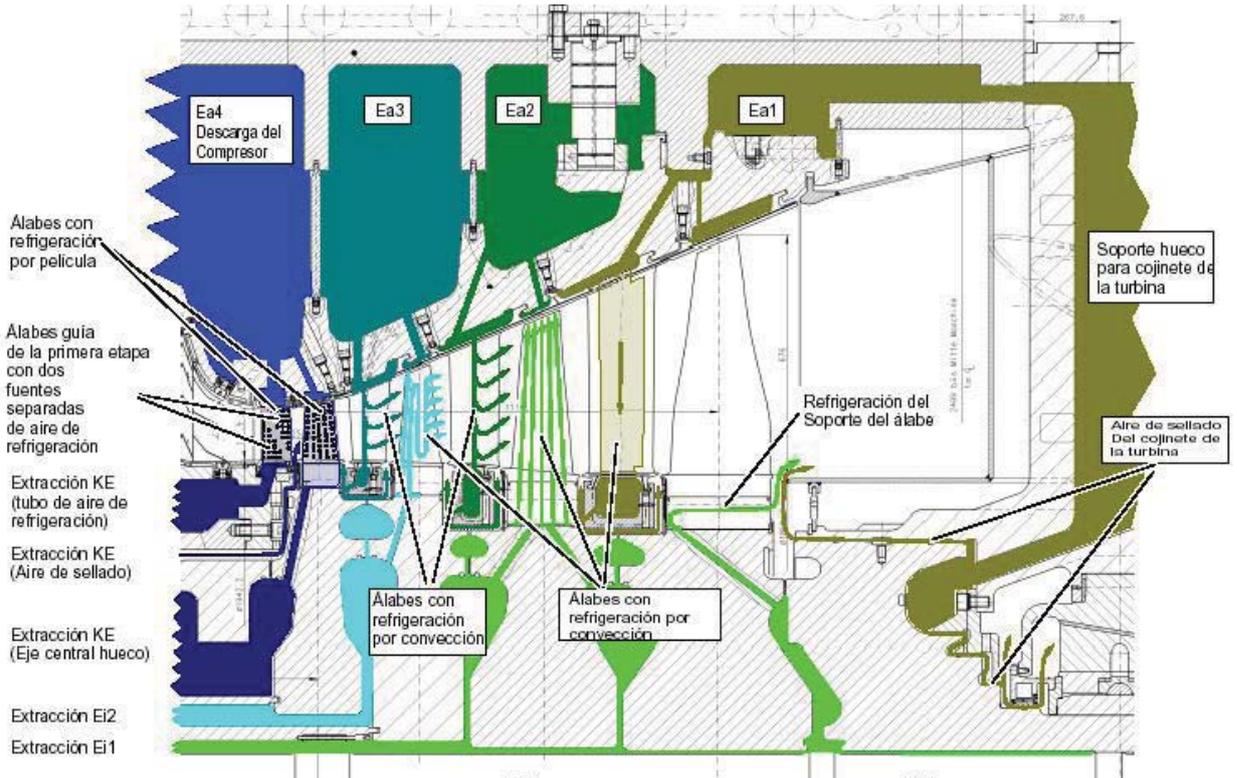


INTRODUCCIÓN	CICLO REAL	<b>AUMENTO <math>T_3</math></b>	REVISIÓN TECNOLÓGICA	R
--------------	------------	---------------------------------	----------------------	---

# AUMENTO DE $T_3$



INTRODUCCIÓN	CICLO REAL	<b>AUMENTO <math>T_3</math></b>	REVISIÓN TECNOLÓGICA	R
--------------	------------	---------------------------------	----------------------	---



INTRODUCCIÓN	CICLO REAL	<b>AUMENTO <math>T_3</math></b>	REVISIÓN TECNOLÓGICA	R
--------------	------------	---------------------------------	----------------------	---

## AUMENTO DE $T_3$

Uso de aire frío en los sellos de los álabes

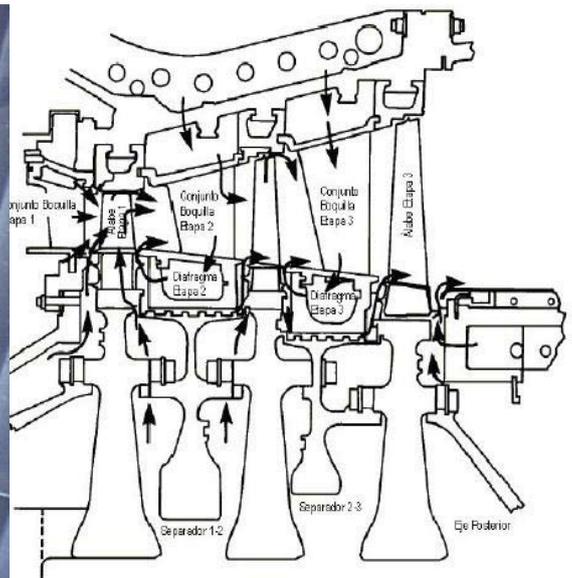
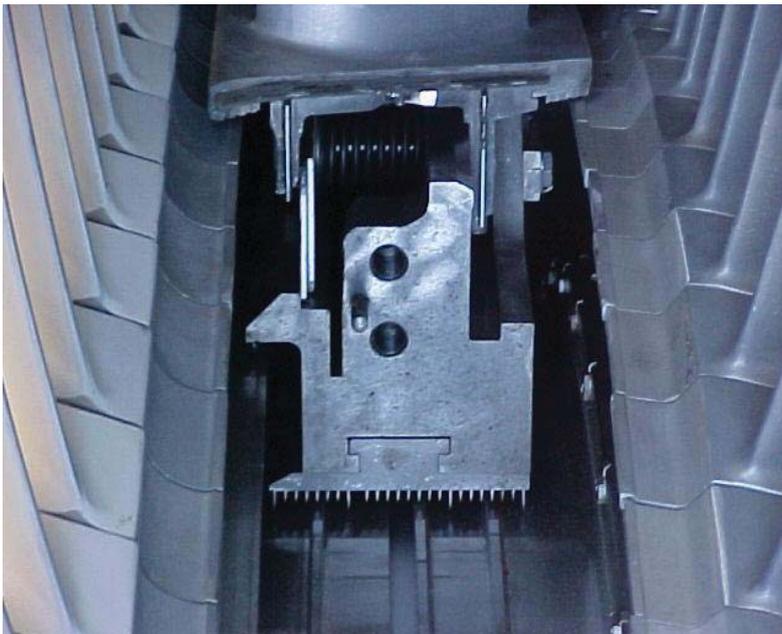
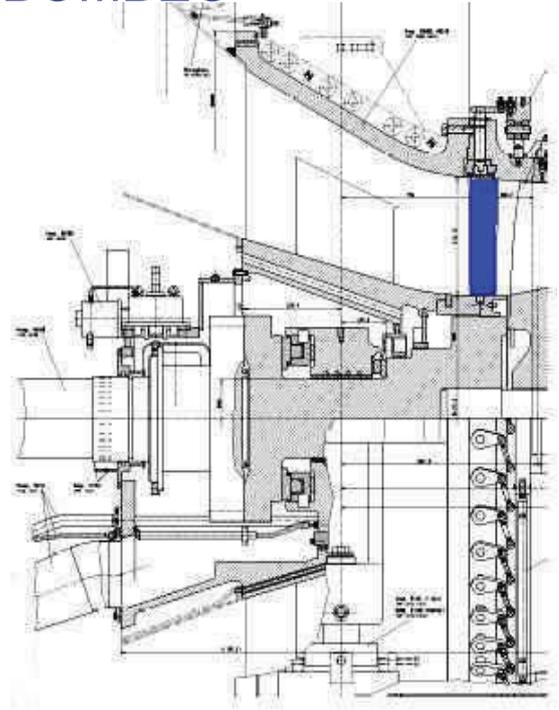


Figura 16. Sección de Turbina - Vista en Corte Mostrando los Flujos de Aire de Enfriamiento

INTRODUCCIÓN	CICLO REAL	<b>AUMENTO <math>T_3</math></b>	REVISIÓN TECNOLÓGICA	R
--------------	------------	---------------------------------	----------------------	---

## PROTECCIÓN FRENTE A BOMBEO

- ❑ Con el fin de proteger el compresor frente a bombeo, suelen emplearse álabes móviles a la entrada del compresor (IGV)
- ❑ Dichos álabes además permiten cerrar el compresor para limitar el enfriamiento durante las paradas



INTRODUCCIÓN

CICLO REAL

AUMENTO T3

**REVISIÓN  
TECNOLÓGICA**

R

## PROTECCIÓN FRENTE A BOMBEO

- ❑ Inlet guide vanes (IGV)



INTRODUCCIÓN

CICLO REAL

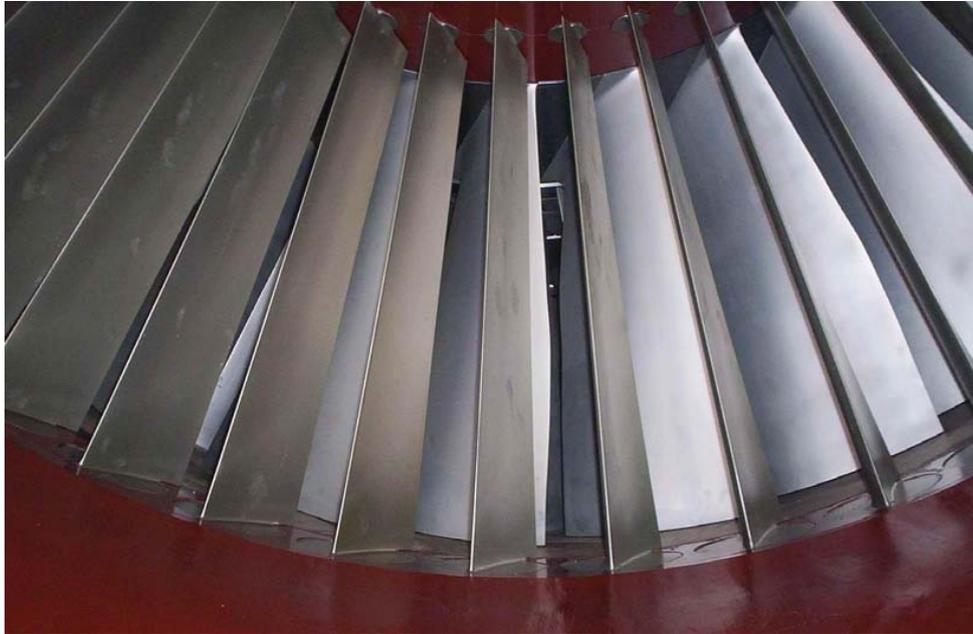
AUMENTO T3

**REVISIÓN  
TECNOLÓGICA**

R

# PROTECCIÓN FRENTE A BOMBEO

Inlet guide vanes (IGV)



INTRODUCCIÓN

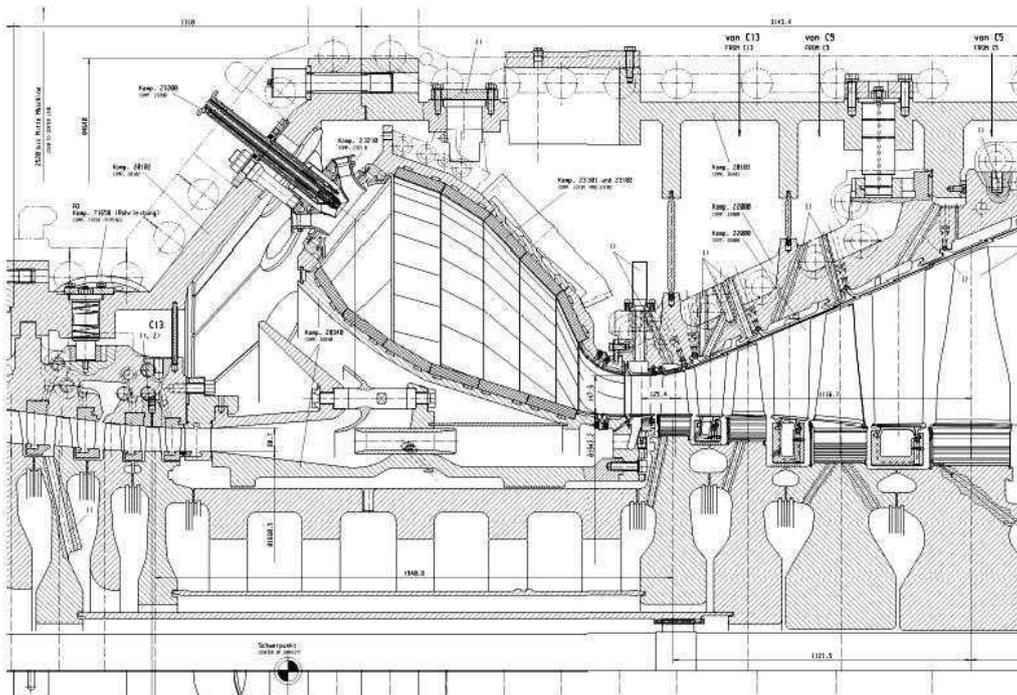
CICLO REAL

AUMENTO T3

REVISIÓN  
TECNOLÓGICA

R

# CÁMARA DE COMBUSTIÓN Y QUEMADORES



INTRODUCCIÓN

CICLO REAL

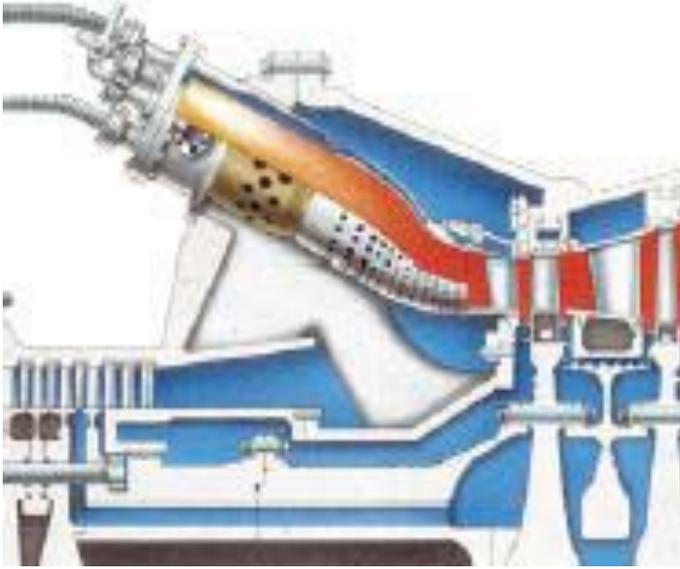
AUMENTO T3

REVISIÓN  
TECNOLÓGICA

R



## CÁMARA DE COMBUSTIÓN



INTRODUCCIÓN

CICLO REAL

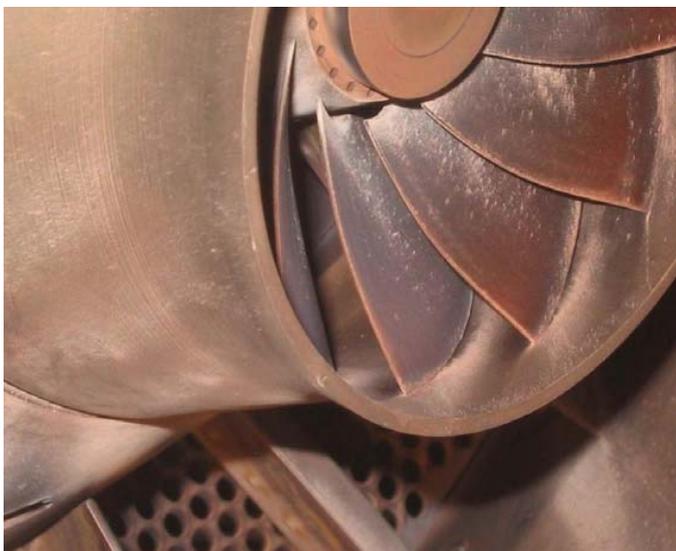
AUMENTO T3

**REVISIÓN  
TECNOLÓGICA**

R

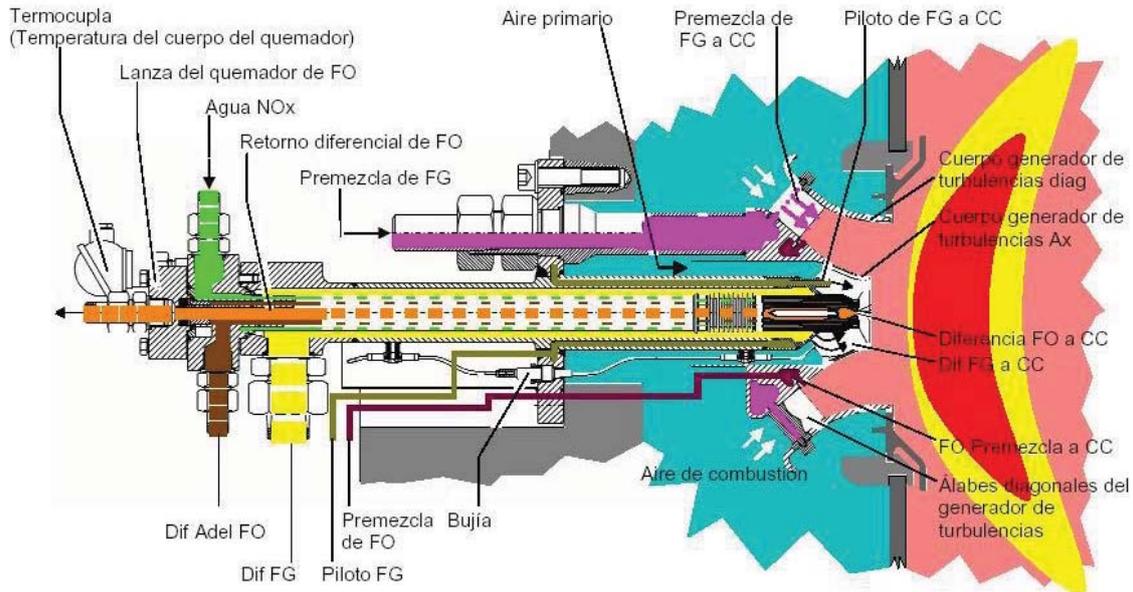


## QUEMADORES



# QUEMADORES

## Control del dosado

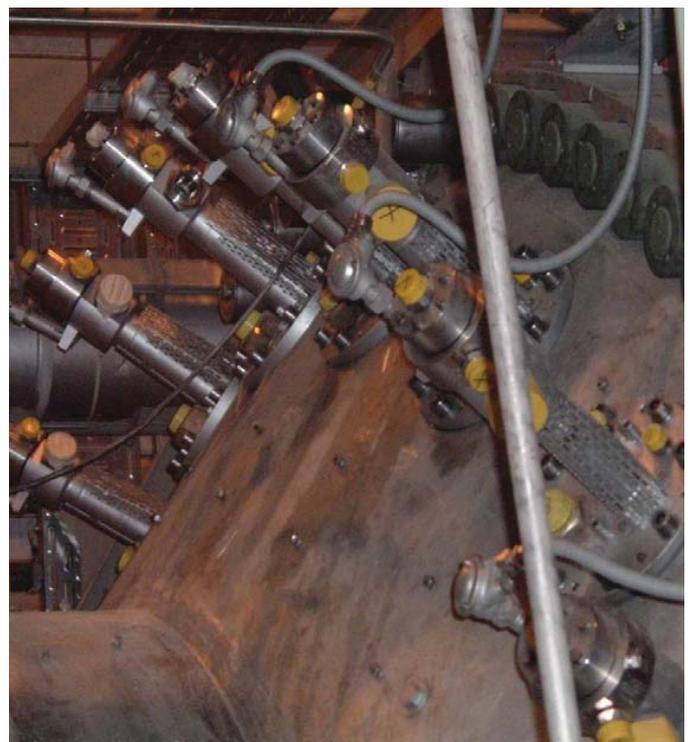


INTRODUCCIÓN	CICLO REAL	AUMENTO T3	<b>REVISIÓN TECNOLÓGICA</b>	R
--------------	------------	------------	-----------------------------	---

# QUEMADORES

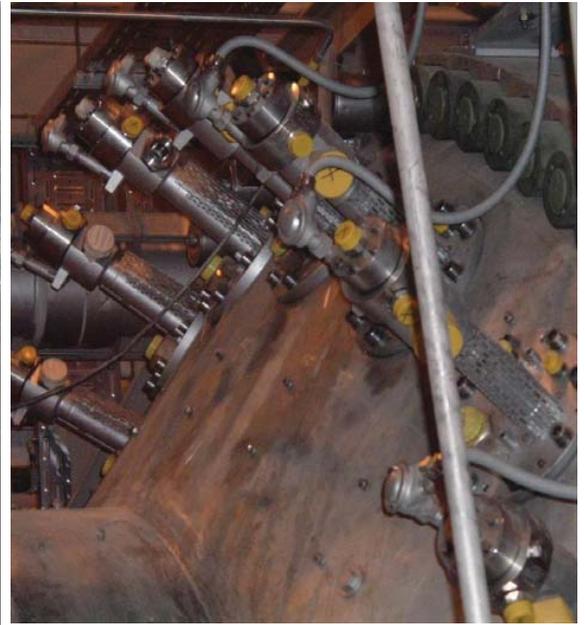
## Control de las emisiones de NOx:

- Uso de mezclas pobres para minimizar los picos de temperatura
- Uso de agua o vapor, inyectado junto con el combustible, para disminuir la temperatura de combustión
- Uso de catalizadores para limpiar los gases de escape
- Uso de quemadores catalíticos



INTRODUCCIÓN	CICLO REAL	AUMENTO T3	<b>REVISIÓN TECNOLÓGICA</b>	R
--------------	------------	------------	-----------------------------	---

## QUEMADORES Y DISTRIBUCIÓN DE GAS



INTRODUCCIÓN

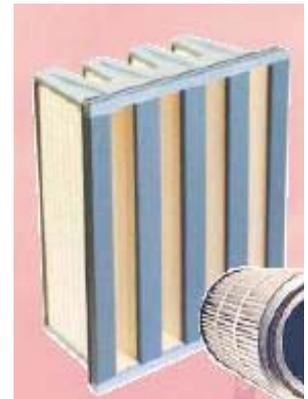
CICLO REAL

AUMENTO T3

**REVISIÓN  
TECNOLÓGICA**

R

## FILTRO DE AIRE



INTRODUCCIÓN

CICLO REAL

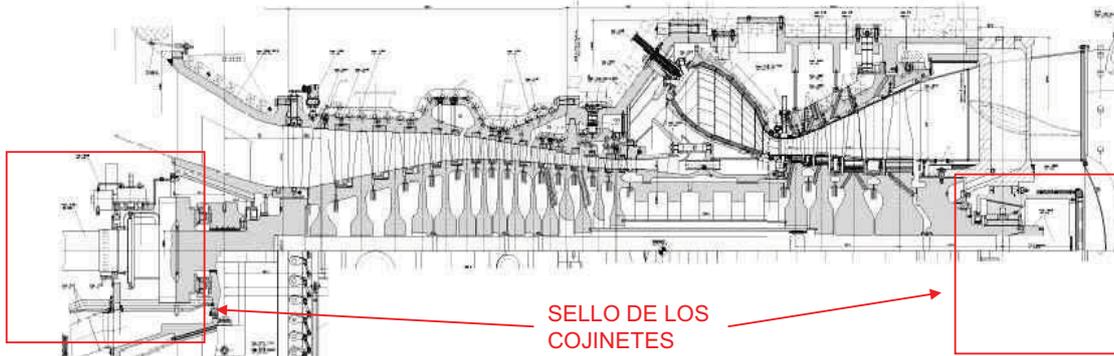
AUMENTO T3

**REVISIÓN  
TECNOLÓGICA**

R

# COJINETES

La turbina de gas presenta dos cojinetes, uno a la entrada del compresor y es combinado (axial-radial), y el segundo está a continuación de la turbina y es solo radial.

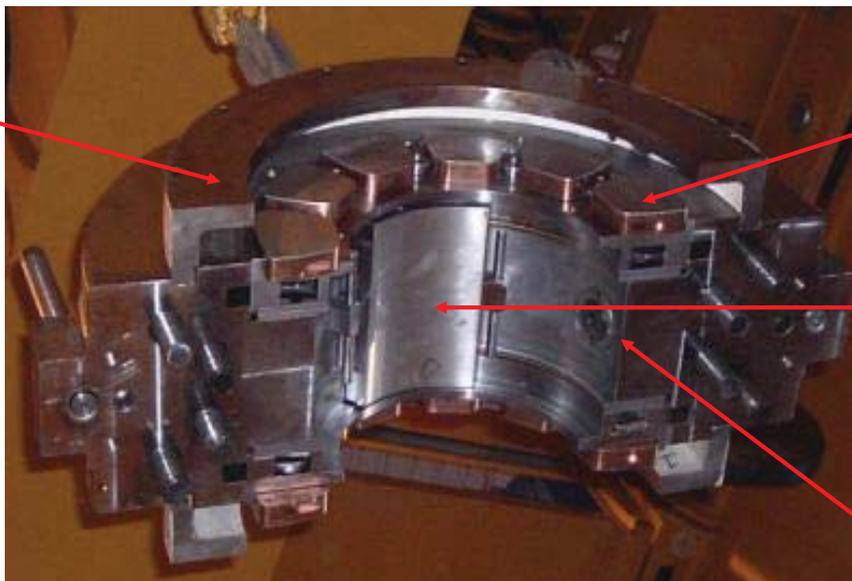


INTRODUCCIÓN	CICLO REAL	AUMENTO T3	<b>REVISIÓN TECNOLÓGICA</b>	R
--------------	------------	------------	-----------------------------	---

# COJINETES

## ❑ Cojinete combinado

Carcasa superior del cojinete



Almohadillas axiales o de empuje

Almohadillas radiales

Rótula de la almohadilla

INTRODUCCIÓN	CICLO REAL	AUMENTO T3	<b>REVISIÓN TECNOLÓGICA</b>	R
--------------	------------	------------	-----------------------------	---

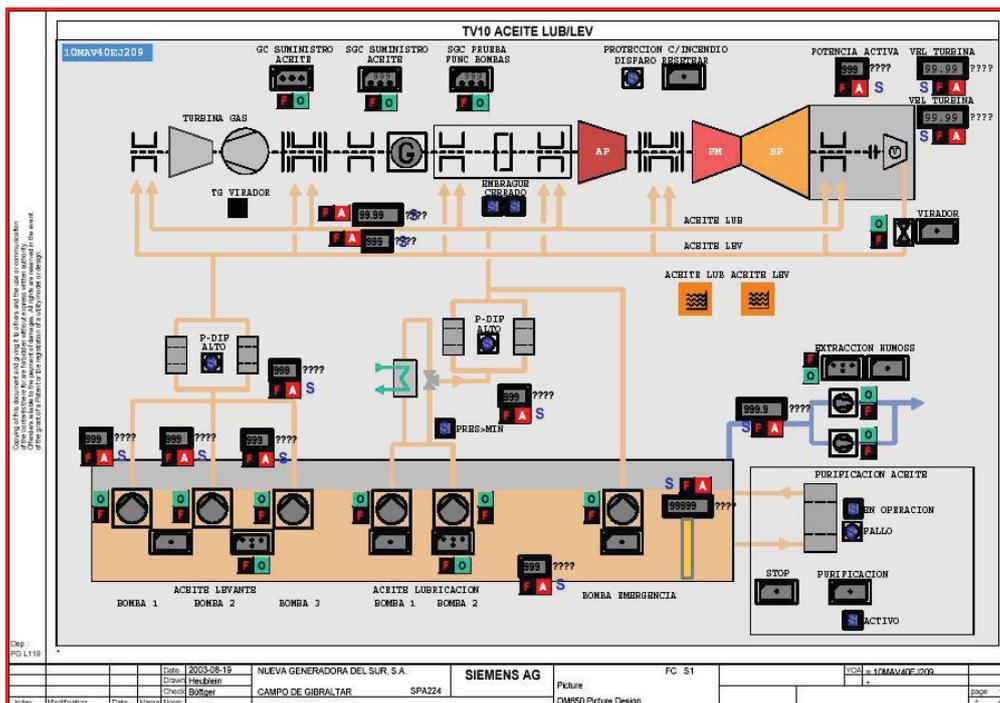
# VIRADOR

- ❑ Acelera la turbina desde parada hasta cierta velocidad
- ❑ En las paradas, mantiene girando la turbina a muy baja velocidad mientras se enfría para evitar la flexión del eje



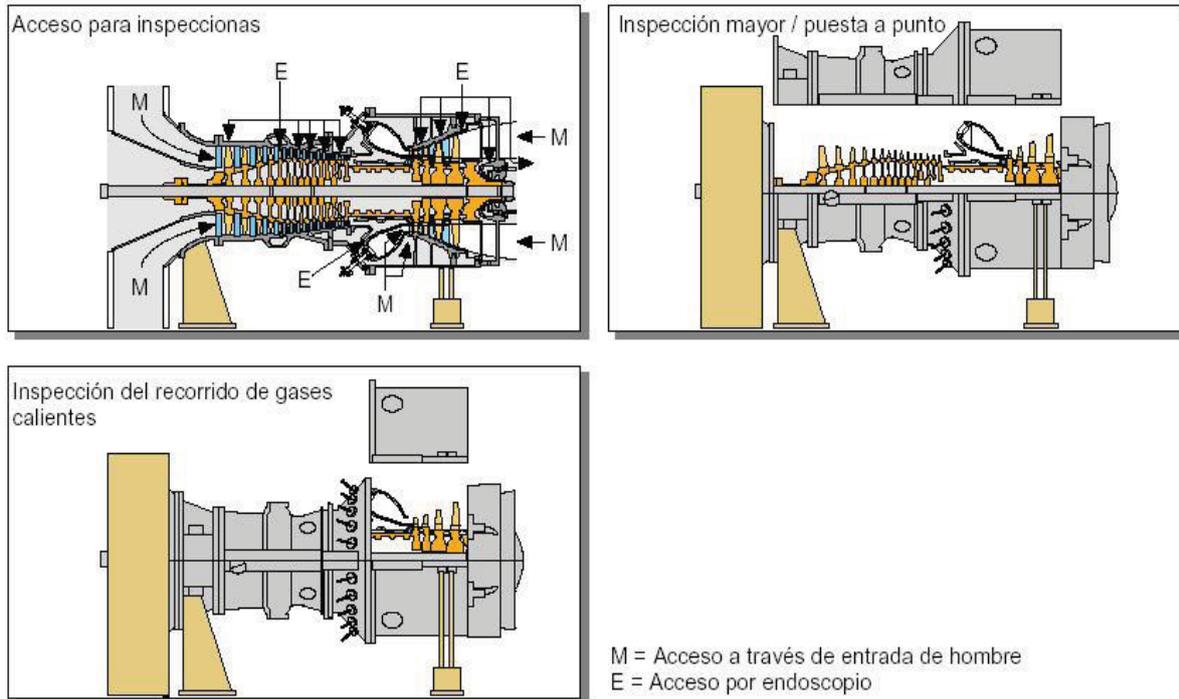
INTRODUCCIÓN	CICLO REAL	AUMENTO T3	REVISIÓN TECNOLÓGICA	R
--------------	------------	------------	----------------------	---

# SISTEMA DE LEVANTAMIENTO



INTRODUCCIÓN	CICLO REAL	AUMENTO T3	REVISIÓN TECNOLÓGICA	R
--------------	------------	------------	----------------------	---

## MANTENIMIENTO



INTRODUCCIÓN

CICLO REAL

AUMENTO T3

**REVISIÓN  
TECNOLÓGICA**

R

## RESUMEN (I)

- Las turbinas de gas abarcan un amplio rango de potencias que va desde 20 kW hasta potencias superiores a 300 MW y rendimientos de hasta el 40 %
- El ciclo real de las TG tiene en cuenta las pérdidas debidas a las compresión y expansión no ideales en el compresor y turbina
- El análisis termodinámico del ciclo permite deducir que para una relación de compresión fijada, a mayor temperatura en los gases de admisión de la turbina mayor rendimiento, por tanto...
- El aumento en el rendimiento de las TG pasa por el diseño de materiales que soporten mayor temperatura y presión en la admisión a la TG

INTRODUCCIÓN

CICLO REAL

AUMENTO T3

**REVISIÓN  
TECNOLÓGICA**

R

## RESUMEN (II)

- La tendencia actual en la investigación pasa por la búsqueda de nuevos materiales y nuevas tecnologías en la refrigeración de los álabes para alargar la vida útil de la TG
- Los NOx son el principal agente contaminante en las TG como consecuencia de las altas temperaturas generadas en la cámara de combustión
- El uso de álabes móviles a la entrada del compresor (IGV) permite la protección de éste frente al problema de bombeo
- El arranque y las paradas de la TG se controlan mediante un virador para evitar problemas de flexión en el eje de la TG como consecuencia de los cambios bruscos de temperatura

INTRODUCCIÓN

CICLO REAL

AUMENTO T3

REVISIÓN  
TECNOLÓGICA

R

## BIBLIOGRAFÍA

- M.P. Boyce  
“Gas turbine engineering handbook”
  
- H. Cohen, G.F.C. Rogers y H.I.H. Saravanamuttoo  
“Teoría de las turbinas de gas”
  
- C. Mataix  
“Turbomáquinas térmicas”

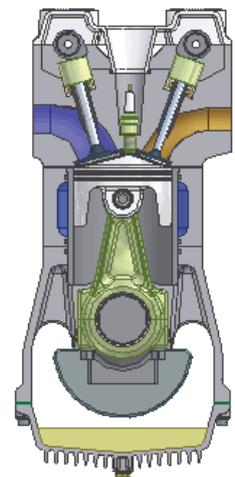
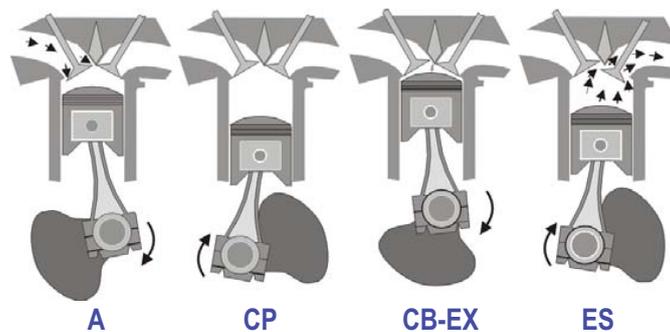
## Contenido

- ❑ Introducción
- ❑ MEP/MEC
- ❑ 4T/2T
- ❑ Parámetros fundamentales y curvas características

INTRO	MEP/MEC	4T/2T	PARÁMETROS Y CURVAS
-------	---------	-------	---------------------

## Introducción

- ❑ Motores de combustión interna alternativos (MCIA):
  - Combustión interna en pistón-cilindro hermético
  - Mecanismo biela-manivela-deslizadera
  - Forma de operación secuencial



INTRO	MEP/MEC	4T/2T	PARÁMETROS Y CURVAS
-------	---------	-------	---------------------

## Introducció

### □ Ventajas:

- Combustible líquido de gran poder calorífico
- Rendimiento térmico aceptable (<55%)
- Amplio rango de potencias (0.1 – 80.000 kW)
- Grado de carga modificable fácilmente
- Potencia específica elevada
- Disposiciones constructivas variadas
- Gran autonomía

### □ Inconvenientes:

- Combustibles de alta calidad (derivados del petróleo)
- Contaminación química y acústica
- Gran variabilidad del rendimiento según las condiciones de uso

INTRO

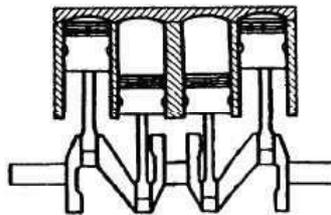
MEP/MEC

4T/2T

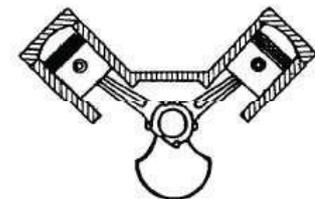
PARÁMETROS Y  
CURVAS

## Introducció

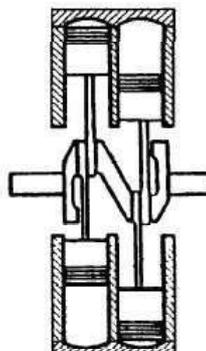
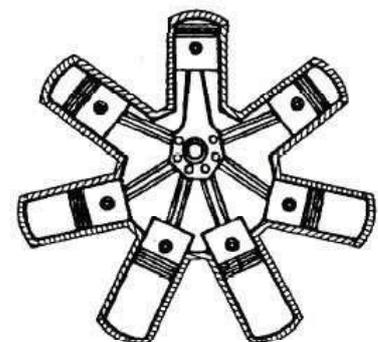
### □ Disposiciones constructivas



En línea



En V

Opuestos  
(Horizontal)

Radial

INTRO

MEP/MEC

4T/2T

PARÁMETROS Y  
CURVAS

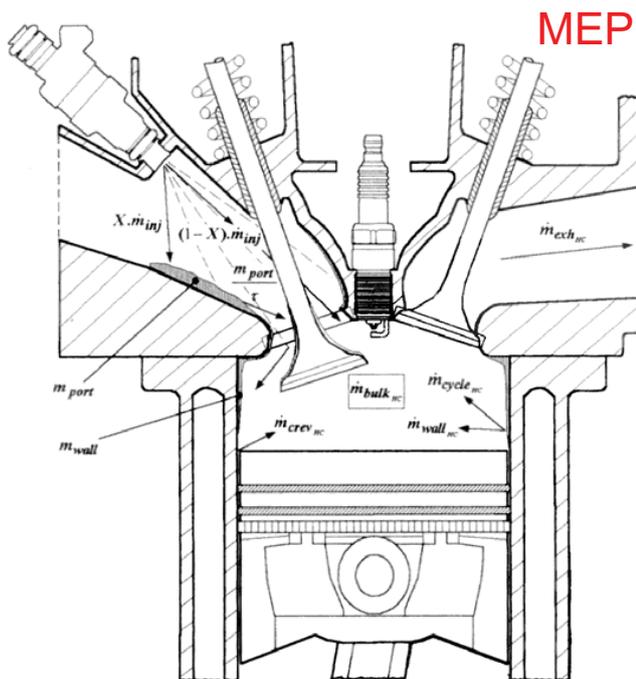
## Introducción

### □ Clasificación:

- Proceso de combustión:
  - Motor de encendido provocado (MEP)
  - Motor de encendido por compresión (MEC)
- Proceso de renovación de la carga:
  - Motores de cuatro tiempos (4T)
  - Motores de dos tiempos (2T)
- Asistencia a la renovación de la carga
  - Motores de aspiración natural
  - Motores sobrealimentados
- Sistema de refrigeración:
  - Refrigerado por agua
  - Refrigerado por aire

INTRO	MEP/MEC	4T/2T	PARÁMETROS Y CURVAS
-------	---------	-------	---------------------

## MEP/MEC



INTRO	MEP/MEC	4T/2T	PARÁMETROS Y CURVAS
-------	---------	-------	---------------------

## MEP/MEC

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) – alto octano	Más pesados (gasoil, fueloil, biodiesel) – alto cetano
Fluido operante	Aire + combustible	Aire
Relación de compresión	8 – 12 (limitada por detonación)	12 – 24 (limitada por $p_{\max}$ y $\eta$ )
Régimen de giro máximo	Automoción: 5500-6500 Competición: 18000	Automoción: 5000 Pesado: 2200 Grandes 2T: 80
Rendimiento máximo	0.2 - 0.38	0.35 - 0.5
Dosado relativo	$\approx 1$	< 00.85-.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)

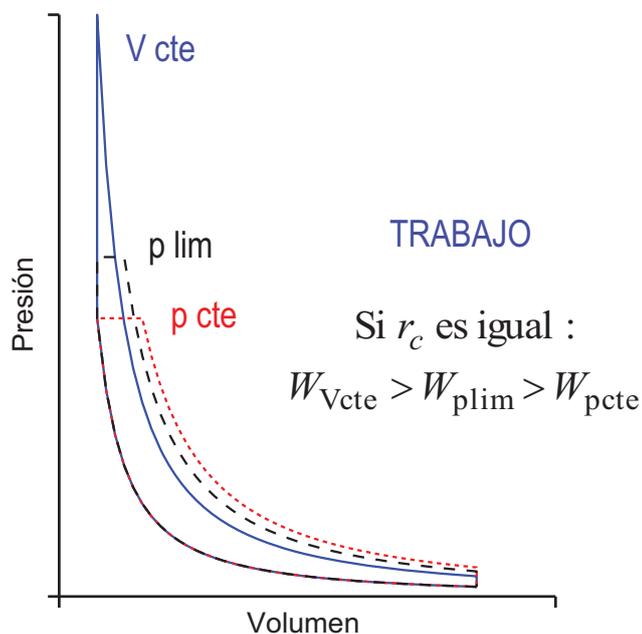
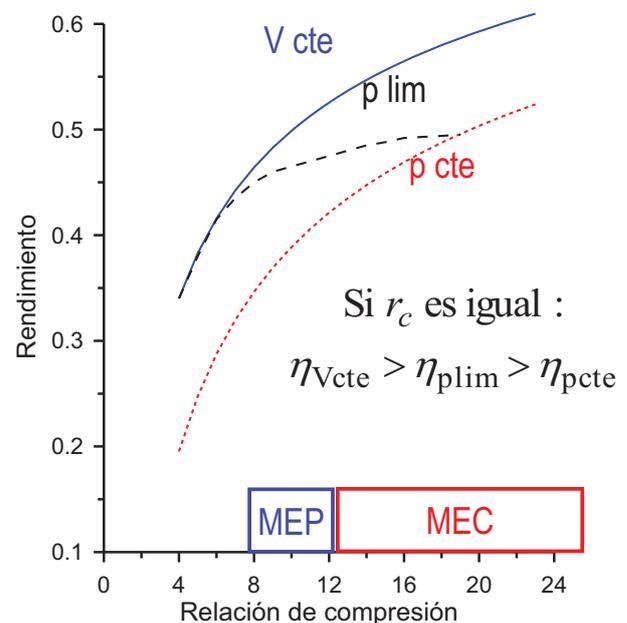
INTRO

MEP/MEC

4T/2T

PARÁMETROS Y  
CURVAS

## MEP/MEC

 Ciclo teórico de trabajo
RENDIMIENTO =  $f(r_c)$ 

INTRO

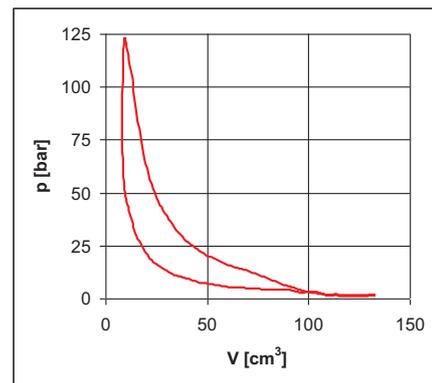
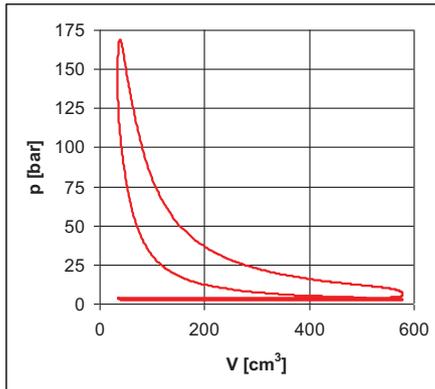
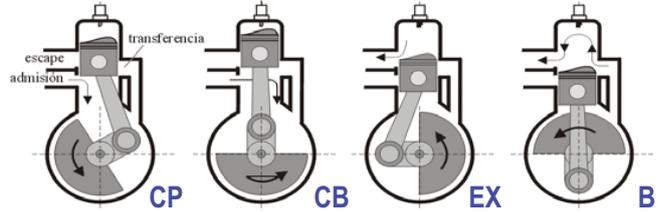
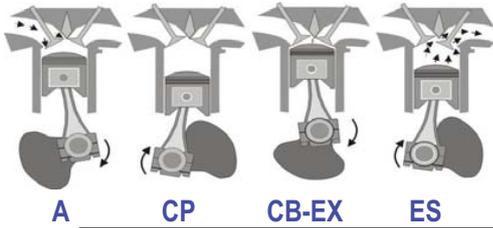
MEP/MEC

4T/2T

PARÁMETROS Y  
CURVAS

## 4T/2T

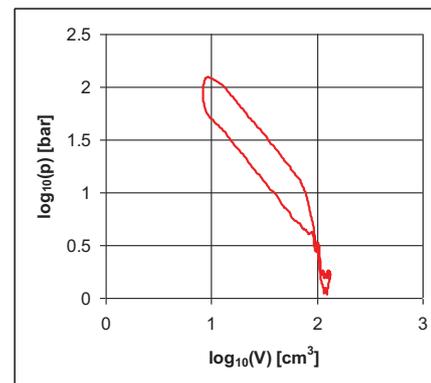
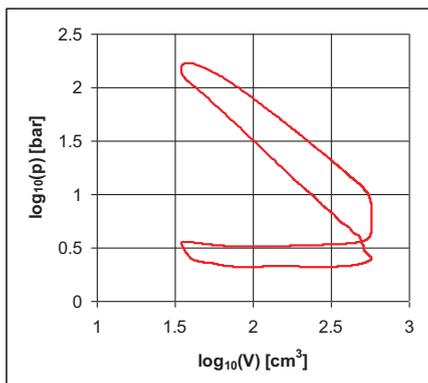
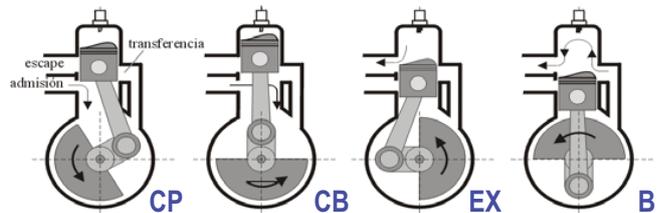
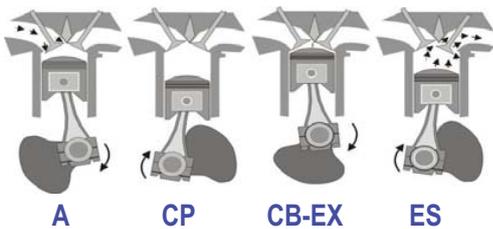
□ Proceso de renovación de la carga



INTRO	MEP/MEC	4T/2T	PARÁMETROS Y CURVAS
-------	---------	-------	---------------------

## 4T/2T

□ Proceso de renovación de la carga



INTRO	MEP/MEC	4T/2T	PARÁMETROS Y CURVAS
-------	---------	-------	---------------------

	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>

TENDENCIA  
TAMAÑO



INTRO	MEP/MEC	4T/2T	PARÁMETROS Y CURVAS
-------	---------	-------	---------------------

## Motores de 2T – casos extremos



$V_D = 6.36 \text{ cm}^3$  (x 1)  
 $D = 21.0 \text{ mm}$   
 $S = 18.3 \text{ mm}$   
 $N_e = 735 \text{ W}$   
 $n_{\max} = 16000 \text{ rpm}$

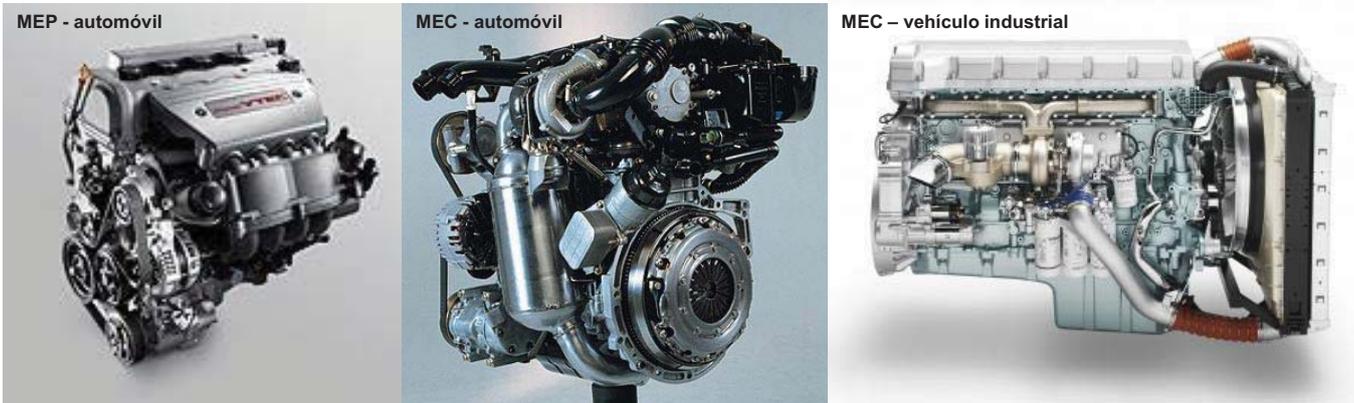
$V_D = 1.81 \text{ m}^3$  (x 14)  
 $D = 0.96 \text{ m}$   
 $S = 2.5 \text{ m}$   
 $N_e = 5720 \text{ kW/cil}$   
 $n_{\max} = 102 \text{ rpm}$



<http://www.wartsila.com>

INTRO	MEP/MEC	4T/2T	PARÁMETROS Y CURVAS
-------	---------	-------	---------------------

## Motores de 4T – automoción



MEP - automóvil  
 $V_D = 588.5 \text{ cm}^3 \text{ (x 4)}$   
 $D = 87.0 \text{ mm}$   
 $S = 99.0 \text{ mm}$   
 $N_e = 30.5 \text{ kW/cil}$   
 $n_{\text{max}} = 6500 \text{ rpm}$

MEC - automóvil  
 $V_D = 390.07 \text{ cm}^3 \text{ (x 4)}$   
 $D = 75.0 \text{ mm}$   
 $S = 88.3 \text{ mm}$   
 $N_e = 20 \text{ kW/cil}$   
 $n_{\text{max}} = 4500 \text{ rpm}$

MEC - vehículo industrial  
 $V_D = 2687.2 \text{ cm}^3 \text{ (x 6)}$   
 $D = 144.0 \text{ mm}$   
 $S = 165.0 \text{ mm}$   
 $N_e = 74.7 \text{ kW/cil}$   
 $n_{\text{max}} = 1850 \text{ rpm}$

INTRO	MEP/MEC	4T/2T	PARÁMETROS Y CURVAS
-------	---------	-------	---------------------

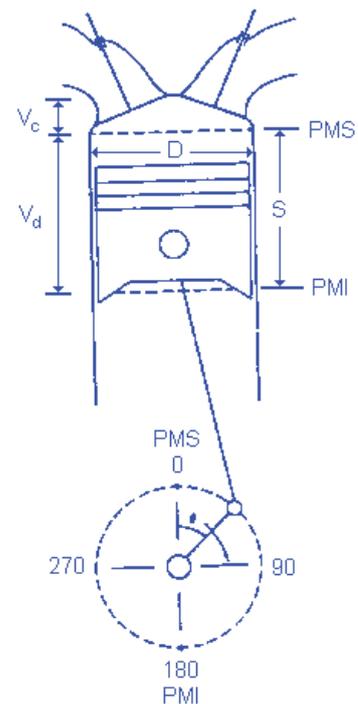
## Parámetros fundamentales

### Parámetros geométricos:

- Diámetro del pistón: **D**
- Carrera del pistón: **S**
- Relación carrera – diámetro: **S/D**
- Sección del pistón:  $A_p = \pi D^2 / 4$
- Cilindrada unitaria:  $V_d = A_p \cdot S$
- Número de cilindros: **z**
- Cilindrada total:  $V_t = z \cdot V_d$
- Vol. de la cámara de comb.:  **$V_c$**
- Relación de compresión  $r = (V_d + V_c) / V_c$

### Parámetros cinemáticos:

- Régimen de giro **n**
- Velocidad media del pistón  $C_m = 2 \cdot S \cdot n$



INTRO	MEP/MEC	4T/2T	PARÁMETROS Y CURVAS
-------	---------	-------	---------------------

## Parámetros fundamentales

### ❑ Gastos y dosado:

#### ➤ Gasto de aire

$$\dot{m}_a$$

#### ➤ Gasto de combustible

$$\dot{m}_f$$

#### ➤ Dosado

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

#### ➤ Dosado estequiométrico

$$F_r = \frac{F}{F_e}$$

$F_e$	GN	1 / 17
	Gasolina	1 / 14.6
	Gasoil	1 / 14.5
	Fueloil	1 / 13.8

$H_{pi}$	GN	47.7 MJ/kg
	Gasolina	42 MJ/kg
	Gasoil	42.8 MJ/kg
	Fueloil	>39.7 MJ/kg

$F_R$	MEP	$\approx 1$
	MEC	< 0.85-0.95 [global]

INTRO	MEP/MEC	4T/2T	PARÁMETROS Y CURVAS
-------	---------	-------	---------------------

## Parámetros fundamentales

### ❑ Potencias, trabajo, par y presión media {N,W,M,pm}

#### ➤ **Indicado:** integración del lazo de trabajo

$$\{N, W, M, pm\}_i$$

#### ➤ **Bombeo:** integración del lazo de bombeo

$$\{N, W, M, pm\}_b$$

#### ➤ **Neto:** $\{N, W, M, pm\}_i - \{N, W, M, pm\}_b =$

$$\{N, W, M, pm\}_n$$

#### ➤ **Efectivo:** en el eje

$$\{N, W, M, pm\}_e$$

#### ➤ **Pérdidas mecánicas:** $\{N, W, M, pm\}_i - \{N, W, M, pm\}_e =$ $\{N, W, M, pm\}_{pm}$

$$N = i \cdot W \cdot n$$

$$pm = \frac{W}{V_T}$$

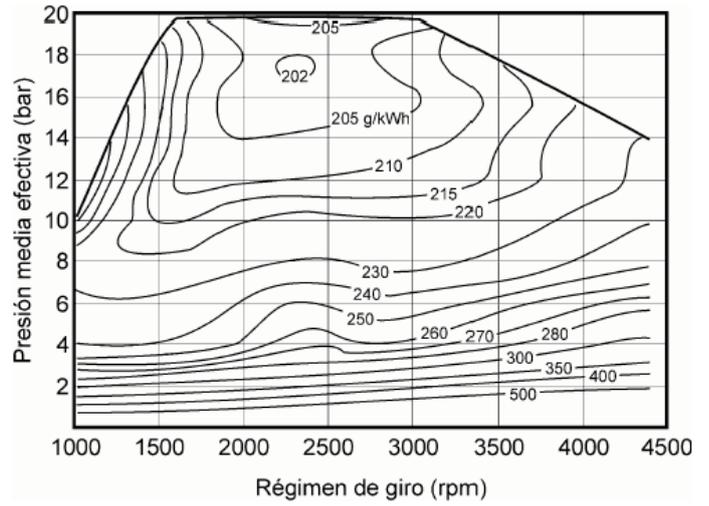
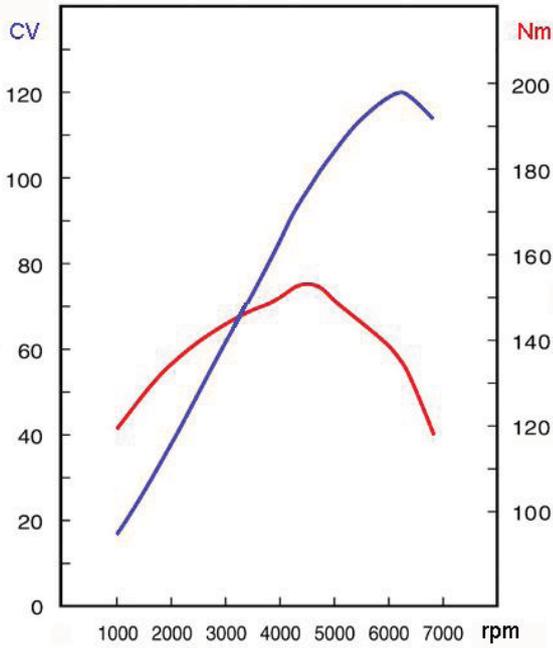
$$\eta_{\{e,i\}} = \frac{N_{\{e,i\}}}{\dot{m}_f H_c} \quad g_{ef} = \frac{\dot{m}_f}{N_e} = \frac{1}{\eta_e H_c} \quad i = \begin{cases} 1 & \text{si } 2T \\ 0.5 & \text{si } 4T \end{cases}$$

$$M = \frac{N}{2\pi n} = \frac{pm \cdot V_T \cdot i}{2\pi} \quad \eta_{pm} = \frac{\eta_e}{\eta_i} = \frac{\{N, W, M, pm\}_e}{\{N, W, M, pm\}_i} = 1 - \frac{\{N, W, M, pm\}_{pm}}{\{N, W, M, pm\}_i}$$

INTRO	MEP/MEC	4T/2T	PARÁMETROS Y CURVAS
-------	---------	-------	---------------------

## Parámetros fundamentales

### Curvas características



INTRO

MEP/MEC

4T/2T

PARÁMETROS Y CURVAS



## CONTENIDO

- Introducción. Balance energético
- Pérdidas mecánicas
- Lubricación
- Refrigeración
- Resumen
- Anexo: Determinación de pérdidas mecánicas

BALANCE ENERGÉTICO	PÉRDIDAS MECÁNICAS	LUBRICACIÓN	REFRIGE- RACIÓN	R	ANEXO: MEDIDA PÉRDIDAS
-----------------------	-----------------------	-------------	--------------------	---	---------------------------

## INTRODUCCIÓN

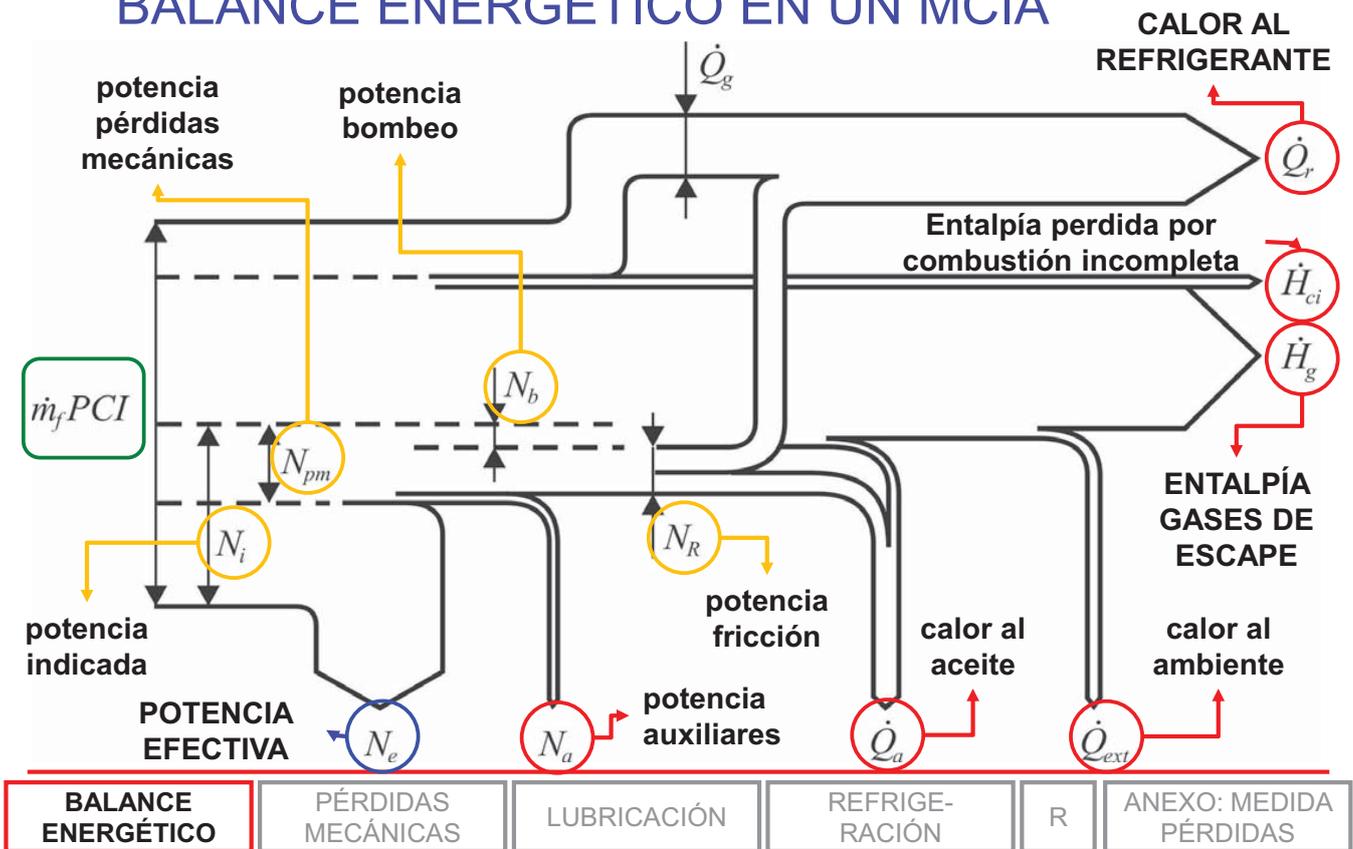
- En un MCIA, sólo una fracción de la energía del combustible es transformada en trabajo en el eje

$$\dot{m}_f PCI = N_e + \dot{Q}_r + \dot{H}_g + N_a + \dot{Q}_a + \dot{H}_{ci} + \dot{Q}_{ext}$$

- Una parte significativa es evacuada en forma de calor
  - Cesión de calor al foco frío (ciclo abierto → entalpía gases de escape)
  - Cesión de calor al refrigerante y/o aceite
- La **refrigeración** resulta imprescindible para mantener acotada la temperatura y dilatación de las piezas
- Por otra parte, el trabajo medido en el eje es significativamente menor que el indicado (*i.e.* medido por integración del ciclo)
- Pérdidas mecánicas: factores que causan que  $p_{mi} > p_{me}$
- Uno de los principales factores de  $p_m$  son las pérdidas por fricción, lo que implica la necesidad de un **sistema de lubricación**

<b>BALANCE ENERGÉTICO</b>	PÉRDIDAS MECÁNICAS	LUBRICACIÓN	REFRIGE- RACIÓN	R	ANEXO: MEDIDA PÉRDIDAS
-------------------------------	-----------------------	-------------	--------------------	---	---------------------------

## BALANCE ENERGÉTICO EN UN MCIA



## PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS

□ Potencias, trabajo y par {N,W,M,pm}

- **Indicado:** integración del lazo de trabajo {N,W,M,pm}<sub>i</sub>
- **Bombeo:** integración del lazo de bombeo {N,W,M,pm}<sub>b</sub>
- **Neto:**  $\{N,W,M,pm\}_i - \{N,W,M,pm\}_b =$  {N,W,M,pm}<sub>n</sub>
- **Efectivo:** en el eje {N,W,M,pm}<sub>e</sub>
- **Pérdidas mecánicas:**  $\{N,W,M,pm\}_i - \{N,W,M,pm\}_e =$  {N,W,M,pm}<sub>pm</sub>

**RENDIMIENTOS EFECTIVO E INDICADO**

$$\eta_{\{e,i\}} = \frac{N_{\{e,i\}}}{\dot{m}_f H_c}$$

$$g_{ef} = \frac{\dot{m}_f}{N_e} = \frac{1}{\eta_e H_c}$$

$$M = \frac{N}{2\pi n} = \frac{pm \cdot V_T \cdot i}{2\pi}$$

$$N = i \cdot W \cdot n$$

**RENDIMIENTO MECÁNICO**

$$\eta_m = \frac{\eta_e}{\eta_i} = \frac{\{N,W,M,pm\}_e}{\{N,W,M,pm\}_i} = 1 - \frac{\{N,W,M,pm\}_{pm}}{\{N,W,M,pm\}_i}$$

$$pm = \frac{W}{V_T}$$

BALANCE ENERGÉTICO	PÉRDIDAS MECÁNICAS	LUBRICACIÓN	REFRIGERACIÓN	R	ANEXO: MEDIDA PÉRDIDAS
--------------------	--------------------	-------------	---------------	---	------------------------

## ANÁLISIS DE PÉRDIDAS MECÁNICAS

❑ El rendimiento mecánico varía de forma considerable según el punto de funcionamiento

- Valor máximo → 0.7~0.9
  - A ralentí → 0
- $$\eta_m = \frac{p_{me}}{p_{mi}} = 1 - \frac{p_{mpm}}{p_{mi}} \quad \eta_e = \eta_m \cdot \eta_i$$

❑ Principales pérdidas mecánicas

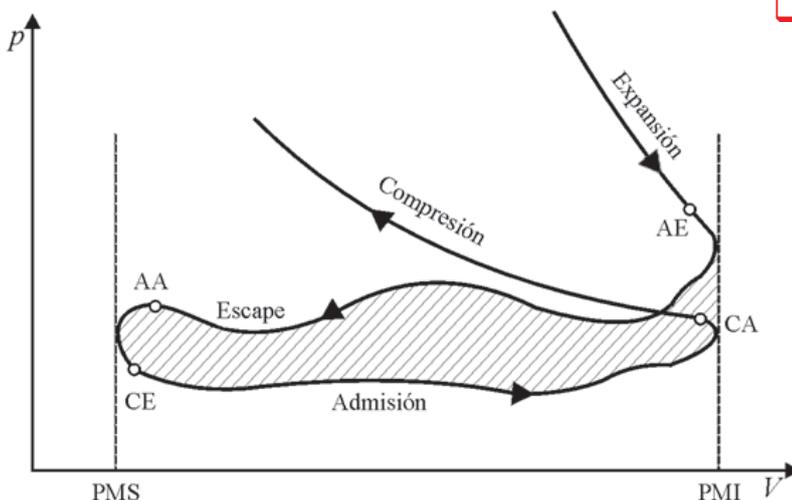
- Pérdidas por accionamiento de auxiliares:
  - Bomba de aceite, de agua, de combustible, alternador
  - Ventilador del radiador, compresor aire acondicionado, aire secundario...
  - Bomba de vacío, dirección asistida...
- Bombeo
- Fricción

Optimización:  
accionamiento  
discontinuo de los  
auxiliares

BALANCE ENERGÉTICO	PÉRDIDAS MECÁNICAS	LUBRICACIÓN	REFRIGERACIÓN	R	ANEXO: MEDIDA PÉRDIDAS
--------------------	--------------------	-------------	---------------	---	------------------------

## PÉRDIDAS POR BOMBEO (I)

❑ Ligadas al proceso de renovación de la carga, cuantifican el trabajo asociado al llenado y vaciado del cilindro



❑ Dependen de:

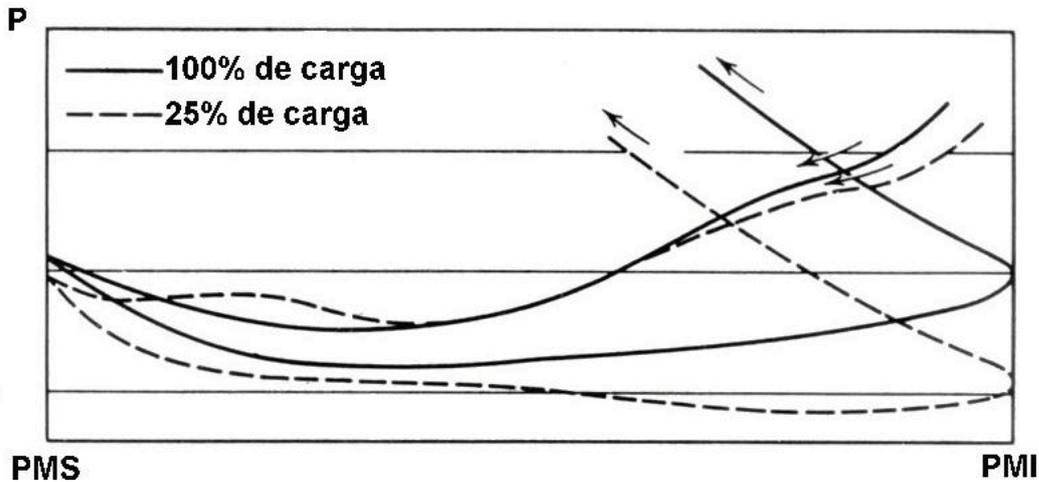
- Caída de presión en filtro
- Contrapresión de escape
- Diagrama de distribución del motor (AAE)
- Geometría de los colectores (sintonizado)
- Pérdidas de carga en proceso de admisión
- Regulación de la carga en MEP con formación externa de la mezcla

(ver lecciones 2 y 3)

BALANCE ENERGÉTICO	PÉRDIDAS MECÁNICAS	LUBRICACIÓN	REFRIGERACIÓN	R	ANEXO: MEDIDA PÉRDIDAS
--------------------	--------------------	-------------	---------------	---	------------------------

## PÉRDIDAS POR BOMBEO (II)

❑ Efecto de la mariposa de admisión en MEP



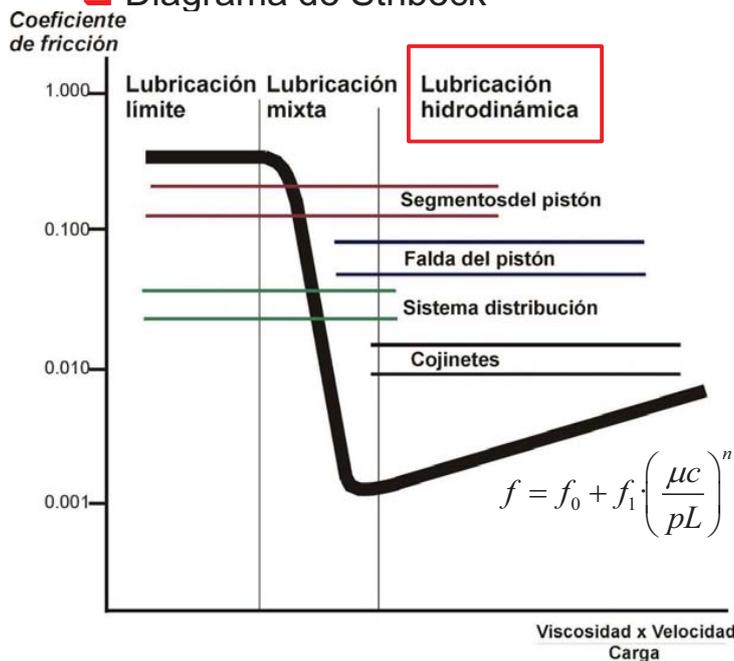
❑ En los motores MEP al bajar la carga  $\left\{ \begin{array}{l} \uparrow p_{mb} \rightarrow \uparrow p_{mpm} \\ \downarrow m_f \rightarrow \downarrow p_{mi} \end{array} \right\} \rightarrow \downarrow \eta_m \rightarrow \downarrow \eta_e$

BALANCE ENERGÉTICO	<b>PÉRDIDAS MECÁNICAS</b>	LUBRICACIÓN	REFRIGERACIÓN	R	ANEXO: MEDIDA PÉRDIDAS
--------------------	---------------------------	-------------	---------------	---	------------------------

## PÉRDIDAS POR ROZAMIENTO (I)

$$F_R = F_N f$$

❑ Diagrama de Stribeck



❑ Cojinetes:

- Variación de las cargas a lo largo del ciclo
- Las deformaciones aumentan la fricción
- 20-30% de las pérdidas

❑ Segmentos:

- Funcionamiento crítico en PMS y PMI
- Segmento de compresión
- 50-70% de las pérdidas

❑ Pistón:

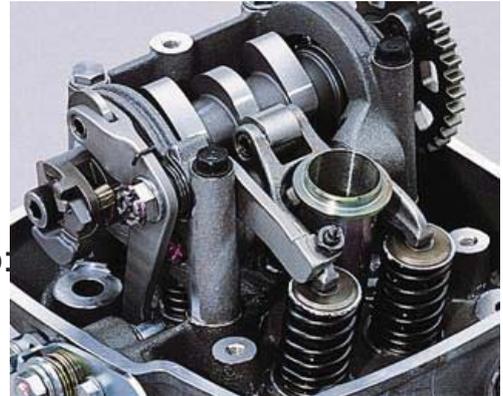
- Cojinete oscilante
- Poco desgaste de la falda

BALANCE ENERGÉTICO	<b>PÉRDIDAS MECÁNICAS</b>	LUBRICACIÓN	REFRIGERACIÓN	R	ANEXO: MEDIDA PÉRDIDAS
--------------------	---------------------------	-------------	---------------	---	------------------------

## PÉRDIDAS POR ROZAMIENTO (II)

Las pérdidas por rozamiento dependen de la velocidad ( $x^2$ ) y la fricción

$$pmR \approx \sum (C_p L + C_i c_m^2 + C_g pmi) f$$



Disminución de pérdidas por rozamiento:

- Optimización aceite (f)
- Aligerar piezas
- Aumentar juegos (pistón-cilindro y cojinetes)
- Eliminar deslizamientos
- Pistones de falda corta
- Mejora mecanizado
- Disminuir número de segmentos y tensión radial



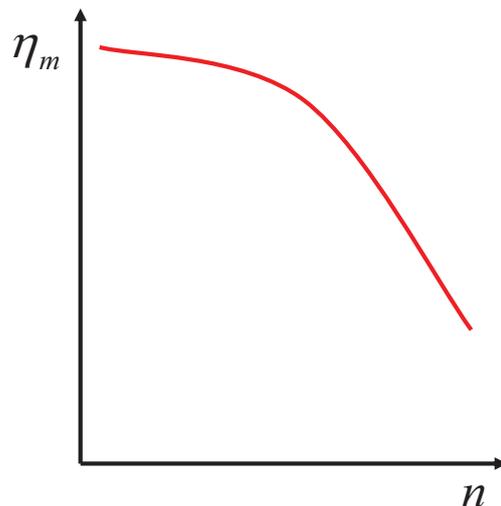
BALANCE ENERGÉTICO	<b>PÉRDIDAS MECÁNICAS</b>	LUBRICACIÓN	REFRIGERACIÓN	R	ANEXO: MEDIDA PÉRDIDAS
--------------------	---------------------------	-------------	---------------	---	------------------------

## SÍNTESIS

El régimen de giro ( $c_m$ ) es el factor con mayor efecto sobre la  $pmpm$ :

- $pmr \approx f(c_m^2)$
- $pmb$  aumenta con  $c_m$  (efectos de compresibilidad y fricción fluida)

La regulación de la carga en MEP también afecta a la  $pmpm$



Nota:  $\eta_m = 1 - \frac{pmpm}{pmi}$

aunque  $pmpm$  se mantenga (MEC),  $\eta_m$  disminuye al disminuir la carga

BALANCE ENERGÉTICO	<b>PÉRDIDAS MECÁNICAS</b>	LUBRICACIÓN	REFRIGERACIÓN	R	ANEXO: MEDIDA PÉRDIDAS
--------------------	---------------------------	-------------	---------------	---	------------------------

## LUBRICACIÓN

□ Condiciones de lubricación:

Conjunto	Desplazam.	T	P	Velocidad relativa
Pistón-camisa	Alternativo	Alta	Moderada	Alta
Pistón-biela	Oscilante	Moderada	Muy alta	Baja
Biela-cigüeñal Cigüeñal-bloque	Rotativo	Baja	Alta	Alta
Árbol de levas-empujadores	Rotativo	Baja	Muy alta	Baja
Válvula de escape	Alternativo	Muy alta	Baja	Moderada
Eje turbogruppo	Rotativo	Alta	Baja	Muy alta

BALANCE ENERGÉTICO	PÉRDIDAS MECÁNICAS	LUBRICACIÓN	REFRIGERACIÓN	R	ANEXO: MEDIDA PÉRDIDAS
--------------------	--------------------	-------------	---------------	---	------------------------

## LUBRICACIÓN

□ Tipos de sistemas de lubricación:

➤ Por mezcla:

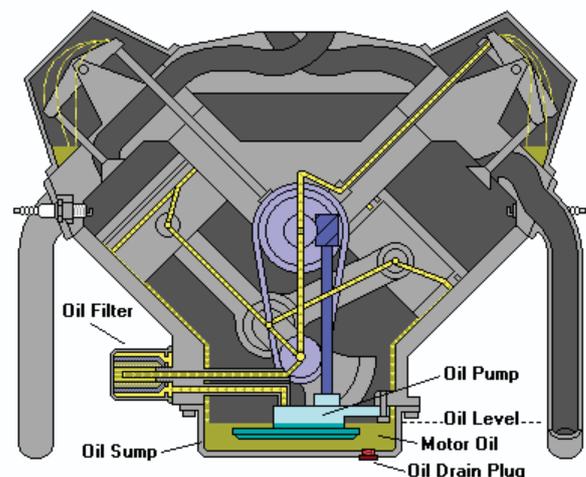
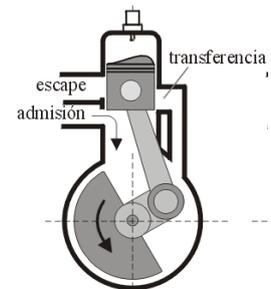
- Aceite incorporado a la mezcla de aire y combustible
- Motores 2T pequeños (directa o por separado)

➤ Barboteo:

- Abandonado en motores modernos
- Aplicado en algunos puntos (falda)

➤ A presión:

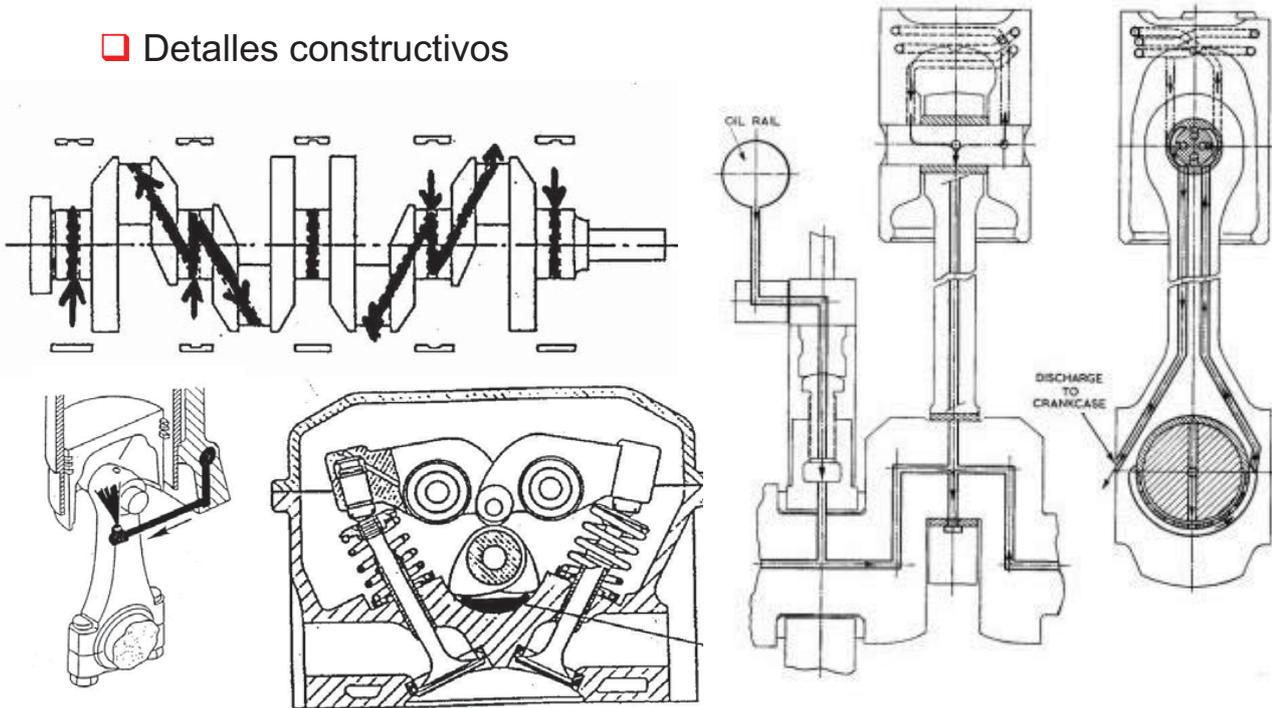
- Sistema habitual
- Bomba de aceite (3~7 bar)
- Circuito específico (15-30 l/hkW)



BALANCE ENERGÉTICO	PÉRDIDAS MECÁNICAS	LUBRICACIÓN	REFRIGERACIÓN	R	ANEXO: MEDIDA PÉRDIDAS
--------------------	--------------------	-------------	---------------	---	------------------------

# LUBRICACIÓN

▣ Detalles constructivos

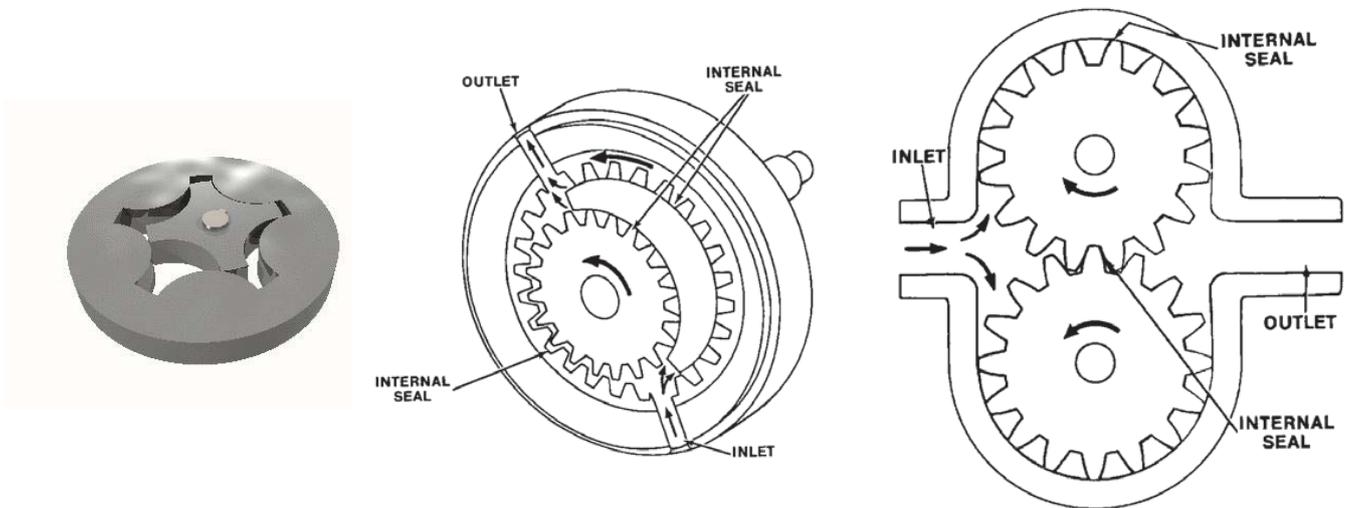


BALANCE ENERGÉTICO	PÉRDIDAS MECÁNICAS	<b>LUBRICACIÓN</b>	REFRIGERACIÓN	R	ANEXO: MEDIDA PÉRDIDAS
--------------------	--------------------	--------------------	---------------	---	------------------------

# LUBRICACIÓN

▣ Bomba de aceite

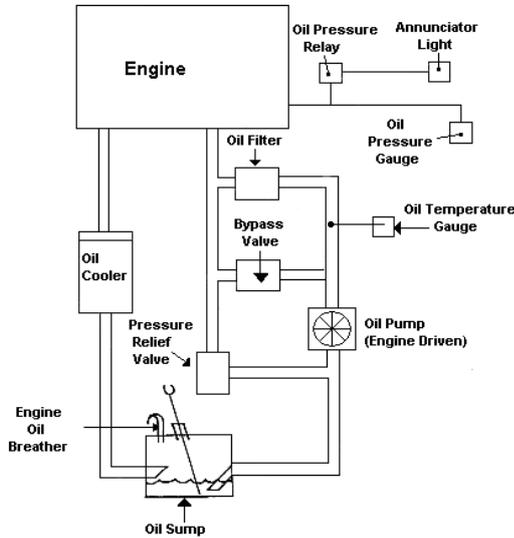
➤ Potencia: 0.5-5 kW



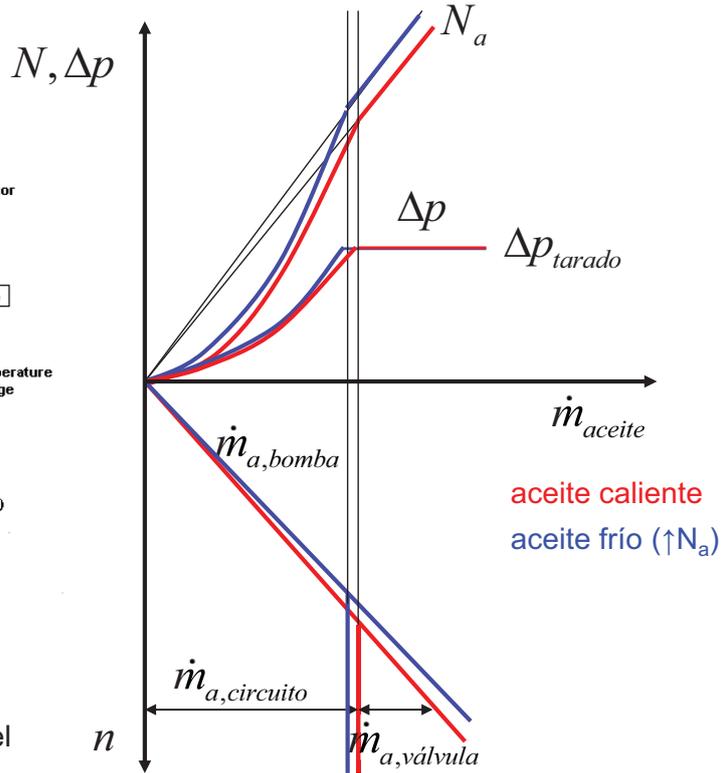
BALANCE ENERGÉTICO	PÉRDIDAS MECÁNICAS	<b>LUBRICACIÓN</b>	REFRIGERACIÓN	R	ANEXO: MEDIDA PÉRDIDAS
--------------------	--------------------	--------------------	---------------	---	------------------------

# LUBRICACIÓN

Funcionamiento



La válvula de alivio permite limitar el consumo de potencia



BALANCE ENERGÉTICO	PÉRDIDAS MECÁNICAS	LUBRICACIÓN	REFRIGERACIÓN	R	ANEXO: MEDIDA PÉRDIDAS
--------------------	--------------------	-------------	---------------	---	------------------------

# ACEITES

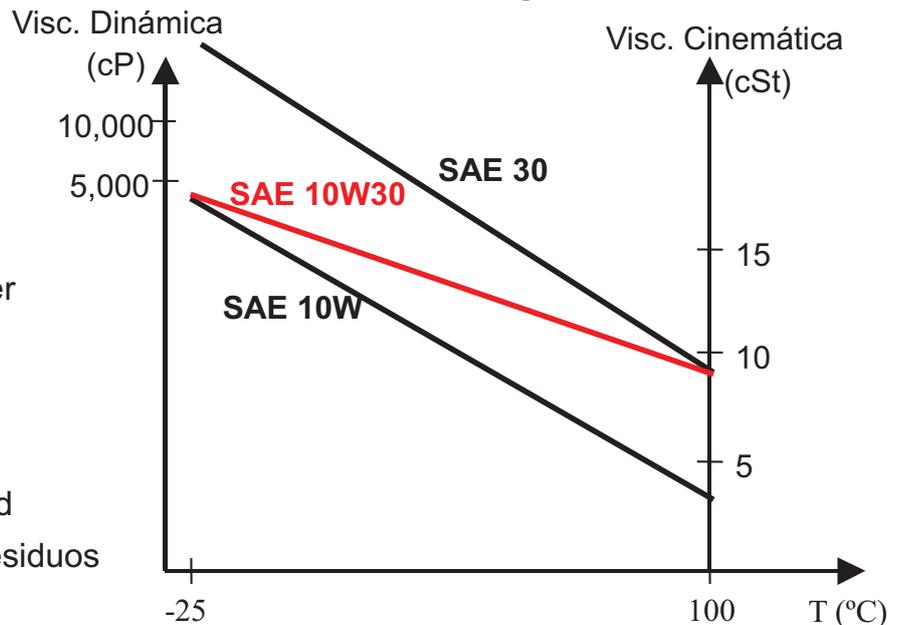
Viscosidad → grado SAE

Funciones:

- Lubricar
- Refrigerar
- Limpiar
- Sellar y proteger

Propiedades:

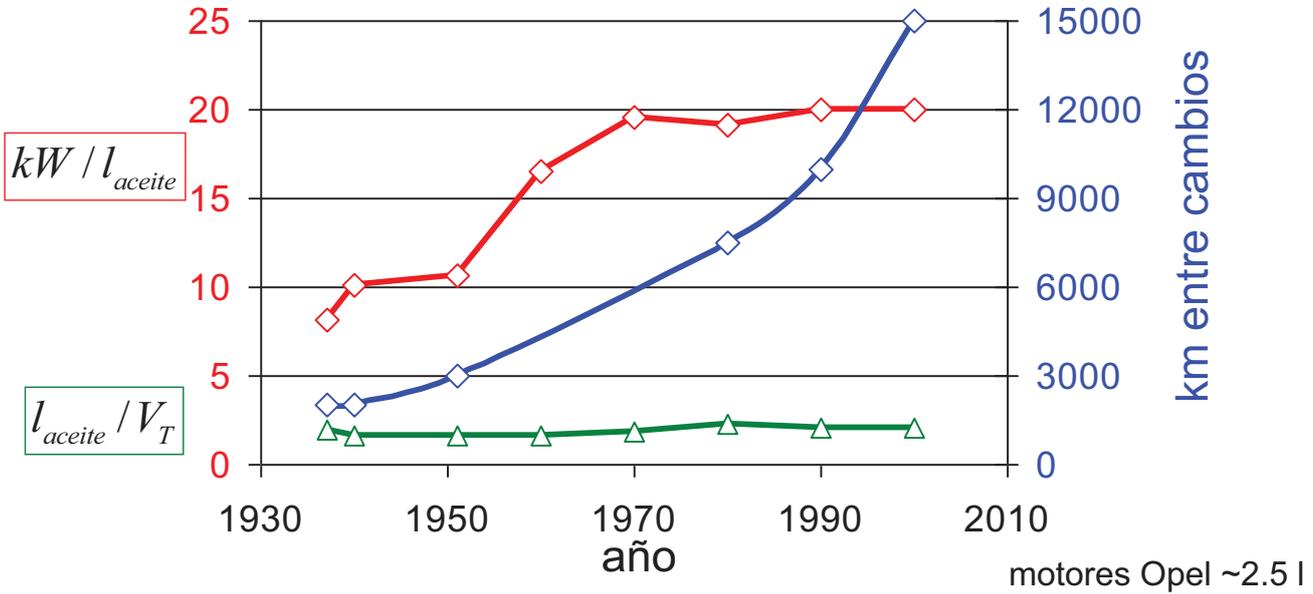
- Tenacidad
- Fluidez
- Poca volatilidad
- Ausencia de residuos
- Estabilidad
- Dispersividad, detergencia
- Alcalinidad y carácter antioxidante



BALANCE ENERGÉTICO	PÉRDIDAS MECÁNICAS	LUBRICACIÓN	REFRIGERACIÓN	R	ANEXO: MEDIDA PÉRDIDAS
--------------------	--------------------	-------------	---------------	---	------------------------

# ACEITES

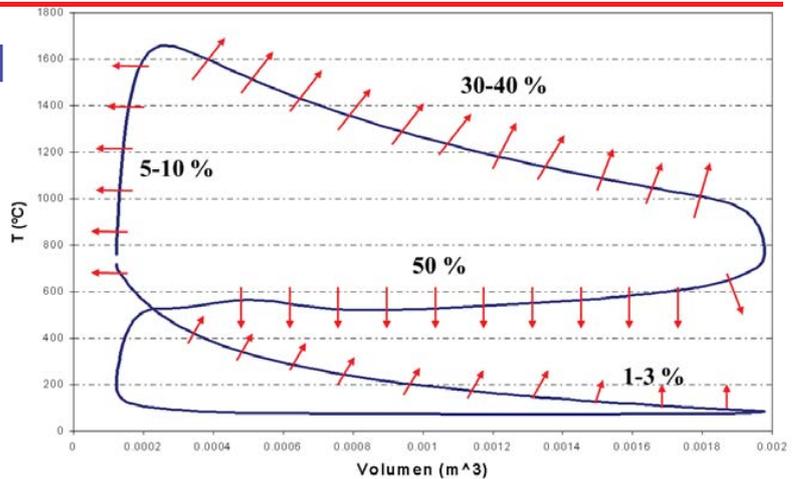
❑ Cambio de aceite. Evolución histórica



BALANCE ENERGÉTICO	PÉRDIDAS MECÁNICAS	<b>LUBRICACIÓN</b>	REFRIGERACIÓN	R	ANEXO: MEDIDA PÉRDIDAS
--------------------	--------------------	--------------------	---------------	---	------------------------

# REFRIGERACIÓN

❑ Cesión de calor al refrigerante



Distribución temporal

$N_e$	Compresión	Combustión	Expansión	Escape	$\dot{H}_g$
	1 - 3%	5 - 10%	30 - 40%		
	50%			50%	
30%	30%				40%

Distribución espacial

Culata	Pistón	Camisa	Pipas de escape
25 - 40%	30 - 40%	20 - 30%	8 - 15%

BALANCE ENERGÉTICO	PÉRDIDAS MECÁNICAS	LUBRICACIÓN	<b>REFRIGERACIÓN</b>	R	ANEXO: MEDIDA PÉRDIDAS
--------------------	--------------------	-------------	----------------------	---	------------------------

## REFRIGERACIÓN

❑ La cesión de calor al refrigerante es una pérdida, pero la ventaja de construir un motor adiabático es limitada:

$N_e$	Compresión	Combustión	Expansión	Escape	$\dot{H}_g$
	1 - 3%	5 - 10%	30 - 40%		
	50%			50%	
30%	30%				40%

$\underbrace{\hspace{10em}}_{\approx 7.5\%}$ 
 $\underbrace{\hspace{10em}}_{\approx 7.5\%}$ 
 $\underbrace{\hspace{10em}}_{15\%}$

Motor adiabático  $\Rightarrow N_e \approx 38\%$        $\dot{Q}_r = 0\%$        $\dot{H}_g \approx 62\%$

BALANCE ENERGÉTICO	PÉRDIDAS MECÁNICAS	LUBRICACIÓN	REFRIGERACIÓN	R	ANEXO: MEDIDA PÉRDIDAS
--------------------	--------------------	-------------	---------------	---	------------------------

## SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

❑ Objetivo: prevenir sobrecalentamiento en diferentes puntos de funcionamiento y condiciones de trabajo

❑ Requisitos:

- Consumo de potencia mínimo
- Alta compacidad
- Ligereza
- Elevada fiabilidad
- Bajo coste

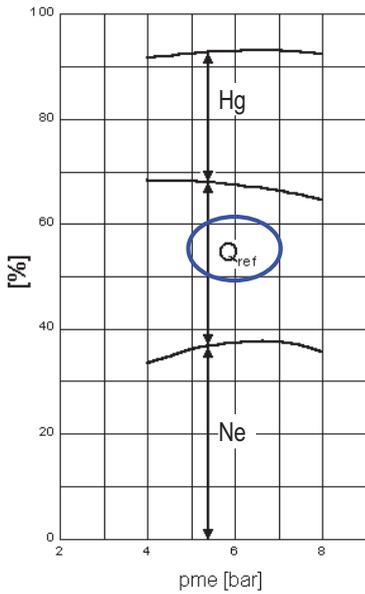
❑ Dos tipos fundamentales de refrigeración:

- Por líquido
- Por aire

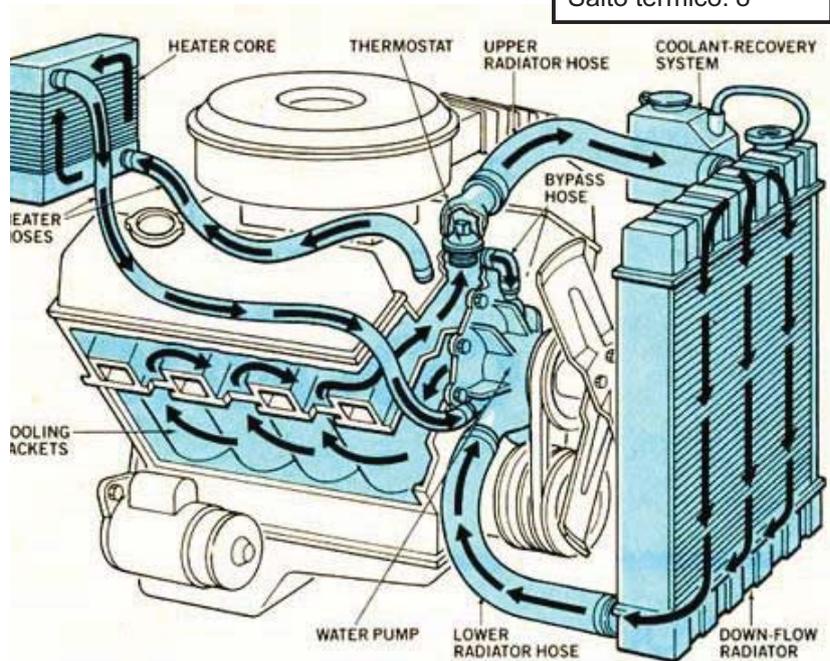
BALANCE ENERGÉTICO	PÉRDIDAS MECÁNICAS	LUBRICACIÓN	REFRIGERACIÓN	R	ANEXO: MEDIDA PÉRDIDAS
--------------------	--------------------	-------------	---------------	---	------------------------

# REFRIGERACIÓN POR LÍQUIDO

Fluido: agua+glicol  
Caudal: 2 l/kW min  
Salto térmico: 8°



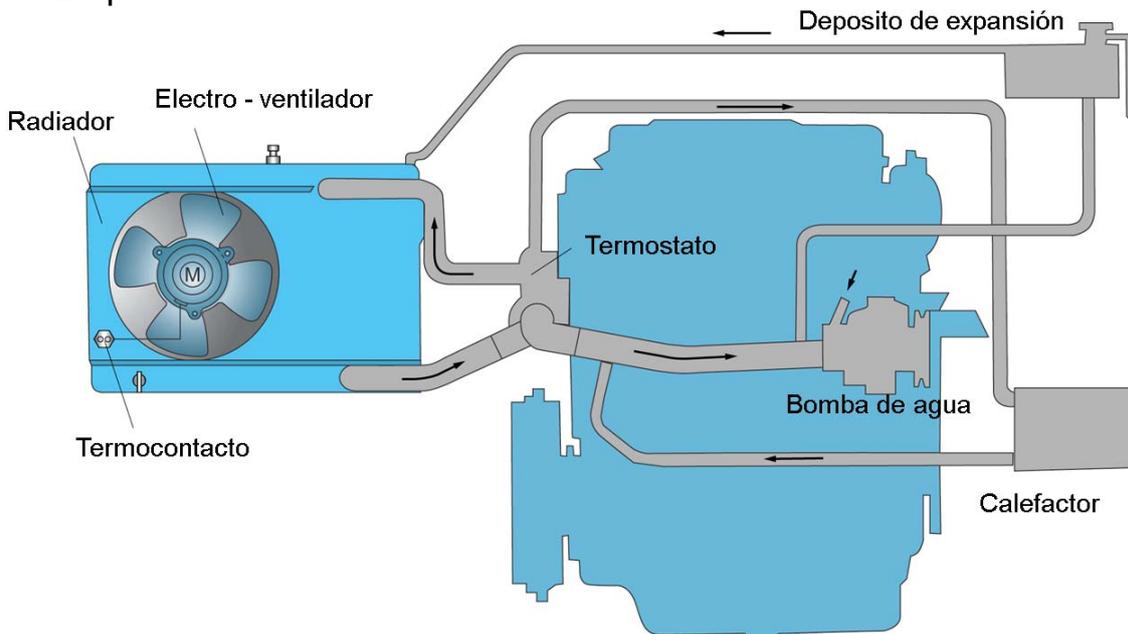
Balance térmico de un motor refrigerado por agua.  
diámetro del pistón: 110 mm



BALANCE ENERGÉTICO	PÉRDIDAS MECÁNICAS	LUBRICACIÓN	REFRIGERACIÓN	R	ANEXO: MEDIDA PÉRDIDAS
--------------------	--------------------	-------------	---------------	---	------------------------

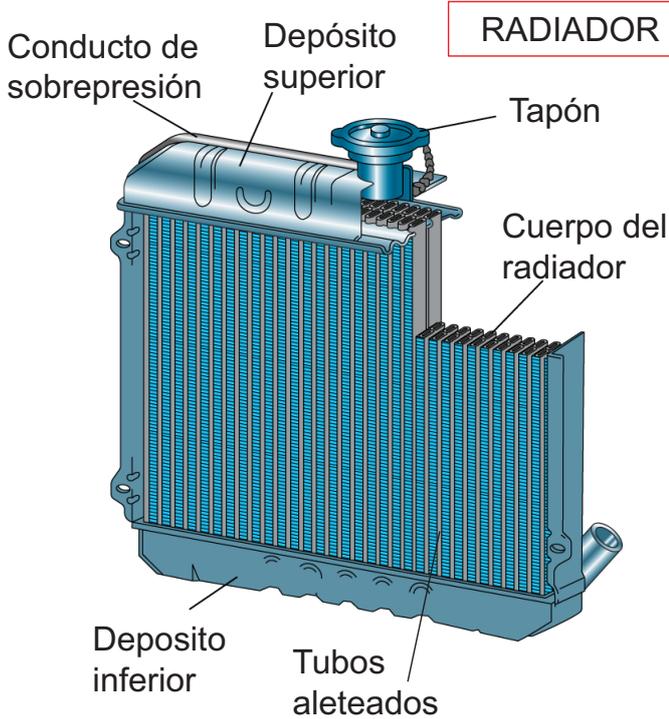
# REFRIGERACIÓN POR LÍQUIDO

## Esquema

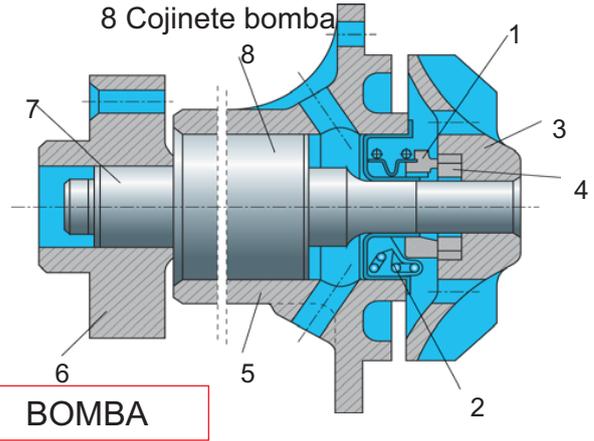


BALANCE ENERGÉTICO	PÉRDIDAS MECÁNICAS	LUBRICACIÓN	REFRIGERACIÓN	R	ANEXO: MEDIDA PÉRDIDAS
--------------------	--------------------	-------------	---------------	---	------------------------

# REFRIGERACIÓN POR LÍQUIDO

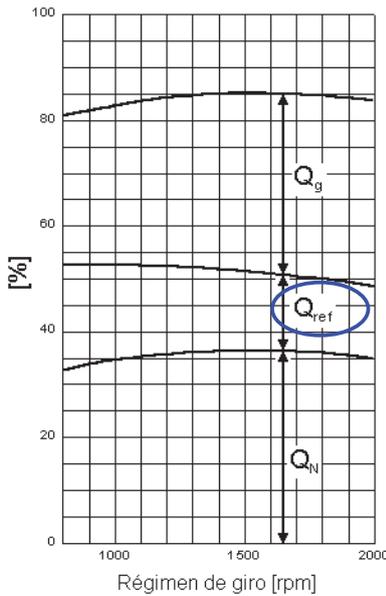


- 1 y 2 Anillos deslizantes de estanqueidad
- 3 Turbina
- 4 Anillo
- 5 Cuerpo de la bomba
- 6 Cubo polea bomba
- 7 Árbol de mando de la bomba
- 8 Cojinete bomba

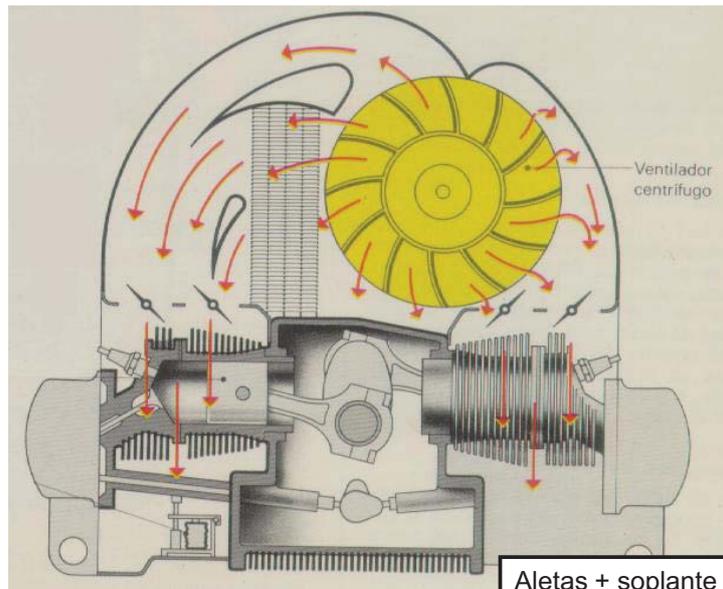


BALANCE ENERGÉTICO	PÉRDIDAS MECÁNICAS	LUBRICACIÓN	REFRIGERACIÓN	R	ANEXO: MEDIDA PÉRDIDAS
--------------------	--------------------	-------------	---------------	---	------------------------

# REFRIGERACIÓN POR AIRE



Balance térmico de un motor refrigerado por aire.  
diámetro del pistón: 110 mm



Aletas + soplante  
Caudal: 2000 l/kW min  
Salto térmico: 40°

BALANCE ENERGÉTICO	PÉRDIDAS MECÁNICAS	LUBRICACIÓN	REFRIGERACIÓN	R	ANEXO: MEDIDA PÉRDIDAS
--------------------	--------------------	-------------	---------------	---	------------------------

## COMPARACIÓN AIRE-LÍQUIDO

### ❑ Ventajas de la refrigeración por aire

- Menos averías y más autonomía → vehículos militares
- Menor inercia térmica → calentamiento / enfriamiento más rápidos
- Menor sensibilidad a las variaciones de la temperatura exterior por el mayor gradiente de temperaturas entre motor y ambiente

### ❑ Inconvenientes de la refrigeración por aire

- Temperaturas de funcionamiento más elevadas:
  - Mayor tolerancia de las piezas en frío → ruido
  - Mayor producción de NOx
  - Problemas por autoencendido (MEP)
- Necesidad de aletas → geometría del motor condicionada:
  - Tamaño pistón limitado:  $D < 150$  mm
  - Vibración de las aletas → ruidos mecánicos
  - Elevada potencia de accionamiento
  - Ruido aerodinámico de la soplante

BALANCE ENERGÉTICO	PÉRDIDAS MECÁNICAS	LUBRICACIÓN	REFRIGERACIÓN	R	ANEXO: MEDIDA PÉRDIDAS
--------------------	--------------------	-------------	---------------	---	------------------------

## RESUMEN (I)

- ❑ El balance energético de un motor indica que la energía del combustible se reparte aproximadamente a partes iguales entre potencia mecánica, calor cedido al refrigerante y calor cedido a los gases de escape
- ❑ Las pérdidas mecánicas suponen un porcentaje importante de la potencia total
- ❑ El rendimiento mecánico depende de las condiciones de funcionamiento
- ❑ Las pérdidas mecánicas incluyen la fricción, el bombeo y el accionamiento de auxiliares
- ❑ El sistema de lubricación es vital para el funcionamiento de los MCIA

BALANCE ENERGÉTICO	PÉRDIDAS MECÁNICAS	LUBRICACIÓN	REFRIGERACIÓN	R	ANEXO: MEDIDA PÉRDIDAS
--------------------	--------------------	-------------	---------------	---	------------------------

## RESUMEN (II)

- ❑ Una parte importante de la cesión de calor al refrigerante se produce durante el escape, lo que no afecta al rendimiento del motor
- ❑ La refrigeración es necesaria por razones tecnológicas no por razones termodinámicas
- ❑ Los elementos térmicamente mas cargados del motor son la culata y el pistón
- ❑ Actualmente la mayor parte de los motores están refrigerados por agua

BALANCE ENERGÉTICO	PÉRDIDAS MECÁNICAS	LUBRICACIÓN	REFRIGERACIÓN	R	ANEXO: MEDIDA PÉRDIDAS
--------------------	--------------------	-------------	---------------	---	------------------------

## BIBLIOGRAFÍA

- ❑ F. Payri y J.M. Desantes  
"Motores de Combustión Interna Alternativos" (Cap. 5, 6 y 7)
- ❑ R. van Basshuysen y F. Schäfer  
"Internal Combustion Engine Handbook: Basics, Components, Systems and Perspectives" (Cap. 7, 8 y 9)
- ❑ J.B. Heywood  
"Internal Combustion engines Fundamentals" (Cap. 12 y 13)

BALANCE ENERGÉTICO	PÉRDIDAS MECÁNICAS	LUBRICACIÓN	REFRIGERACIÓN	R	ANEXO: MEDIDA PÉRDIDAS
--------------------	--------------------	-------------	---------------	---	------------------------

## ANEXO: MEDIDA DE PÉRDIDAS MECÁNICAS

❑ Existen varios procedimientos para la determinación de pérdidas mecánicas:

<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Diagrama de indicador</li> <li>➤ Arrastre</li> <li>➤ Recta de Willans</li> <li>➤ Método Morse</li> <li>➤ Deceleración libre</li> </ul>	<b>MEDIDA</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Ecuaciones semiempíricas</li> </ul>	<b>ESTIMACIÓN</b>

BALANCE ENERGÉTICO	PÉRDIDAS MECÁNICAS	LUBRICACIÓN	REFRIGERACIÓN	R	<b>ANEXO: MEDIDA PÉRDIDAS</b>
--------------------	--------------------	-------------	---------------	---	-------------------------------

## ANEXO: MEDIDA DE PÉRDIDAS MECÁNICAS

❑ Diagrama de indicador. Precisa una medida de **presión en cámara**

- De la integración del diagrama →  $W_i$
- De la integración del lazo de bombeo →  $W_b$
- A partir de una medida de potencia/par →  $W_e$
- Auxiliares: se determinan por separado →  $W_a+W_c$
- El término de fricción se obtiene por diferencia

❑ Es un método complejo (errores de medida, de fase entre las señales, etc.) y que requiere instrumentación cara e intrusiva

BALANCE ENERGÉTICO	PÉRDIDAS MECÁNICAS	LUBRICACIÓN	REFRIGERACIÓN	R	<b>ANEXO: MEDIDA PÉRDIDAS</b>
--------------------	--------------------	-------------	---------------	---	-------------------------------

## ANEXO: MEDIDA DE PÉRDIDAS MECÁNICAS

### □ Arrastre

- Mediante un motor eléctrico (usualmente un dinamo-freno actuando como motor), se arrastra el motor sin combustión
- La potencia absorbida corresponde a las pérdidas mecánicas
- Debe considerarse que al no haber combustión:
  - Disminuyen las cargas asociadas a la pmi
  - Varían presiones en el caso de motores sobrealimentados
  - Disminución de temperatura de funcionamiento (juegos y viscosidad del aceite)
- Debe hacerse rápidamente tras cesar la combustión
- Permite medida de pérdidas de diferentes elementos

BALANCE ENERGÉTICO	PÉRDIDAS MECÁNICAS	LUBRICACIÓN	REFRIGERACIÓN	R	<b>ANEXO: MEDIDA PÉRDIDAS</b>
--------------------	--------------------	-------------	---------------	---	-------------------------------

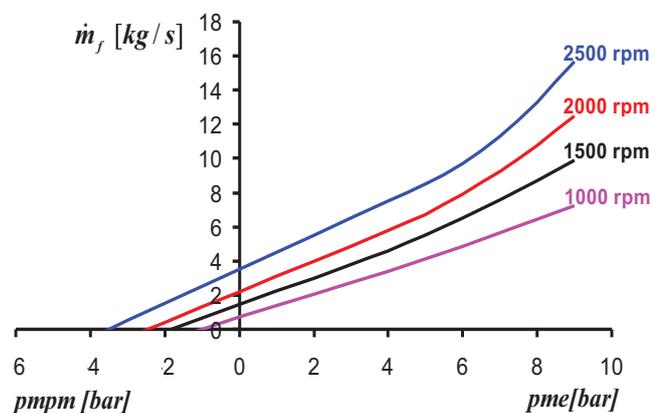
## ANEXO: MEDIDA DE PÉRDIDAS MECÁNICAS

### □ Recta de Willans

- Linealidad entre gasto de combustible y PME
- No apto para MEP
- Hipótesis a n cte:
  - $\eta_i = \text{cte.}$
  - $pmpm \text{ cte.}$

$$\dot{m}_f = K(pme + pmpm) = Kpmi$$

$$\frac{\dot{m}_f}{N_i} = g_{if} = \frac{Kpmi}{N_i} = \frac{K}{n/2 \cdot V_T} = K'$$



BALANCE ENERGÉTICO	PÉRDIDAS MECÁNICAS	LUBRICACIÓN	REFRIGERACIÓN	R	<b>ANEXO: MEDIDA PÉRDIDAS</b>
--------------------	--------------------	-------------	---------------	---	-------------------------------

## ANEXO: MEDIDA DE PÉRDIDAS MECÁNICAS

### ❑ Método Morse

- Desactivación sucesiva de cada cilindro

$$\begin{Bmatrix} N_e^{(1)} \\ N_e^{(2)} \\ N_e^{(3)} \\ N_e^{(4)} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} N_{e1} \\ N_{e2} \\ N_{e3} \\ N_{e4} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} N_{pm1} \\ N_{pm2} \\ N_{pm3} \\ N_{pm4} \end{Bmatrix}$$

$$\sum_{k=1}^4 N_e^{(k)} = 3 \sum_{k=1}^4 N_{ek} - \sum_{k=1}^4 N_{pmk} = 3N_e - N_{pm} \rightarrow N_{pm} = (z-1)N_e - \sum_{k=1}^z N_e^{(k)}$$

- Modificación de las presiones y temperaturas al desactivar el cilindro

BALANCE ENERGÉTICO	PÉRDIDAS MECÁNICAS	LUBRICACIÓN	REFRIGERACIÓN	R	<b>ANEXO: MEDIDA PÉRDIDAS</b>
--------------------	--------------------	-------------	---------------	---	-------------------------------

## ANEXO: MEDIDA DE PÉRDIDAS MECÁNICAS

### ❑ Deceleración libre

- Sin combustión, se cumple:

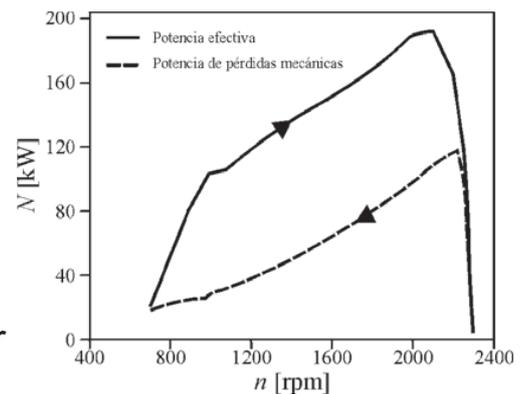
$$M_{pm} = I \cdot \alpha$$

- Conocido I se mide  $\alpha$
- Si no es conocido I, se puede colocar un volante de inercia, con  $I_c$  conocido:

$$M_{pm} = I \cdot \alpha \quad \longrightarrow \quad M_{pm} = \frac{I_c \cdot \alpha'}{1 - \frac{\alpha'}{\alpha}}$$

$$M_{pm} = (I + I_c) \cdot \alpha'$$

- Como en el caso del arrastre, la variación de temperatura debe ser tenida en cuenta. Además,  $n$  varía ( $n(t) \rightarrow M_{pm}(t)$ )



BALANCE ENERGÉTICO	PÉRDIDAS MECÁNICAS	LUBRICACIÓN	REFRIGERACIÓN	R	<b>ANEXO: MEDIDA PÉRDIDAS</b>
--------------------	--------------------	-------------	---------------	---	-------------------------------

## ANEXO: DETERMINACIÓN DE PÉRDIDAS MECÁNICAS

### □ Ecuaciones semiempíricas:

#### ➤ Bishop (ejemplos)

- Pérdidas del sistema de distribución

$$pmpm = 0.701 \cdot 10^{-3} \cdot \left( 30 - \frac{4 \cdot n}{1000} \right) \frac{D_v^{1.75}}{D^2 \cdot S}$$

- Pérdidas en cojinetes de bancada y en cabeza de biela

$$pmpm = 5.5 \cdot 10^{-2} \frac{D}{S} \frac{n}{1000}$$

- Pérdidas en conjunto pistón-segmentadura

$$pmpm = 3.69 \cdot 10^{-3} \frac{S \cdot a}{D^2} K + 7.56 \cdot 10^{-3} \frac{b \cdot c_m}{D \cdot S}$$

BALANCE ENERGÉTICO	PÉRDIDAS MECÁNICAS	LUBRICACIÓN	REFRIGE- RACIÓN	R	<b>ANEXO: MEDIDA PÉRDIDAS</b>
-----------------------	-----------------------	-------------	--------------------	---	-----------------------------------

## CONTENIDO

- Introducción
- Renovación de la carga en 4T
  - Válvulas
  - Diagrama de distribución
  - Sintonizado de colectores
- Renovación de la carga en 2T
- Resumen

INTRODUCCIÓN	VÁLVULAS	DIAGRAMA DISTRIBUCIÓN	SINTONIZADO COLECTORES	MOTORES 2T	R
--------------	----------	--------------------------	---------------------------	------------	---

## INTRODUCCIÓN

- Desde el punto de vista energético, la **combustión** es el fenómeno responsable de la entrega de potencia. La combustión precisa la formación de una mezcla aire-combustible
- Como la inyección de combustible es ‘forzada’, la entrada de aire en el motor es el fenómeno limitante
- Como los MCIA son de ciclo abierto, la entrada de mezcla fresca lleva aparejada la salida de gases de escape → **Renovación de la carga (PRC)**

**Definición:** *proceso mediante el cual los gases producto de la combustión son desalojados del cilindro y substituidos por mezcla (aire) fresca*

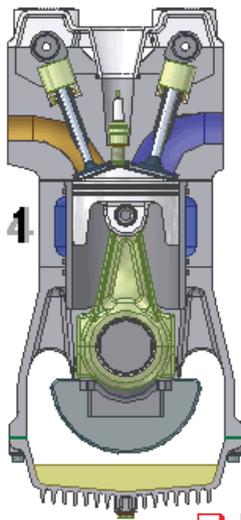
4T: realizado durante las carreras de escape y admisión

2T: realizado en las cercanías del PMI

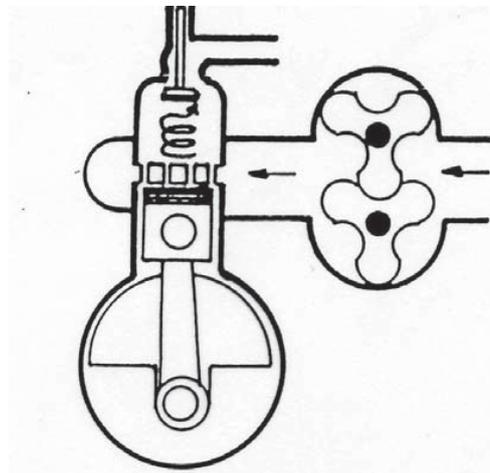
INTRODUCCIÓN	VÁLVULAS	DIAGRAMA DISTRIBUCIÓN	SINTONIZADO COLECTORES	MOTORES 2T	R
--------------	----------	--------------------------	---------------------------	------------	---

## INTRODUCCIÓN

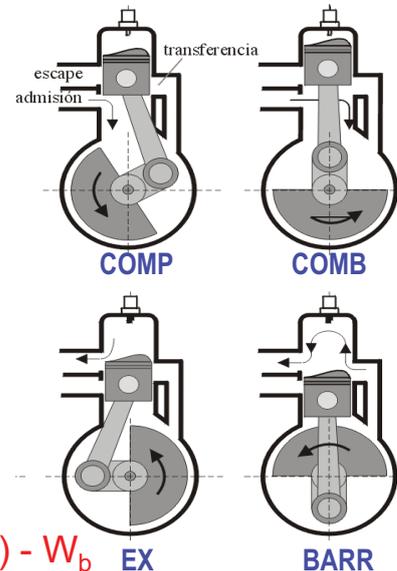
4T



2T  
bar. independiente



2T  
barrido por cárter



□ Evaluación PRC:  $\eta_v$  y  $W_b$ .  $W_n = W_i(\eta_v) - W_b$  EX BARR

INTRODUCCIÓN

VÁLVULAS

DIAGRAMA  
DISTRIBUCIÓN

SINTONIZADO  
COLECTORES

MOTORES 2T

R

## PROCESO DE ADMISIÓN IDEAL EN 4T

□ Hipótesis:

- No existe fricción entre el fluido y las paredes, y la evolución es en todo momento reversible
- El proceso es adiabático
- El fluido no tiene inercia y no hay fenómenos dinámicos
- Todo el combustible está gasificado
- Las válvulas abren y cierran instantáneamente en los PM → no existe cortocircuito de mezcla fresca
- Los gases de escape están a la misma presión y temperatura que la mezcla de admisión

$$\dot{m}_m = \frac{n}{2} \cdot V_T \cdot \rho_{m,a} \leftrightarrow \eta_v = 1$$

INTRODUCCIÓN

VÁLVULAS

DIAGRAMA  
DISTRIBUCIÓN

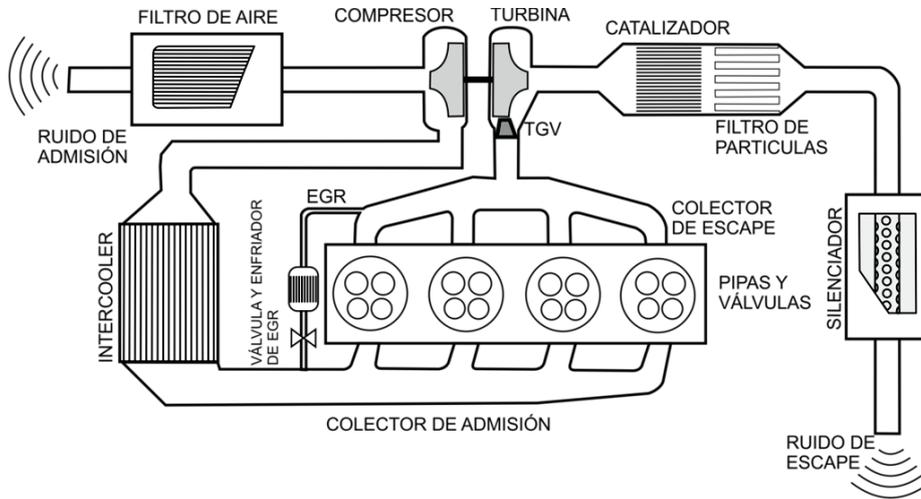
SINTONIZADO  
COLECTORES

MOTORES 2T

R

## PROCESO DE ADMISIÓN REAL

❑ Ninguna de las hipótesis anteriores se cumple de forma perfecta:

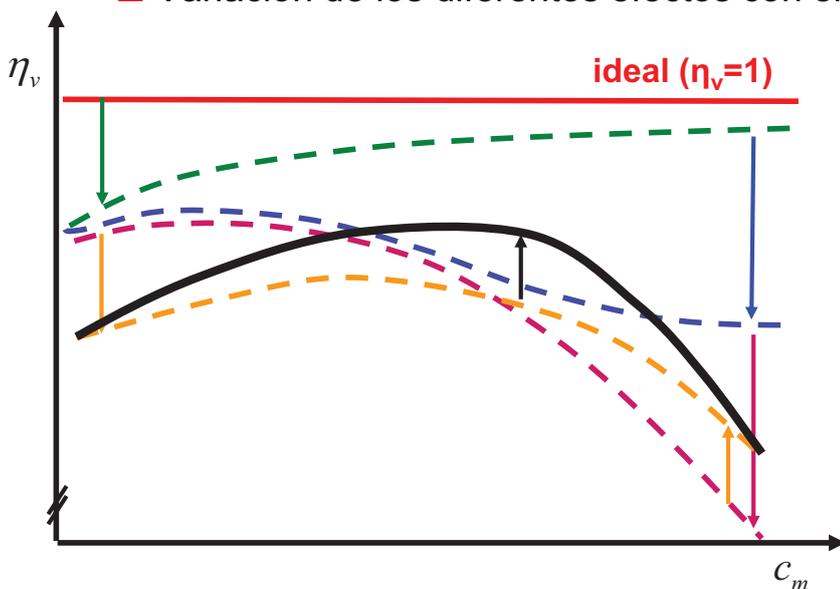


$\eta_v$  referido a condiciones ambientales (motores de aspiración natural) o a condiciones en el colector de admisión (sobrealimentados)

INTRODUCCIÓN	VÁLVULAS	DIAGRAMA DISTRIBUCIÓN	SINTONIZADO COLECTORES	MOTORES 2T	R
--------------	----------	-----------------------	------------------------	------------	---

## PROCESO DE ADMISIÓN REAL

❑ Variación de los diferentes efectos con el régimen de giro



**1.- calentamiento**

aumenta con  $t \rightarrow c_m^{-1}$

**2.- fricción fluida ( $\Delta p$ )**

válvulas, filtro, silenciador, uniones...

aumenta con  $m_a \rightarrow c_m \quad K = \frac{\Delta p_0}{\rho u^2 / 2}$

**3.- compresibilidad**

tapón sónico en válvulas a muy alto  $m_a \rightarrow$  alto  $c_m$

**4.- inercia (y reflujos)**

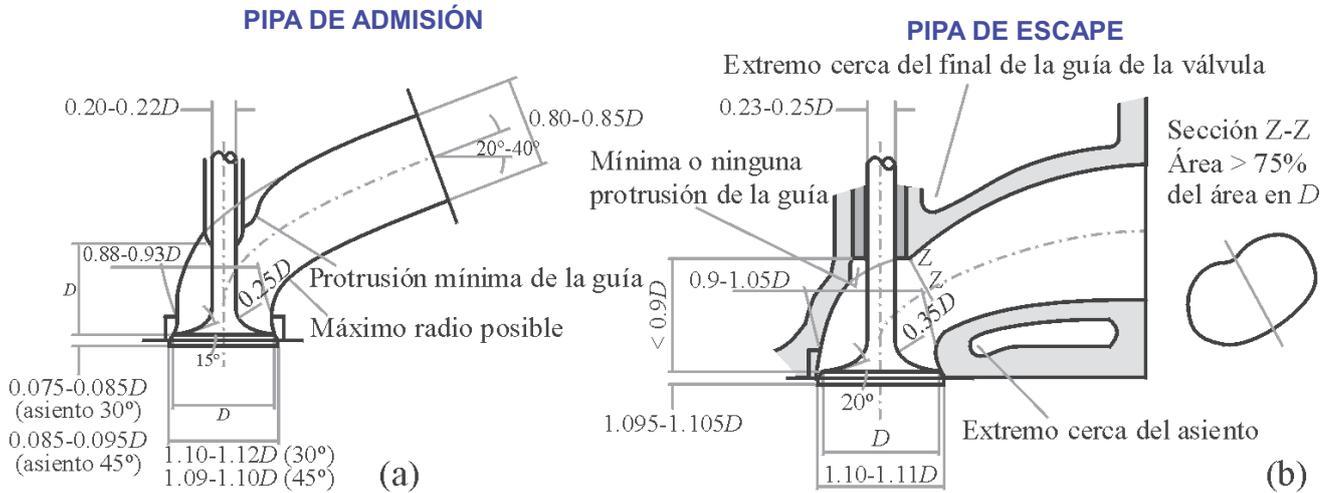
**5.- sintonizado colectores**

efectos asociados al flujo no estacionario

INTRODUCCIÓN	VÁLVULAS	DIAGRAMA DISTRIBUCIÓN	SINTONIZADO COLECTORES	MOTORES 2T	R
--------------	----------	-----------------------	------------------------	------------	---

# VÁLVULAS – EFECTOS DE COMPRESIBILIDAD

❑ Sección de paso en válvulas → sección más estrecha



❑ Válvula de admisión más crítica para  $\eta_v$

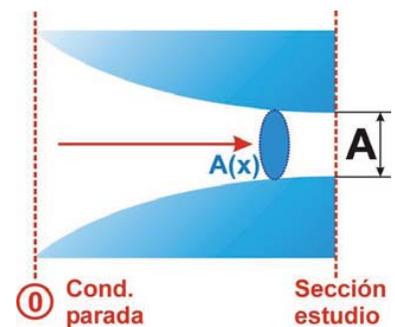
❑ Escape: afecta a la presión de los residuales y a  $W_b$

INTRODUCCIÓN	<b>VÁLVULAS</b>	DIAGRAMA DISTRIBUCIÓN	SINTONIZADO COLECTORES	MOTORES 2T	R
--------------	-----------------	-----------------------	------------------------	------------	---

# EFECTOS DE COMPRESIBILIDAD

❑ Flujo a través de un conducto convergente

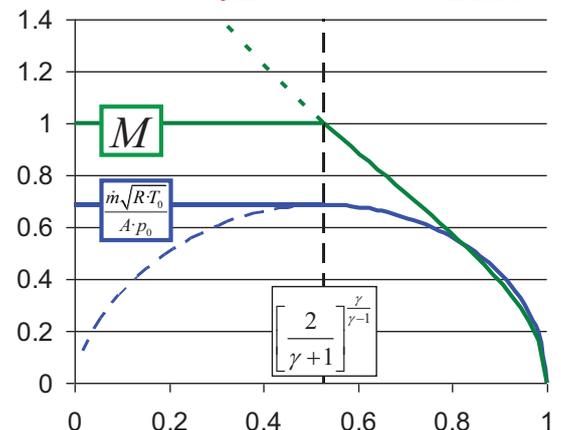
- Ecuación de continuidad  $\dot{m} = A \cdot c \cdot \rho = cte$
- Conservación de la energía  $h_0 = c_p \cdot T + c^2/2 = cte$
- Ley de estado  $p/\rho = R \cdot T$
- Evolución isentrópica  $p \cdot \rho^{-\gamma} = cte$



$$\dot{m} = A c \rho = A \frac{p_0}{\sqrt{RT_0}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[ \left(\frac{p}{p_0}\right)^{2/\gamma} - \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\gamma+1/\gamma} \right]}$$

$$p/p_0 \leq \left[ \frac{2}{\gamma+1} \right]^{\gamma/(\gamma-1)}$$

$$\left[ \frac{\dot{m} \sqrt{RT_0}}{A p_0} \right]_{\max} = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma+1} \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{1/\gamma-1}}$$

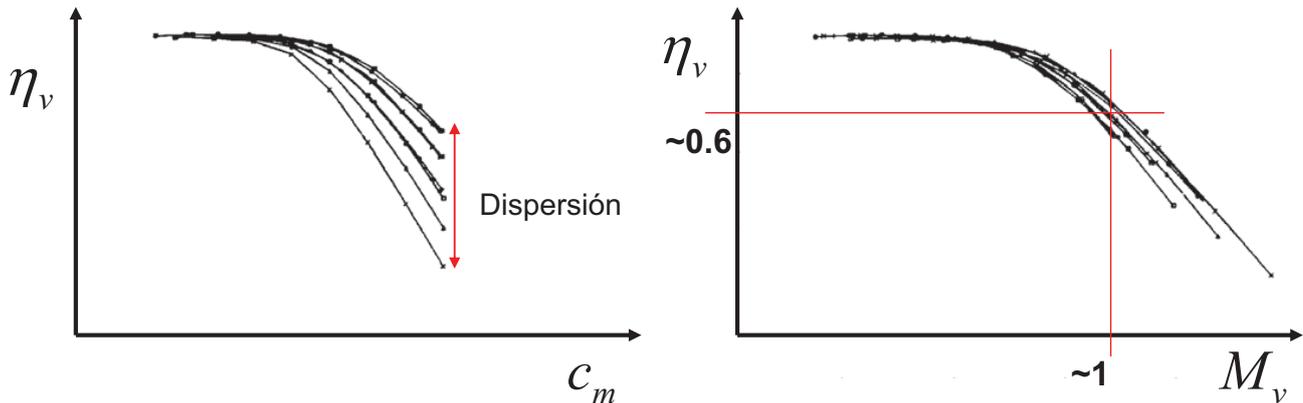


INTRODUCCIÓN	<b>VÁLVULAS</b>	DIAGRAMA DISTRIBUCIÓN	SINTONIZADO COLECTORES	MOTORES 2T	R
--------------	-----------------	-----------------------	------------------------	------------	---

# VÁLVULAS - EFECTOS DE COMPRESIBILIDAD

□ Efecto de las condiciones del flujo en las válvulas sobre  $\eta_v$

$$\bar{M}_v = \frac{1}{a} \int_{\text{ciclo}} u_v = \frac{\bar{u}_v}{a} = \left( \frac{A_p}{A_v C_D} \right) \frac{c_m}{a} = \left( \frac{D}{D_v} \right)^2 \frac{c_m}{a C_D}$$

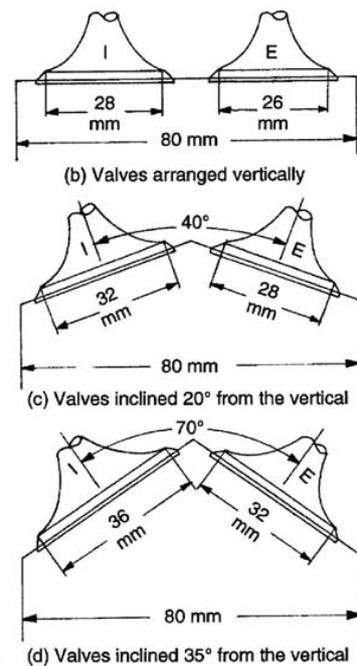
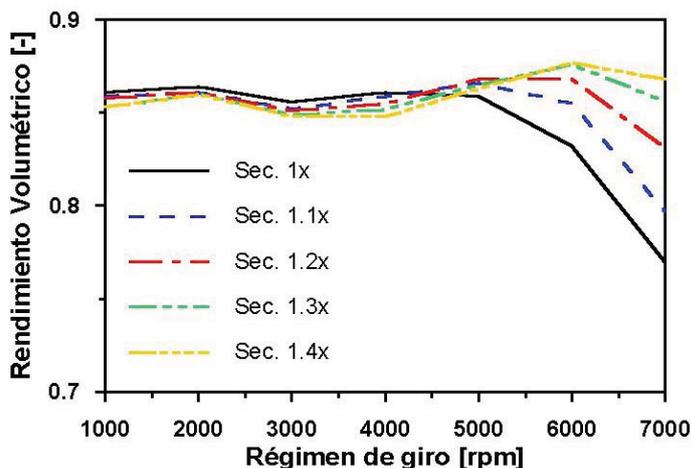


INTRODUCCIÓN	<b>VÁLVULAS</b>	DIAGRAMA DISTRIBUCIÓN	SINTONIZADO COLECTORES	MOTORES 2T	R
--------------	-----------------	-----------------------	------------------------	------------	---

# VÁLVULAS - DISEÑO

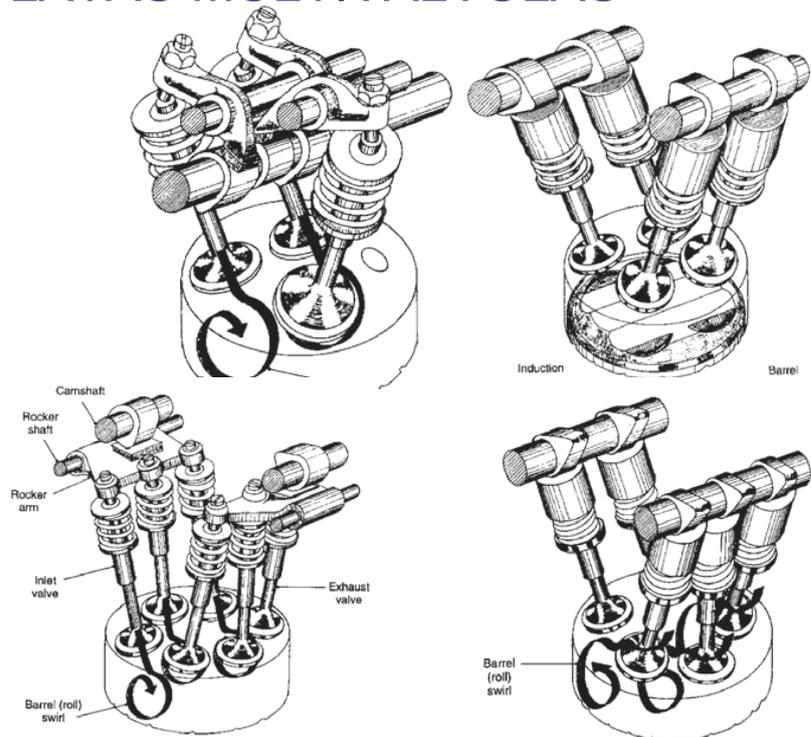
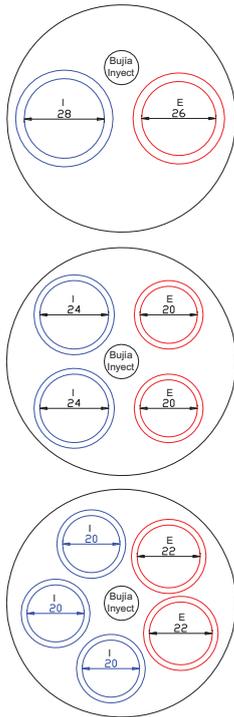
□ Diseño: maximizar sección válvulas

- Aumentar el tamaño
- Mejorar el diseño de las pipas



INTRODUCCIÓN	<b>VÁLVULAS</b>	DIAGRAMA DISTRIBUCIÓN	SINTONIZADO COLECTORES	MOTORES 2T	R
--------------	-----------------	-----------------------	------------------------	------------	---

## VÁLVULAS - CULATAS MULTIVÁLVULAS



INTRODUCCIÓN

**VÁLVULAS**DIAGRAMA  
DISTRIBUCIÓNSINTONIZADO  
COLECTORES

MOTORES 2T

R

## VÁLVULAS Y RELACIÓN S/D

### ❑ Relación carrera-diámetro

- ↓ S/D → permite aumentar  $D_v$ , pero
  - aumenta el cortocircuito
  - empeora el llenado a bajo régimen
- Motores deportivos: bajos valores de S/D
  - Mayor régimen ( $c_m = 2 \cdot S \cdot n$ )
  - Mayor sección de válvulas

INTRODUCCIÓN

**VÁLVULAS**DIAGRAMA  
DISTRIBUCIÓNSINTONIZADO  
COLECTORES

MOTORES 2T

R

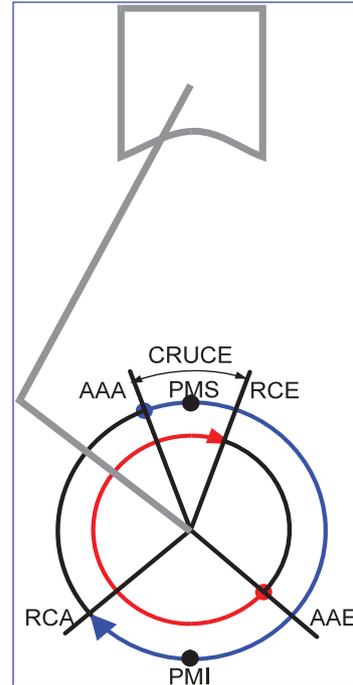
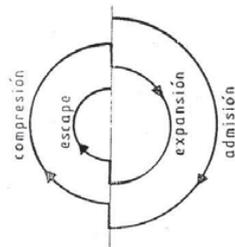
## DIAGRAMA DE DISTRIBUCIÓN - INERCIA

Debido a la existencia de inercia, el flujo a través de las válvulas no es nulo en los PM

$$\Phi = \frac{E_{c, fluido}}{V_D} = \frac{\frac{1}{2} \rho V_{pipa} c_{pipa}^2}{V_D} = \frac{1}{2} \rho \frac{L_{pipa}}{S} \left( \frac{D}{D_{pipa}} \right)^2 c_m^2$$

Los fenómenos de inercia aumentan con el régimen de giro del motor ( $c_m^2$ )

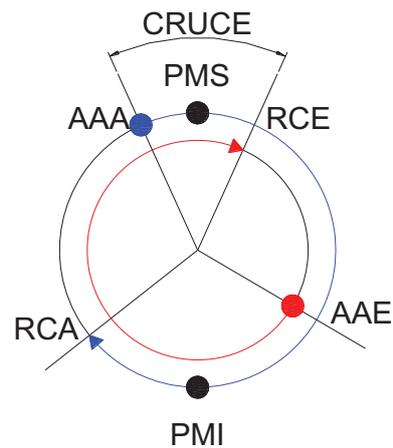
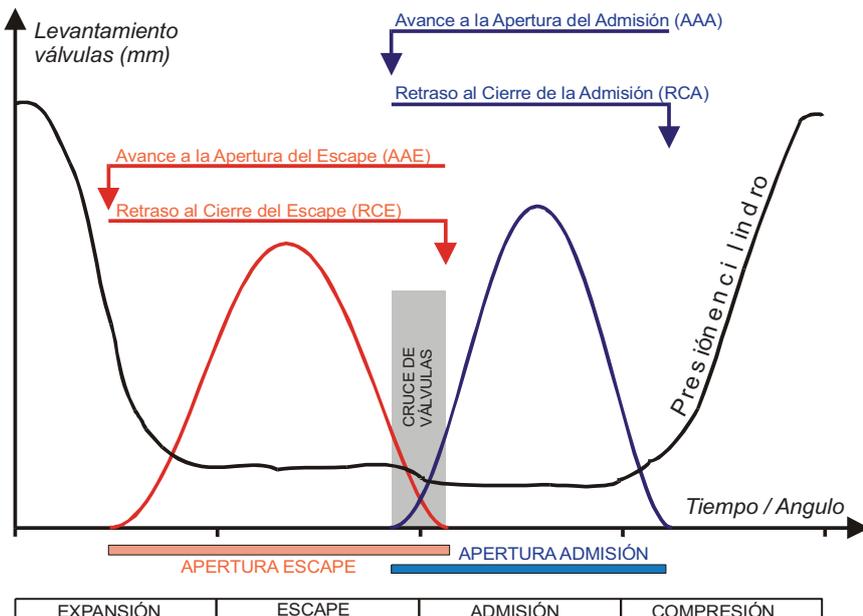
El diagrama de distribución se modifica para aprovechar estos efectos



INTRODUCCIÓN	VÁLVULAS	<b>DIAGRAMA DISTRIBUCIÓN</b>	SINTONIZADO COLECTORES	MOTORES 2T	R
--------------	----------	------------------------------	------------------------	------------	---

## DIAGRAMA DE DISTRIBUCIÓN

Diagrama de distribución real

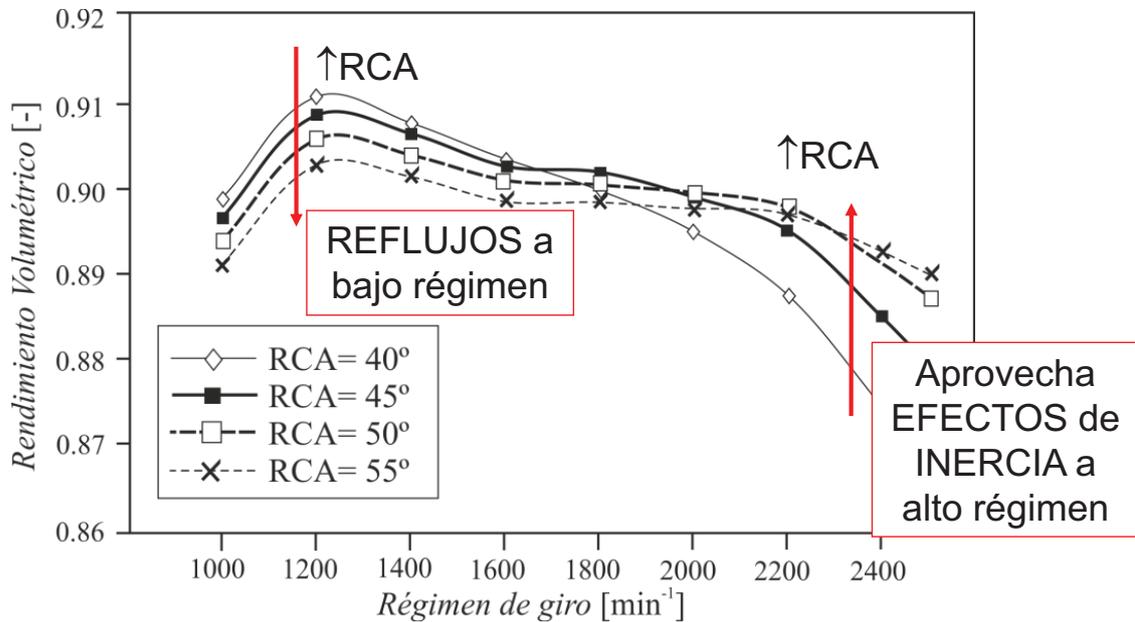


RCA y AAE son los más críticos

INTRODUCCIÓN	VÁLVULAS	<b>DIAGRAMA DISTRIBUCIÓN</b>	SINTONIZADO COLECTORES	MOTORES 2T	R
--------------	----------	------------------------------	------------------------	------------	---

## DIAGRAMA DE DISTRIBUCIÓN

### Retraso del cierre de la admisión



INTRODUCCIÓN

VÁLVULAS

**DIAGRAMA  
DISTRIBUCIÓN**
SINTONIZADO  
COLECTORES

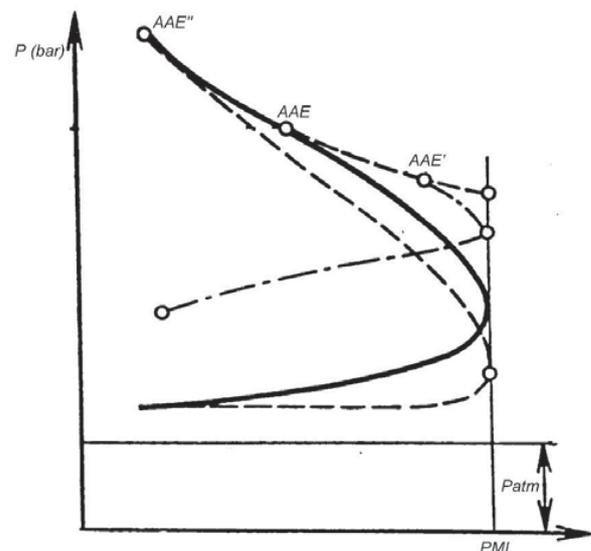
MOTORES 2T

R

## DIAGRAMA DE DISTRIBUCIÓN

### Avance de apertura del escape

- Permite aprovechar el escape espontáneo
- AAE óptimo: Poca pérdida de trabajo de expansión, menor trabajo de bombeo
- Si  $n \uparrow \Rightarrow AAE \uparrow$  (condiciones sónicas)
- Variaciones de AAE no modifica otros ángulos



INTRODUCCIÓN

VÁLVULAS

**DIAGRAMA  
DISTRIBUCIÓN**
SINTONIZADO  
COLECTORES

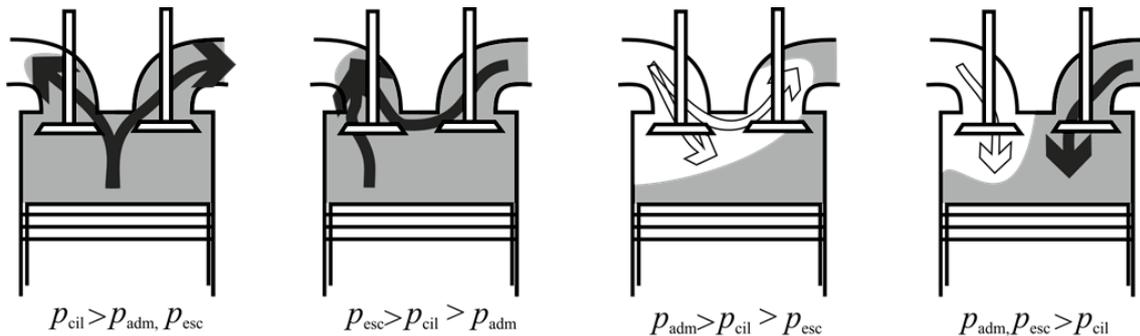
MOTORES 2T

R

## DIAGRAMA DE DISTRIBUCIÓN

❑ Cruce de válvulas (AAA+RCE = 10°-20° + 15°-30°):

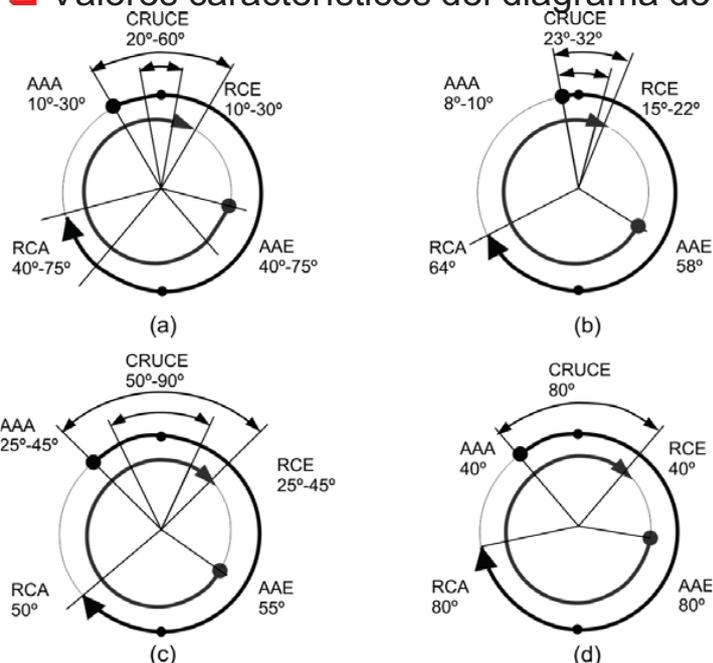
- Permite aprovechar los efectos dinámicos en el colector de escape para mejorar el llenado del cilindro
- Motores sobrealimentados: si  $p_{adm}$  es mayor que  $p_{esc}$  puede utilizarse cruces importantes para barrer los gases de escape y refrigerar las válvulas de escape



INTRODUCCIÓN	VÁLVULAS	DIAGRAMA DISTRIBUCIÓN	SINTONIZADO COLECTORES	MOTORES 2T	R
--------------	----------	-----------------------	------------------------	------------	---

## DIAGRAMA DE DISTRIBUCIÓN

❑ Valores característicos del diagrama de distribución

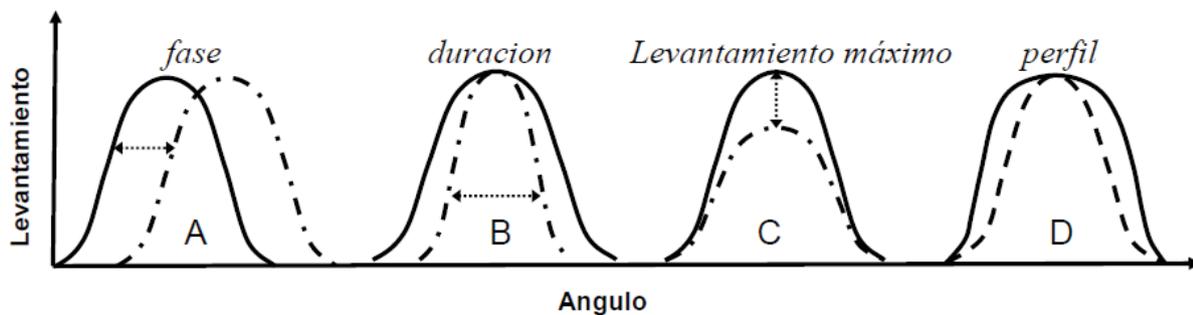


- Valores límite MEP-MEC turismo
- Valores habituales MEP-MEC turismo
- MEC sobrealimentado gran tamaño
- MEP altas prestaciones

INTRODUCCIÓN	VÁLVULAS	DIAGRAMA DISTRIBUCIÓN	SINTONIZADO COLECTORES	MOTORES 2T	R
--------------	----------	-----------------------	------------------------	------------	---

## DIAGRAMA DE DISTRIBUCIÓN

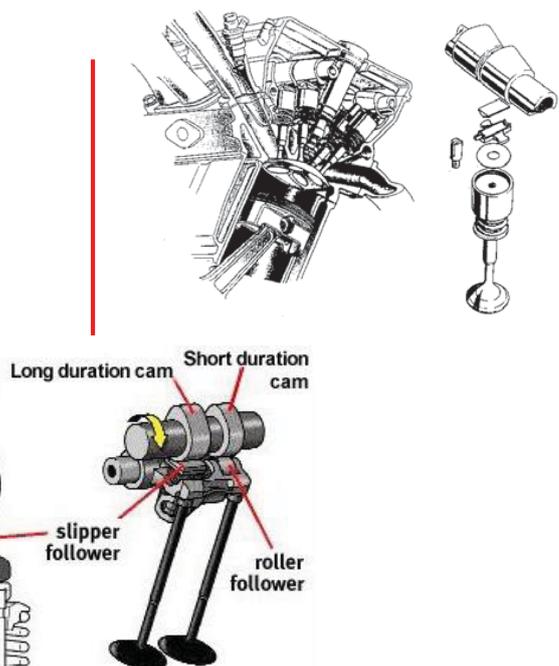
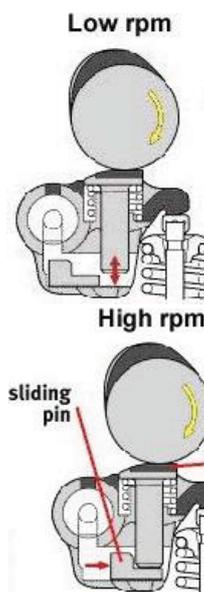
- ❑ Los ángulos óptimos (reflujos/inercia) dependen del punto de funcionamiento: sistemas de distribución variable
- ❑ Prácticamente todos los MEP actuales de automoción presentan algún sistema de distribución variable
- ❑ Algunos permiten variar el desfase, levantamiento, perfil, etc.



INTRODUCCIÓN	VÁLVULAS	DIAGRAMA DISTRIBUCIÓN	SINTONIZADO COLECTORES	MOTORES 2T	R
--------------	----------	-----------------------	------------------------	------------	---

## DIAGRAMA DE DISTRIBUCIÓN

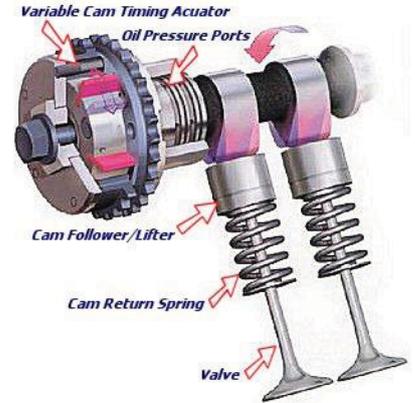
- ❑ Sistemas de distribución variable:  
Sistemas mecánicos



INTRODUCCIÓN	VÁLVULAS	DIAGRAMA DISTRIBUCIÓN	SINTONIZADO COLECTORES	MOTORES 2T	R
--------------	----------	-----------------------	------------------------	------------	---

# DIAGRAMA DE DISTRIBUCIÓN

❑ Sistemas de distribución variable: desfases hidrúlicos



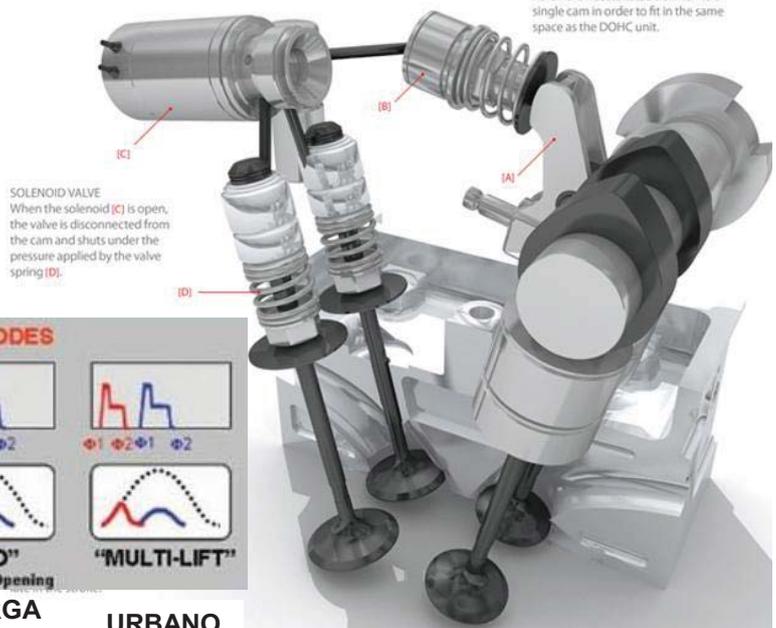
INTRODUCCIÓN	VÁLVULAS	<b>DIAGRAMA DISTRIBUCIÓN</b>	SINTONIZADO COLECTORES	MOTORES 2T	R
--------------	----------	------------------------------	------------------------	------------	---

# DIAGRAMA DE DISTRIBUCIÓN

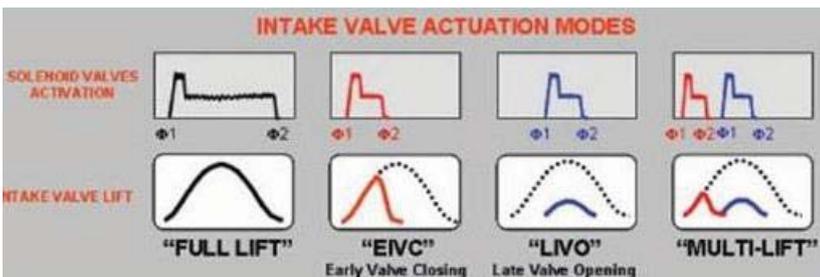
❑ Sistemas de distribución variable: sistema 'camless' hidrúlico

Permite reducir necesidad mariposa

IT'S ALL IN THE OIL  
The intake-cam lobe acts on a finger follower (A), which actuates a piston (B) that pushes oil into the valve assembly, which has a piston, a lash adjuster, and a hydraulic brake. The Multilair hardware necessitated a switch to a single cam in order to fit in the same space as the DOHC unit.



SOLENOID VALVE  
When the solenoid (C) is open, the valve is disconnected from the cam and shuts under the pressure applied by the valve spring (D).



PLENA CARGA a max n	PLENA CARGA a baja n	CARGA PARCIAL, RALENTÍ	URBANO
---------------------	----------------------	------------------------	--------

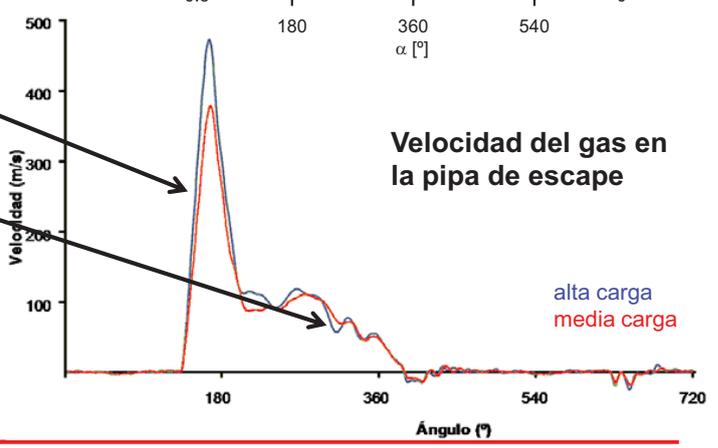
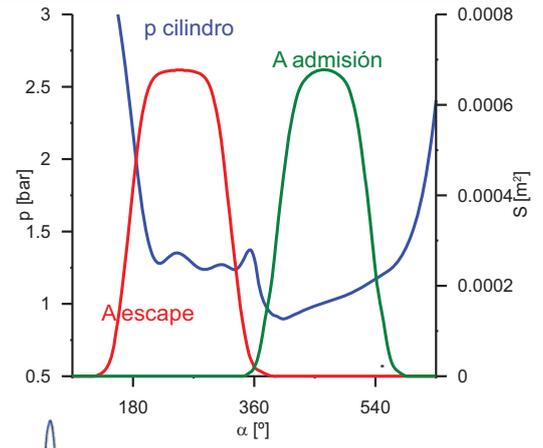
<http://www.youtube.com/watch?v=5IrPcmMHqHE>

INTRODUCCIÓN	VÁLVULAS	<b>DIAGRAMA DISTRIBUCIÓN</b>	SINTONIZADO COLECTORES	MOTORES 2T	R
--------------	----------	------------------------------	------------------------	------------	---

# EFFECTOS DINÁMICOS

Comportamiento pulsante del motor

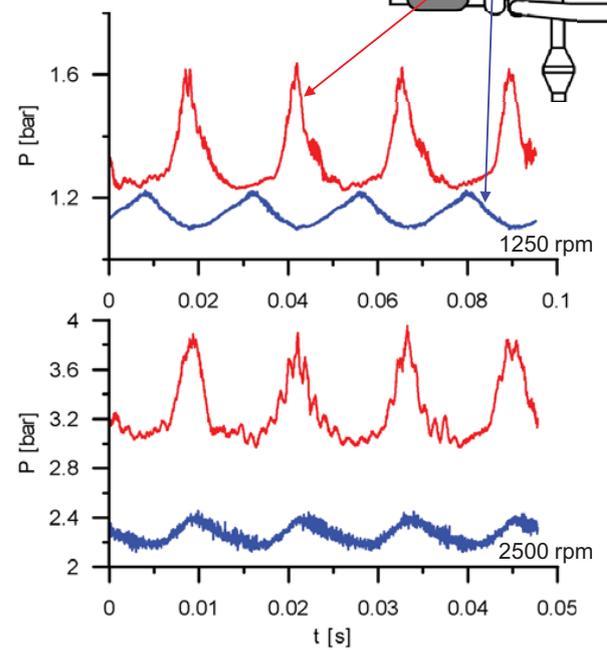
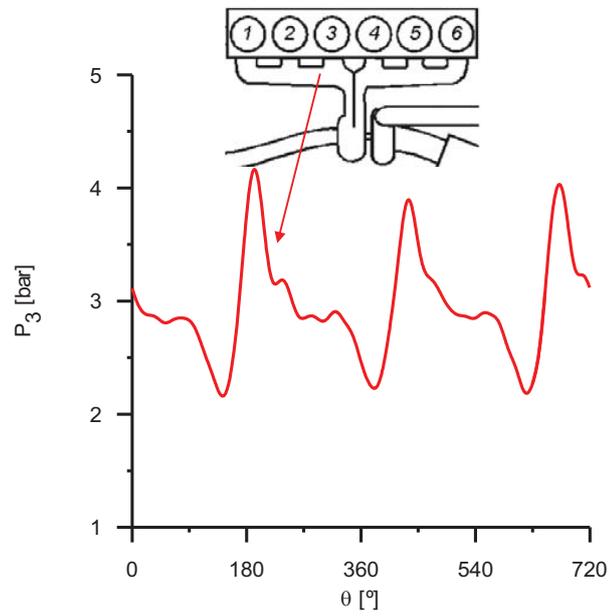
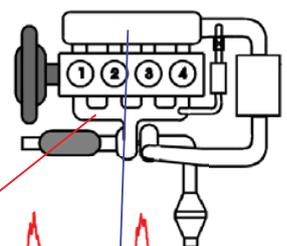
- Comportamiento alternativo ( $f = z \cdot n / 2$ )
  - Alta presión en el cilindro a la apertura del escape: escape espontáneo
  - Movimiento del pistón: escape forzado
- Pulsaciones de presión y velocidad del gas en válvulas y colectores



INTRODUCCIÓN	VÁLVULAS	DIAGRAMA DISTRIBUCIÓN	SINTONIZADO COLECTORES	MOTORES 2T	R
--------------	----------	-----------------------	------------------------	------------	---

# EFFECTOS DINÁMICOS

Ejemplos de presiones en los colectores



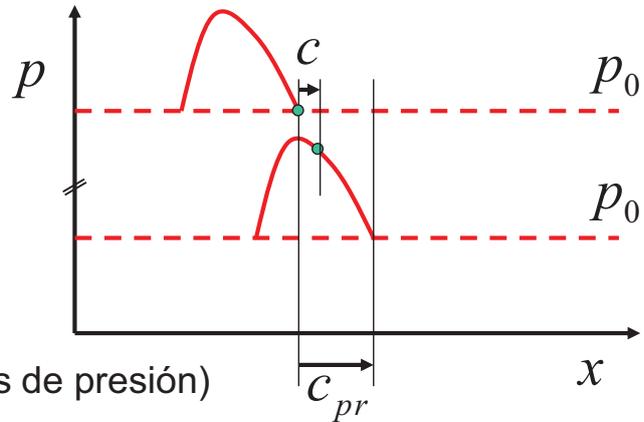
INTRODUCCIÓN	VÁLVULAS	DIAGRAMA DISTRIBUCIÓN	SINTONIZADO COLECTORES	MOTORES 2T	R
--------------	----------	-----------------------	------------------------	------------	---

## SINTONIZADO DE COLECTORES

□ Dicha dinámica afecta a la velocidad de desplazamiento del:

➤ Gas

$$c = \frac{2a_0}{\gamma - 1} \left[ \left( \frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\gamma - 1}{2\gamma}} - 1 \right]$$



➤ Perturbaciones (variaciones de presión)

$$c_{pr} = c + a = \frac{2a_0}{\gamma - 1} \left[ \frac{\gamma + 1}{2} \left( \frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\gamma - 1}{2\gamma}} - 1 \right]$$

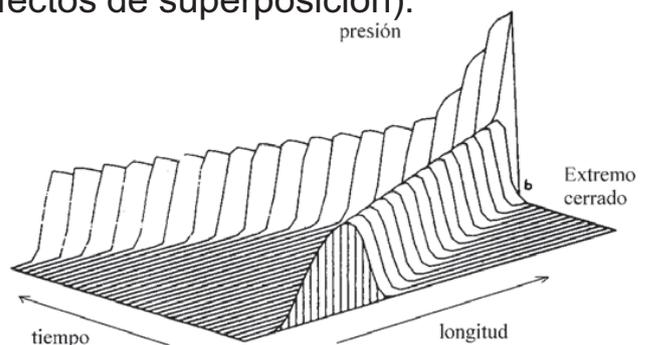
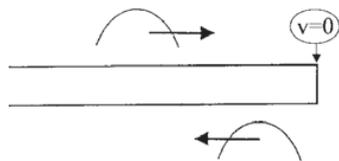
$c_{pr} \approx a_0$  ante pequeñas perturbaciones

INTRODUCCIÓN	VÁLVULAS	DIAGRAMA DISTRIBUCIÓN	<b>SINTONIZADO COLECTORES</b>	MOTORES 2T	R
--------------	----------	-----------------------	-------------------------------	------------	---

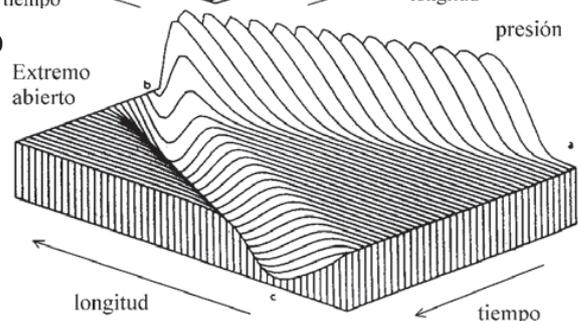
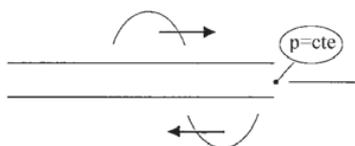
## SINTONIZADO DE COLECTORES

□ Reflexión de ondas de presión (efectos de superposición):

➤ Extremo cerrado



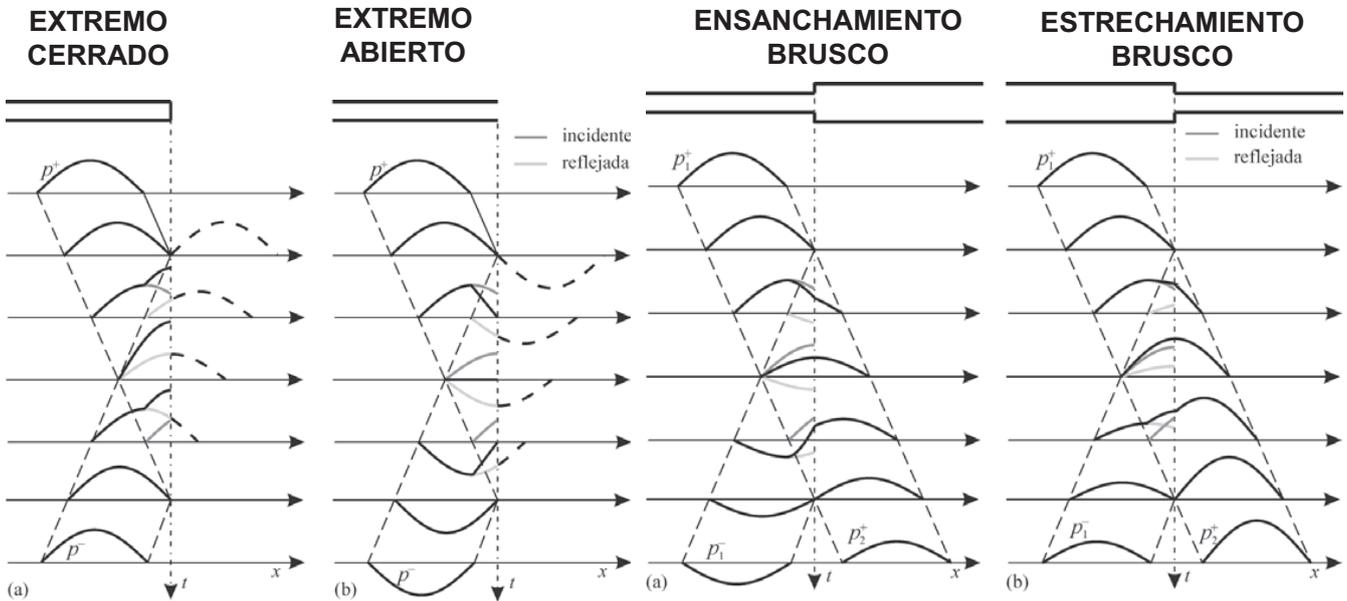
➤ Rarefacción en extremo abierto



INTRODUCCIÓN	VÁLVULAS	DIAGRAMA DISTRIBUCIÓN	<b>SINTONIZADO COLECTORES</b>	MOTORES 2T	R
--------------	----------	-----------------------	-------------------------------	------------	---

# SINTONIZADO DE COLECTORES

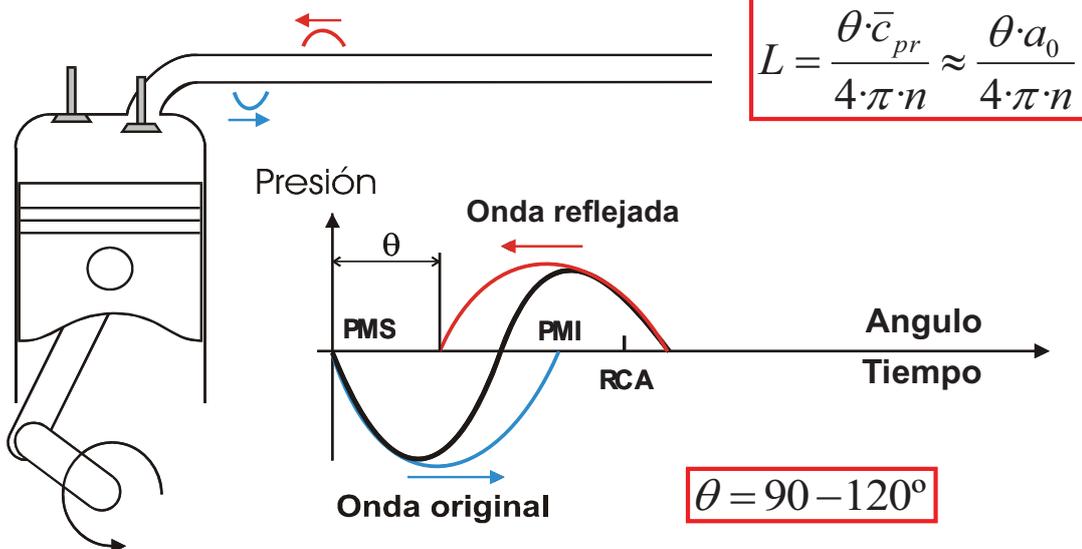
## Ejemplos



INTRODUCCIÓN	VÁLVULAS	DIAGRAMA DISTRIBUCIÓN	<b>SINTONIZADO COLECTORES</b>	MOTORES 2T	R
--------------	----------	-----------------------	-------------------------------	------------	---

# SINTONIZADO DE COLECTORES

## Diseño de colectores de admisión (4T):

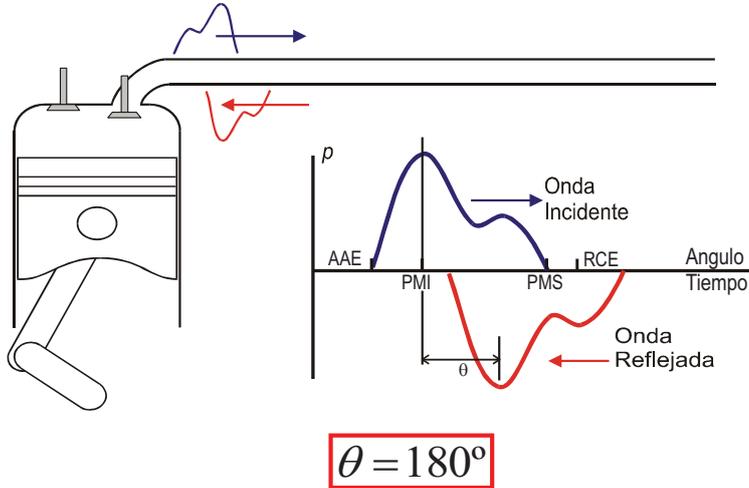


Aprovechando la dinámica de ondas, se pueden conseguir incrementos del 25% en  $\eta_v$

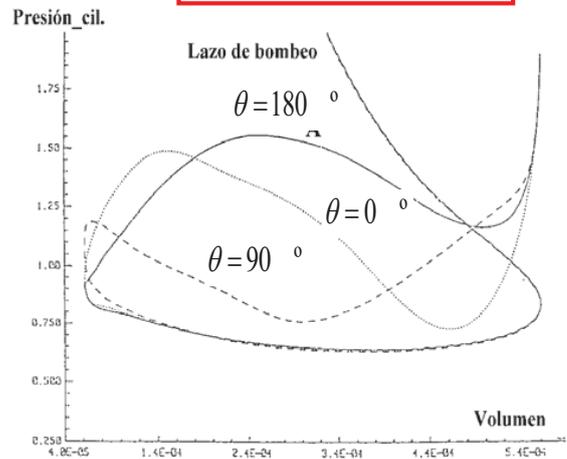
INTRODUCCIÓN	VÁLVULAS	DIAGRAMA DISTRIBUCIÓN	<b>SINTONIZADO COLECTORES</b>	MOTORES 2T	R
--------------	----------	-----------------------	-------------------------------	------------	---

# SINTONIZADO DE COLECTORES

❑ Diseño de colectores de escape (4T):



$$L = \frac{\theta \cdot \bar{c}_{pr}}{4 \cdot \pi \cdot n} \approx \frac{\theta \cdot a_0}{4 \cdot \pi \cdot n}$$

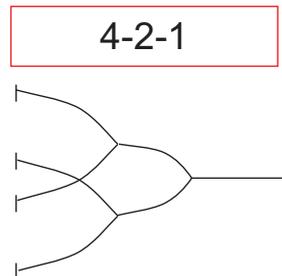
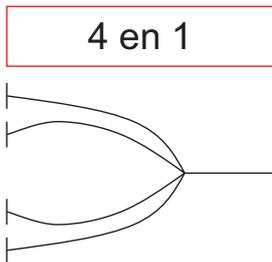


Si la rarefacción llega durante el cruce de válvulas, puede aumentarse el rendimiento volumétrico en torno a un 5%; también afecta al  $N_b$

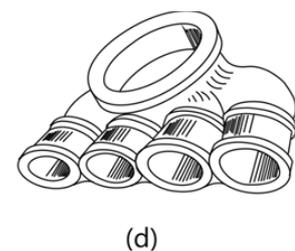
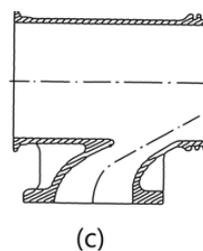
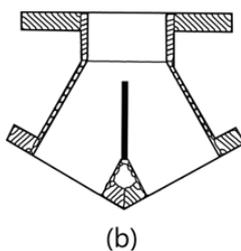
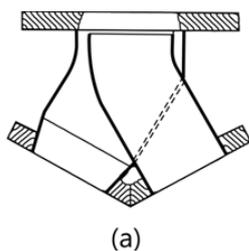
INTRODUCCIÓN	VÁLVULAS	DIAGRAMA DISTRIBUCIÓN	<b>SINTONIZADO COLECTORES</b>	MOTORES 2T	R
--------------	----------	-----------------------	-------------------------------	------------	---

# SINTONIZADO DE COLECTORES

❑ Escapes en motores policilíndricos (4T):



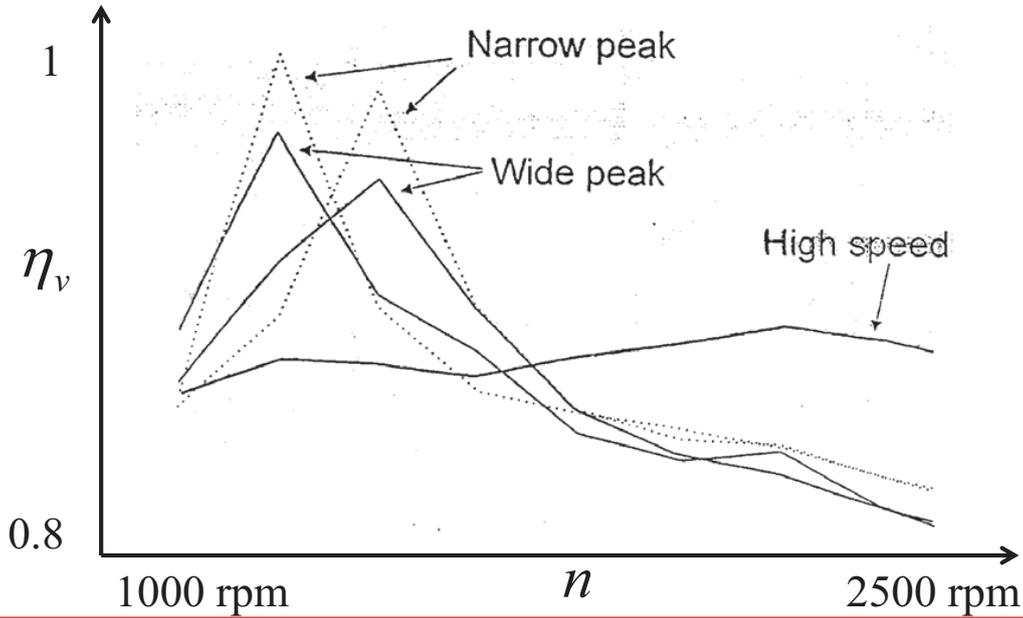
❑ disminución interferencia entre cilindros: uniones direccionales



INTRODUCCIÓN	VÁLVULAS	DIAGRAMA DISTRIBUCIÓN	<b>SINTONIZADO COLECTORES</b>	MOTORES 2T	R
--------------	----------	-----------------------	-------------------------------	------------	---

# SINTONIZADO DE COLECTORES

❑ Sintonizado. Decisión en el diseño:

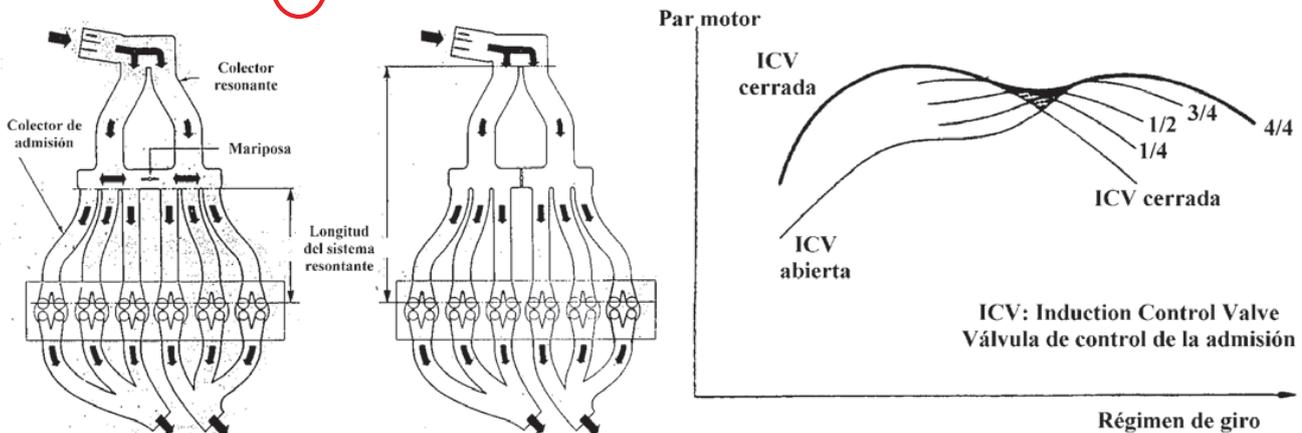


INTRODUCCIÓN	VÁLVULAS	DIAGRAMA DISTRIBUCIÓN	<b>SINTONIZADO COLECTORES</b>	MOTORES 2T	R
--------------	----------	-----------------------	-------------------------------	------------	---

# SINTONIZADO DE COLECTORES

❑ Colectores de admisión de geometría variable:

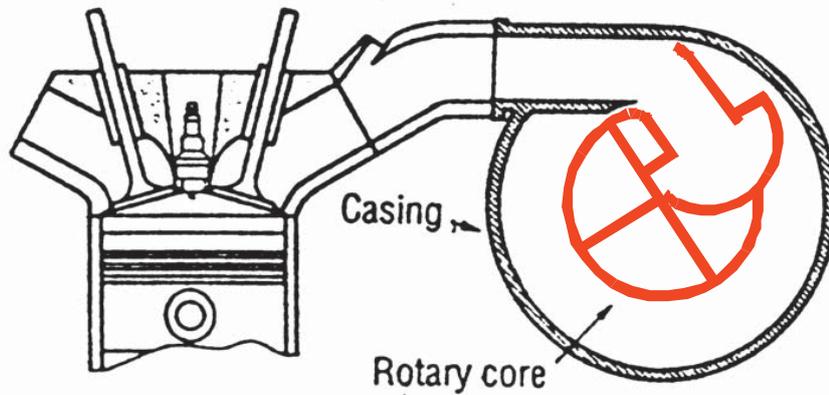
$$L \approx \frac{90^\circ}{360^\circ} \cdot a_0 \cdot 2n$$



INTRODUCCIÓN	VÁLVULAS	DIAGRAMA DISTRIBUCIÓN	<b>SINTONIZADO COLECTORES</b>	MOTORES 2T	R
--------------	----------	-----------------------	-------------------------------	------------	---

## SINTONIZADO DE COLECTORES

- ❑ Colectores de admisión de geometría variable:

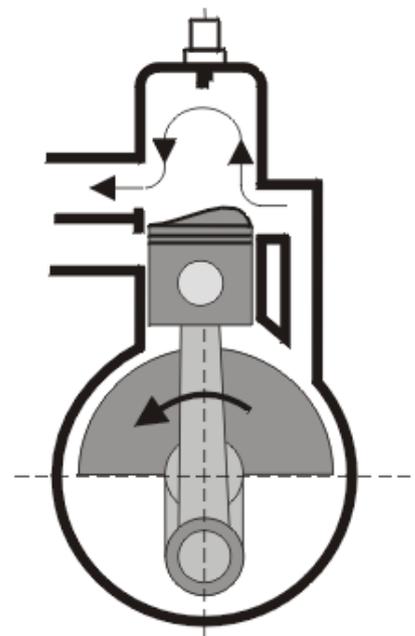
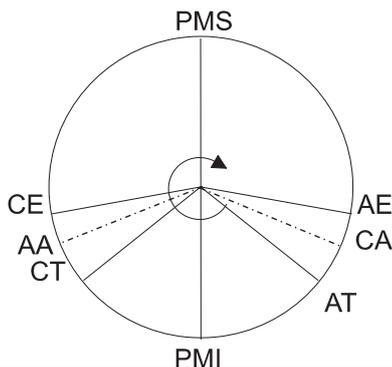


En la actualidad estos sistemas están siendo desplazados por los sistemas de distribución variable

INTRODUCCIÓN	VÁLVULAS	DIAGRAMA DISTRIBUCIÓN	<b>SINTONIZADO COLECTORES</b>	MOTORES 2T	R
--------------	----------	-----------------------	-------------------------------	------------	---

## MOTORES 2T DE BARRIDO POR CÁRTER

- ❑ Problemática específica:
  - Suministrar la máxima mezcla
  - Evitar el cortocircuito
  - Expulsar los gases de escape
  - Evitar la mezcla entre la mezcla fresca y los gases de escape

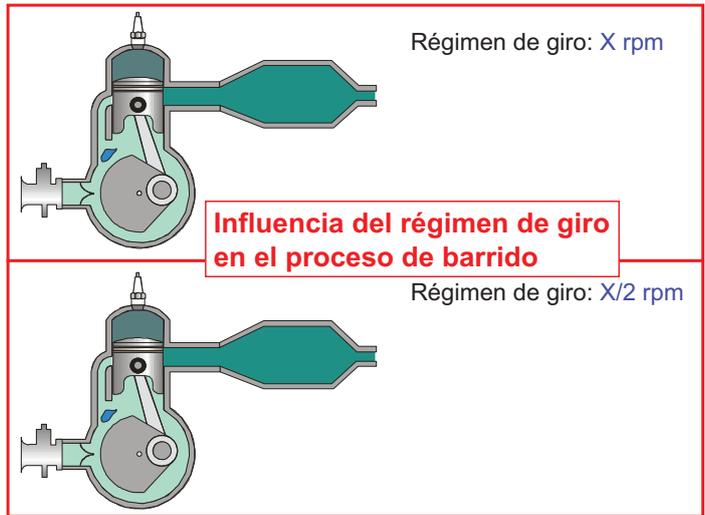


INTRODUCCIÓN	VÁLVULAS	DIAGRAMA DISTRIBUCIÓN	SINTONIZADO COLECTORES	<b>MOTORES 2T</b>	R
--------------	----------	-----------------------	------------------------	-------------------	---

## MOTORES 2T DE BARRIDO POR CÁRTER

❑ Diseño específico del colector de escape con cono y contracono:

- El cono crea una rarefacción que ayuda a la entrada de mezcla fresca entre AT y CT
- El contracono crea una sobrepresión que debe evitar el cortocircuito entre CT y CE

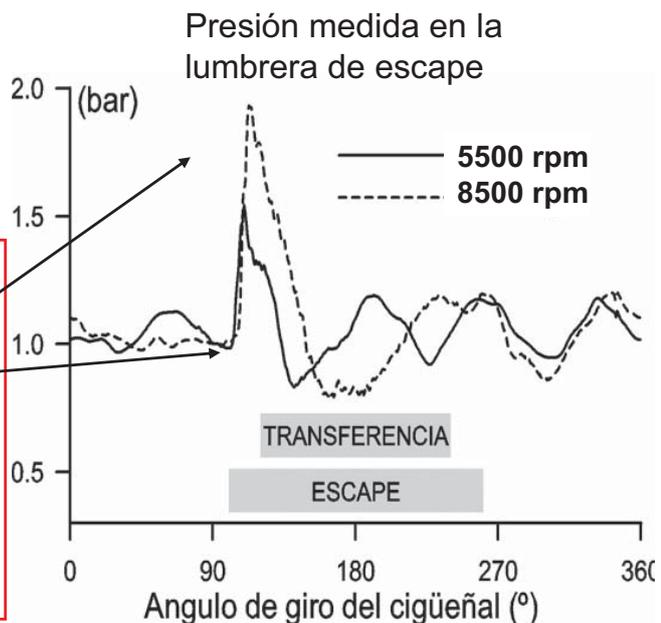
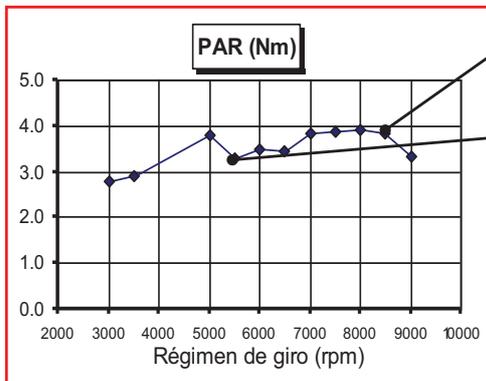


INTRODUCCIÓN	VÁLVULAS	DIAGRAMA DISTRIBUCIÓN	SINTONIZADO COLECTORES	MOTORES 2T	R
--------------	----------	-----------------------	------------------------	------------	---

## MOTORES 2T DE BARRIDO POR CÁRTER

❑ Ejemplo de sintonizado:

- Motor de 50 cm<sup>3</sup>
- Plena carga



INTRODUCCIÓN	VÁLVULAS	DIAGRAMA DISTRIBUCIÓN	SINTONIZADO COLECTORES	MOTORES 2T	R
--------------	----------	-----------------------	------------------------	------------	---

## RESUMEN

- ❑ El proceso de renovación de la carga es clave para el correcto funcionamiento del motor
- ❑ El PRC influye sobre las prestaciones y el rendimiento
- ❑ En los motores de 4T el rendimiento volumétrico suele ser menor que 1. El rendimiento volumétrico es afectado por numerosos factores de carácter complejo
- ❑ El sintonizado de colectores y la optimización del diagrama de distribución permite la mejora del rendimiento volumétrico (para  $n$  fijo)
- ❑ Los sistemas de geometría/distribución variable permiten obtener esas ventajas en mayores rangos de régimen de giro
- ❑ La renovación de la carga en los motores de 2T de barrido por cárter tiene complejidad adicional al producirse procesos de mezcla y cortocircuito

INTRODUCCIÓN

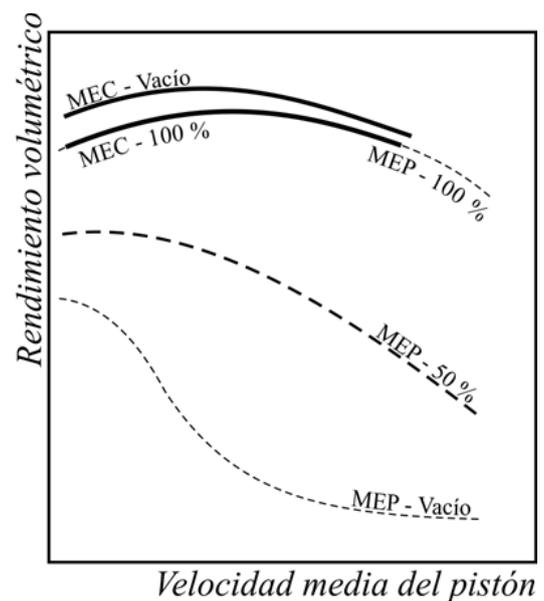
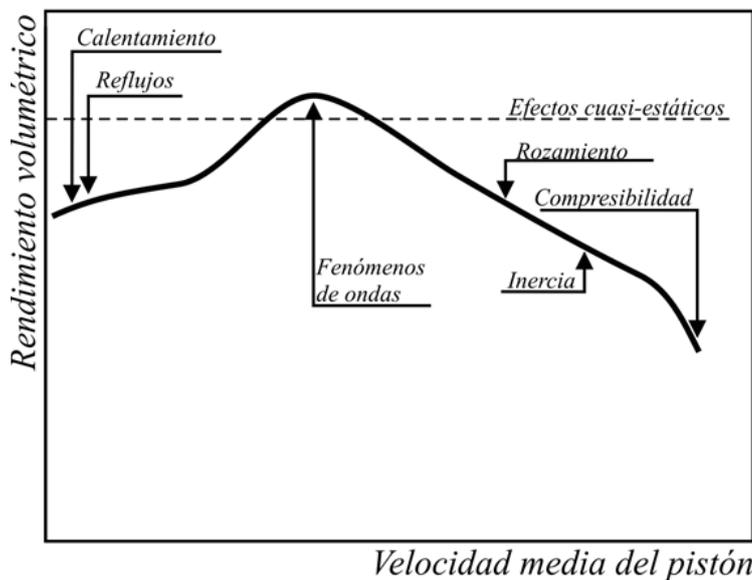
VÁLVULAS

DIAGRAMA  
DISTRIBUCIÓNSINTONIZADO  
COLECTORES

MOTORES 2T

R

## RESUMEN



INTRODUCCIÓN

VÁLVULAS

DIAGRAMA  
DISTRIBUCIÓNSINTONIZADO  
COLECTORES

MOTORES 2T

R

## BIBLIOGRAFÍA

- F. Payri y J.M. Desantes  
"Motores de Combustión Interna Alternativos" (Cap. 8, 9 y 10)
  
  - J.B. Heywood  
"Internal Combustion Engine Fundamentals" (Cap. 6)
  
  - R. Stone  
"Introduction to Internal Combustion Engines" (Cap. 6 y 7)
  
  - R. van Basshuysen y F. Schäfer  
"Internal Combustion Engine Handbook: Basics, Components, Systems  
and Perspectives" (Cap. 10)
-

## CONTENIDO

- Introducción. Justificación de la sobrealimentación
- Efectos de la sobrealimentación sobre el motor
- Tipos de sobrealimentación
- Acoplamiento motor-turbogrupo
- Tendencias en MEP y MEC
- Resumen

INTRODUCCIÓN	EFFECTOS SOBREAL.	TIPOS DE SOBREAL.	ACOPLAMIENTO CON MOTOR	TENDENCIAS MEP/MEC	R
--------------	-------------------	-------------------	------------------------	--------------------	---

## INTRODUCCIÓN

- La sobrealimentación consiste en el aumento de la densidad del aire en el colector de admisión
- De esta forma es posible aumentar la potencia específica del motor
- Las primeras patentes de sobrealimentación son casi tan antiguas como los primeros MCIAs:
  - 1885→ primera patente de Daimler
  - 1896→ patente de Diesel
  - 1905→ patente de Büchi (turbosobrealimentación)
- En la actualidad la sobrealimentación está muy extendida (especialmente en MEC)

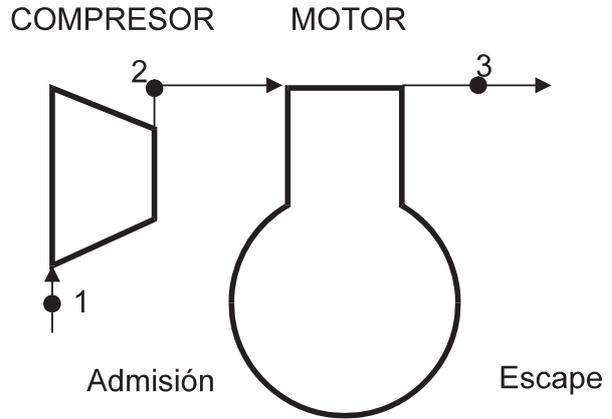
INTRODUCCIÓN	EFFECTOS SOBREAL.	TIPOS DE SOBREAL.	ACOPLAMIENTO CON MOTOR	TENDENCIAS MEP/MEC	R
--------------	-------------------	-------------------	------------------------	--------------------	---

# JUSTIFICACIÓN DE LA SOBREALIMENTACIÓN

□ Potencia efectiva:

$$Ne = \rho_a \cdot \eta_v \cdot V_T \cdot \frac{n}{2} \cdot F_r \cdot F_e \cdot H_p \cdot \eta_e$$

$$\frac{Ne}{V_T} = \rho_a \cdot \eta_v \cdot \frac{n}{2} \cdot F_r \cdot F_e \cdot H_p \cdot \eta_e$$



$$\uparrow \rho_a \Rightarrow \uparrow Ne \quad \uparrow \frac{Ne}{V_T}$$

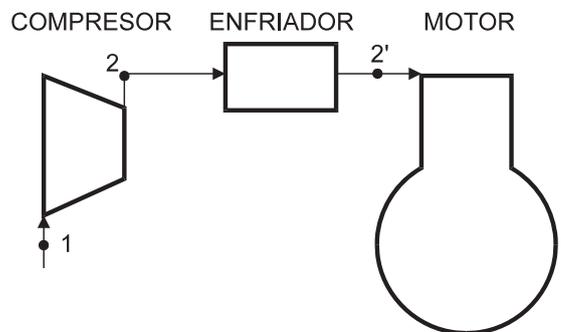
<b>INTRODUCCIÓN</b>	EFFECTOS SOBREAL.	TIPOS DE SOBREAL.	ACOPLAMIENTO CON MOTOR	TENDENCIAS MEP/MEC	R
---------------------	-------------------	-------------------	------------------------	--------------------	---

# JUSTIFICACIÓN DE LA SOBREALIMENTACIÓN

□ Enfriamiento del aire de admisión (*intercooler*):

MEC DI - 4 cilindros - 2 litros / par máximo.

	Atmosf.	Sobreal.	Sobreal. Enfriador
P. admisión (bar)	1	2	1.95
T. admisión (°C/K)	20/293	120/393	60/333
$\rho$ admisión (kg/m <sup>3</sup> )	1.2	1.8	2.1
m <sub>f</sub> (mg/cc)	30	45	52.5
PMI (bar)	10	15	17.5



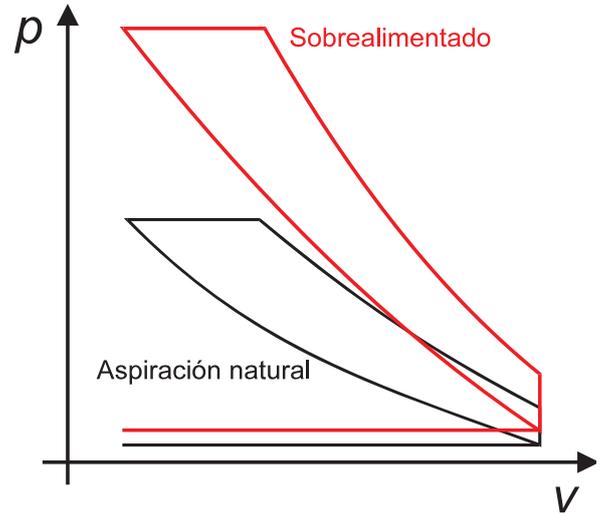
<b>INTRODUCCIÓN</b>	EFFECTOS SOBREAL.	TIPOS DE SOBREAL.	ACOPLAMIENTO CON MOTOR	TENDENCIAS MEP/MEC	R
---------------------	-------------------	-------------------	------------------------	--------------------	---

## AUMENTO DE TENSIONES - MECÁNICA

- ❑ Aumento presión máxima
  - Efecto sobre patín hidrodinámico
  - Resistencia mecánica (130-200 bar)
- ❑ Soluciones:
  - Disminución  $r_c$
  - Cambio ley de inyección

$$P_{fin.comp.} = P_{adm.} \cdot r_c^k$$

- ❑  $\downarrow P_{max}/p_{me}$



INTRODUCCIÓN	<b>EFFECTOS SOBREAL.</b>	TIPOS DE SOBREAL.	ACOPLAMIENTO CON MOTOR	TENDENCIAS MEP/MEC	R
--------------	--------------------------	-------------------	------------------------	--------------------	---

## AUMENTO DE TENSIONES - TÉRMICA

- ❑  $T_{max} = f(T_{adm}, \dots) \rightarrow$  interés del *intercooler*
- ❑ Calor cedido a las paredes:

$$Q_r = h_m \cdot A \cdot \Delta T$$

$$h_m = 10.4 \cdot \frac{k_a}{\mu_a^{0.75}} (c_m \cdot \rho_a)^{0.75} \cdot D^{-0.25} \quad (\text{Taylor y Toong})$$

- ❑ Soluciones:
  - Sistema de refrigeración reforzado
  - Enfriamiento del pistón por chorro de aceite

- ❑  $\downarrow Q_r/Q_{comb}$

INTRODUCCIÓN	<b>EFFECTOS SOBREAL.</b>	TIPOS DE SOBREAL.	ACOPLAMIENTO CON MOTOR	TENDENCIAS MEP/MEC	R
--------------	--------------------------	-------------------	------------------------	--------------------	---

## AUMENTO DE TENSIONES

### □ Ejemplo:

MEC DI - 4 cilindros - 2 litros / par máximo

	Atmosf.	Sobreal.	Sobreal. Enfriador
P. admisión (bar)	1	2	1.95
T. admisión (°C/K)	20/293	120/393	60/333
P. maxi (bar)	90	140	140
P.max. / PME	11	10	9
Q refrig / Q comb.	0.30	0.27	0.26

INTRODUCCIÓN	<b>EFFECTOS SOBREAL.</b>	TIPOS DE SOBREAL.	ACOPLAMIENTO CON MOTOR	TENDENCIAS MEP/MEC	R
--------------	--------------------------	-------------------	------------------------	--------------------	---

## OTRAS CONSECUENCIAS SOBRE EL MOTOR

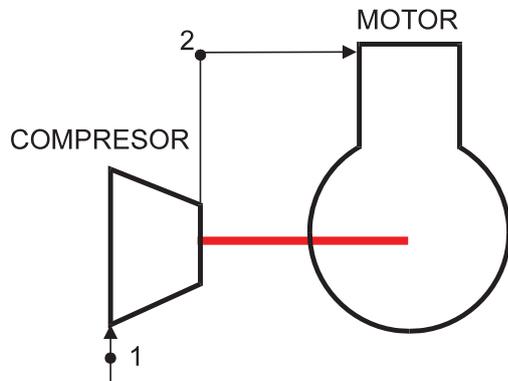
- Mejora del rendimiento indicado
  - Motor más adiabático ( $\downarrow Q_r/Q_{comb}$ )
- Mejora del rendimiento mecánico (sin considerar el compresor)
  - pmf depende principalmente de  $c_m$
  - pmf/pmi baja al sobrealimentar el motor
- Proceso de combustión
  - MEP:  $\uparrow P$  y  $T \rightarrow$  peligro de detonación
  - MEC:  $\uparrow P$  y  $T \rightarrow$  favorece el autoencendido
  - $\uparrow \rho \rightarrow$  favorece la mezcla aire/combustible
- Aumento emisiones de NOx al aumentar T

INTRODUCCIÓN	<b>EFFECTOS SOBREAL.</b>	TIPOS DE SOBREAL.	ACOPLAMIENTO CON MOTOR	TENDENCIAS MEP/MEC	R
--------------	--------------------------	-------------------	------------------------	--------------------	---

## TIPOS DE SOBREALIMENTACIÓN

### Mecánica

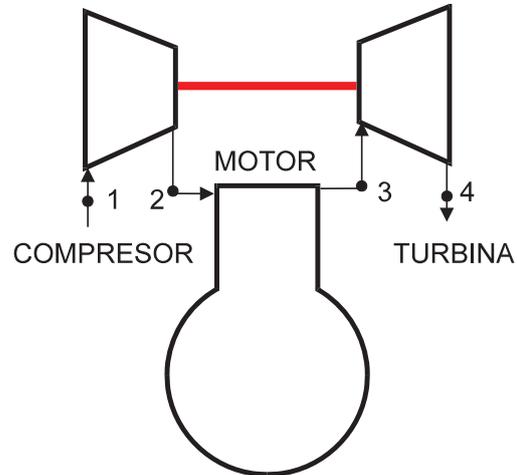
- Acoplamiento mecánico entre compresor y motor



### Compresores volumétricos:

- de paletas
- de tornillo
- Roots
- espiral

### Turbosobrealimentación



INTRODUCCIÓN

EFECTOS  
SOBREAL.

TIPOS DE  
SOBREAL.

ACOPLAMIENTO  
CON MOTOR

TENDENCIAS  
MEP/MEC

R

## TIPOS DE SOBREALIMENTACIÓN

### Mecánica

- Comportamiento del compresor poco sensible al régimen → grado de sobrealimentación constante
- Respuesta instantánea del compresor a cambios de régimen del motor
- Potencia absorbida por el compresor → ↓  $\eta_e$  global
- Volumen y peso del compresor

### Turbosobrealimentación

- Recuperación de parte de la energía de los gases de escape
- Mejora del  $\eta_e$  global del motor
- Peso y tamaño reducido
- Acoplamiento fluidodinámico turbogrupo / motor complejo.
- Respuesta muy variable en función del régimen y de la carga del motor
- Mala respuesta en transitorios del motor (inercia del turbogrupo)

INTRODUCCIÓN

EFECTOS  
SOBREAL.

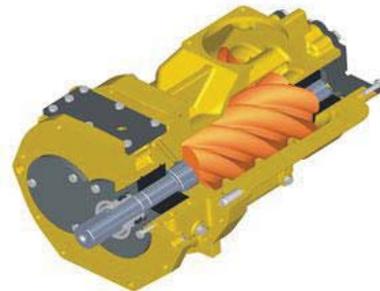
TIPOS DE  
SOBREAL.

ACOPLAMIENTO  
CON MOTOR

TENDENCIAS  
MEP/MEC

R

## SOBREALIMENTACIÓN MECÁNICA

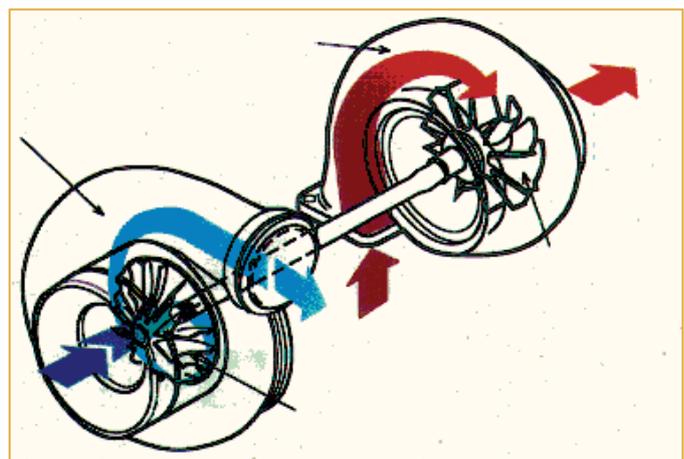


INTRODUCCIÓN	EFFECTOS SOBREAL.	<b>TIPOS DE SOBREAL.</b>	ACOPLAMIENTO CON MOTOR	TENDENCIAS MEP/MEC	R
--------------	-------------------	--------------------------	------------------------	--------------------	---

## TURBOSOBREALIMENTACIÓN

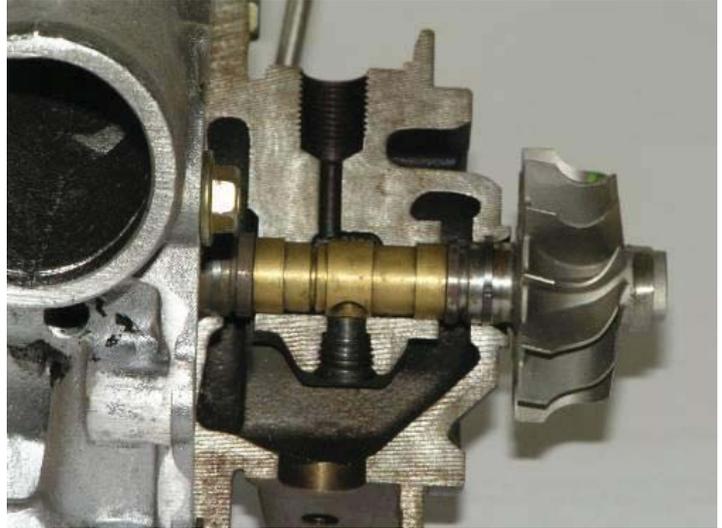
- ❑ Uso de turbogrupos
  - Compresor y turbina radiales (generalmente)
- ❑ Aprovechamiento de la energía de escape
  - $H_{\text{escape}} \sim \frac{1}{3} Q_{\text{comb}}$
  - Pérdidas de calor y laminación en válvulas
  - Pulsación

La energía recuperable suele ser en general suficiente para accionar el compresor



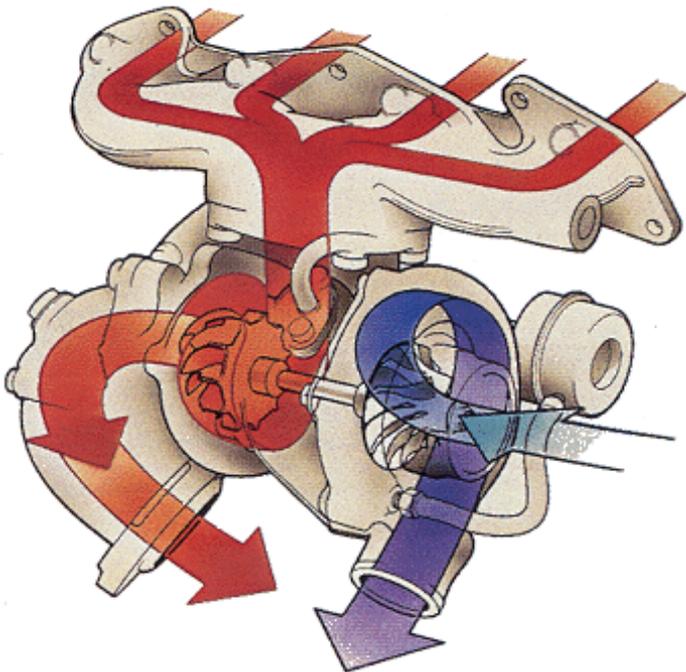
INTRODUCCIÓN	EFFECTOS SOBREAL.	<b>TIPOS DE SOBREAL.</b>	ACOPLAMIENTO CON MOTOR	TENDENCIAS MEP/MEC	R
--------------	-------------------	--------------------------	------------------------	--------------------	---

# TURBOSOBREALIMENTACIÓN



INTRODUCCIÓN	EFFECTOS SOBREAL.	<b>TIPOS DE SOBREAL.</b>	ACOPLAMIENTO CON MOTOR	TENDENCIAS MEP/MEC	R
--------------	-------------------	--------------------------	------------------------	--------------------	---

# TURBOSOBREALIMENTACIÓN



INTRODUCCIÓN	EFFECTOS SOBREAL.	<b>TIPOS DE SOBREAL.</b>	ACOPLAMIENTO CON MOTOR	TENDENCIAS MEP/MEC	R
--------------	-------------------	--------------------------	------------------------	--------------------	---

## ACOPLAMIENTO MOTOR-TURBOGRUPO

- ❑ Requerimientos del motor imponen  $p_2$  (y  $m_a$ ); son función del régimen y de la carga del motor
- ❑ Acoplamiento turbocompresor / motor
  - $(m_a)_{\text{compresor}} = (m_a)_{\text{motor}}$
  - $(p_2)_{\text{compresor}} = (p_2)_{\text{motor}} + \Delta p_{\text{intercooler}}; (T_2)_{\text{motor}} = T_{\text{intercooler}}$
- ❑ Acoplamiento turbina / motor
  - $(m_a + m_f)_{\text{turbina}} = (m_a + m_f)_{\text{motor}}$
  - Las condiciones de escape del motor ( $p_3, T_3$ ) son las de entrada de la turbina
- ❑ Acoplamiento turbina / turbocompresor
  - $n_{\text{turbina}} = n_{\text{turbocompresor}}$
  - $N_{\text{turbina}} = N_{\text{turbocompresor}}$

INTRODUCCIÓN	EFFECTOS SOBREAL.	TIPOS DE SOBREAL.	ACOPLAMIENTO CON MOTOR	TENDENCIAS MEP/MEC	R
--------------	-------------------	-------------------	------------------------	--------------------	---

## ACOPLAMIENTO MOTOR-TURBOGRUPO

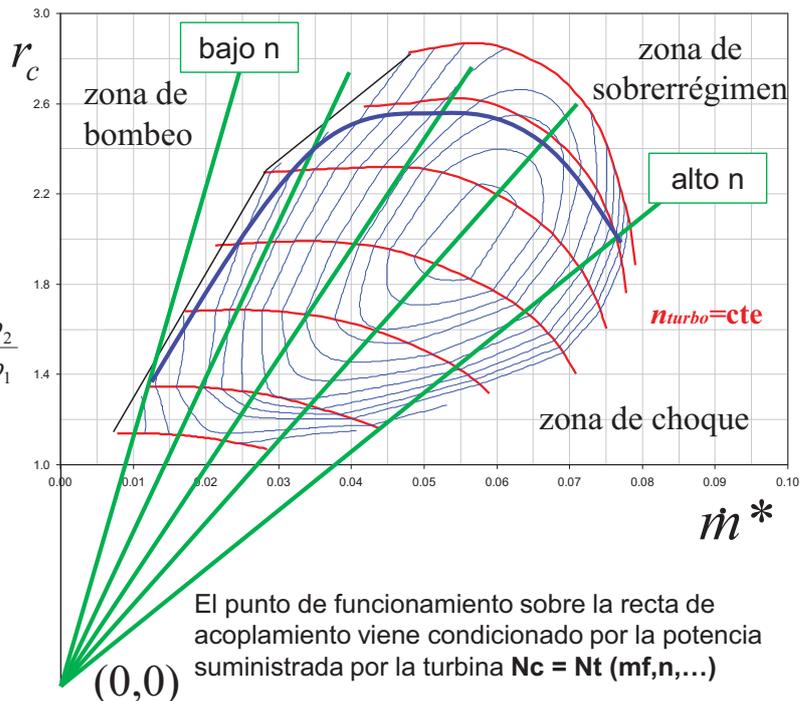
- ❑ Acoplamiento motor-compresor

$$\dot{m}_a = \eta_v V_T \frac{n}{2} \frac{1}{RT_{\text{int}}} p_2$$

$$\dot{m}^* = \frac{\dot{m}_a}{p_1/p_{\text{ref}}} \sqrt{\frac{T_1}{T_{\text{ref}}}} = \eta_v V_T \frac{n}{2} \frac{p_{\text{ref}} \sqrt{T_1/T_{\text{ref}}}}{RT_{\text{int}}} \frac{p_2}{p_1}$$

$$\dot{m}^* = k_{(n, T_{\text{int}}, p_1)} r_c$$

A partir de los requerimientos de  $p_2$  (o  $m_a$ , o  $m_f$  y  $F$ ), es posible la selección del compresor



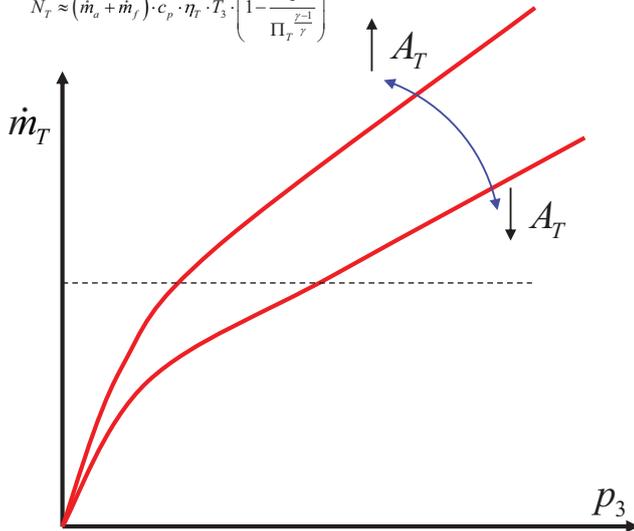
INTRODUCCIÓN	EFFECTOS SOBREAL.	TIPOS DE SOBREAL.	ACOPLAMIENTO CON MOTOR	TENDENCIAS MEP/MEC	R
--------------	-------------------	-------------------	------------------------	--------------------	---

## ACOPLAMIENTO MOTOR-TURBOGRUPO

### □ Acoplamiento compresor-turbina y motor-turbina

$$N_C \approx \dot{m}_a \cdot c_p \cdot \frac{1}{\eta_c} \cdot T_1 \cdot \left( \Pi_c^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right)$$

$$N_T \approx (\dot{m}_a + \dot{m}_f) \cdot c_p \cdot \eta_T \cdot T_3 \cdot \left( 1 - \frac{1}{\Pi_T^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \right)$$



$$N_T = N_C \quad (+N_{perd})$$

$$n_T = n_C$$

Una vez resuelto el acoplamiento motor-compresor, es posible seleccionar la turbina ( $A_T$ )

$$T_3 = f(F_r, T_2, p_3, \dots)$$

$$p_3 = f(\dot{m}_a + \dot{m}_f, A_T, T_3, \dots)$$

$$\eta_T = f(\sigma, \dots)$$

El valor de  $A_T$  requerido, puede variar de forma importante en función de las condiciones de operación

INTRODUCCIÓN	EFECTOS SOBREAL.	TIPOS DE SOBREAL.	<b>ACOPLAMIENTO CON MOTOR</b>	TENDENCIAS MEP/MEC	R
--------------	------------------	-------------------	-------------------------------	--------------------	---

## ACOPLAMIENTO MOTOR-TURBOGRUPO

### □ Un valor de $A_T$ constante no se adapta convenientemente a todos los puntos de funcionamiento (especialmente motores rápidos)

- bajo régimen del motor →  $N_T$  suficiente
- alto régimen del motor →  $N_T$  demasiado elevada
  - sobrerégimen del turbogrupo
  - $p_{adm}$  demasiado alta
  - compresor puede llegar a funcionar dentro de la zona de bombeo

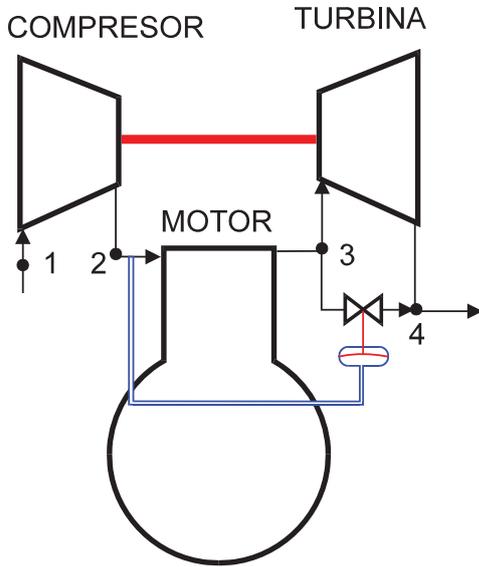
### □ Soluciones:

- Waste-gate
- TGV

INTRODUCCIÓN	EFECTOS SOBREAL.	TIPOS DE SOBREAL.	<b>ACOPLAMIENTO CON MOTOR</b>	TENDENCIAS MEP/MEC	R
--------------	------------------	-------------------	-------------------------------	--------------------	---

# ACOPLAMIENTO MOTOR-TURBOGRUPO

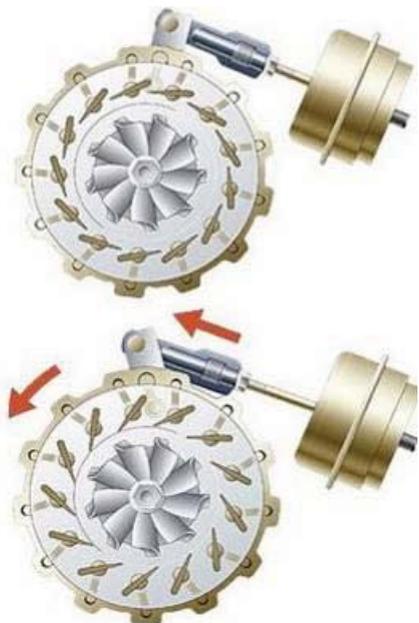
## WASTE-GATE



INTRODUCCIÓN	EFFECTOS SOBREAL.	TIPOS DE SOBREAL.	<b>ACOPLAMIENTO CON MOTOR</b>	TENDENCIAS MEP/MEC	R
--------------	-------------------	-------------------	-------------------------------	--------------------	---

# ACOPLAMIENTO MOTOR-TURBOGRUPO

## Turbina de geometría variable (TGV)



INTRODUCCIÓN	EFFECTOS SOBREAL.	TIPOS DE SOBREAL.	<b>ACOPLAMIENTO CON MOTOR</b>	TENDENCIAS MEP/MEC	R
--------------	-------------------	-------------------	-------------------------------	--------------------	---

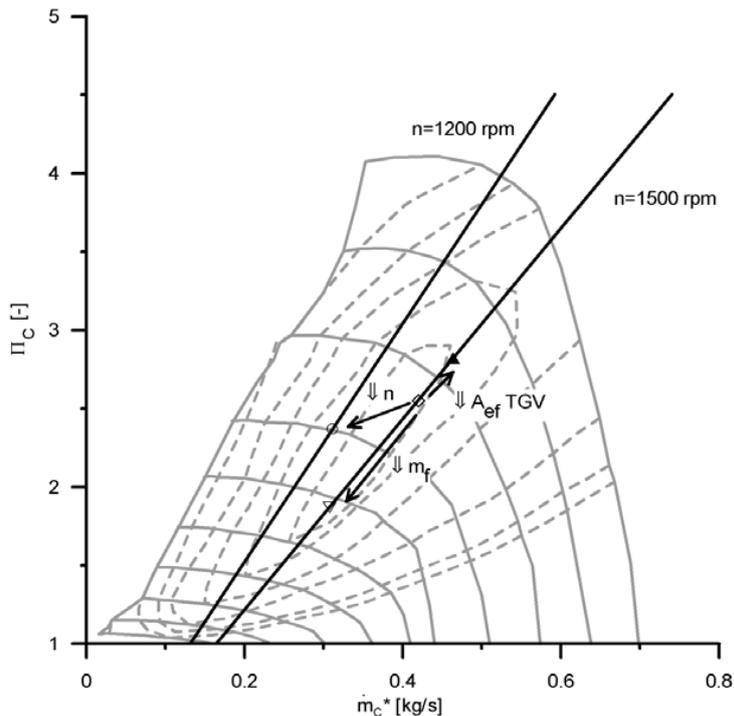
# ACOPLAMIENTO MOTOR-TURBOGRUPO

- Turbina de geometría variable (TGV)



INTRODUCCIÓN	EFFECTOS SOBREAL.	TIPOS DE SOBREAL.	<b>ACOPLAMIENTO CON MOTOR</b>	TENDENCIAS MEP/MEC	R
--------------	-------------------	-------------------	-------------------------------	--------------------	---

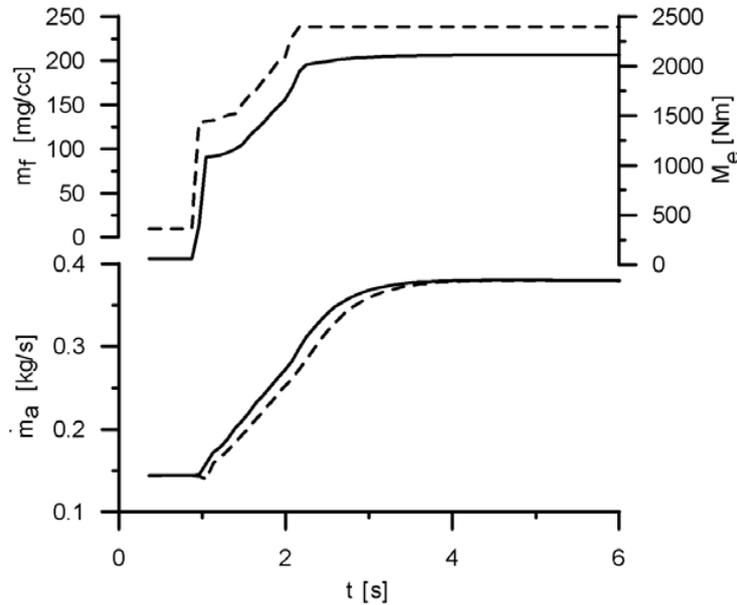
# ACOPLAMIENTO MOTOR-TURBOGRUPO



INTRODUCCIÓN	EFFECTOS SOBREAL.	TIPOS DE SOBREAL.	<b>ACOPLAMIENTO CON MOTOR</b>	TENDENCIAS MEP/MEC	R
--------------	-------------------	-------------------	-------------------------------	--------------------	---

# ACOPLAMIENTO MOTOR-TURBOGRUPO

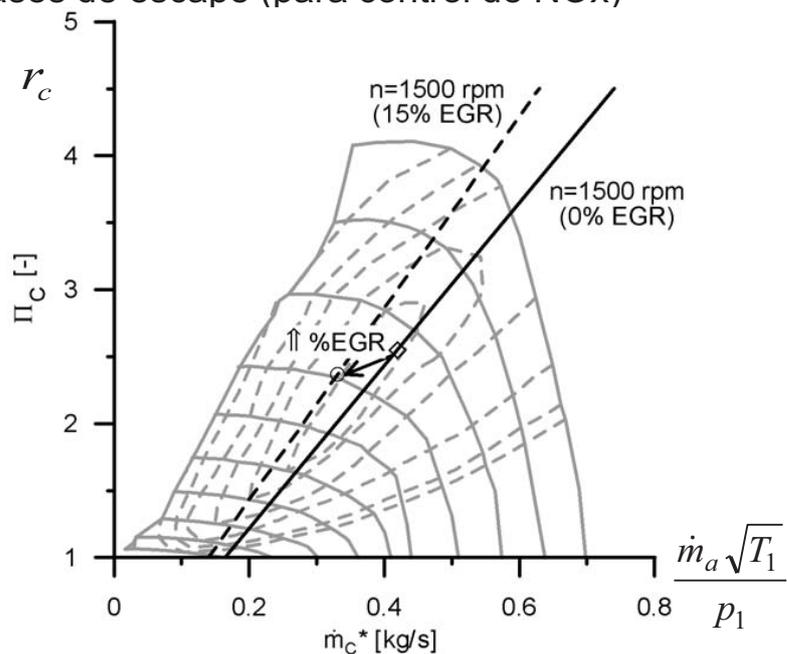
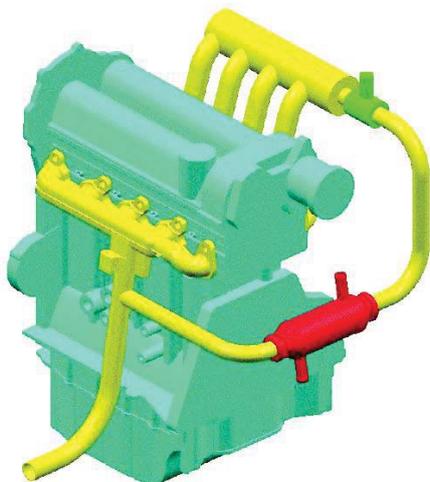
Transitorios de carga



INTRODUCCIÓN	EFFECTOS SOBREAL.	TIPOS DE SOBREAL.	<b>ACOPLAMIENTO CON MOTOR</b>	TENDENCIAS MEP/MEC	R
--------------	-------------------	-------------------	-------------------------------	--------------------	---

# ACOPLAMIENTO MOTOR-TURBOGRUPO

Efecto recirculación gases de escape (para control de NOx)



INTRODUCCIÓN	EFFECTOS SOBREAL.	TIPOS DE SOBREAL.	<b>ACOPLAMIENTO CON MOTOR</b>	TENDENCIAS MEP/MEC	R
--------------	-------------------	-------------------	-------------------------------	--------------------	---

## TENDENCIAS ACTUALES

### □ MEP

- Implantación creciente pero no generalizada (riesgo de detonación)
- Sobrealimentación a baja presión – alta presión
- Turbosobrealimentación o compresores mecánicos

### □ MEC

- Sobrealimentación casi generalizada
- Únicamente turbosobrealimentación
- Uso de *intercooler* muy extendido

INTRODUCCIÓN	EFFECTOS SOBREAL.	TIPOS DE SOBREAL.	ACOPLAMIENTO CON MOTOR	TENDENCIAS MEP/MEC	R
--------------	-------------------	-------------------	------------------------	--------------------	---

## TENDENCIAS ACTUALES

### □ Rangos actuales

	$P_{adm}$ maxi. (bar)	Enfriador	PME (bar)
MEP automoción	≈1.3 (2.5)	Frecuente	≈15
MEC automoción	1.7 a 2.8	Frecuente/gen.	13 a 23
MEC transp. pesado	2.5 a 3.5	Generalizado	16 a 25
MEC estacionario	> 2.5	Generalizado	> 20

### □ Sistemas en desarrollo:

- Asistencia eléctrica en transitorios
- Sistemas en serie (alta presión –  $p_2 = 5.5$  bar /  $p_{me} = 33$  bar)
- Sistemas secuenciales



INTRODUCCIÓN	EFFECTOS SOBREAL.	TIPOS DE SOBREAL.	ACOPLAMIENTO CON MOTOR	TENDENCIAS MEP/MEC	R
--------------	-------------------	-------------------	------------------------	--------------------	---

## RESUMEN

- ❑ Sobrealimentación
  - Incremento importante de  $p_{me}$
  - Limitada por tensiones mecánicas y térmicas
  - Intercooler:  $\uparrow \rho_a$ ;  $\downarrow$  tensiones térmicas
- ❑ Turbosobrealimentación
  - Mejora  $\eta_i$ ,  $\eta_m$  y  $\eta_e$
  - Problemas de acoplamiento
  - Casi generalizado en MEC
- ❑ Influencia sobre el comportamiento del motor
  - Respuesta del turbogrupo variable  $\rightarrow$  afecta a la curva de par del motor y a la respuesta dinámica
  - Incremento de P y T afecta al proceso de combustión y a las emisiones de contaminantes

INTRODUCCIÓN	EFECTOS SOBREAL.	TIPOS DE SOBREAL.	ACOPLAMIENTO CON MOTOR	TENDENCIAS MEP/MEC	R
--------------	------------------	-------------------	------------------------	--------------------	---

## BIBLIOGRAFÍA

- ❑ F. Payri y J.M. Desantes  
"Motores de Combustión Interna Alternativos" (Cap. 11)
- ❑ R. Stone  
"Introduction to Internal Combustion Engines" (Cap. 9)
- ❑ R. van Basshuysen y F. Schäfer  
"Internal Combustion Engine Handbook: Basics, Components, Systems and Perspectives" (Cap. 11)
- ❑ N. Watson y M.S. Janota  
"Turbocharging the Internal Combustion Engine"

## CONTENIDO

- Introducción
- Combustión homogénea en MEP
- Combustión estratificada en MEP
- Proceso de combustión en MEC
- Resumen

INTRODUCCIÓN	COMBUSTIÓN MEP HOMOG.	MEP CARGA ESTRATIFICADA	COMBUSTIÓN MEC	R
--------------	--------------------------	----------------------------	----------------	---

## INTRODUCCIÓN

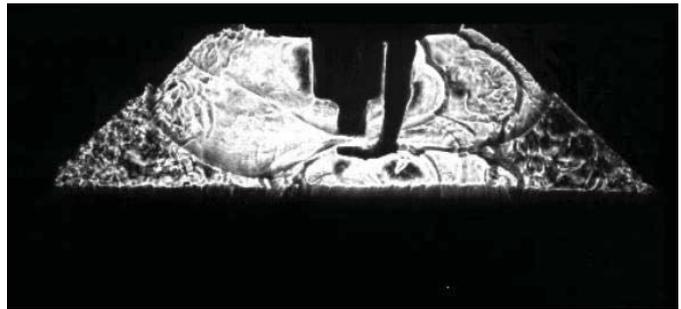
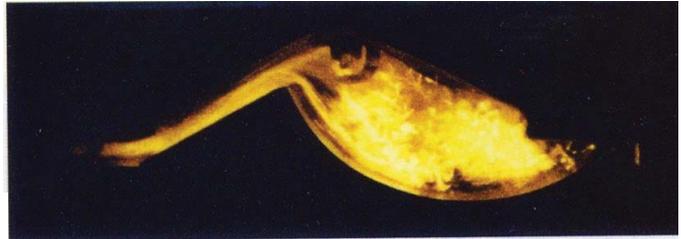
- La combustión de la mezcla en el cilindro es uno de los fenómenos que controlan la potencia, rendimiento y las emisiones del motor
- Importancia de la combustión sobre el funcionamiento de los MCIA:
  - Rendimiento de la combustión →  $\eta_i$
  - Velocidad de la combustión →  $\eta_i$
  - Formación de contaminantes
  - Combustión anormal
- Existen diferentes conceptos según el modo de preparara la carga y de encenderla:
  - Homogénea /no homogénea
  - Encendido provocado / encendido por compresión

INTRODUCCIÓN	COMBUSTIÓN MEP HOMOG.	MEP CARGA ESTRATIFICADA	COMBUSTIÓN MEC	R
--------------	--------------------------	----------------------------	----------------	---

# INTRODUCCIÓN

Estudio del proceso de combustión:

- Visualización
- Evolución de la  $p_{cil}$

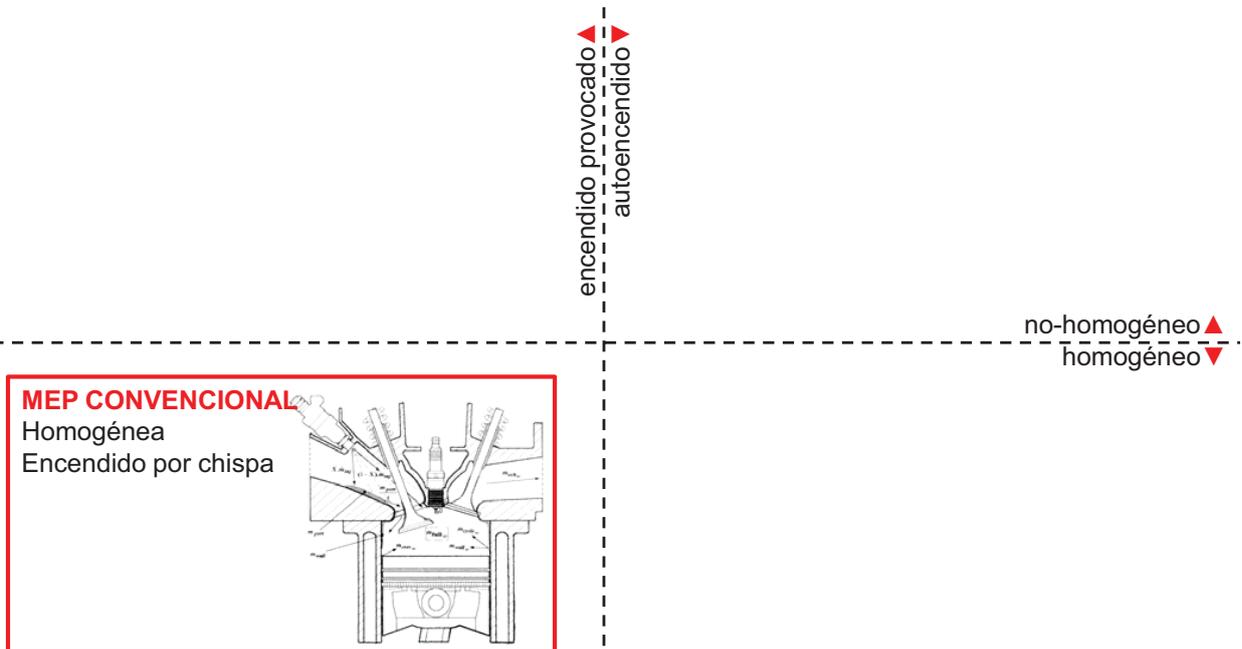


$$p(\alpha) \xrightarrow{V(\alpha), m_a, m_{res}, m_f} T(\alpha), FQL(\alpha)$$

INTRODUCCIÓN	COMBUSTIÓN MEP HOMOG.	MEP CARGA ESTRATIFICADA	COMBUSTIÓN MEC	R
--------------	-----------------------	-------------------------	----------------	---

# INTRODUCCIÓN

MEP convencional



INTRODUCCIÓN	COMBUSTIÓN MEP HOMOG.	MEP CARGA ESTRATIFICADA	COMBUSTIÓN MEC	R
--------------	-----------------------	-------------------------	----------------	---

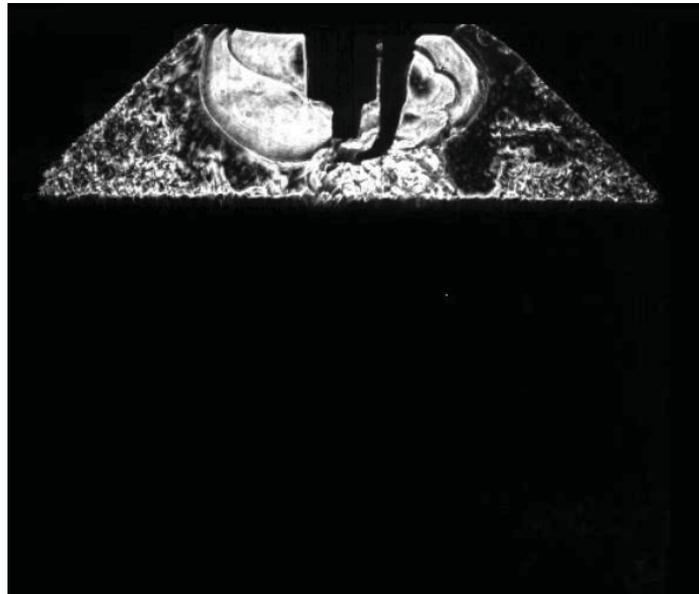
# INTRODUCCIÓN

## MEP CONVENCIONAL

Mezcla homogénea  
 Combustión premezclada  
 Encendido provocado  
 Regulación cuantitativa

Estequiométrica  
 + Fácil postratamiento  
 - Bajo rendimiento  
 - Detonación de la mezcla

Mezclas pobres  
 + Mejora rendimiento  
 - Complica postratamiento



INTRODUCCIÓN	COMBUSTIÓN MEP HOMOG.	MEP CARGA ESTRATIFICADA	COMBUSTIÓN MEC	R
--------------	-----------------------	-------------------------	----------------	---

# INTRODUCCIÓN

MEC convencional

encendido provocado ▲  
 autoencendido ▼

**MEC CONVENCIONAL**  
 No homogénea  
 Encendido por compresión

no-homogéneo ▲  
 homogéneo ▼

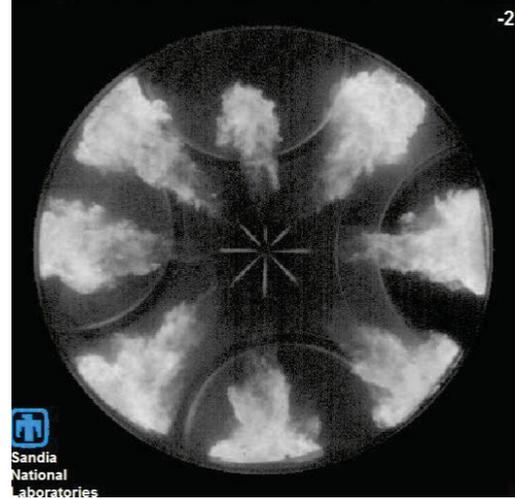
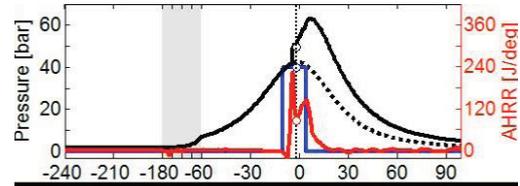
INTRODUCCIÓN	COMBUSTIÓN MEP HOMOG.	MEP CARGA ESTRATIFICADA	COMBUSTIÓN MEC	R
--------------	-----------------------	-------------------------	----------------	---

# INTRODUCCIÓN

## MEC CONVENCIONAL

Mezcla no homogénea  
 Combustión por difusión  
 Autoencendido  
 Regulación cualitativa

- + Buen rendimiento
- Difícil postratamiento (NOx)
- Motor caro



INTRODUCCIÓN	COMBUSTIÓN MEP HOMOG.	MEP CARGA ESTRATIFICADA	COMBUSTIÓN MEC	R
--------------	-----------------------	-------------------------	----------------	---

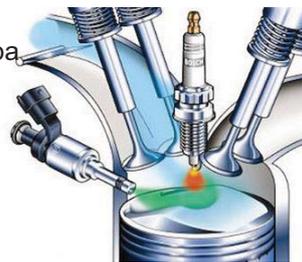
# INTRODUCCIÓN

☐ MEP con carga estratificada (inyección directa gasolina)

## MEP CARGA ESTRATIFICADA

No homogénea  
 Encendido por chispa

Mezcla (muy) pobre



encendido provocado  
 autoencendido

no-homogéneo ▲  
 homogéneo ▼

INTRODUCCIÓN	COMBUSTIÓN MEP HOMOG.	MEP CARGA ESTRATIFICADA	COMBUSTIÓN MEC	R
--------------	-----------------------	-------------------------	----------------	---

# INTRODUCCIÓN

## MEP CARGA ESTRATIFICADA

Mezcla no homogénea, muy pobre  
Requerimientos inyección similar a diesel

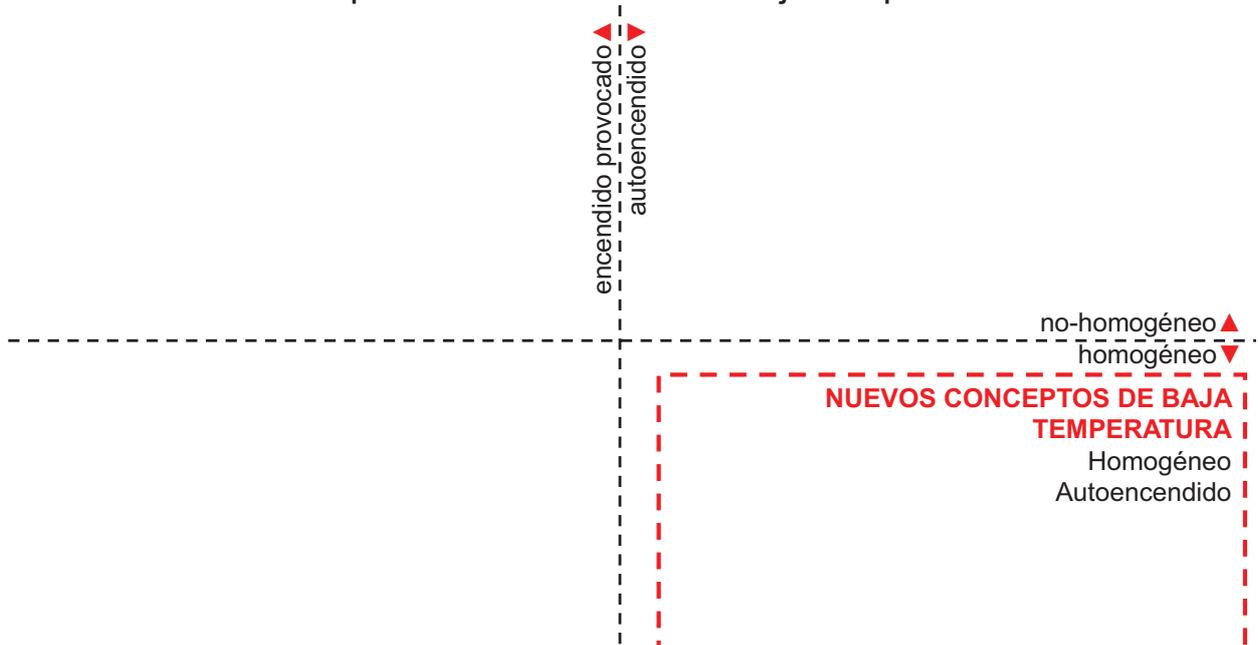
- + Mejora rendimiento respecto a gasolina convencional
- Complica postratamiento
- Regulación compleja
- Control complejo de la mezcla
- Precisa cambios de modo



INTRODUCCIÓN	COMBUSTIÓN MEP HOMOG.	MEP CARGA ESTRATIFICADA	COMBUSTIÓN MEC	R
--------------	-----------------------	-------------------------	----------------	---

# INTRODUCCIÓN

❑ Nuevos conceptos de combustión de baja temperatura



INTRODUCCIÓN	COMBUSTIÓN MEP HOMOG.	MEP CARGA ESTRATIFICADA	COMBUSTIÓN MEC	R
--------------	-----------------------	-------------------------	----------------	---

# INTRODUCCIÓN

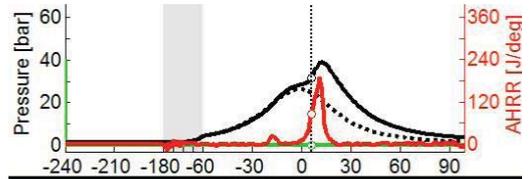
## NUEVOS CONCEPTOS DE COMBUSTIÓN DE BAJA TEMPERATURA

Homogéneo  
Autoencendido

Existen conceptos con diesel (HCCI) y con gasolina (CAI)

- + Buen rendimiento (similar a diesel)
- + Bajas emisiones (similar a gasolina)
- **Regulación** muy compleja
- Precisa **cambios de modo**

Problemas aún no resueltos (**tecnología experimental**)



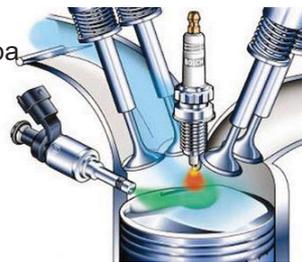
INTRODUCCIÓN	COMBUSTIÓN MEP HOMOG.	MEP CARGA ESTRATIFICADA	COMBUSTIÓN MEC	R
--------------	-----------------------	-------------------------	----------------	---

# INTRODUCCIÓN

### MEP CARGA ESTRATIFICADA

No homogénea  
Encendido por chispa

Mezcla (muy) pobre



encendido provocado  
autoencendido

### MEC CONVENCIONAL

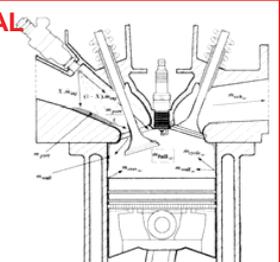
No homogénea  
Encendido por compresión



no-homogéneo ▲  
homogéneo ▼

### MEP CONVENCIONAL

Homogénea  
Encendido por chispa



### NUEVOS CONCEPTOS DE BAJA TEMPERATURA

Homogéneo  
Autoencendido

diesel      gasolina  
HCCI      CAI

INTRODUCCIÓN	COMBUSTIÓN MEP HOMOG.	MEP CARGA ESTRATIFICADA	COMBUSTIÓN MEC	R
--------------	-----------------------	-------------------------	----------------	---

## PROCESO DE COMBUSTIÓN EN MEP

### ❑ Fenomenología del proceso:

- Mezcla homogénea
- Encendido provocado
- Propagación del frente de llama
  - Velocidad de combustión
  - Tiempo de combustión
- Combustión subsónica – deflagración
- Combustión turbulenta
- Dispersión cíclica

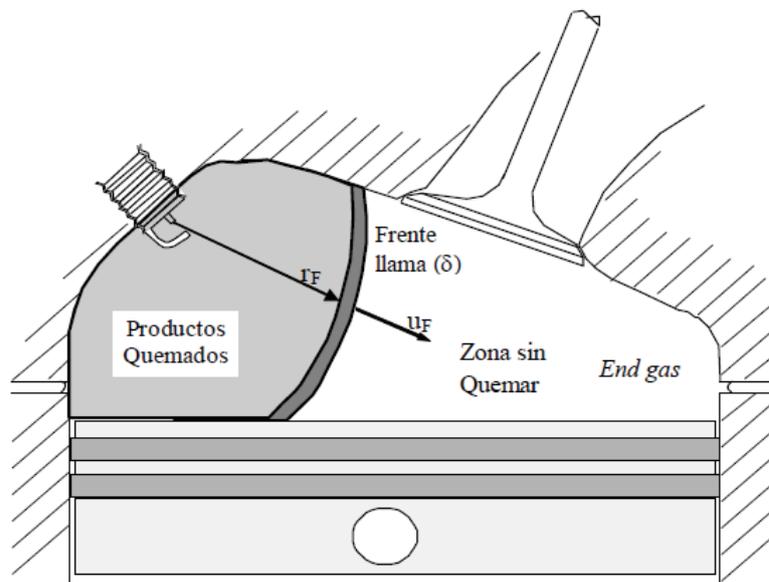
### ❑ Combustible MEP:

- Elevada **volatilidad**: debe permitir la formación de una mezcla homogénea
- Resistencia a la autoinflamación: **elevado número de octano (NO)**
- Gasolina, GLP, GN, etanol, metanol

INTRODUCCIÓN	COMBUSTIÓN MEP HOMOG.	MEP CARGA ESTRATIFICADA	COMBUSTIÓN MEC	R
--------------	-----------------------	-------------------------	----------------	---

## PROCESO DE COMBUSTIÓN EN MEP

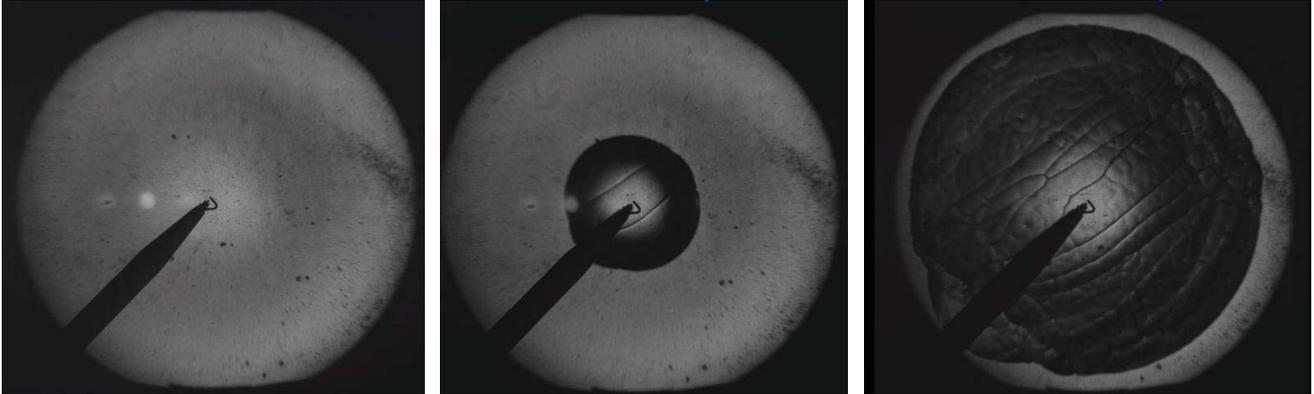
### ❑ Frente de llama:



INTRODUCCIÓN	COMBUSTIÓN MEP HOMOG.	MEP CARGA ESTRATIFICADA	COMBUSTIÓN MEC	R
--------------	-----------------------	-------------------------	----------------	---

## PROCESO DE COMBUSTIÓN EN MEP

### □ Frente de llama:



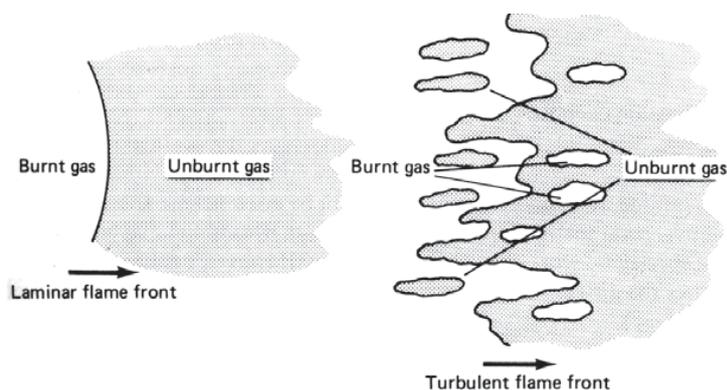
bomba a volumen constante

INTRODUCCIÓN	<b>COMBUSTIÓN MEP HOMOG.</b>	MEP CARGA ESTRATIFICADA	COMBUSTIÓN MEC	R
--------------	------------------------------	-------------------------	----------------	---

## PROCESO DE COMBUSTIÓN EN MEP

### □ Velocidad del frente de llama. Combustión turbulenta:

- Turbulencias en el campo de velocidad (micro y macro)
- Plegamiento en el frente de llama → gran superficie
- Velocidad de combustión turbulenta muy rápida

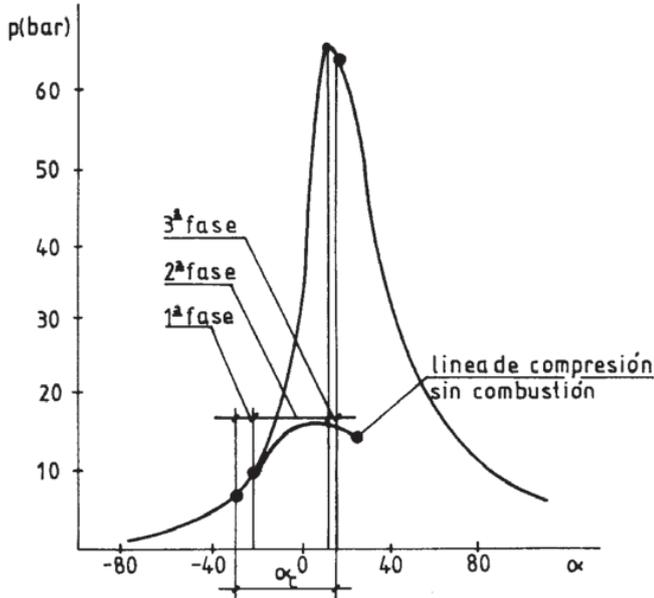


- La turbulencia aumenta con  $n$
- Los MEP pueden operar a alto  $n$

INTRODUCCIÓN	<b>COMBUSTIÓN MEP HOMOG.</b>	MEP CARGA ESTRATIFICADA	COMBUSTIÓN MEC	R
--------------	------------------------------	-------------------------	----------------	---

## PROCESO DE COMBUSTIÓN EN MEP

### □ Fases de la combustión



–Encendido: chispa eléctrica.

–Fase inicial ( $\alpha_1$ ): desde el salto de la chispa hasta que la presión supera la correspondiente a la compresión. Combustión laminar.

–Fase principal ( $\alpha_2$ ): finaliza cuando se alcanza la presión máxima. Es turbulenta, en ella se quema la mayor parte de la mezcla.

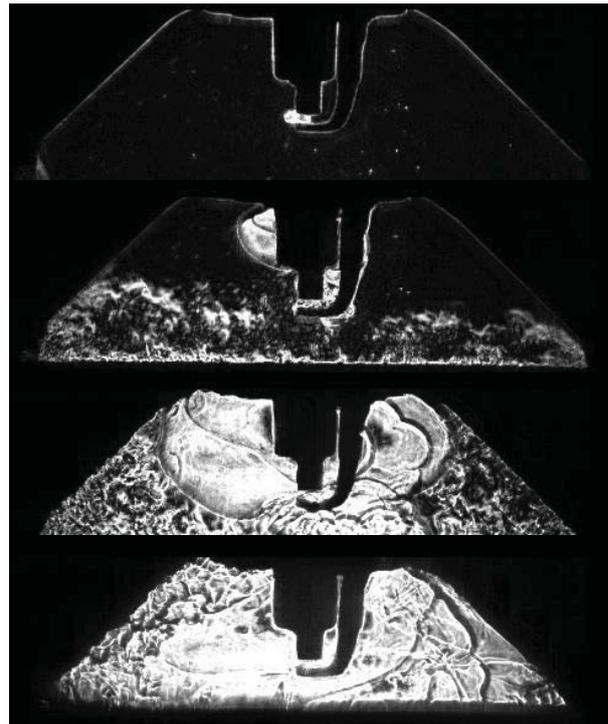
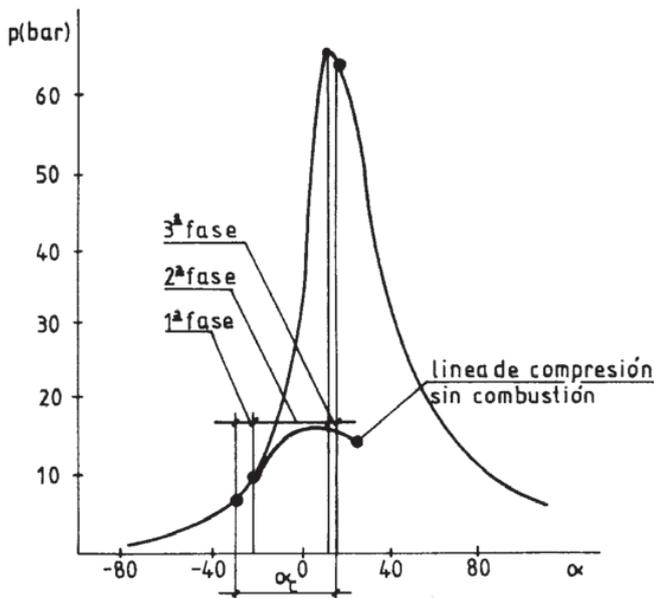
–Fase final o residual ( $\alpha_3$ ): Es laminar y es difícil precisar dónde termina. En ella se quema la mezcla cercana a las paredes.

–Extinción

INTRODUCCIÓN	<b>COMBUSTIÓN MEP HOMOG.</b>	MEP CARGA ESTRATIFICADA	COMBUSTIÓN MEC	R
--------------	------------------------------	-------------------------	----------------	---

## PROCESO DE COMBUSTIÓN EN MEP

### □ Fases de la combustión



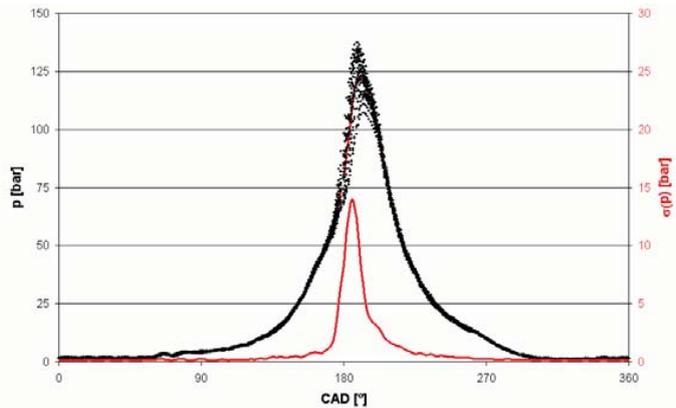
INTRODUCCIÓN	<b>COMBUSTIÓN MEP HOMOG.</b>	MEP CARGA ESTRATIFICADA	COMBUSTIÓN MEC	R
--------------	------------------------------	-------------------------	----------------	---

# PROCESO DE COMBUSTIÓN EN MEP

## FACTORES QUE AFECTAN A LA COMBUSTIÓN

- ❑ Factores de diseño:
  - Cámara de combustión
  - Posición de las bujías
- ❑ Factores de funcionamiento:
  - Punto de encendido
  - Dosado
  - Régimen de giro del motor
  - Grado de admisión

❑ Existen variaciones locales en los niveles de turbulencia, dosado, EGR, etc. → **dispersión cíclica**

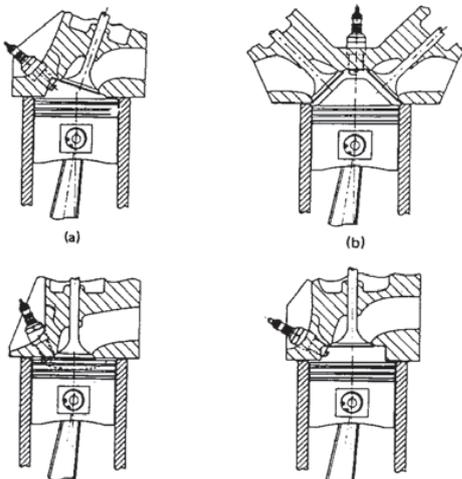


presión en cámara en varios ciclos consecutivos en un MEP-2T de competición

INTRODUCCIÓN	COMBUSTIÓN MEP HOMOG.	MEP CARGA ESTRATIFICADA	COMBUSTIÓN MEC	R
--------------	-----------------------	-------------------------	----------------	---

# FACTORES QUE AFECTAN A LA COMBUSTIÓN

- ❑ Cámara de combustión
  - Debe favorecer la turbulencia y ser de pequeñas dimensiones para que  $\alpha_c$  sea pequeño



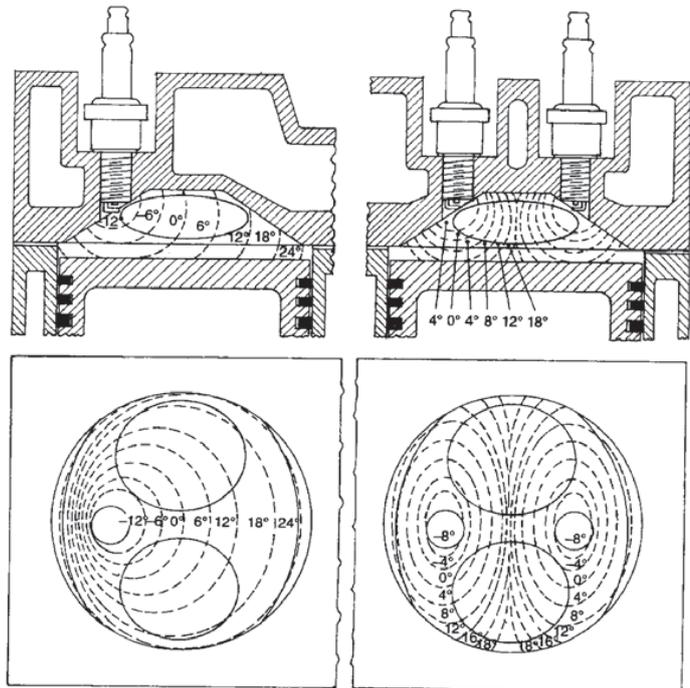
- **De cuña:** concentra la mayor parte de la mezcla cerca de la bujía. “End-gas” pequeño.
- **Hemiesférica:** el recorrido de frente de llama es pequeño y simétrico. Muy compacta.
- **Labrada en pistón:** es compacta y de alta turbulencia.
- **Labrada en la culata:** es compacta, pero concentra mayor masa en “end gas”.

INTRODUCCIÓN	COMBUSTIÓN MEP HOMOG.	MEP CARGA ESTRATIFICADA	COMBUSTIÓN MEC	R
--------------	-----------------------	-------------------------	----------------	---

# FACTORES QUE AFECTAN A LA COMBUSTIÓN

## Posición de las bujías

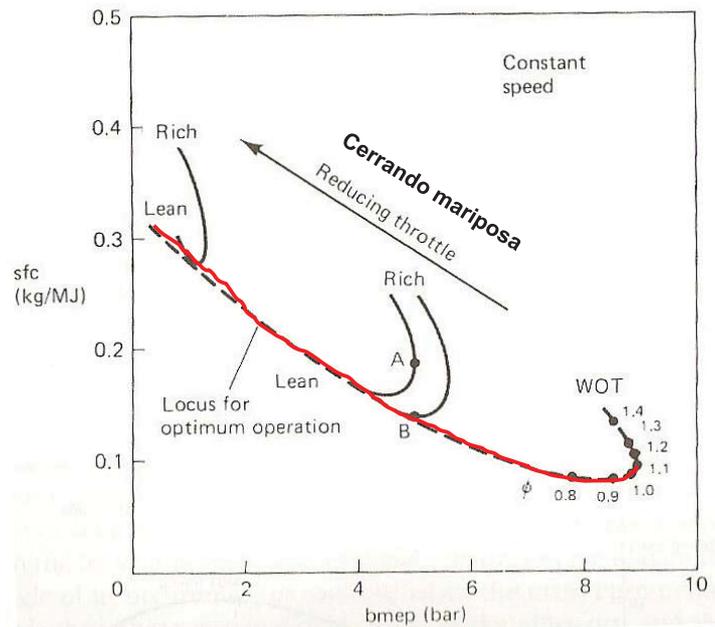
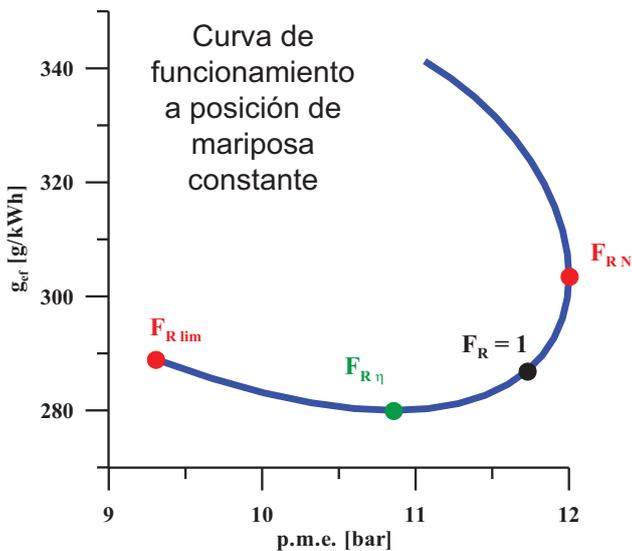
- Centrada para minimizar el recorrido del frente de llama
- Situada en zona de alta turbulencia para disminuir la primera fase de la combustión
- Situada en la zona más caliente
- Posibilidad de utilizar varias bujías, o varias chispas por bujía



INTRODUCCIÓN	COMBUSTIÓN MEP HOMOG.	MEP CARGA ESTRATIFICADA	COMBUSTIÓN MEC	R
--------------	-----------------------	-------------------------	----------------	---

# FACTORES QUE AFECTAN A LA COMBUSTIÓN

## Efecto del dosado



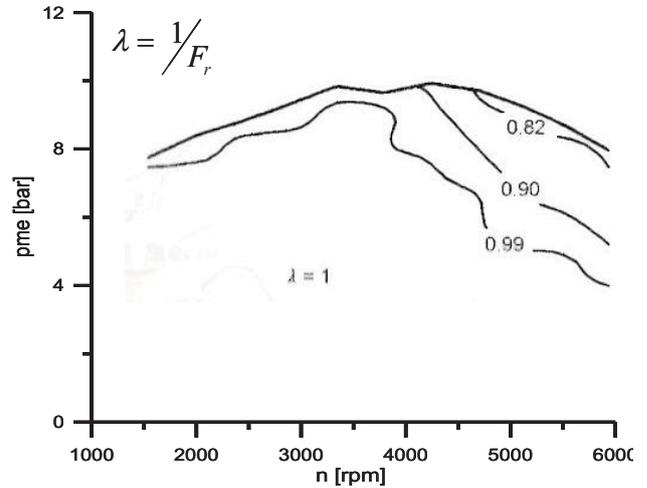
*El uso de mezclas pobres ( $F_R < 1$ ) permite aumentar el rendimiento al disminuir la necesidad de estrangulamiento*

INTRODUCCIÓN	COMBUSTIÓN MEP HOMOG.	MEP CARGA ESTRATIFICADA	COMBUSTIÓN MEC	R
--------------	-----------------------	-------------------------	----------------	---

# FACTORES QUE AFECTAN A LA COMBUSTIÓN

- ❑ En los motores modernos existen varias opciones en el diseño del mapa de dosado:
  - $Fr = 1 \leftrightarrow$  catalizador 3v
  - $Fr > 1$  a alta carga  $\leftrightarrow$  prestaciones
  - $Fr < 1$  a baja carga  $\leftrightarrow$  consumo

❑ Ejemplo:

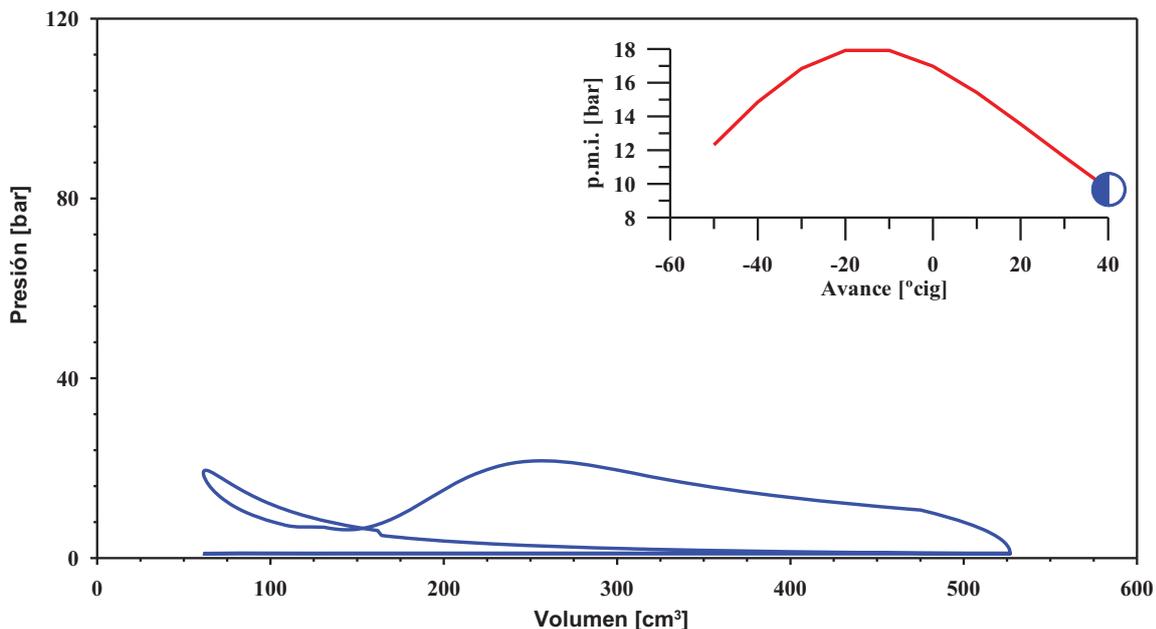


*La decisión afecta al sistema de postratamiento aplicable*

INTRODUCCIÓN	COMBUSTIÓN MEP HOMOG.	MEP CARGA ESTRATIFICADA	COMBUSTIÓN MEC	R
--------------	-----------------------	-------------------------	----------------	---

# FACTORES QUE AFECTAN A LA COMBUSTIÓN

❑ Efecto del avance de encendido:

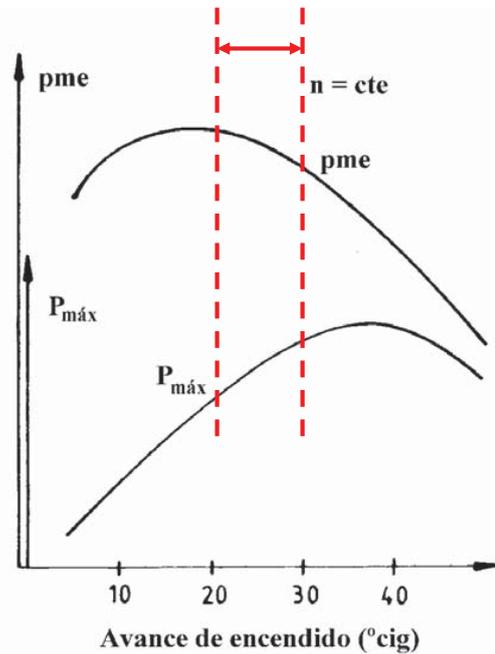


INTRODUCCIÓN	COMBUSTIÓN MEP HOMOG.	MEP CARGA ESTRATIFICADA	COMBUSTIÓN MEC	R
--------------	-----------------------	-------------------------	----------------	---

# FACTORES QUE AFECTAN A LA COMBUSTIÓN

## ❑ Punto de encendido:

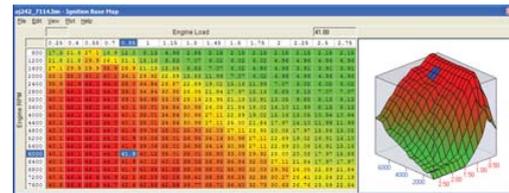
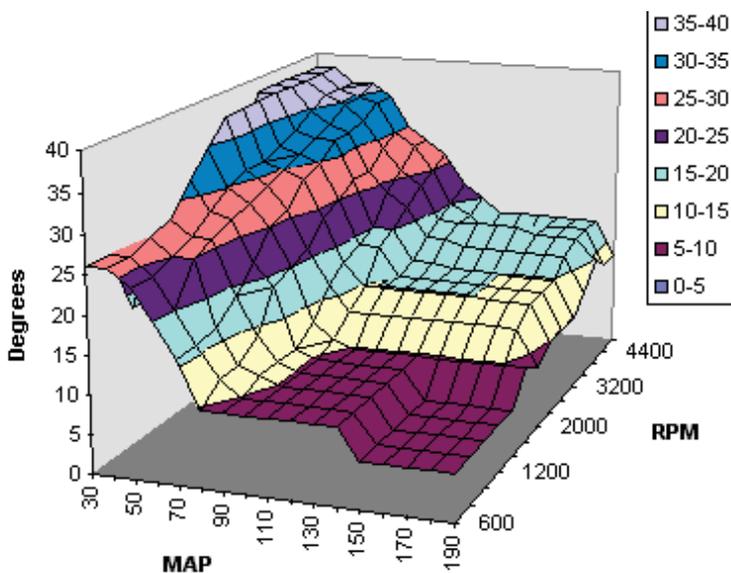
- Es el parámetro de control que permite centrar la combustión
- Al adelantar el encendido se quema más mezcla en la carrera de compresión, con lo que aumenta la presión máxima
- Al aumentar el avance se incrementa el riesgo de *combustión detonante*
- El punto de encendido se adapta al punto de operación (régimen y carga)



INTRODUCCIÓN	COMBUSTIÓN MEP HOMOG.	MEP CARGA ESTRATIFICADA	COMBUSTIÓN MEC	R
--------------	-----------------------	-------------------------	----------------	---

# FACTORES QUE AFECTAN A LA COMBUSTIÓN

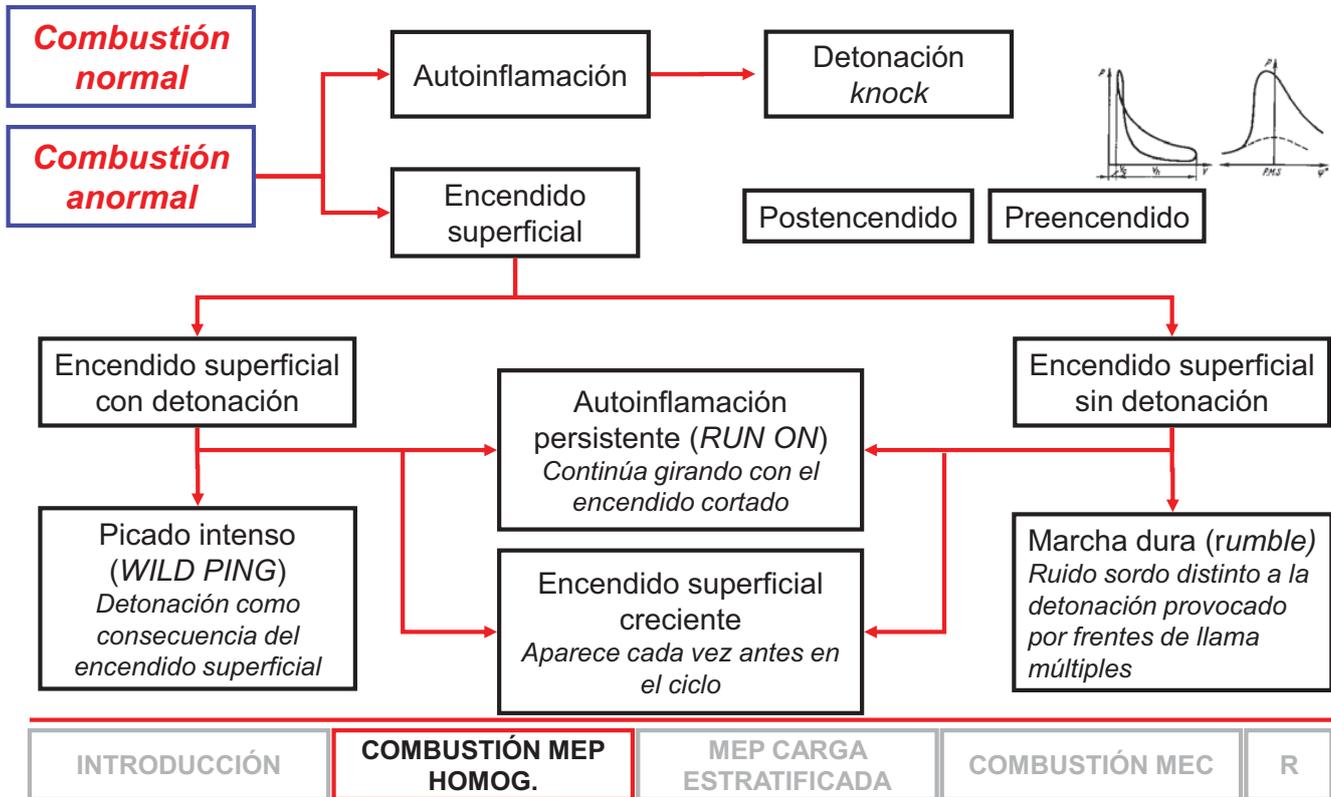
## ❑ Mapa de avance de encendido:



- ❑ En general, el avance de encendido debe aumentarse al:
  - Disminuir la carga (= presión en el colector de admisión MAP)
  - Aumentar el régimen de giro

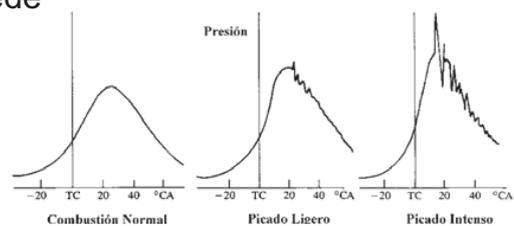
INTRODUCCIÓN	COMBUSTIÓN MEP HOMOG.	MEP CARGA ESTRATIFICADA	COMBUSTIÓN MEC	R
--------------	-----------------------	-------------------------	----------------	---

# COMBUSTIÓN ANORMAL EN MEP



# DETONACIÓN

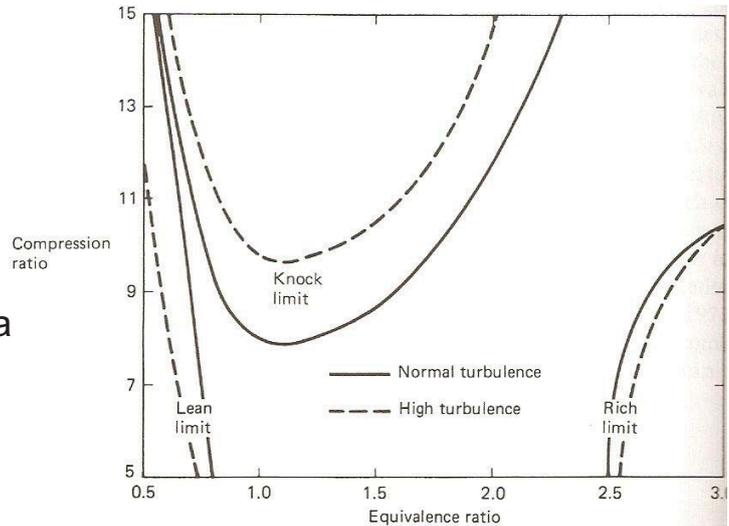
- ❑ Detonación: bajo ciertas circunstancias puede darse el autoencendido de la mezcla: combustión **detonante**
- ❑ Aparece en puntos a elevada presión y temperatura, tras un **tiempo de retraso ( $\tau$ )**
- ❑ Genera ondas de presión que rebotan en la cámara de combustión hasta ser disipadas por rozamiento
  - Efectos destructivos sobre el motor (pistón y culata de aluminio)
  - Factor limitante de potencia y rendimiento en MEP
  - Ruido característico
  - Requerimientos sobre el combustible
- ❑ Grado de detonación: ligero es admisible
- ❑ Detonación más probable: bajo n, alta carga



# DETONACIÓN

❑ Para reducir la aparición de la detonación

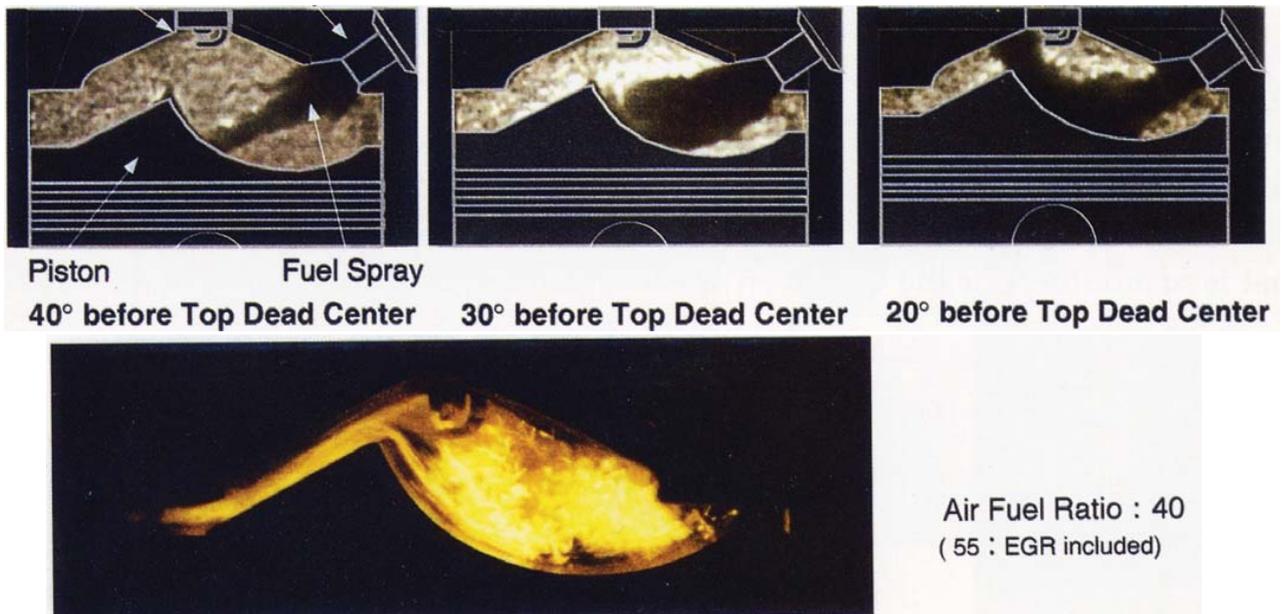
- Limitar relación de compresión
- Especificaciones de combustible con alto índice de octano
- Diseño cámara de alta turbulencia
- Límite al avance de encendido



INTRODUCCIÓN	COMBUSTIÓN MEP HOMOG.	MEP CARGA ESTRATIFICADA	COMBUSTIÓN MEC	R
--------------	-----------------------	-------------------------	----------------	---

# COMBUSTIÓN MEP CARGA ESTRATIFICADA

❑ Funcionamiento con mezcla estratificada: permite ↓↓ F global



INTRODUCCIÓN	COMBUSTIÓN MEP HOMOG.	MEP CARGA ESTRATIFICADA	COMBUSTIÓN MEC	R
--------------	-----------------------	-------------------------	----------------	---

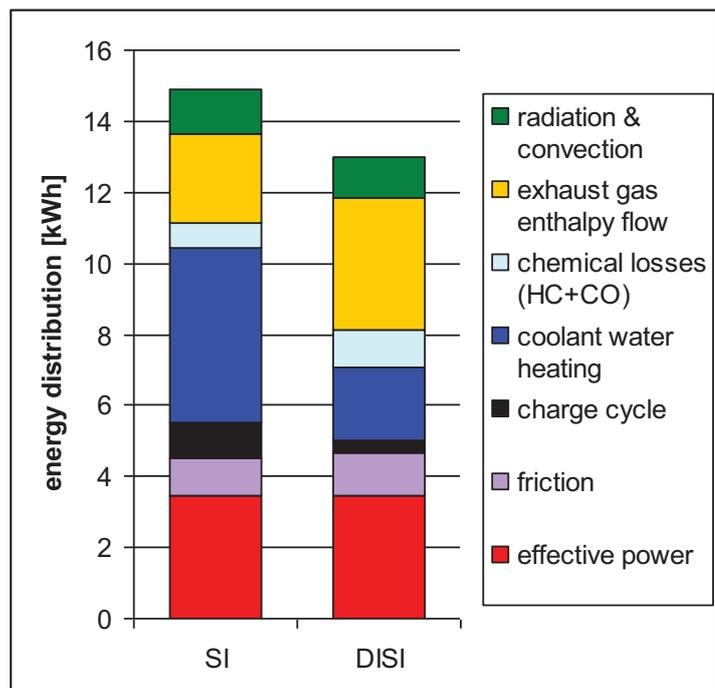
## COMBUSTIÓN MEP CARGA ESTRATIFICADA

- ❑ Combustión con mezclas estratificadas/inyección directa gasolina:
  - Objetivo: reducir el trabajo de bombeo por eliminación (parcial) de la mariposa
  - Dosados globalmente pobres (por debajo del límite de inflamabilidad) a baja carga
  - Estratificación de la mezcla
  - Requiere un control muy preciso del sistema de inyección (similar a MEC)

INTRODUCCIÓN	COMBUSTIÓN MEP HOMOG.	MEP CARGA ESTRATIFICADA	COMBUSTIÓN MEC	R
--------------	-----------------------	-------------------------	----------------	---

## COMBUSTIÓN MEP CARGA ESTRATIFICADA

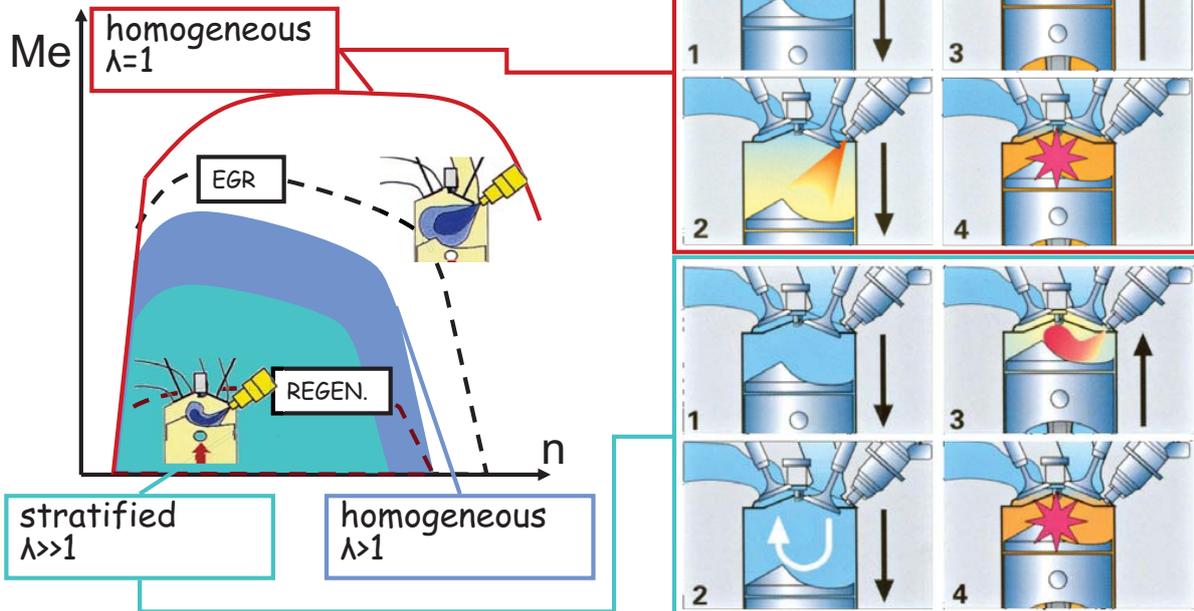
- ❑ Efecto del empleo de MEP de carga estratificada a baja carga:
  - Disminución pérdidas de calor al refrigerante
  - Disminución trabajo de bombeo



INTRODUCCIÓN	COMBUSTIÓN MEP HOMOG.	MEP CARGA ESTRATIFICADA	COMBUSTIÓN MEC	R
--------------	-----------------------	-------------------------	----------------	---

## COMBUSTIÓN MEP CARGA ESTRATIFICADA

Adaptación del modo de funcionamiento



INTRODUCCIÓN

COMBUSTIÓN MEP  
HOMOG.MEP CARGA  
ESTRATIFICADA

COMBUSTIÓN MEC

R

## PROCESO DE COMBUSTIÓN EN MEC

- ❑ A diferencia de en MEP, en los MEC el proceso de combustión se produce en un medio altamente heterogéneo
- ❑ Se comprime aire y en las cercanías del PMS se inyecta el combustible
- ❑ La combustión se produce por la autoinflamación del combustible
- ❑ El control de la combustión se realiza actuando sobre:
  - Cantidad de combustible (dosado global)
  - Inicio de la inyección
  - Características de la inyección

INTRODUCCIÓN

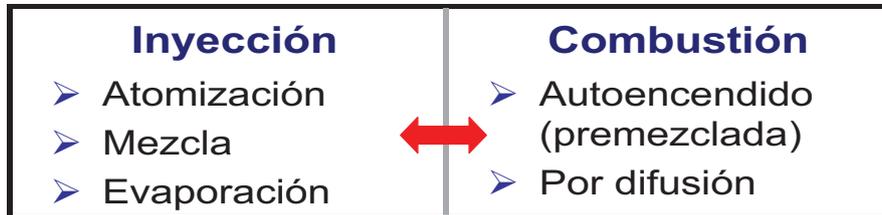
COMBUSTIÓN MEP  
HOMOG.MEP CARGA  
ESTRATIFICADA

COMBUSTIÓN MEC

R

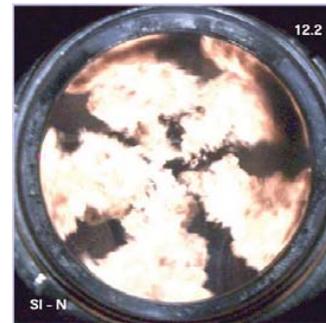
## PROCESO DE COMBUSTIÓN EN MEC

- ❑ Gran interrelación entre combustión e inyección



- ❑ Condicionado por:

- La ley de inyección
- Calidad de los chorros
- Condiciones de  $p$  y  $T$
- El movimiento del aire



INTRODUCCIÓN

COMBUSTIÓN MEP  
HOMOG.MEP CARGA  
ESTRATIFICADA

COMBUSTIÓN MEC

R

## PROCESO DE COMBUSTIÓN EN MEC



INTRODUCCIÓN

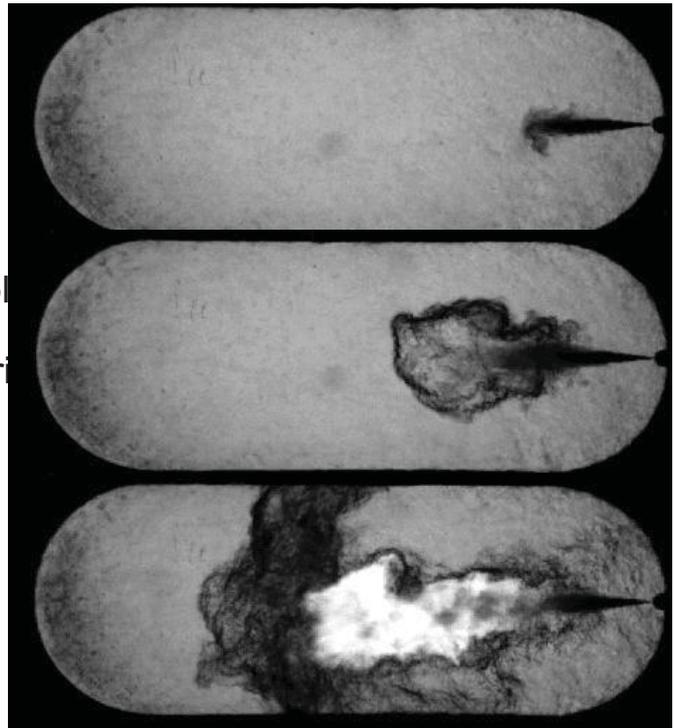
COMBUSTIÓN MEP  
HOMOG.MEP CARGA  
ESTRATIFICADA

COMBUSTIÓN MEC

R

## FENOMENOLOGÍA DEL PROCESO

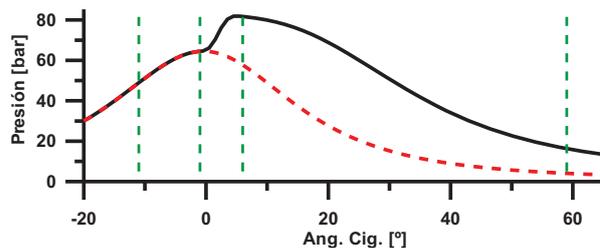
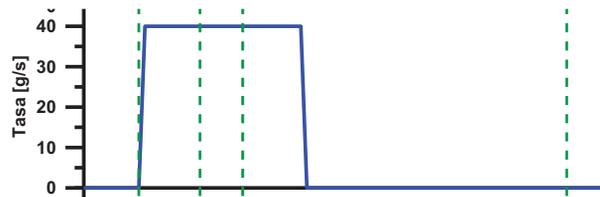
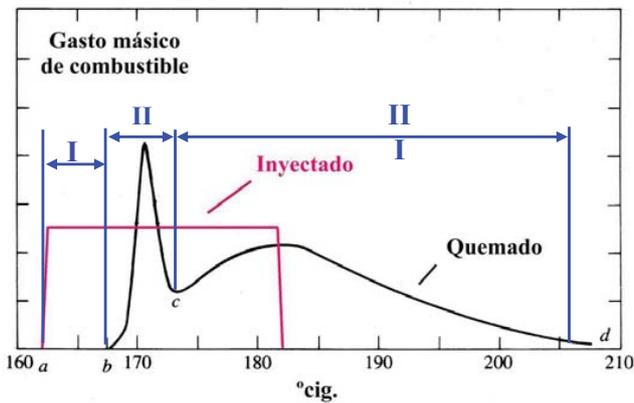
- Combustión en mezcla heterogénea
- Autoencendido de la mezcla:
  - Elevada relación de compresión
  - Combustible autoinflamable (alto número de cetano NC)
- Dosado global < estequiométrico
- Proceso relativamente lento: régimen máximo limitado



INTRODUCCIÓN	COMBUSTIÓN MEP HOMOG.	MEP CARGA ESTRATIFICADA	COMBUSTIÓN MEC	R
--------------	-----------------------	-------------------------	----------------	---

## FASES DE LA COMBUSTIÓN

- Se definen tres fases diferenciadas:



INTRODUCCIÓN	COMBUSTIÓN MEP HOMOG.	MEP CARGA ESTRATIFICADA	COMBUSTIÓN MEC	R
--------------	-----------------------	-------------------------	----------------	---

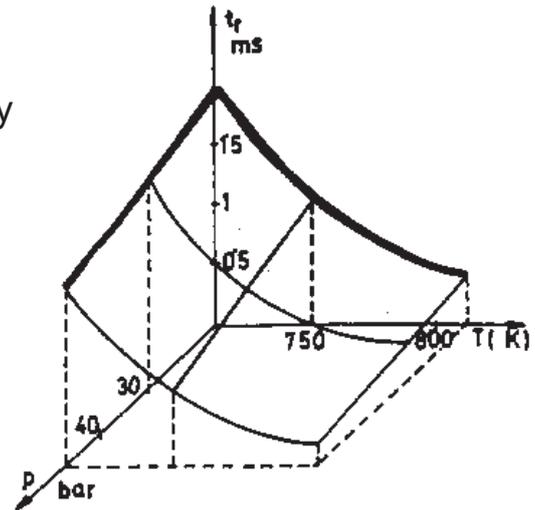
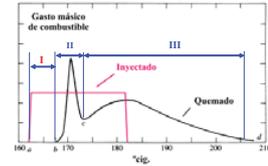
## FASES DE LA COMBUSTIÓN

### □ Fase I: tiempo de retraso

➤ Tiempo entre el inicio de la inyección y el comienzo de la combustión

- **Retraso físico** (10 %). Vaporización y homogeneización del combustible. Depende de las características del chorro
- **Retraso químico** (90%). Prereacciones para el inicio de la combustión. Depende del **NC**,  **$\underline{I}$**  y **p**

**A mayor T, menor  $t_r$**



INTRODUCCIÓN

COMBUSTIÓN MEP  
HOMOG.MEP CARGA  
ESTRATIFICADA

COMBUSTIÓN MEC

R

## FASES DE LA COMBUSTIÓN

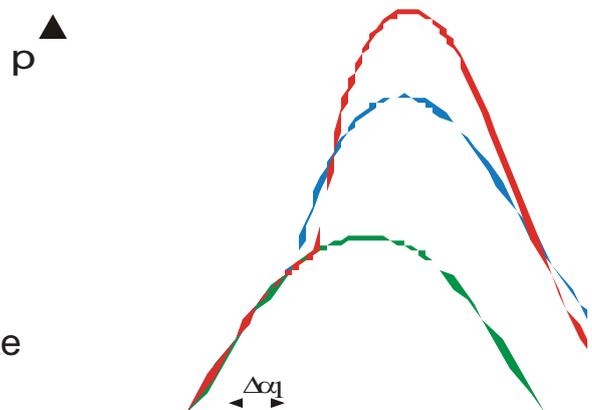
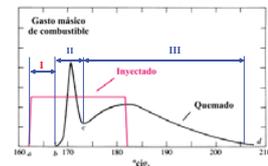
### □ Fase II: combustión premezclada

➤ Autoencendido del combustible vaporizado y mezclado con aire en la fase anterior

➤ Aumento brusco de presión (ruido). Depende de:

- Cantidad de combustible inyectado durante el tiempo de retraso
- Gasificación de este combustible y mezcla con aire
- Tipo de cámara de combustión

➤ **Marcha dura:** cantidad importante de combustible quemado en esta fase



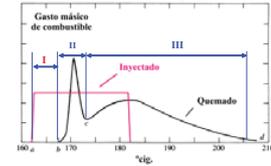
INTRODUCCIÓN

COMBUSTIÓN MEP  
HOMOG.MEP CARGA  
ESTRATIFICADA

COMBUSTIÓN MEC

R

# FASES DE LA COMBUSTIÓN

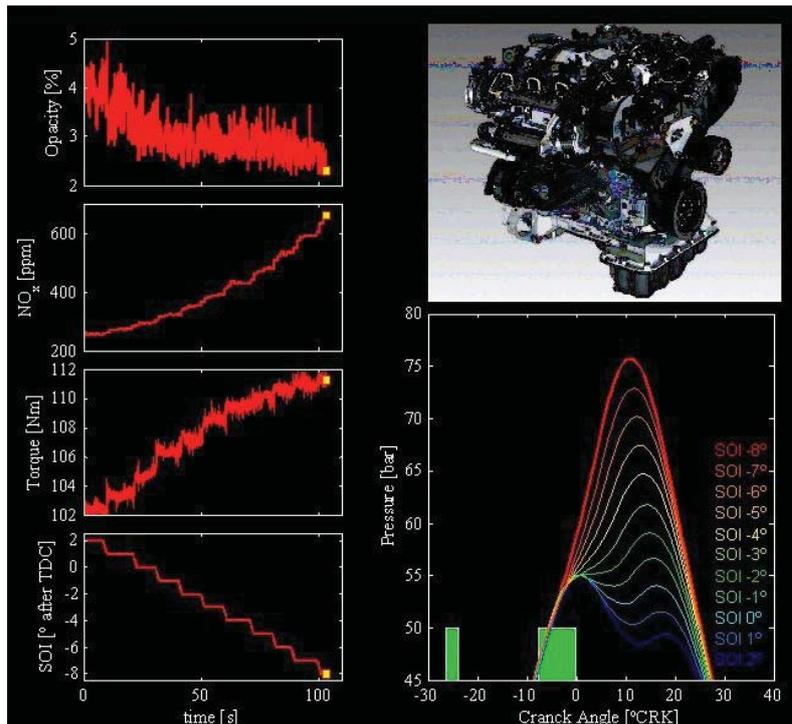


- ❑ Fase III: combustión por difusión
  - Combustión progresiva controlada por:
    - Tasa de inyección
    - Evaporación del combustible
    - Mezcla con el aire
  - Es la fase más importante en los grandes motores diesel (2T lentos)

INTRODUCCIÓN	COMBUSTIÓN MEP HOMOG.	MEP CARGA ESTRATIFICADA	COMBUSTIÓN MEC	R
--------------	-----------------------	-------------------------	----------------	---

# FACTORES QUE AFECTAN A LA COMBUSTIÓN

- ❑ Punto de inyección

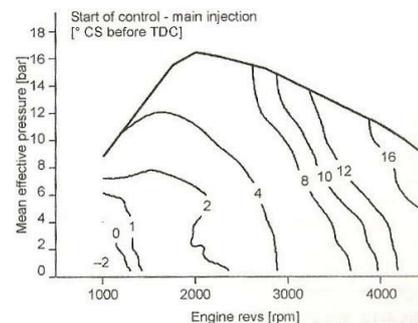
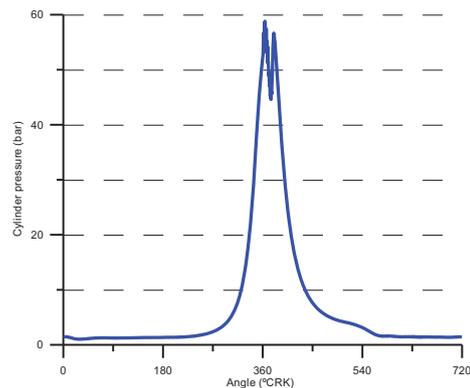


INTRODUCCIÓN	COMBUSTIÓN MEP HOMOG.	MEP CARGA ESTRATIFICADA	COMBUSTIÓN MEC	R
--------------	-----------------------	-------------------------	----------------	---

## FACTORES QUE AFECTAN A LA COMBUSTIÓN

### □ Punto de inyección

- Si la primera fase tiene lugar en las cercanías del PMS, el  $t_r$  se reduce
- Grandes avances aumentan el  $t_r$  y además hacen mayor los gradientes de  $p$  y  $p_{max}$
- Afecta al rendimiento
- En la actualidad, por problemas en la formación de NO<sub>x</sub>, es normal utilizar inyecciones muy retrasadas



INTRODUCCIÓN

COMBUSTIÓN MEP  
HOMOG.MEP CARGA  
ESTRATIFICADA

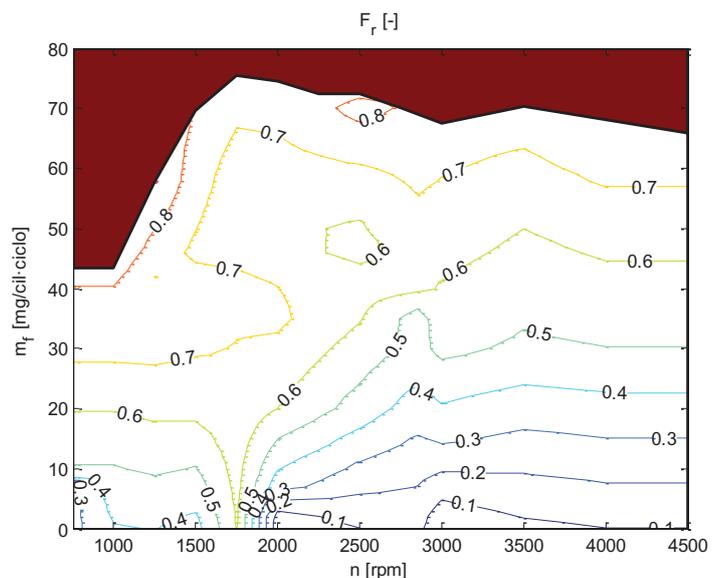
COMBUSTIÓN MEC

R

## FACTORES QUE AFECTAN A LA COMBUSTIÓN

### □ Dosado

- Disminuir  $F$  global aumenta el  $t_r$  por disminuir  $T$
- Límite mínimo de dosado ( $Fr \sim 0.04$ ) → toda la combustión es premezclada, no llega a haber difusión
- Límite máximo de dosado → formación de humo negro (partículas)



INTRODUCCIÓN

COMBUSTIÓN MEP  
HOMOG.MEP CARGA  
ESTRATIFICADA

COMBUSTIÓN MEC

R

## FACTORES QUE AFECTAN A LA COMBUSTIÓN

### ❑ Sobrealimentación

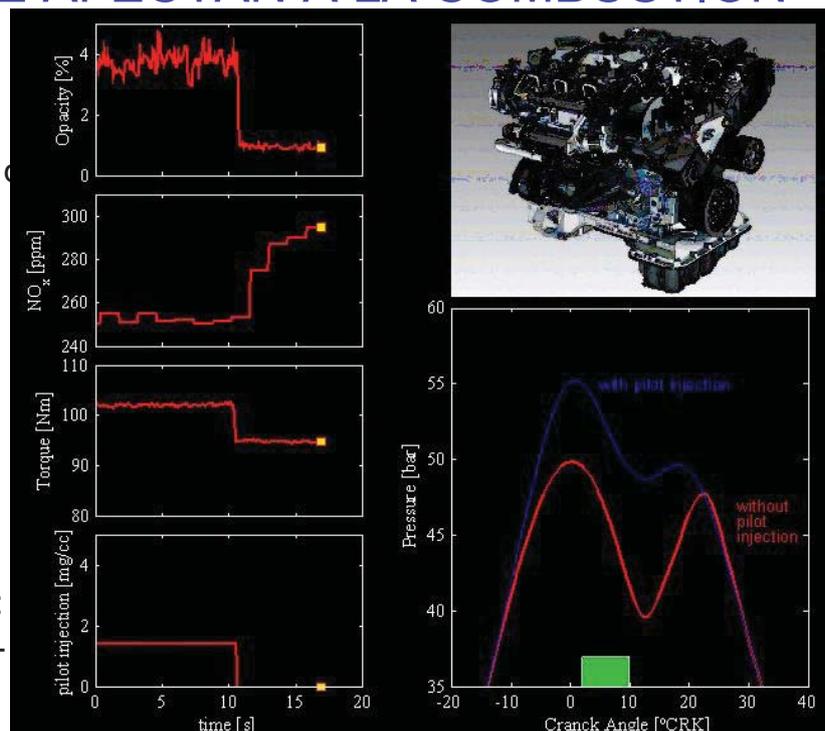
- Reducción de  $t_r$  por aumento de  $p$  y  $T$
- Sin embargo, se debe inyectar mayor cantidad de combustible  
→ gradientes de  $p$  y  $p_{\max}$  inadmisibles
- Soluciones:
  - Modificar la ley de combustión para que la mayoría del combustible se entregue al final de ésta
  - Disminuir avance de inyección (hasta las proximidades del PMS)

INTRODUCCIÓN	COMBUSTIÓN MEP HOMOG.	MEP CARGA ESTRATIFICADA	COMBUSTIÓN MEC	R
--------------	-----------------------	-------------------------	----------------	---

## FACTORES QUE AFECTAN A LA COMBUSTIÓN

### ❑ Otros factores

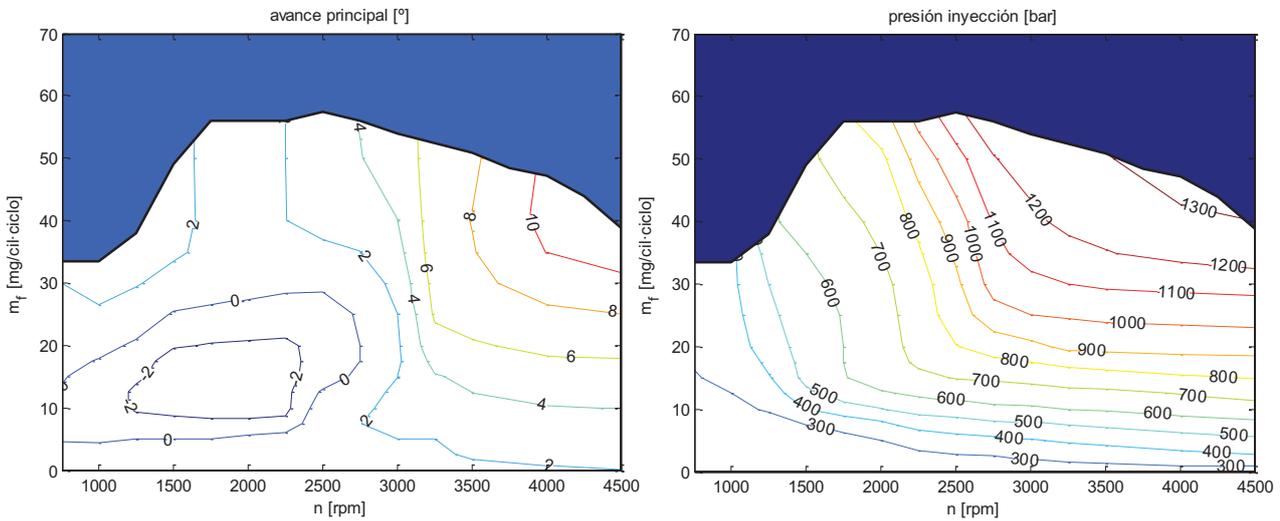
- Características del combustible: número de cetano
- Temperatura del refrigerante
- Condiciones en el colector de admisión
- Recirculación de gases de escape
- Técnicas de inyección avanzadas: inyección piloto, post-inyección, etc.



INTRODUCCIÓN	COMBUSTIÓN MEP HOMOG.	MEP CARGA ESTRATIFICADA	COMBUSTIÓN MEC	R
--------------	-----------------------	-------------------------	----------------	---

# FACTORES QUE AFECTAN A LA COMBUSTIÓN

Mapas de inyección: avance principal y presión de inyección



INTRODUCCIÓN	COMBUSTIÓN MEP HOMOG.	MEP CARGA ESTRATIFICADA	<b>COMBUSTIÓN MEC</b>	R
--------------	-----------------------	-------------------------	-----------------------	---

# CÁMARAS DE COMBUSTIÓN

Objetivos:

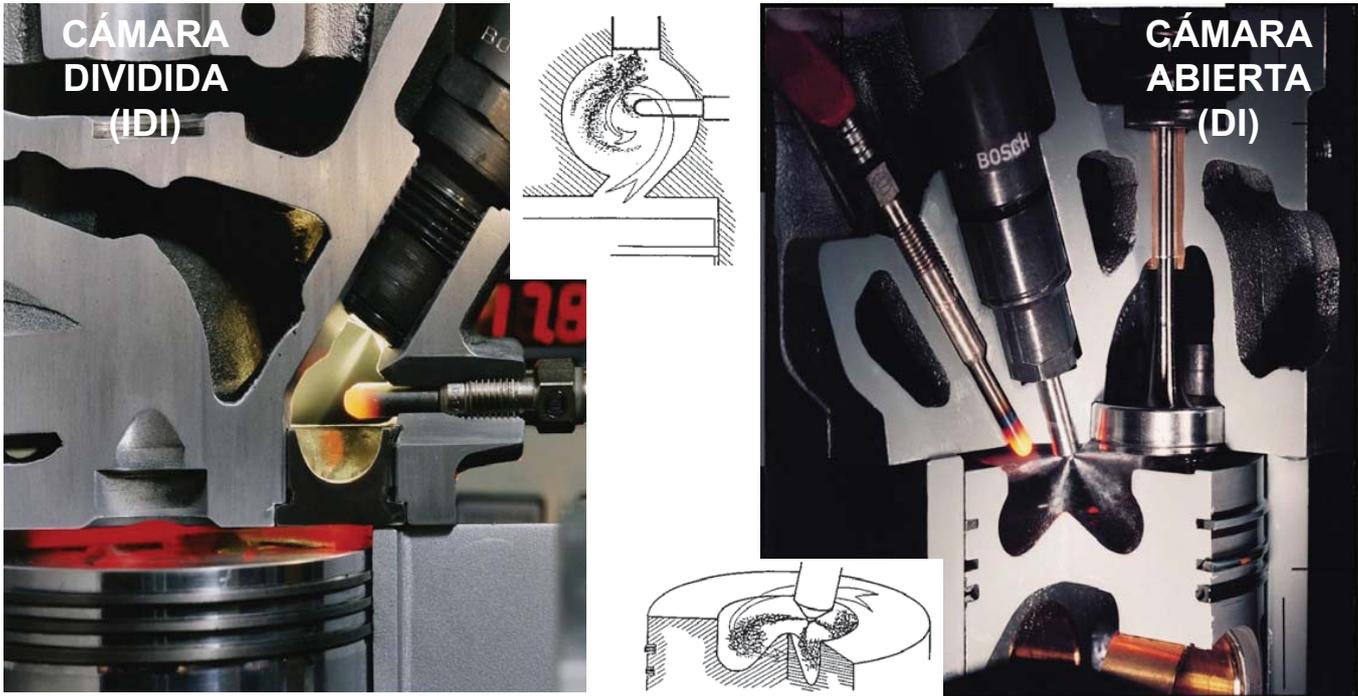
➤ Favorecer la mezcla aire-combustible

Mezcla por turbulencia Inyección Indirecta	Mezcla asegurada por los chorros Inyección Directa

➤ Minimizar la superficie para limitar la transferencia de calor ⇒ disminuye el tiempo de retraso y favorece el arranque en frío

INTRODUCCIÓN	COMBUSTIÓN MEP HOMOG.	MEP CARGA ESTRATIFICADA	<b>COMBUSTIÓN MEC</b>	R
--------------	-----------------------	-------------------------	-----------------------	---

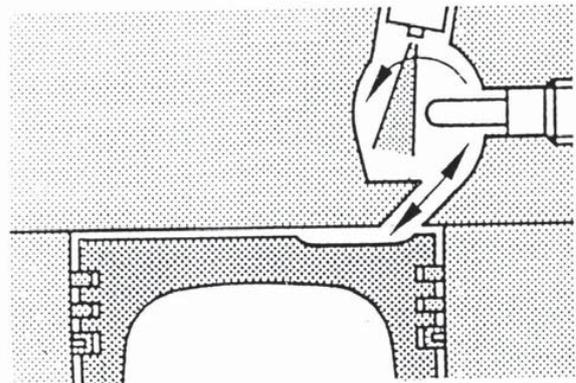
# CÁMARAS DE COMBUSTIÓN



INTRODUCCIÓN	COMBUSTIÓN MEP HOMOG.	MEP CARGA ESTRATIFICADA	<b>COMBUSTIÓN MEC</b>	R
--------------	-----------------------	-------------------------	-----------------------	---

# CÁMARAS DE COMBUSTIÓN

- ❑ Cámara dividida → Inyección indirecta (IDI)
  - Alta turbulencia
  - Mezcla asegurada por la turbulencia
  - Calidad del chorro poco crítica:
    - Inyector de 1 orificio (1 mm)
    - P. de inyección 'baja' (200 a 400 bar)

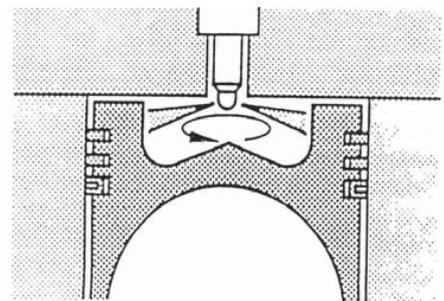
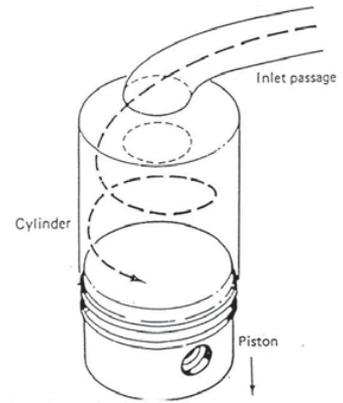


INTRODUCCIÓN	COMBUSTIÓN MEP HOMOG.	MEP CARGA ESTRATIFICADA	<b>COMBUSTIÓN MEC</b>	R
--------------	-----------------------	-------------------------	-----------------------	---

# CÁMARAS DE COMBUSTIÓN

## ❑ Cámara abierta → Inyección directa (DI)

- Baja turbulencia
- Mezcla asegurada por los chorros
- Calidad de los chorros crítica:
  - Varios orificios (5 a 8)
  - Orificios muy pequeños (0.15 a 0.25 mm)
  - P. de inyección muy altas (> 1500 bar)

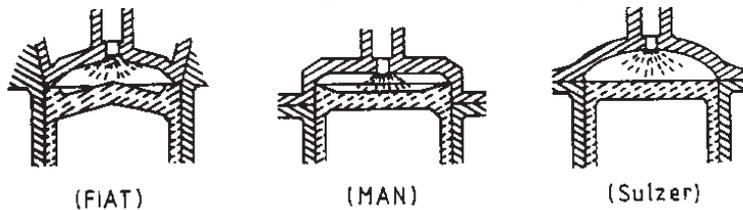


INTRODUCCIÓN	COMBUSTIÓN MEP HOMOG.	MEP CARGA ESTRATIFICADA	COMBUSTIÓN MEC	R
--------------	-----------------------	-------------------------	----------------	---

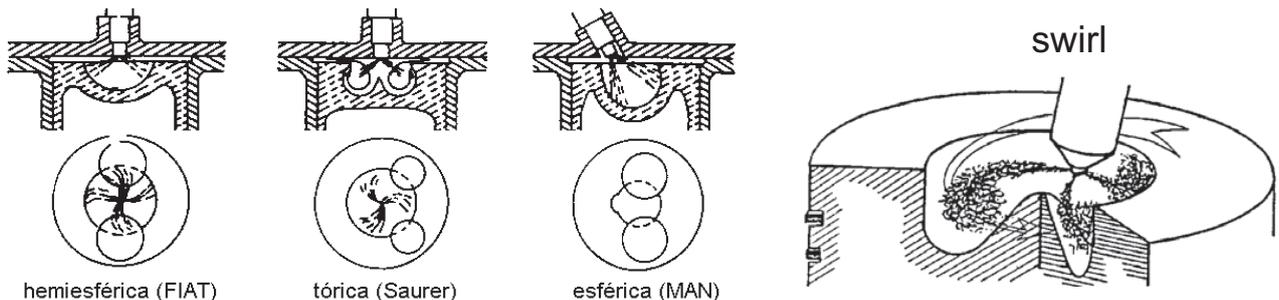
# CÁMARAS DE COMBUSTIÓN

## ❑ Cámara abierta

- Diseños sin turbulencia (motores lentos)



- Diseños con turbulencia



INTRODUCCIÓN	COMBUSTIÓN MEP HOMOG.	MEP CARGA ESTRATIFICADA	COMBUSTIÓN MEC	R
--------------	-----------------------	-------------------------	----------------	---

## CÁMARAS DE COMBUSTIÓN

### ❑ Comparación IDI/DI

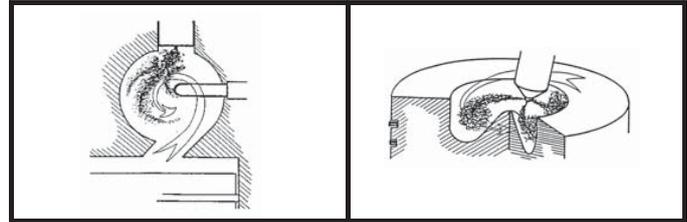
↑ Sistema de inyección más sencillo

↑ Mejor proceso de mezcla:

- ✓ Dosado máximo admisible mayor -con la misma calidad de chorro- (0.85)

↑ Mejor proceso de combustión:

- ✓ Más rápido
- ✓ Menos emisiones contaminantes



↓ Gran superficie de pared

↓ Perdidas de calor importantes

↓ Arranque en frío difícil

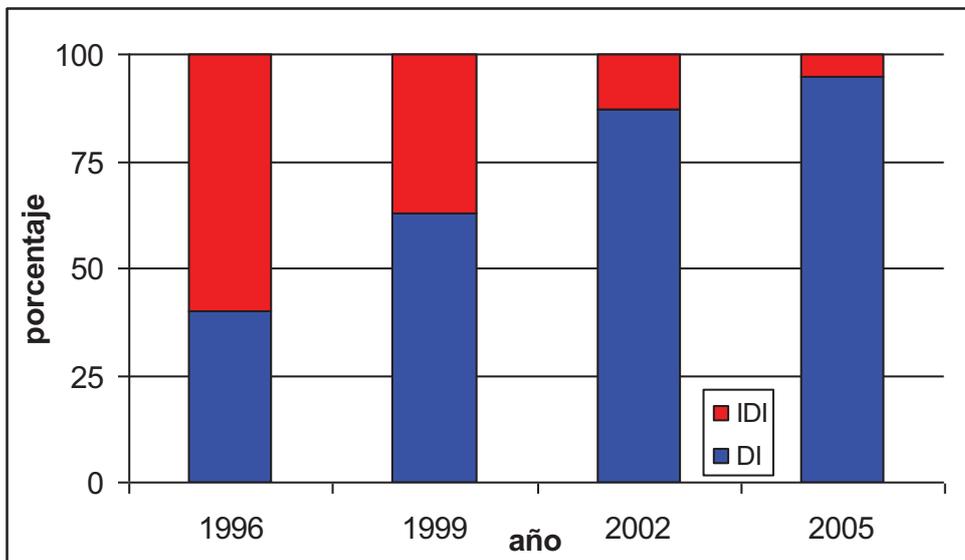
↓ Menor rendimiento

Sistema en desuso

INTRODUCCIÓN	COMBUSTIÓN MEP HOMOG.	MEP CARGA ESTRATIFICADA	<b>COMBUSTIÓN MEC</b>	R
--------------	-----------------------	-------------------------	-----------------------	---

## CÁMARAS DE COMBUSTIÓN

❑ Evolución de la producción de motores MEC de turismo en la UE



INTRODUCCIÓN	COMBUSTIÓN MEP HOMOG.	MEP CARGA ESTRATIFICADA	<b>COMBUSTIÓN MEC</b>	R
--------------	-----------------------	-------------------------	-----------------------	---

## RESUMEN - MEP

- La combustión en MEP se produce por el avance de un frente de llama en una mezcla homogénea
- La expansión de los gases quemados y los fenómenos de turbulencia permiten altas velocidades del frente de llama → son posibles altos regímenes de giro
- El dosado afecta a la potencia y al rendimiento
- El punto de encendido es un parámetro de control clave
- La combustión con mezclas estratificadas permite mantener un dosado global bajo evitando el uso de la mariposa

INTRODUCCIÓN	COMBUSTIÓN MEP HOMOG.	MEP CARGA ESTRATIFICADA	COMBUSTIÓN MEC	R
--------------	-----------------------	-------------------------	----------------	---

## RESUMEN - MEC

- La combustión MEC está condicionada por los procesos de atomización, evaporación y mezcla del combustible (combustión por difusión)
- El combustible debe ser fácilmente autoinflamable
- Existen tres fases diferenciadas: tiempo de retraso, combustión premezclada y combustión por difusión
- El avance de la inyección y el control de las características de ésta (ley de inyección: definición de presión del rail y duración de las inyecciones) permiten controlar la combustión
- Existen dos tipos de diseños de cámaras de combustión: ID e IDI

INTRODUCCIÓN	COMBUSTIÓN MEP HOMOG.	MEP CARGA ESTRATIFICADA	COMBUSTIÓN MEC	R
--------------	-----------------------	-------------------------	----------------	---

---

## BIBLIOGRAFÍA

- F. Payri y J.M. Desantes  
"Motores de Combustión Interna Alternativos" (Cap. 13-20)
  
  - J.B. Heywood  
"Internal Combustion Engine Fundamentals" (Cap. 9-10)
  
  - R. van Basshuysen y F. Schäfer  
"Internal Combustion Engine Handbook: Basics, Components, Systems  
and Perspectives" (Cap. 15)
  
  - R. Stone  
"Introduction to Internal Combustion Engines" (Cap. 3-5)
-





## CONTENIDO

- Introducción
- Emisiones reguladas y soluciones activas
- Post-tratamiento (soluciones pasivas)
- Medida de emisiones, normativas y su evolución histórica
- Emisiones no reguladas: CO<sub>2</sub>

INTRODUCCIÓN

EMISIONES  
REGULADASPOST-  
TRATAMIENTO

NORMATIVAS

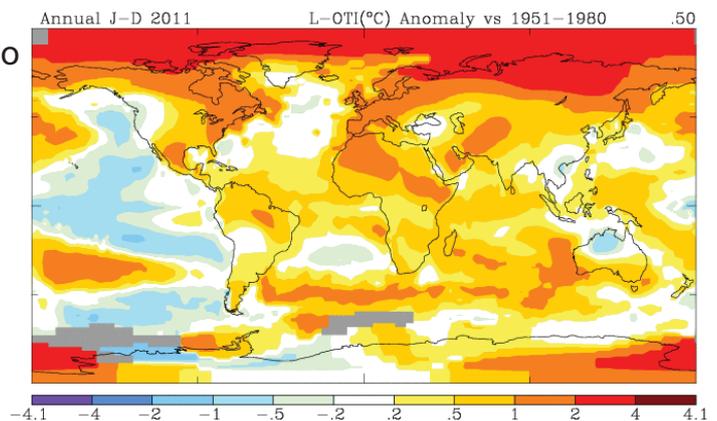
CO<sub>2</sub>

R



## INTRODUCCIÓN

- Hace décadas: **prestaciones** principal criterio de diseño
- Aumento continuo del parque móvil (MCIA)
- Consecuencia:
  - Los MCIA se han convertido en la primera fuente de contaminación en las ciudades
    - Smog fotoquímico
    - Partículas
    - Ruido
  - Efecto invernadero



INTRODUCCIÓN

EMISIONES  
REGULADASPOST-  
TRATAMIENTO

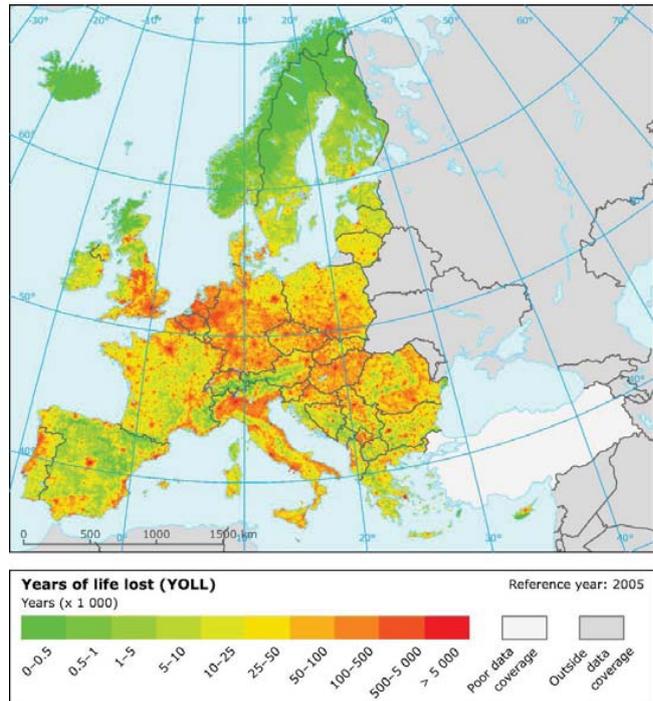
NORMATIVAS

CO<sub>2</sub>

R

# INTRODUCCIÓN

- ❑ Hace décadas: **prestaciones** principal criterio de diseño
- ❑ Aumento continuo del parque móvil (MCIA)
- ❑ Consecuencia:
  - Los MCIA se han convertido en la primera fuente de contaminación en las ciudades
    - Smog fotoquímico
    - Partículas
    - Ruido
  - Efecto invernadero



INTRODUCCIÓN	EMISIONES REGULADAS	POST-TRATAMIENTO	NORMATIVAS	CO <sub>2</sub>	R
--------------	---------------------	------------------	------------	-----------------	---

# FUENTES DE CONTAMINACIÓN EN LOS MCIA

TIPO DE CONTAMINACIÓN	FUENTES
<b>ACÚSTICA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❑ Ruido de escape</li> <li>❑ Ruido de combustión</li> <li>❑ Sobrealimentación</li> <li>❑ Ruido mecánico</li> <li>❑ Vehículos: ruido aerodinámico y de rodadura</li> </ul>
<b>QUÍMICA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❑ Combustible evaporado del depósito                             <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 20% del total del HC sin quemar</li> </ul> </li> <li>❑ Gases del cárter del motor                             <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ Fugas de compresión</li> <li>➢ 25% del total del HC sin quemar</li> </ul> </li> <li>❑ <b>Gases de combustión</b></li> </ul>

INTRODUCCIÓN	EMISIONES REGULADAS	POST-TRATAMIENTO	NORMATIVAS	CO <sub>2</sub>	R
--------------	---------------------	------------------	------------	-----------------	---

# PRODUCTOS CONTAMINANTES

❑ Principales productos contaminantes en los gases de escape:

➤ Monóxido de carbono	(CO)	<b>REGULADAS</b>
➤ Óxidos de nitrógeno	(NOx)	
➤ Hidrocarburos sin quemar	(HC)	
➤ Partículas y humos	(PM)	

➤ Dióxido de carbono	(CO <sub>2</sub> )	<b>REGULADO PARA LA FLOTA (proporcional al consumo)</b>
----------------------	--------------------	---

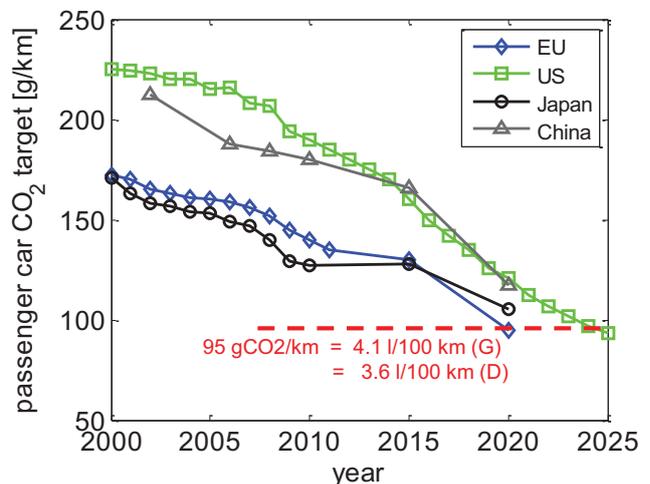
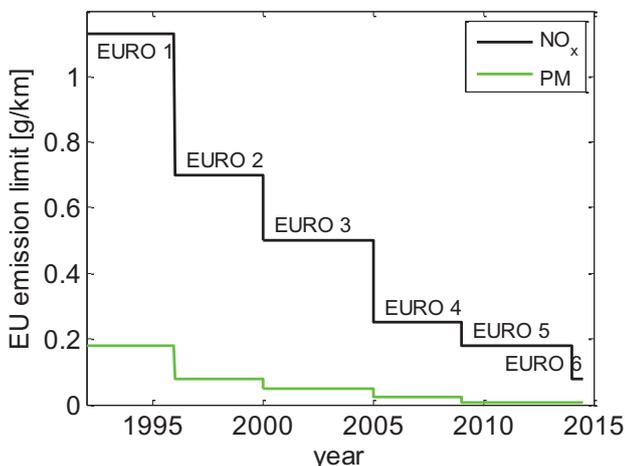
➤ Óxidos de <b>azufre</b>	(SOx)	<b>NO REGULADAS</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ En la actualidad bajo contenido en S en automoción:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>– Gasolina y gasóleo A: 50 ppm (10 ppm)</li> <li>– Gasóleo B y C: 0.2 %</li> <li>– Fuelóleo: <b>1 % - 4%</b></li> </ul> </li> <li>▪ S suele desactivar los catalizadores → interferencia con el post-trat.</li> </ul>		

<b>INTRODUCCIÓN</b>	EMISIONES REGULADAS	POST-TRATAMIENTO	NORMATIVAS	CO <sub>2</sub>	R
---------------------	---------------------	------------------	------------	-----------------	---

# INTRODUCCIÓN

❑ En la actualidad las normativas de emisiones condicionan el diseño de los motores

➤ El aumento de sensibilidad social en materia medioambiental ha propiciado la aparición de legislaciones específicas



<b>INTRODUCCIÓN</b>	EMISIONES REGULADAS	POST-TRATAMIENTO	NORMATIVAS	CO <sub>2</sub>	R
---------------------	---------------------	------------------	------------	-----------------	---

## MONÓXIDO DE CARBONO (CO)

### EFECTOS

- Inodoro y muy tóxico. Actúa sobre el SNC y la fijación de oxígeno (carboxi-hemoglobina)
- Mortal en dosis elevadas (0.3%, 30 min)

### MECANISMOS DE FORMACIÓN

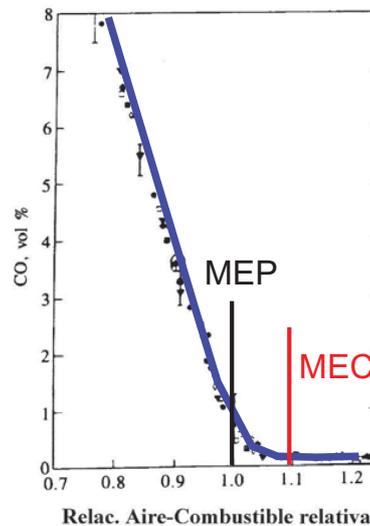
- Especie intermedia en la combustión; posteriormente se oxida formando  $\text{CO}_2$ :  $\text{CO} + \text{OH} \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}$

Al bajar T (carrera de expansión) la cinética se ralentiza y el CO es emitido

- Al tratarse de una oxidación incompleta depende fuertemente del dosado relativo

### CONTROL EN MEP

- Control dosado (mezclas pobres o estequiométricas), sistema de encendido



■ Importante en MEP

■ Casi inexistente en MEC

INTRODUCCIÓN	<b>EMISIONES REGULADAS</b>	POST-TRATAMIENTO	NORMATIVAS	CO <sub>2</sub>	R
--------------	----------------------------	------------------	------------	-----------------	---

## ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NO<sub>x</sub>)

### EFECTOS

- Tóxicos, en particular el NO<sub>2</sub>. Problemas respiratorios, dolor de cabeza
- Participan en la formación de smog u ozono, y en la lluvia ácida

### MECANISMO DE FORMACIÓN

- Oxidación del N<sub>2</sub> del aire (o del combustible)



■ Importante en MEP y MEC

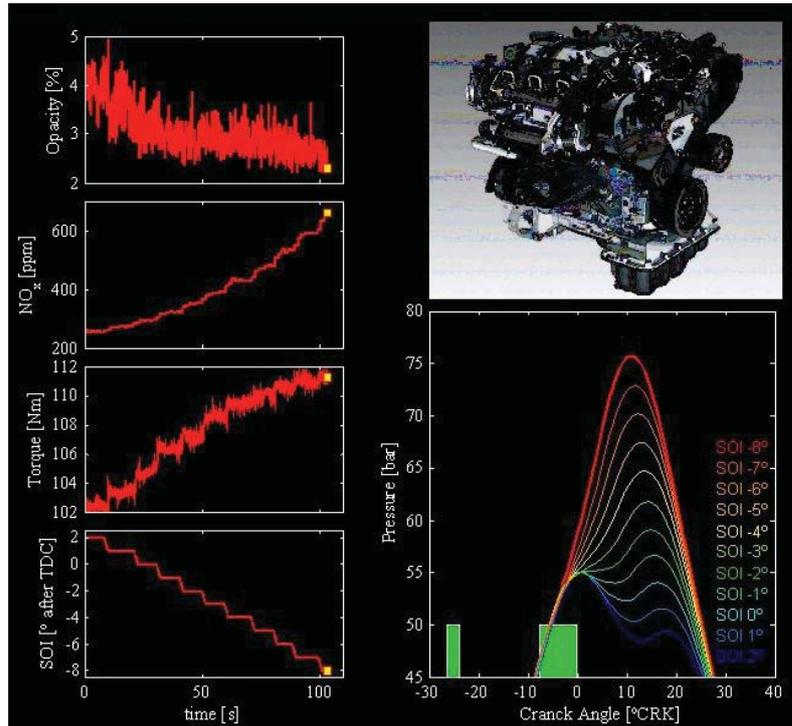
- La generación de NO es función de T y [O<sub>2</sub>]
- Oxidación posterior del NO a NO<sub>2</sub> (sólo en MEC y hasta un 25%)
- Las emisiones de NO<sub>x</sub> son un indicativo de 'buena combustión' (al contrario que CO y HC)

INTRODUCCIÓN	<b>EMISIONES REGULADAS</b>	POST-TRATAMIENTO	NORMATIVAS	CO <sub>2</sub>	R
--------------	----------------------------	------------------	------------	-----------------	---

# ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NO<sub>x</sub>)

## CONTROL

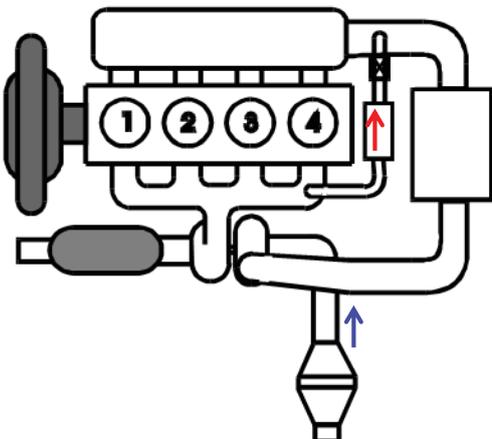
- MEC:
  - Retraso punto de inyección
  - EGR
- MEP:
  - Mezclas pobres
  - EGR
- Empleo de sistemas de combustión de baja temperatura (LTC):
  - CAI
  - HCCI



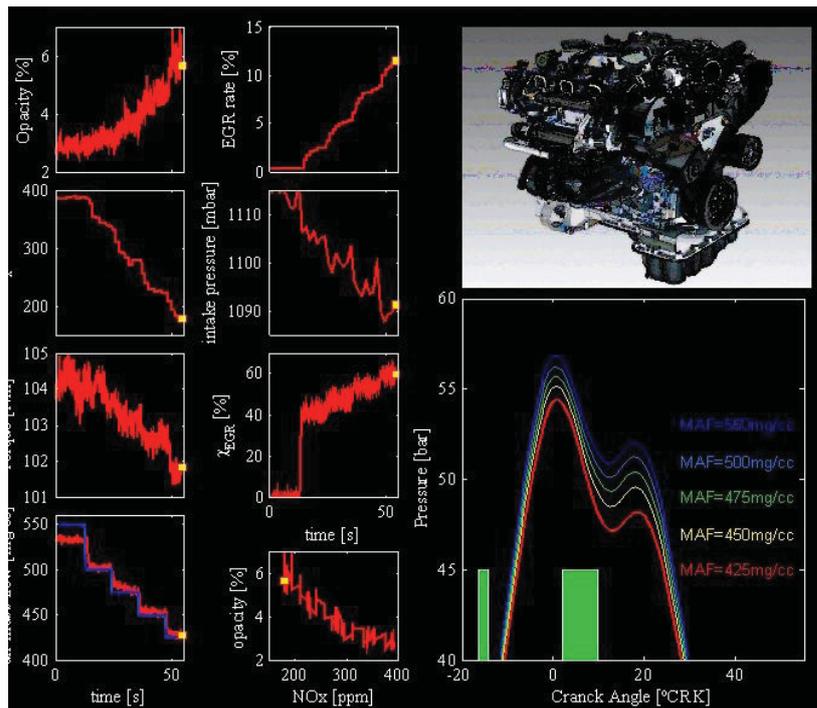
INTRODUCCIÓN	EMISIONES REGULADAS	POST-TRATAMIENTO	NORMATIVAS	CO <sub>2</sub>	R
--------------	---------------------	------------------	------------	-----------------	---

# ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NO<sub>x</sub>)

## EGR



$$\dot{m}_{egr} = \eta_v i \frac{p}{RT} V_T - \dot{m}_a$$



INTRODUCCIÓN	EMISIONES REGULADAS	POST-TRATAMIENTO	NORMATIVAS	CO <sub>2</sub>	R
--------------	---------------------	------------------	------------	-----------------	---

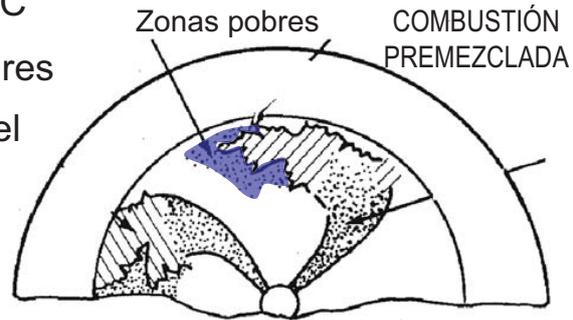
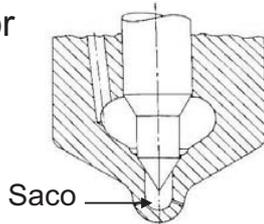
## HIDROCARBUROS SIN QUEMAR (HC)

### ❑ EFECTOS

- Efecto sobre la salud según su naturaleza: tóxicos (olefinas, aldehídos,...), alteraciones SNC (monocíclicos aromáticos,...), cancerígenos (policíclicos aromáticos,...), irritantes, ...

### ❑ MECANISMO DE FORMACIÓN-MEC

- Zonas con mezclas demasiado pobres
- Apagado de llama en las paredes del bowl (arranque, baja carga)
- Saco del inyector



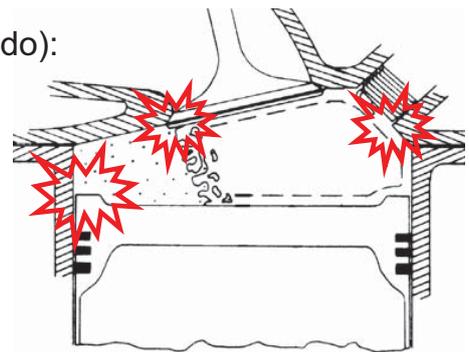
■ Bajos en MEC

INTRODUCCIÓN	EMISIONES REGULADAS	POST-TRATAMIENTO	NORMATIVAS	CO <sub>2</sub>	R
--------------	---------------------	------------------	------------	-----------------	---

## HIDROCARBUROS SIN QUEMAR (HC)

### ❑ MECANISMOS DE FORMACIÓN - MEP

- Combustión incompleta (mal control del dosado):
  - Dosado rico
  - Dosado demasiado pobre
  - Combustión inestable
- Apagado de la llama cerca de la pared y en rincones
- Absorción / desorción en el aceite
- Cortocircuito de la mezcla (MEP 2T)
- Vapores depósito (20%) y cárter (25%)



■ Importante en MEP

### ❑ CONTROL - MEP

- Control dosado ( $Fr$  cercano a 1), diseño adecuado de la cámara de combustión, optimización gestión térmica y encendido, distribución variable e inyección directa (cortocircuito)

■ Los HC se pueden quemar en el escape (**POSTCOMBUSTIÓN** si  $\uparrow T \uparrow [O]$ )

INTRODUCCIÓN	EMISIONES REGULADAS	POST-TRATAMIENTO	NORMATIVAS	CO <sub>2</sub>	R
--------------	---------------------	------------------	------------	-----------------	---

# HUMOS Y PARTÍCULAS (PM)

## DEFINICIONES

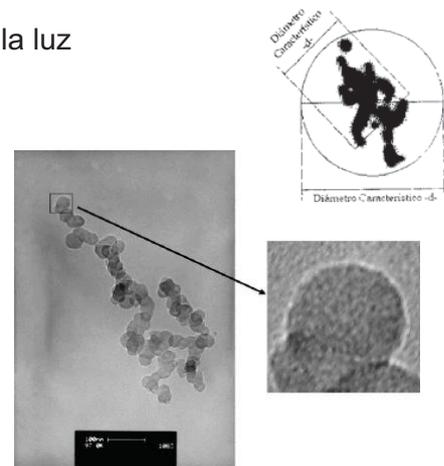
**Partículas:** son el material que queda atrapado en un medio filtrante. Están formadas por:

- Una parte sólida (hollín y cenizas)
- Una parte líquida (restos de aceite y combustible)

**Humos:** son las partículas en suspensión que absorben la luz

## CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

- Sistemas polidispersos
- Diámetro característico:  $0.005-1\mu\text{m}$  ( $15\mu\text{m}$ )
- El tamaño se ajusta a distribuciones de probabilidad que están influenciadas por factores como la temperatura del escape (si  $\uparrow T$ ,  $\downarrow$  tamaño)



INTRODUCCIÓN	EMISIONES REGULADAS	POST-TRATAMIENTO	NORMATIVAS	CO <sub>2</sub>	R
--------------	---------------------	------------------	------------	-----------------	---

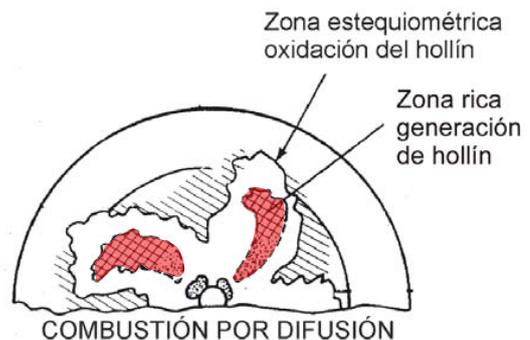
# PARTÍCULAS (PM)

## EFFECTOS

- Suciedad ambiental
- Depósito en tejido pulmonar:
  - Corto plazo: irritaciones
  - Largo plazo: efecto cancerígeno
- Peligro de absorción inversamente proporcional a su tamaño

## MECANISMO DE FORMACIÓN

- Impurezas en el combustible
- Generación por aglomeración o deshidrogenación del combustible en condiciones de alto dosado local (formación de la mezcla deficiente)
- Mecanismos de oxidación posterior

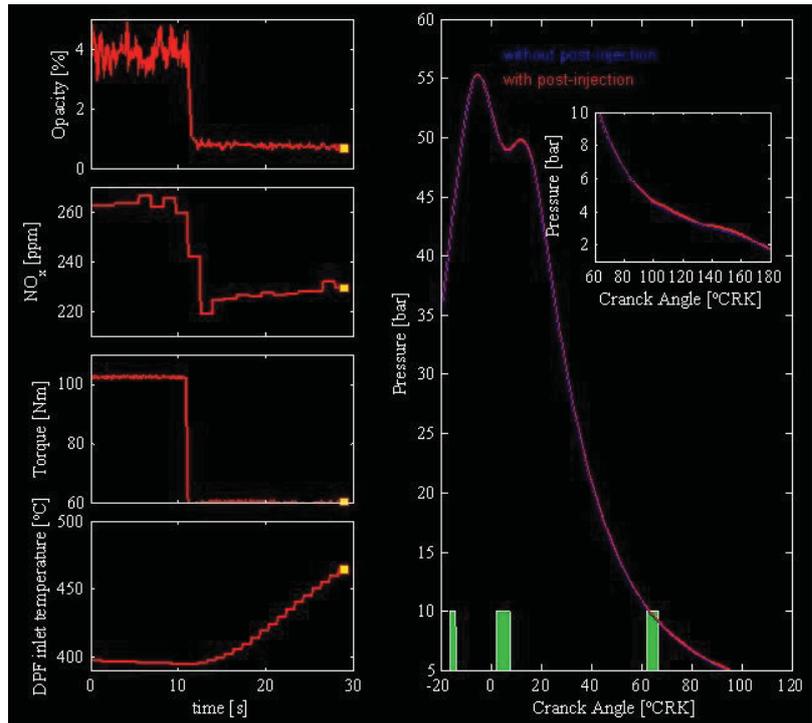


▪ Sólo son relevantes en MEC

INTRODUCCIÓN	EMISIONES REGULADAS	POST-TRATAMIENTO	NORMATIVAS	CO <sub>2</sub>	R
--------------	---------------------	------------------	------------	-----------------	---

# PARTÍCULAS (PM)

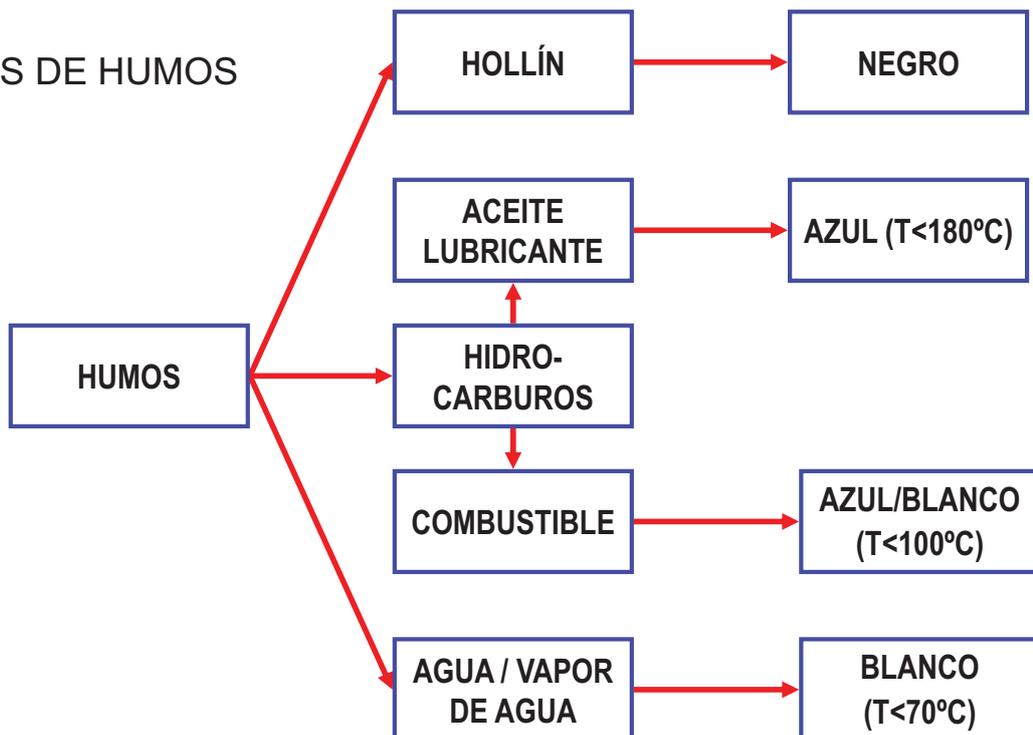
- ❑ CONTROL EN MEC
  - Optimización del sistema de inyección (alta p)
  - Diseño cámara de combustión / choque pared
  - Post-inyección
  - Control del dosado durante el transitorio (limitador de humos)



INTRODUCCIÓN	EMISIONES REGULADAS	POST-TRATAMIENTO	NORMATIVAS	CO <sub>2</sub>	R
--------------	---------------------	------------------	------------	-----------------	---

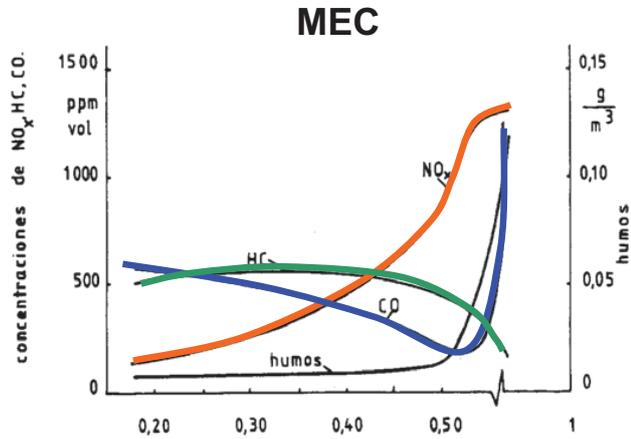
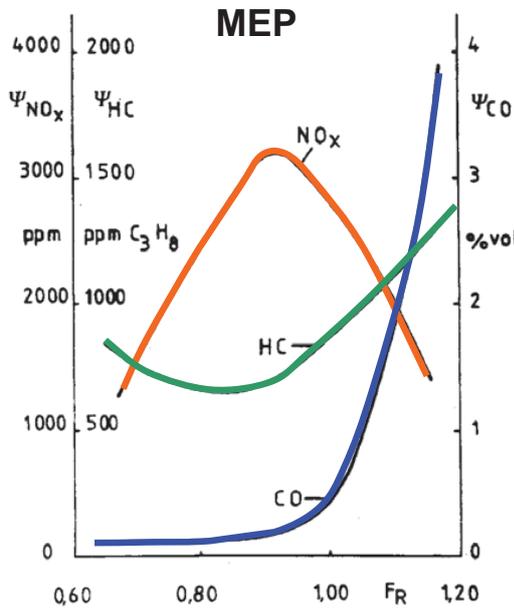
# HUMOS

- ❑ TIPOS DE HUMOS



INTRODUCCIÓN	EMISIONES REGULADAS	POST-TRATAMIENTO	NORMATIVAS	CO <sub>2</sub>	R
--------------	---------------------	------------------	------------	-----------------	---

## RESUMEN DE EMISIONES MEP/ MEC



INTRODUCCIÓN	<b>EMISIONES REGULADAS</b>	POST-TRATAMIENTO	NORMATIVAS	CO <sub>2</sub>	R
--------------	----------------------------	------------------	------------	-----------------	---

## SISTEMAS DE POST-TRATAMIENTO

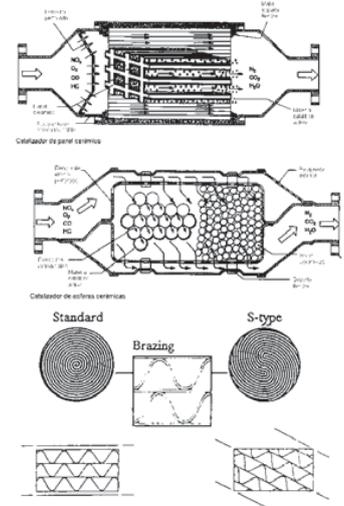
- ❑ **HC,CO**      Catalizadores de oxidación      MEP  $F_R < 1$ , MEC
- ❑ **NO<sub>x</sub>,HC,CO**      Catalizadores de tres vías      MEP  $F_R = 1$
- ❑ **NO<sub>x</sub>**      Catalizadores de reducción
  - SCR      (reacción con urea)      MEP  $F_R < 1$ , MEC
  - LNT      (trampa de NO<sub>x</sub>)      MEP  $F_R < 1$ , MEC
- ❑ **PM**      Trampa de partículas      MEC

INTRODUCCIÓN	EMISIONES REGULADAS	<b>POST-TRATAMIENTO</b>	NORMATIVAS	CO <sub>2</sub>	R
--------------	---------------------	-------------------------	------------	-----------------	---

## CATALIZADORES - GENERALIDADES

### ❑ POSTRATAMIENTO CON CATALIZADOR

- Sustrato:
  - Metálico (↑T) - Cerámico (↓coste)
  - Esferas - panel
- Material poroso de impregnación (20-50 Å)
- Catalizador:
  - Permite realizar las reacciones químicas con una menor energía de activación
  - Pd, Pt, Rh, óxidos metálicos (envenenamiento del catalizador por Pb o P)

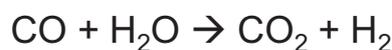
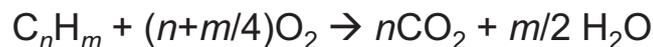


- ❑ Tienen un problema de temperatura de activación (light-off):
  - Reducir la inercia térmica del colector de escape
  - Acercar el catalizador al motor (close-coupled)
  - Instalar un pre-catalizador para acelerar el calentamiento

INTRODUCCIÓN	EMISIONES REGULADAS	POST-TRATAMIENTO	NORMATIVAS	CO <sub>2</sub>	R
--------------	---------------------	------------------	------------	-----------------	---

## CATALIZADOR DE OXIDACIÓN

- ❑ Se oxidan los HC y CO



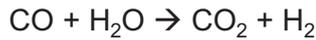
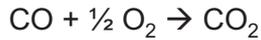
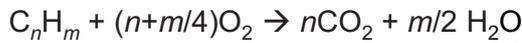
- ❑ Los NO<sub>x</sub> permanecen esencialmente inalterables
- ❑ Los NO (mayoritarios en el escape) se oxidan a NO<sub>2</sub>
- ❑ Solamente funcionan si hay **exceso de oxígeno**:
  - Directamente aplicables en MEC (bajo dosado relativo)
  - MEP con dosado pobre (o rico con inyección de aire secundario)

INTRODUCCIÓN	EMISIONES REGULADAS	POST-TRATAMIENTO	NORMATIVAS	CO <sub>2</sub>	R
--------------	---------------------	------------------	------------	-----------------	---

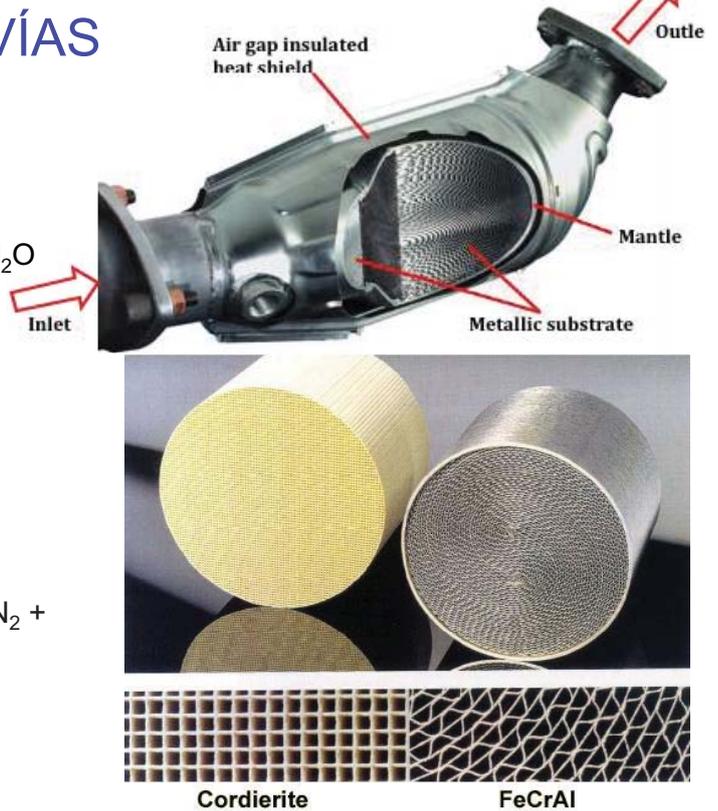
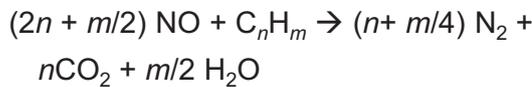
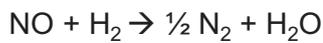
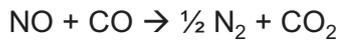
## CATALIZADOR DE 3 VÍAS

Realiza simultáneamente:

Oxidación HC y CO



Reducción NOx

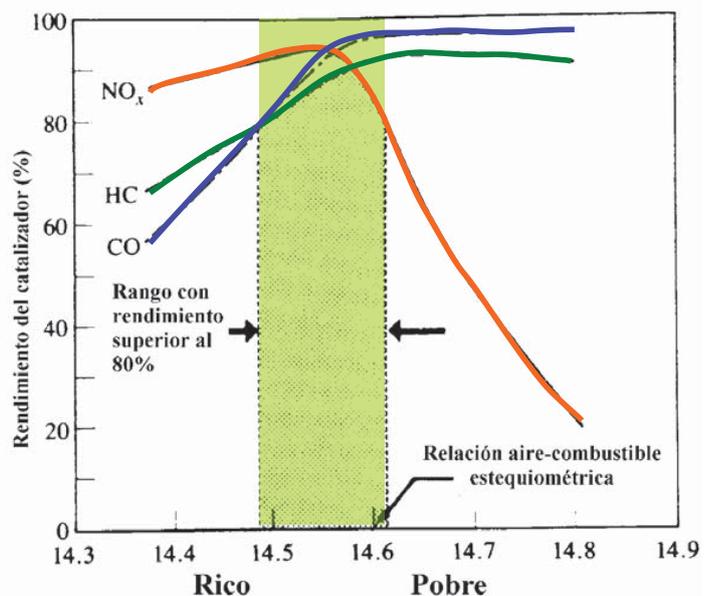


INTRODUCCIÓN	EMISIONES REGULADAS	POST-TRATAMIENTO	NORMATIVAS	CO <sub>2</sub>	R
--------------	---------------------	------------------	------------	-----------------	---

## CATALIZADOR DE 3 VÍAS

Precisa condiciones estequiométricas (sólo aplicables a MEP) → necesitan además un control óptimo del dosado:

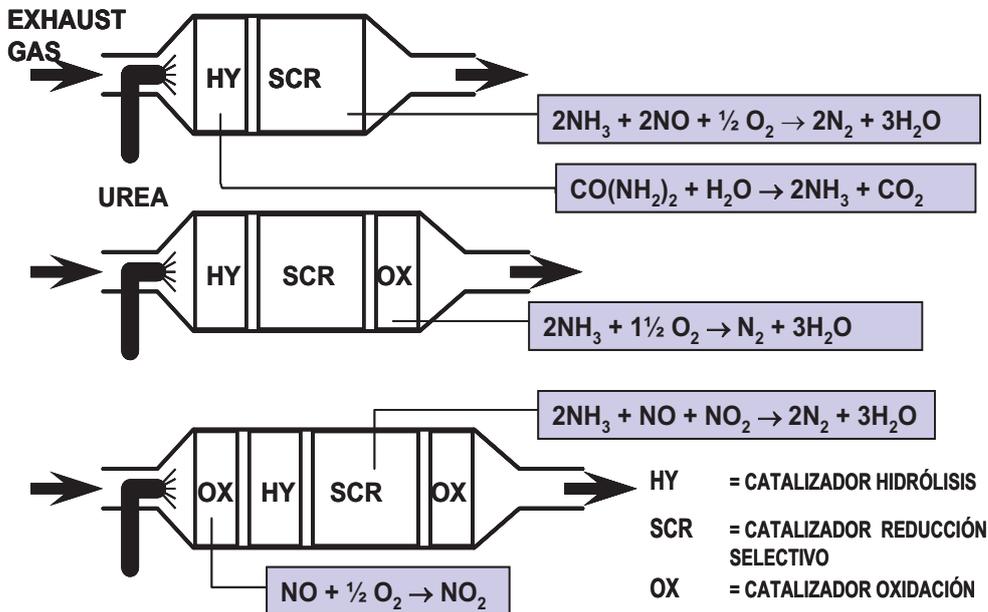
- Inyección electrónica
- Control por sonda λ



INTRODUCCIÓN	EMISIONES REGULADAS	POST-TRATAMIENTO	NORMATIVAS	CO <sub>2</sub>	R
--------------	---------------------	------------------	------------	-----------------	---

# CATALIZADOR DE REDUCCIÓN - SCR

□ Empleo de urea para la reducción de NOx en atmósferas oxidantes

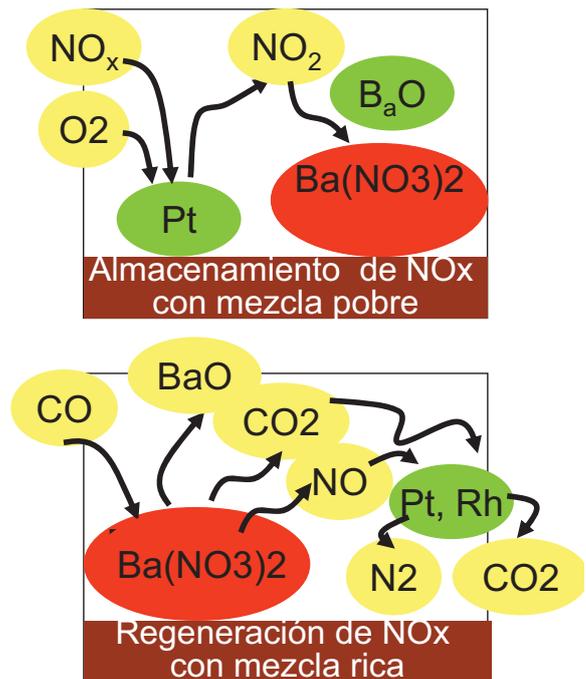


INTRODUCCIÓN	EMISIONES REGULADAS	POST-TRATAMIENTO	NORMATIVAS	CO <sub>2</sub>	R
--------------	---------------------	------------------	------------	-----------------	---

# TRAMPA DE NO<sub>x</sub> - LNT

□ Uso de una trampa para retener el NOx durante la operación con mezcla pobre (lean NOx trap) y su posterior reducción operando con mezcla rica (HC+CO)

- Adecuadas para:
- MEC, que consigue las condiciones de regeneración con la postinyección
  - MEP con mezclas pobres (Fr<1 homogénea o estratificada), regenera subiendo el dosado (Fr>1)



INTRODUCCIÓN	EMISIONES REGULADAS	POST-TRATAMIENTO	NORMATIVAS	CO <sub>2</sub>	R
--------------	---------------------	------------------	------------	-----------------	---

## COMPARACIÓN LNT-SCR

	LNT	Urea SCR
Agente reductor	Combustible	Amoniaco
Eficiencia de conversión	<85%	90%
Estabilidad térmica	Envejecimiento alto (desulfatación)	Hasta 650°C approx (con nuevos zeolitos).
Coste	Alto dopado con Pt	Dosificador y consumo de urea
Sensores	Lambda, T, NO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub> + dosificación
Penalización en consumo	Alta (+2% - +8%)	Baja o beneficiosa (-3% - +4%)
Calibración del motor	Regeneración + desulfatación	Gestión térmica para calentamiento rápido
Otros aspectos	Impacto del envejecimiento no conocido Combustible con muy poco S	Hidrólisis de urea y reparto de flujo Infraestructura de suministro de urea

INTRODUCCIÓN

EMISIONES  
REGULADASPOST-  
TRATAMIENTO

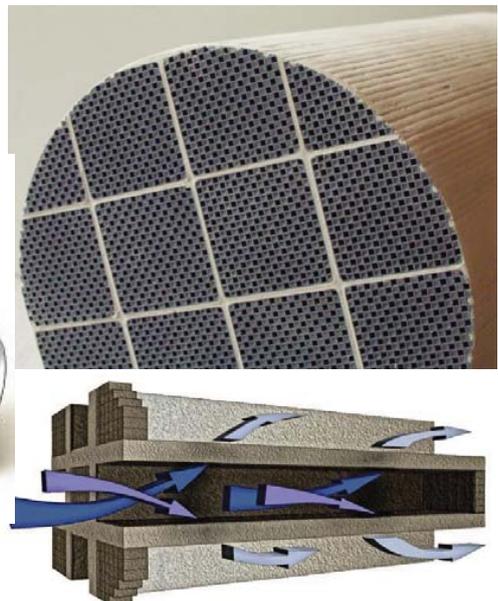
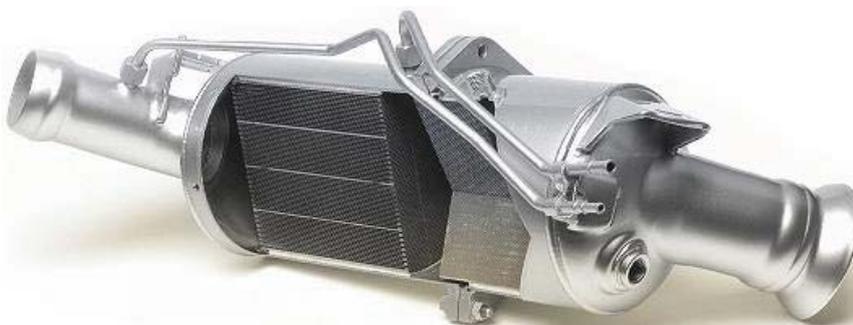
NORMATIVAS

CO<sub>2</sub>

R

## TRAMPA DE PARTÍCULAS

- ❑ Filtro cerámico que retiene las partículas
  - Necesidad de regeneración mediante alta temperatura (post-combustión)



INTRODUCCIÓN

EMISIONES  
REGULADASPOST-  
TRATAMIENTO

NORMATIVAS

CO<sub>2</sub>

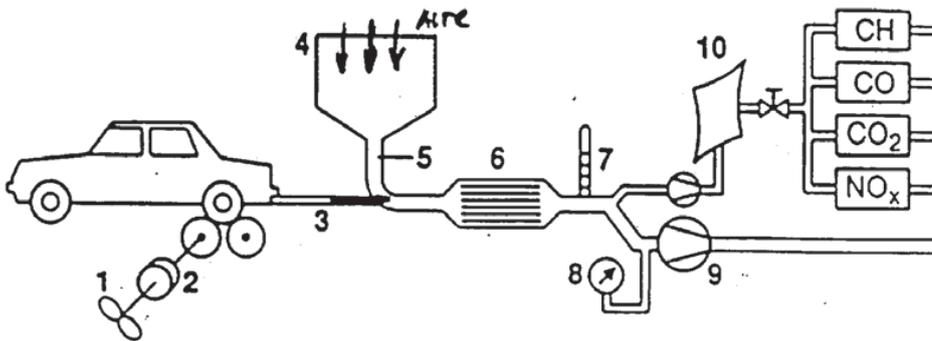
R

# NORMATIVA PARA VEHÍCULOS LIGEROS

## Medida

límites en g/km

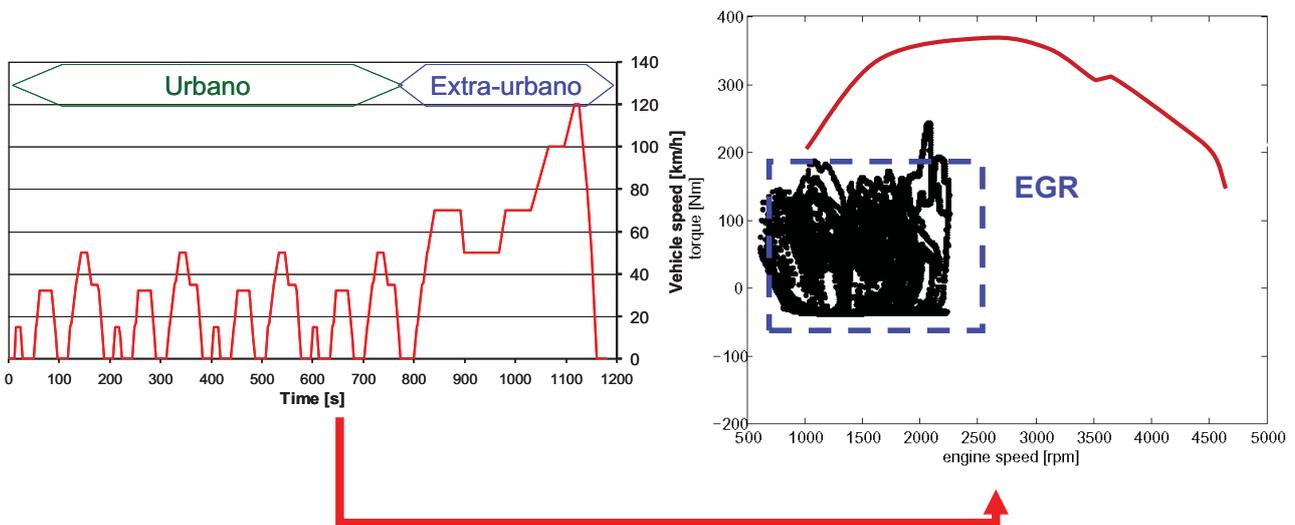
- Ensayo normalizado en banco de rodillos (vehículo)
- Diferentes límites para gasolina y diesel
- Arranque en frío -7°C (gas.) → 15 g/km de CO y 1.8 g/km de HC en ciclo urbano
- Durabilidad: 160000 km o 5 años sin afectar a las emisiones
- **OBD** (*on board diagnostics*) → detección a bordo de fallos que aumenten las emisiones



INTRODUCCIÓN	EMISIONES REGULADAS	POST-TRATAMIENTO	<b>NORMATIVAS</b>	CO <sub>2</sub>	R
--------------	---------------------	------------------	-------------------	-----------------	---

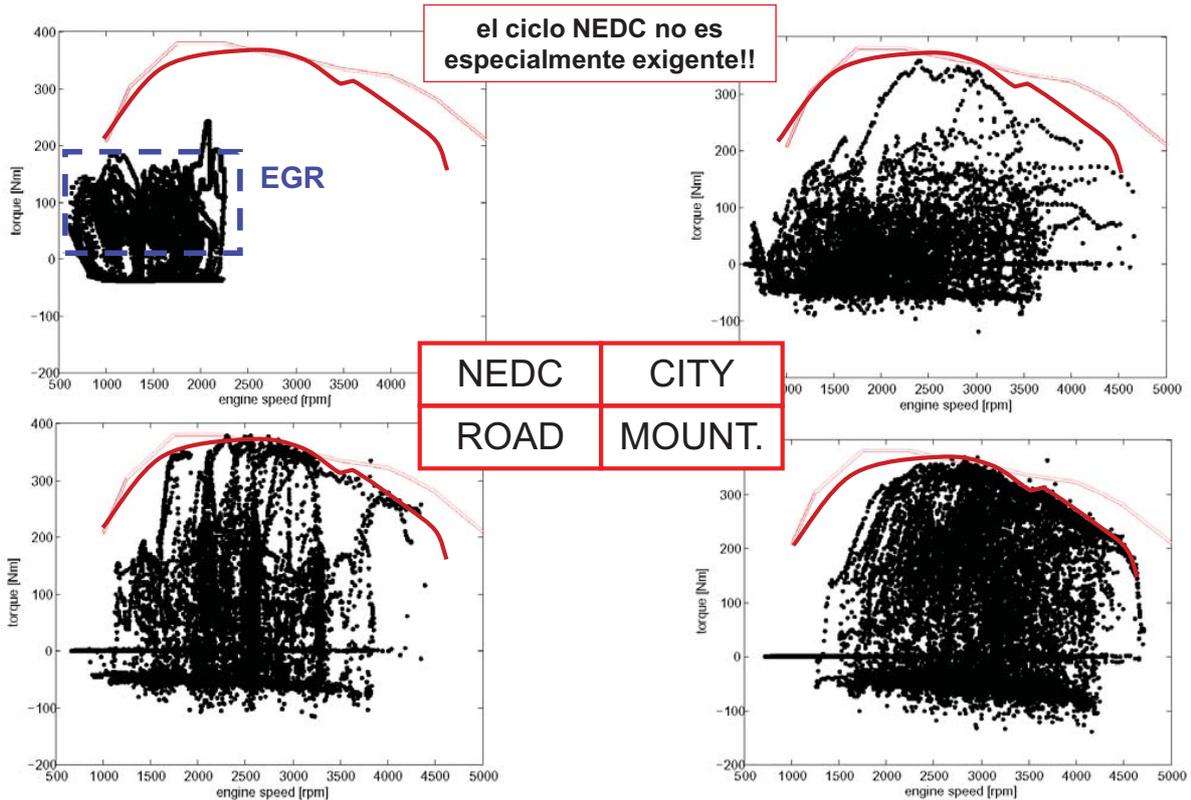
# NORMATIVA PARA VEHÍCULOS LIGEROS

## Ciclo de homologación: ciclo NEDC (New European Driving Cycle)



dato un **peso** (y resistencia) del vehículo y una **transmisión** dada

INTRODUCCIÓN	EMISIONES REGULADAS	POST-TRATAMIENTO	<b>NORMATIVAS</b>	CO <sub>2</sub>	R
--------------	---------------------	------------------	-------------------	-----------------	---

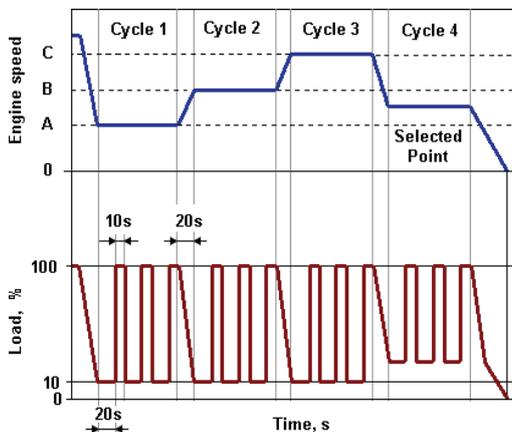


## NORMATIVA PARA VEHÍCULOS PESADOS

Medida

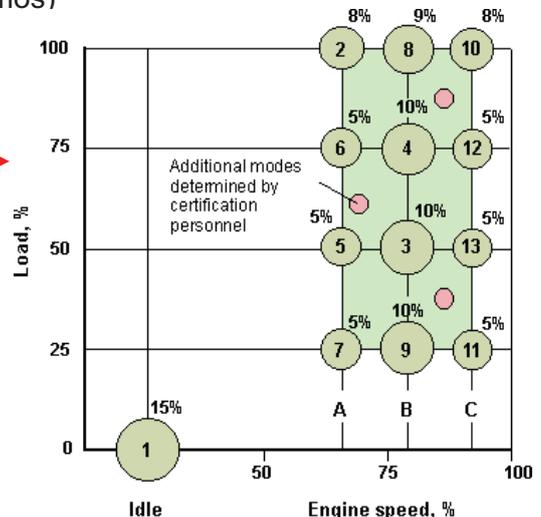
- Ensayos normalizado en banco motor (sin vehículo)
- Diferentes ciclos: ESC (European steady cycle) + ETC (European transient cycle) + ELR (European load response → humos)

límites en g/kWh



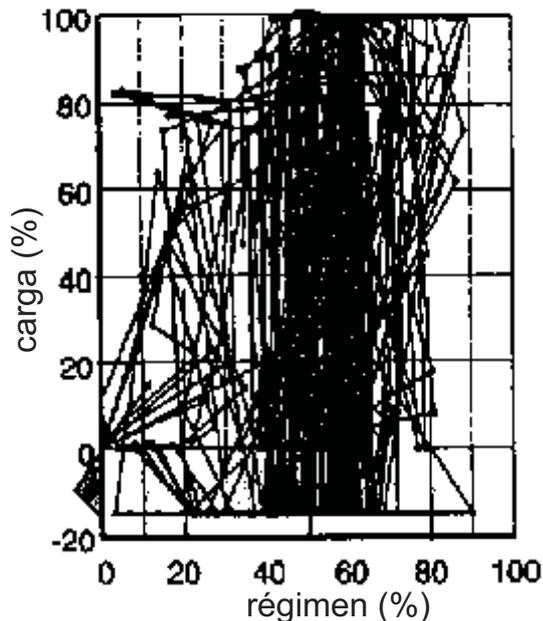
ESC

ELR



## NORMATIVA PARA VEHÍCULOS PESADOS

### Medida



◀ ETC

- Los límites impuestos en el ciclo ETC son superiores a los del ciclo ESC (excepto en NO<sub>x</sub>, que son iguales)

INTRODUCCIÓN

EMISIONES  
REGULADASPOST-  
TRATAMIENTO

NORMATIVAS

CO<sub>2</sub>

R

## EMISIONES DE CO<sub>2</sub>

Actualmente la emisión de CO<sub>2</sub> no está regulada a nivel de vehículo, pero sí a nivel de flota vendida por el fabricante. Debe considerarse que:

- La emisión de CO<sub>2</sub> es proporcional al consumo → coste combustible
- Las medidas para contener las emisiones reguladas generalmente empeoran el rendimiento (aumenta la emisión de CO<sub>2</sub>):
  - Descentrar combustión
  - Catalizadores
  - EGR

Objetivo actual en la UE para valor medio

- 2020: 95 g/km  
(ajustado por masa vehículo)

INTRODUCCIÓN

EMISIONES  
REGULADASPOST-  
TRATAMIENTO

NORMATIVAS

CO<sub>2</sub>

R

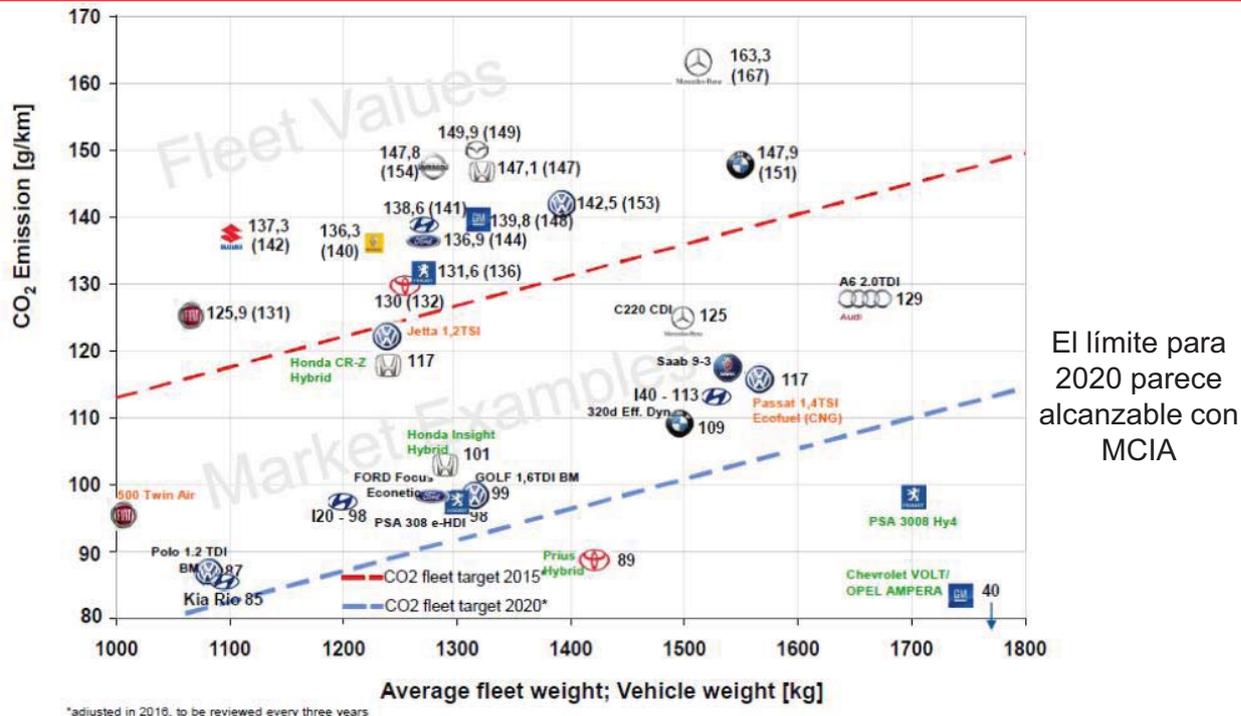


Fig. 1. Fuel economy chart for 2011 fleet-average CO<sub>2</sub> emissions for European vehicle manufacturers (2010 value are reported in parenthesis) and value for selected vehicles featuring lowest CO<sub>2</sub> emissions (Source: AVL)

INTRODUCCIÓN

EMISIONES  
REGULADASPOST-  
TRATAMIENTO

NORMATIVAS

CO<sub>2</sub>

R

## EMISIONES DE CO<sub>2</sub>

❑ Existen muchos más factores además del motor:

- Resistencia aerodinámica
- Resistencia rodadura
- Peso vehículo
- Velocidad y aceleración
- Eficiencia transmisión
- Red viaria
- Modos de conducción (ecoconducción) y de utilización (transporte público, etc.)
- Relación C/H del combustible y biocombustibles

INTRODUCCIÓN

EMISIONES  
REGULADASPOST-  
TRATAMIENTO

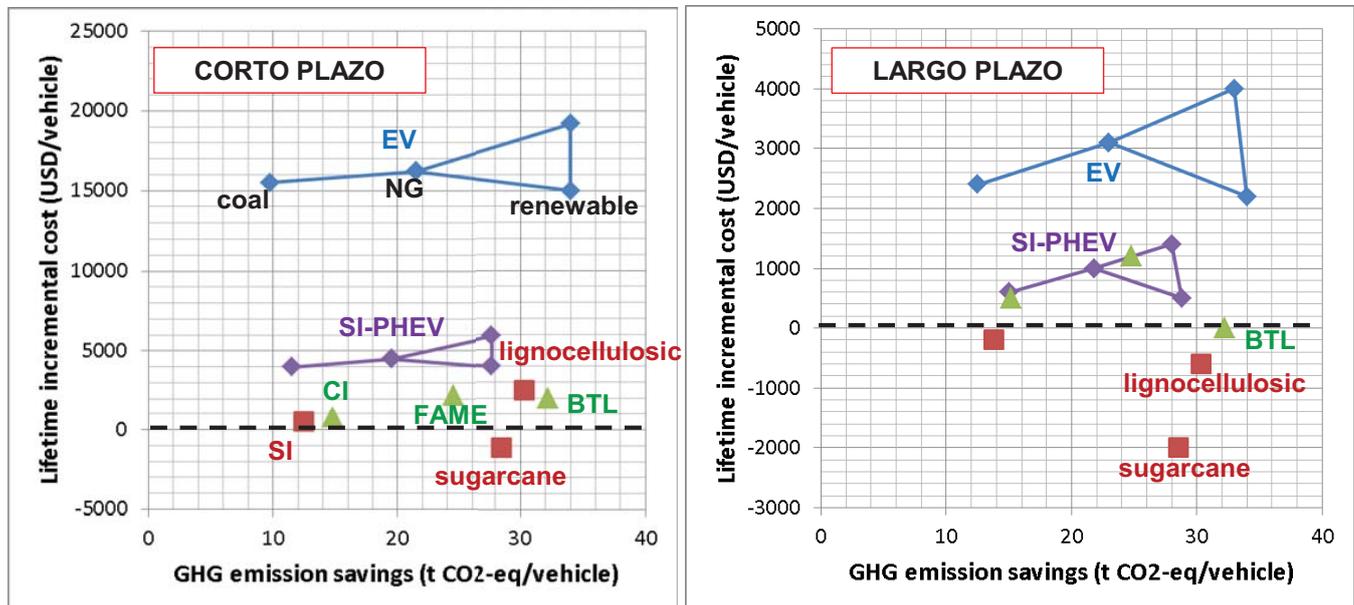
NORMATIVAS

CO<sub>2</sub>

R

## EMISIONES DE CO<sub>2</sub>

❑ Los biocombustibles pueden ser clave para reducir el cambio climático



Adaptado de IEA, precio base petróleo 120 USD/barril

INTRODUCCIÓN	EMISIONES REGULADAS	POST-TRATAMIENTO	NORMATIVAS	CO <sub>2</sub>	R
--------------	---------------------	------------------	------------	-----------------	---

## Resumen

- ❑ Importancia a la hora de diseñar un motor
- ❑ Contaminantes principales: CO, NO<sub>x</sub>, HC y Partículas (MEC)
- ❑ Estrategias activas:
  - Recirculación de gases de escape EGR (MEP y MEC)
  - Mejora del sistema de inyección y combustión (especialmente MEC)
  - Mejor control: limitador de humos, distribución variable, ...
- ❑ Post-tratamiento: catalizadores de 3 vías (MEP estequiométrico), de oxidación, SCR o LNT (MEC/MEP mezclas pobres), filtros de partículas (MEC)
- ❑ Normativas anticontaminantes:
  - El valor límite de las emisiones se reduce continuamente
  - Es distinta para cada tipo de motor y cada aplicación
- ❑ CO<sub>2</sub>: problema complejo que trasciende al diseño del motor

INTRODUCCIÓN	EMISIONES REGULADAS	POST-TRATAMIENTO	NORMATIVAS	CO <sub>2</sub>	R
--------------	---------------------	------------------	------------	-----------------	---

## BIBLIOGRAFÍA

- ❑ F. Payri y J.M. Desantes  
"Motores de Combustión Interna Alternativos" (Cap. 15 y 21)
  
  - ❑ J.B. Heywood  
"Internal Combustion Engine Fundamentals" (Cap. 4 y 5)
  
  - ❑ R. Stone  
"Introduction to Internal Combustion Engines" (Cap. 11)
  
  - ❑ R. van Basshuysen y F. Schäfer  
"Internal Combustion Engine Handbook: Basics, Components, Systems  
and Perspectives" (Cap. 21)
-



## CONTENIDO

- ❑ Introducción:
  - Evolución histórica
  - Fundamentos de control
- ❑ Sistemas controlados en los MCIA
- ❑ Sensores
- ❑ Control electrónico

INTRODUCCIÓN	SISTEMAS CONTROLADOS	SENSORES	CONTROL ELECTRÓNICO	R
--------------	----------------------	----------	---------------------	---

## EVOLUCIÓN HISTÓRICA

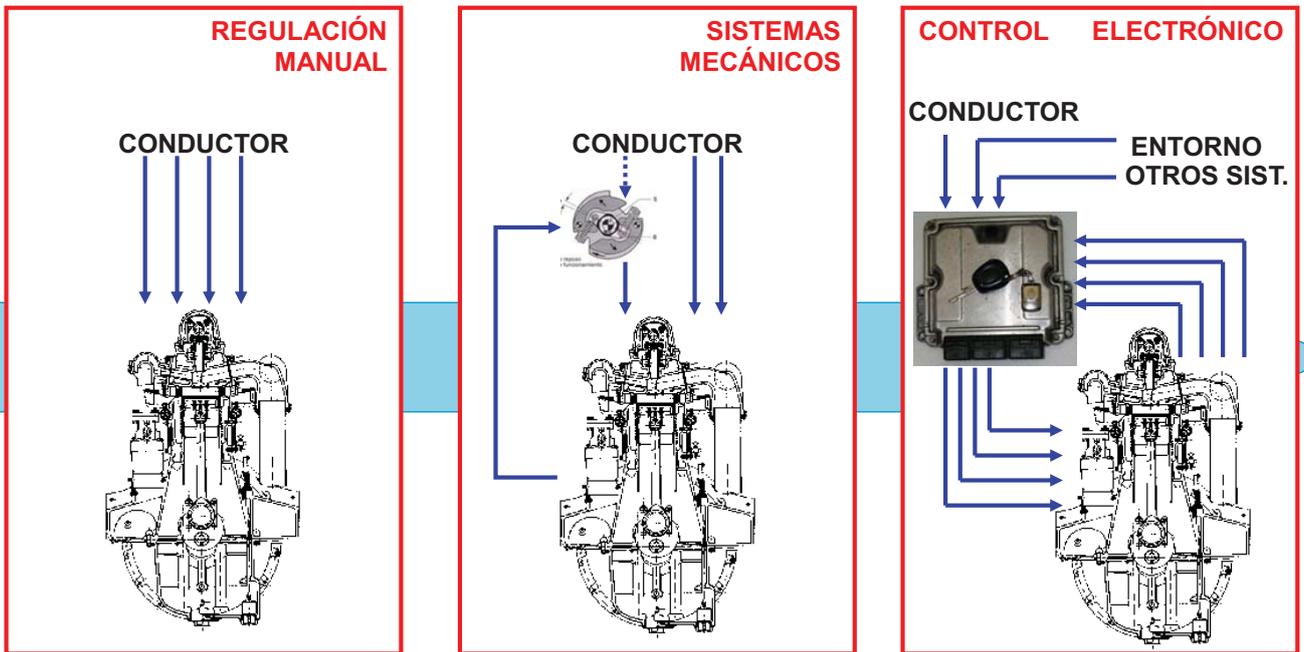
**REGULACIÓN MANUAL**

**SISTEMAS MECÁNICOS (desde 1920-1930)**

**CONTROL ELECTRÓNICO (desde 1970s)**

INTRODUCCIÓN	SISTEMAS CONTROLADOS	SENSORES	CONTROL ELECTRÓNICO	R
--------------	----------------------	----------	---------------------	---

# EVOLUCIÓN HISTÓRICA



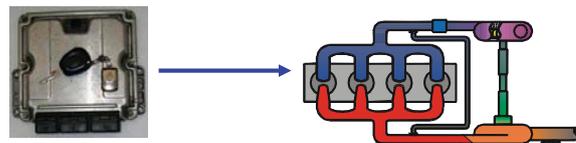
INTRODUCCIÓN	SISTEMAS CONTROLADOS	SENSORES	CONTROL ELECTRÓNICO	R
--------------	----------------------	----------	---------------------	---

# FUNDAMENTOS DE CONTROL

Los sistemas de control básicos se pueden clasificar en:

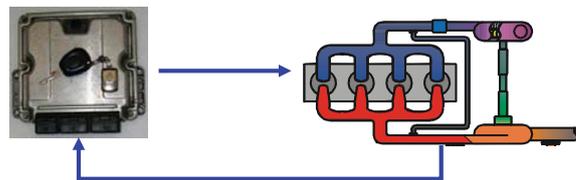
➤ **Bucle abierto:** La acción de control no tiene en cuenta la diferencia entre el valor de la variable y el valor deseado

(no garantiza la posición)



➤ **Bucle cerrado:** La acción de control se calcula a partir de la diferencia entre el valor actual de la variable y la consigna

(uso generalizado de controles PID –pueden garantizar la posición)



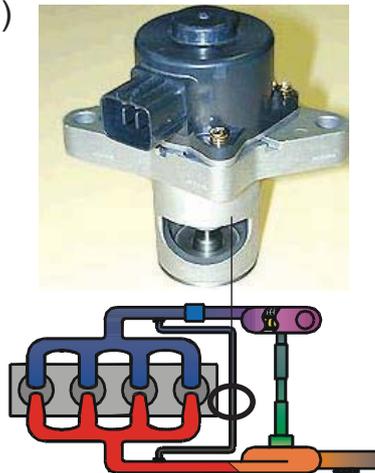
La estrategia de control se ve fuertemente condicionada por las variables que se es capaz de medir (o estimar). Además hay implicaciones sobre la estabilidad y robustez

INTRODUCCIÓN	SISTEMAS CONTROLADOS	SENSORES	CONTROL ELECTRÓNICO	R
--------------	----------------------	----------	---------------------	---

# SISTEMAS CONTROLADOS

❑ Sistemas de gestión del bucle de aire (I):

- Mariposa de admisión (MEP,MEC)
- Turbina de geometría variable (MEC)
- Válvula de EGR (MEP,MEC)
- Waste gate (MEP,MEC)

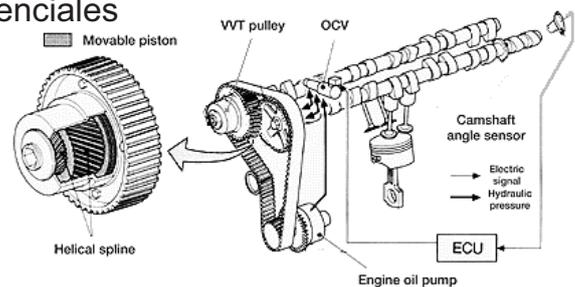
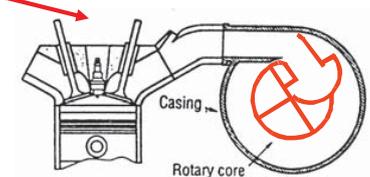


INTRODUCCIÓN	SISTEMAS CONTROLADOS	SENSORES	CONTROL ELECTRÓNICO	R
--------------	----------------------	----------	---------------------	---

# SISTEMAS CONTROLADOS

❑ Sistemas de gestión del bucle de aire (II):

- Sistema de admisión de geometría variable (MEP)
- Sistema de escape de geometría variable (MEP)
- Lumbreras de altura variable (MEP 2T)
- Sistemas de distribución variable (MEP)
- Válvula de swirl (MEC)
- Compresor geometría variable (MEC futuro)
- Sistemas de distribución variable electrohid. (futuro)
- Sistemas de sobrealimentación secuenciales (Sistema biturbo Peugeot: ¡WG+EGR+3 válvulas adicionales!)
- ...



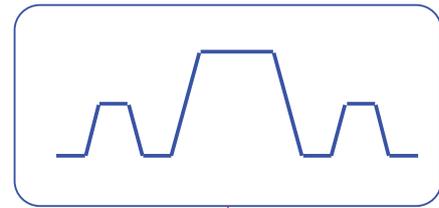
INTRODUCCIÓN	SISTEMAS CONTROLADOS	SENSORES	CONTROL ELECTRÓNICO	R
--------------	----------------------	----------	---------------------	---

# SISTEMAS CONTROLADOS

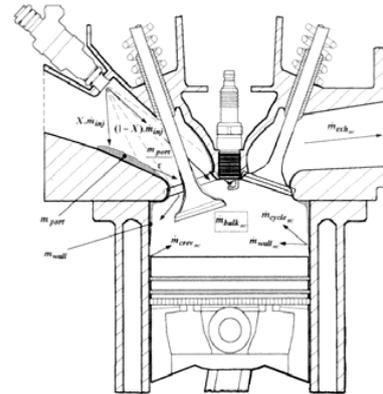
- ❑ Gestión de la inyección - MEC:
  - Presión de inyección (bomba baja presión, bomba alta presión y válvula de descarga)
  - Inicio de la inyección
  - Duración de la inyección

hasta x5 inyecciones por cilindro y ciclo

  - Perfil de la inyección (futuro)



- ❑ Gestión de la inyección - MEP:
  - Presión de inyección
  - Inicio de la inyección
  - Duración de la inyección
  - Inyección directa gasolina ↔ convergencia con gestión MEC



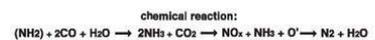
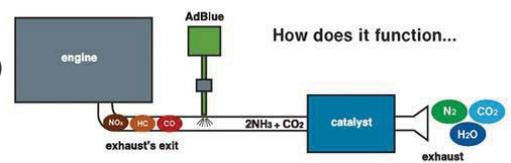
INTRODUCCIÓN	SISTEMAS CONTROLADOS	SENSORES	CONTROL ELECTRÓNICO	R
--------------	----------------------	----------	---------------------	---

# SISTEMAS CONTROLADOS

- ❑ Gestión del encendido - MEP:
  - Avance de encendido
  - Energía chispa
- ❑ Gestión térmica:
  - Bypass radiador/intercambiadores
  - Electroventilador
  - Bujías de precalentamiento (MEC)
  - ...



- ❑ Sistemas de postratamiento
- ❑ Transmisión/vehículo:
  - Panel salpicadero (testigos, indicadores MIL...)
  - Frenos
  - Caja de cambios
  - Compresor aire acondicionado
  - Sistemas híbridos...



**Ejemplo con SCR**

❑ ...

INTRODUCCIÓN	SISTEMAS CONTROLADOS	SENSORES	CONTROL ELECTRÓNICO	R
--------------	----------------------	----------	---------------------	---

## SENSORES HABITUALES

❑ Los sensores empleados en el control del motor deben ser:

- Fiables, robustos y duraderos
- Económicos
- **Necesarios**

❑ La inclusión de un sensor en el sistema de control es compleja:

Ejemplo: sensor de presión en cámara

- Excelente herramienta de diagnóstico
- Problemas industrialización (solucionables)
- No está claro cómo utilizarlo en labores de control



INTRODUCCIÓN	SISTEMAS CONTROLADOS	SENSORES	CONTROL ELECTRÓNICO	R
--------------	----------------------	----------	---------------------	---

## SENSORES HABITUALES

❑ Sensores disponibles en motores de serie (I):

- Posición acelerador → (suele estar **duplicado**)
- Pedal de freno, embrague, marcha engranada, velocidad vehículo
- Posición cigüeñal → (crítico para ubicar la inyección/encendido)
- Posición árbol de levas (identifica PMS de compresión)



INTRODUCCIÓN	SISTEMAS CONTROLADOS	SENSORES	CONTROL ELECTRÓNICO	R
--------------	----------------------	----------	---------------------	---

## SENSORES HABITUALES

### ❑ Sensores disponibles en motores de serie (II):

- Presión sobrealimentación
- Gasto de aire
- Posición diferentes actuadores (TGV, EGR, waste-gate, mariposa, etc.)



Chaivavont



INTRODUCCIÓN

SISTEMAS  
CONTROLADOS

SENSORES

CONTROL  
ELECTRÓNICO

R

## SENSORES HABITUALES

### ❑ Sensores disponibles en motores de serie (III):

- Temperatura refrigerante del motor
- Temperatura lubricante
- Temperatura carburante
- Temperatura aire en admisión

Gestión térmica del motor.

Críticos por seguridad del motor y gestión del arranque



- Presión de inyección (en el rail)  
(control inyección)

- Acelerómetro en el bloque  
(sensor picado, ruido)



INTRODUCCIÓN

SISTEMAS  
CONTROLADOS

SENSORES

CONTROL  
ELECTRÓNICO

R

# SENSORES HABITUALES

❑ Sensores disponibles en motores de serie (IV):

➤ Sonda lambda →  
 (suele haber dos en MEP, permite control del dosado y diagnóstico catalizador. Menos extendida en MEC)



➤ Medida presión diferencial →  
 (regeneración trampa de partículas)  
 ➤ Sonda concentración NOx  
 (poco extendido, prácticamente experimental)



INTRODUCCIÓN	SISTEMAS CONTROLADOS	<b>SENSORES</b>	CONTROL ELECTRÓNICO	R
--------------	----------------------	-----------------	---------------------	---

# CONTROL ELECTRÓNICO

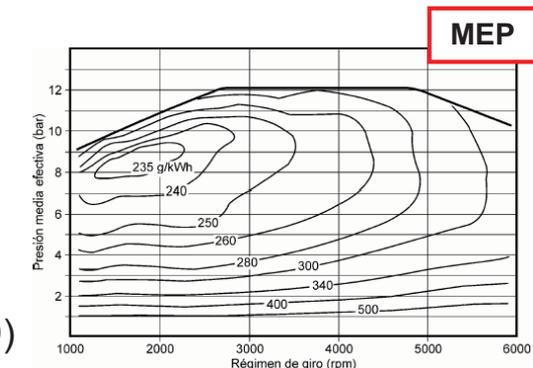
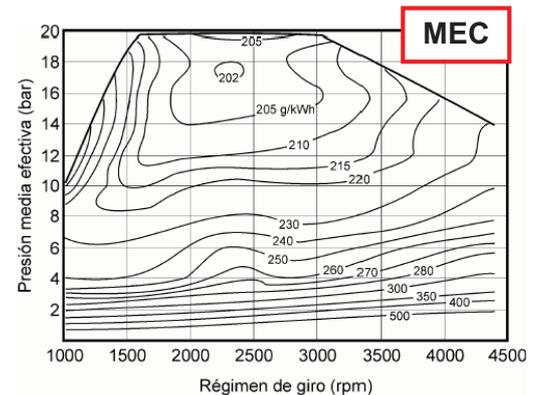
❑ Permite actuar sobre los sistemas del motor de forma diferenciada según los requerimientos de conducción y funcionamiento → **gran flexibilidad**

❑ Cada punto de funcionamiento está sujeto a optimización:

- Reducción de las emisiones contaminantes
- Optimización del rendimiento / prestaciones

❑ Interacción con otros elementos de control del vehículo (ABS, ETC, cambio automático, control de velocidad, etc.)

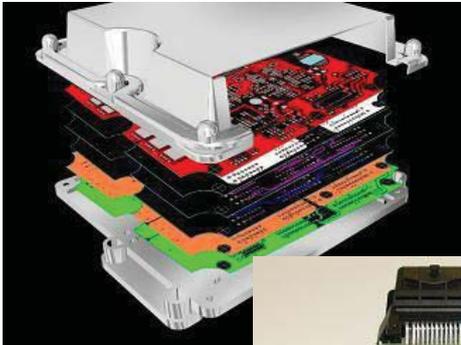
❑ Diagnóstico (*on board diagnostics OBD*) – de obligado cumplimiento



INTRODUCCIÓN	SISTEMAS CONTROLADOS	SENSORES	<b>CONTROL ELECTRÓNICO</b>	R
--------------	----------------------	----------	----------------------------	---

# CONTROL ELECTRÓNICO

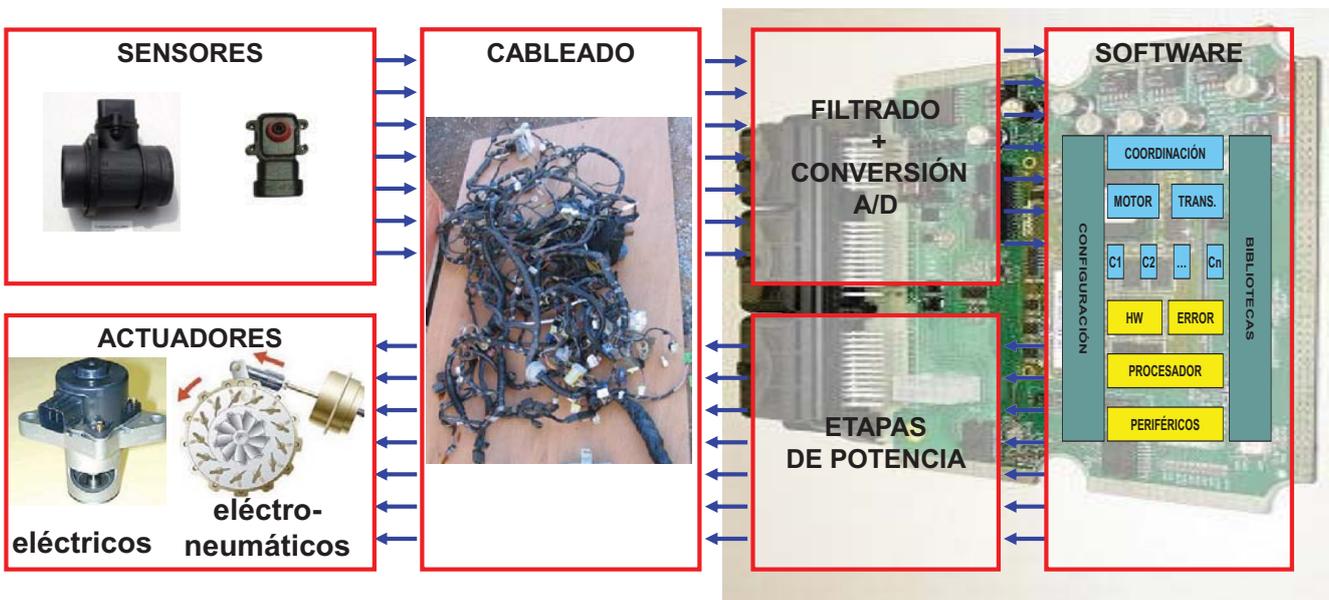
❑ ECU (electronic/engine control unit) o PCM (powertrain control module)



INTRODUCCIÓN	SISTEMAS CONTROLADOS	SENSORES	<b>CONTROL ELECTRÓNICO</b>	R
--------------	----------------------	----------	----------------------------	---

# CONTROL ELECTRÓNICO

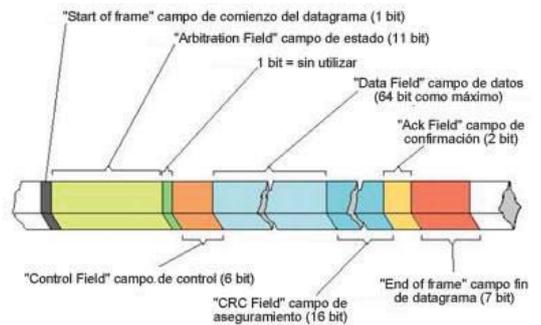
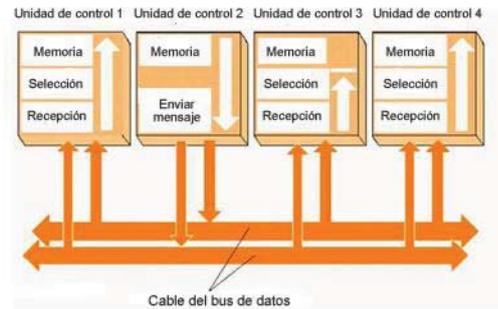
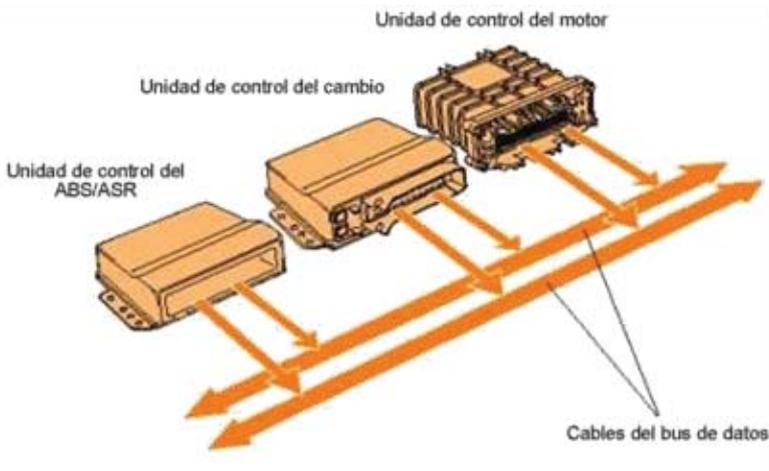
❑ Esquema general del sistema de control (HW+SW)



INTRODUCCIÓN	SISTEMAS CONTROLADOS	SENSORES	<b>CONTROL ELECTRÓNICO</b>	R
--------------	----------------------	----------	----------------------------	---

# CONTROL ELECTRÓNICO

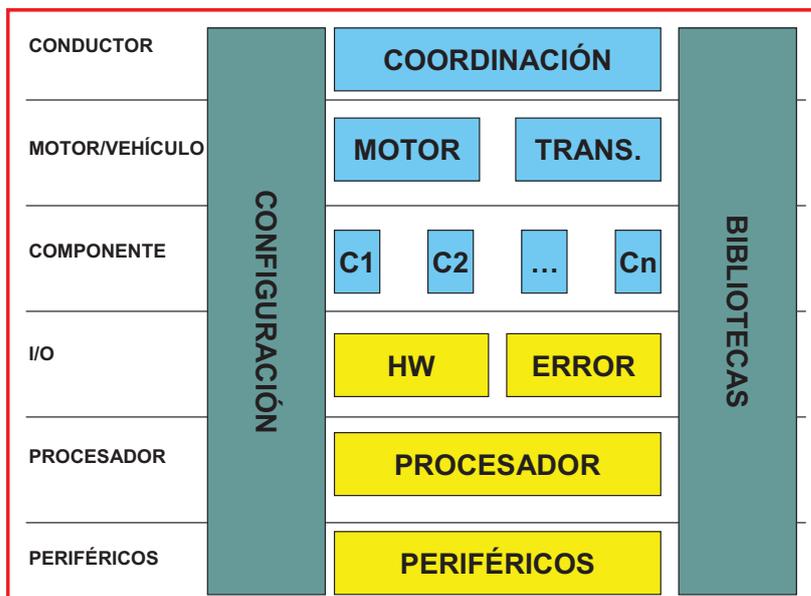
Los cableados convencionales están siendo sustituidos por conexiones por bus de datos – CAN (controller area network)



INTRODUCCIÓN	SISTEMAS CONTROLADOS	SENSORES	<b>CONTROL ELECTRÓNICO</b>	R
--------------	----------------------	----------	----------------------------	---

# CONTROL ELECTRÓNICO

Programación por niveles



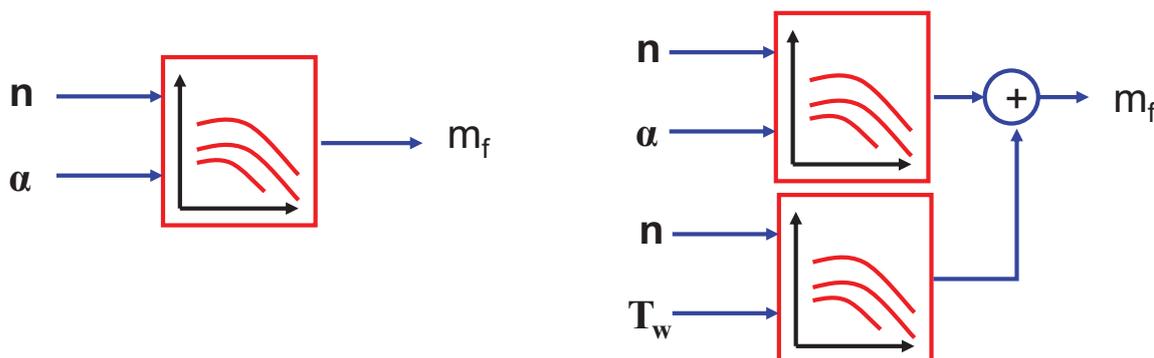
"quiero acelerar" → par objetivo  
 par objetivo → refs. sistemas  
 refs. sistemas → actuadores  
 señales de salida y de entrada

INTRODUCCIÓN	SISTEMAS CONTROLADOS	SENSORES	<b>CONTROL ELECTRÓNICO</b>	R
--------------	----------------------	----------	----------------------------	---

# CONTROL ELECTRÓNICO

□ Uso extendido de *cartografías* (tablas 2D que contienen un mapa característico de las variables de control: referencias, parámetros, valores de actuación en bucle abierto, correcciones...)

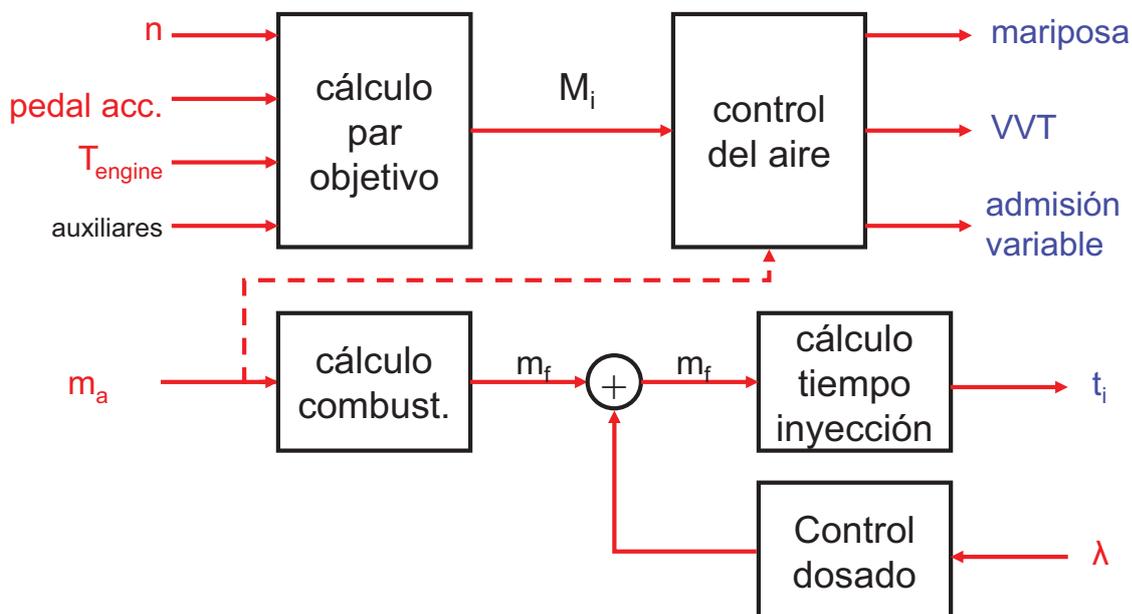
	1000	2000	3000	4000	5000
0	3.2	1.2	0	0	0
25	13	9.2	7.5	2	1
50	72	60.5	52.1	43	30
100	80	77	60	50	40



# CONTROL ELECTRÓNICO

sensores  
actuadores

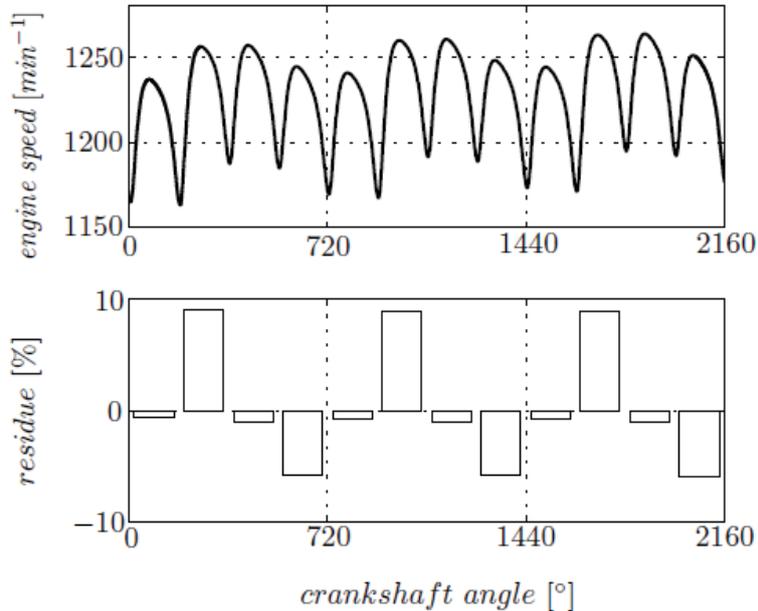
□ Control de la mezcla MEP



# CONTROL ELECTRÓNICO

sensores  
actuadores

□ Balanceo de la inyección / detección de fallos de encendido

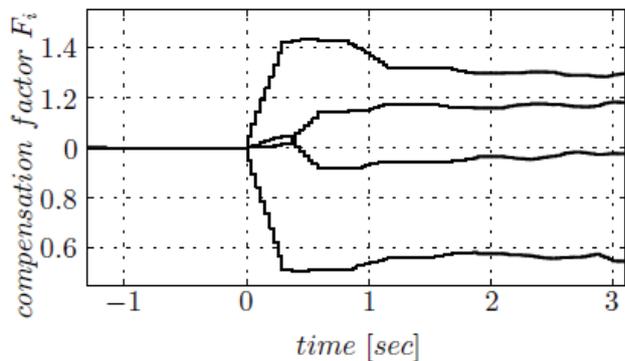
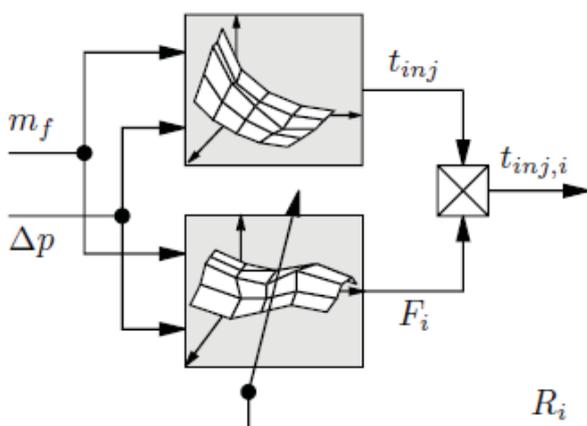


INTRODUCCIÓN	SISTEMAS CONTROLADOS	SENSORES	<b>CONTROL ELECTRÓNICO</b>	R
--------------	----------------------	----------	----------------------------	---

# CONTROL ELECTRÓNICO

sensores  
actuadores

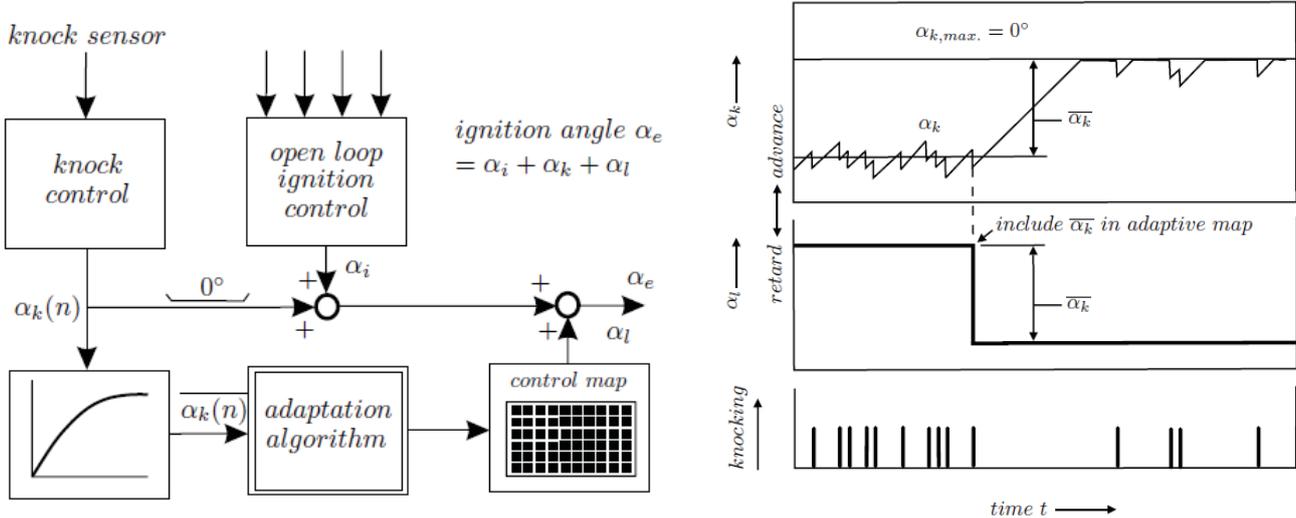
□ Balanceo de la inyección / detección de fallos de encendido



INTRODUCCIÓN	SISTEMAS CONTROLADOS	SENSORES	<b>CONTROL ELECTRÓNICO</b>	R
--------------	----------------------	----------	----------------------------	---

# CONTROL ELECTRÓNICO

## Control del encendido MEP

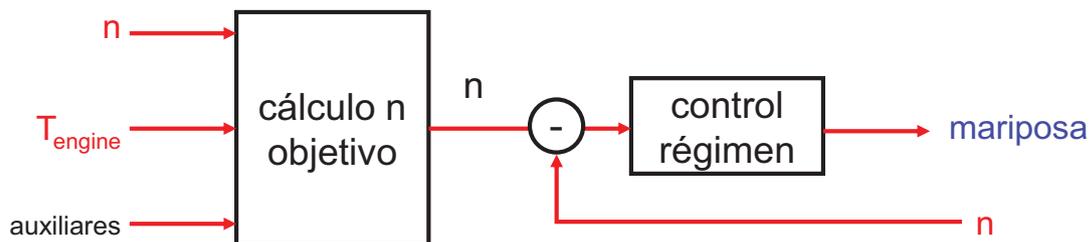


INTRODUCCIÓN	SISTEMAS CONTROLADOS	SENSORES	<b>CONTROL ELECTRÓNICO</b>	R
--------------	----------------------	----------	----------------------------	---

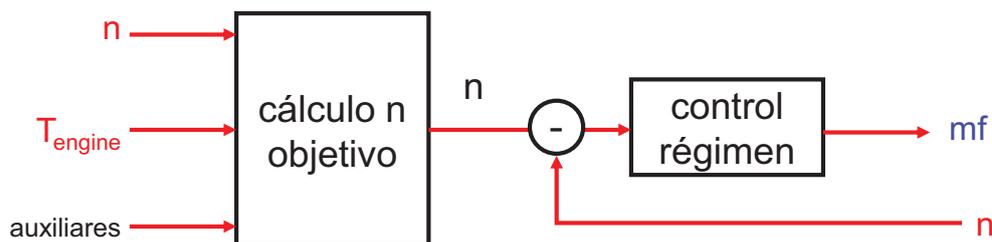
# CONTROL ELECTRÓNICO

sensores  
actuadores

## Control del ralentí en MEP



## Control de ralentí en MEC

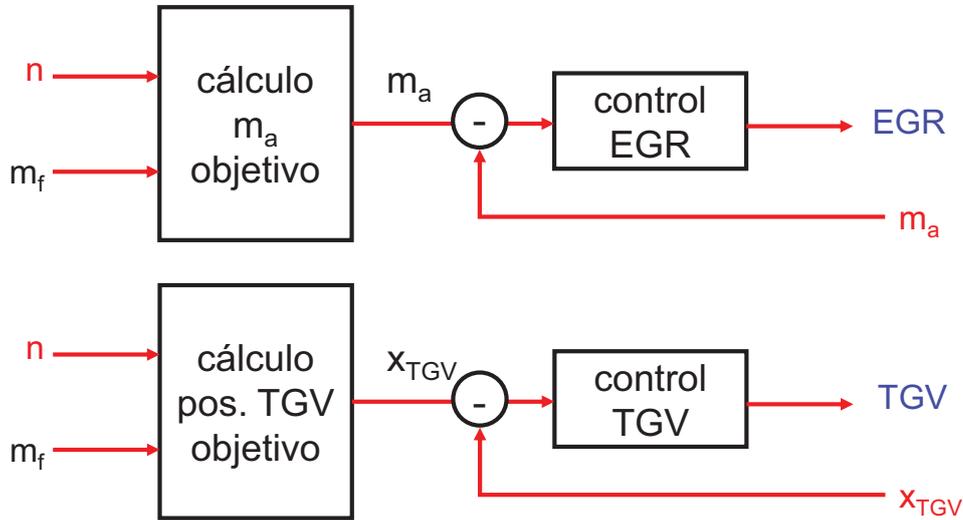


INTRODUCCIÓN	SISTEMAS CONTROLADOS	SENSORES	<b>CONTROL ELECTRÓNICO</b>	R
--------------	----------------------	----------	----------------------------	---

# CONTROL ELECTRÓNICO

sensores  
actuadores

Control del bucle de aire en MEC (con EGR y la TGV en posición fija)

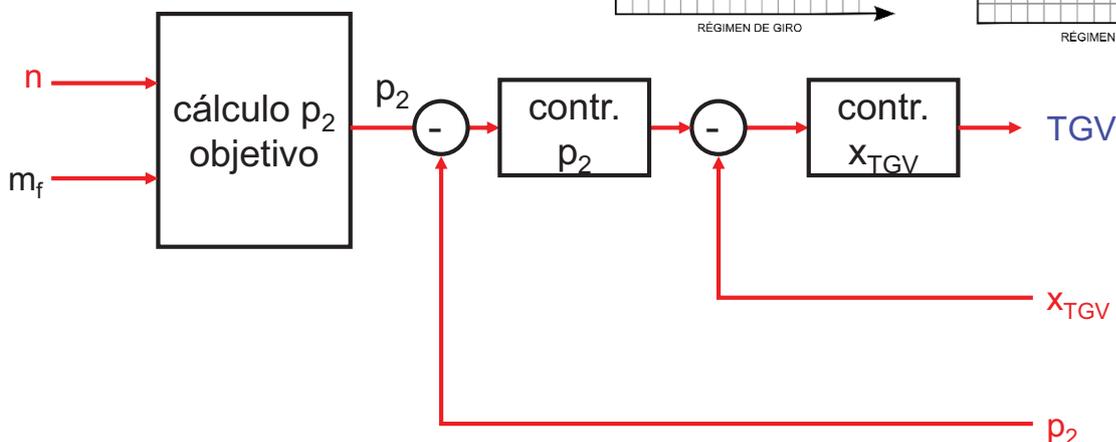
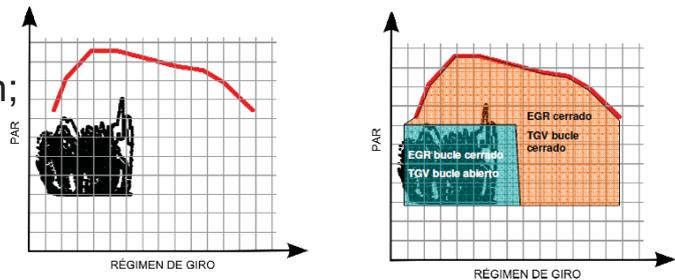


INTRODUCCIÓN	SISTEMAS CONTROLADOS	SENSORES	<b>CONTROL ELECTRÓNICO</b>	R
--------------	----------------------	----------	----------------------------	---

# CONTROL ELECTRÓNICO

sensores  
actuadores

Control del bucle de aire en MEC (control sobrealimentación; EGR=0)

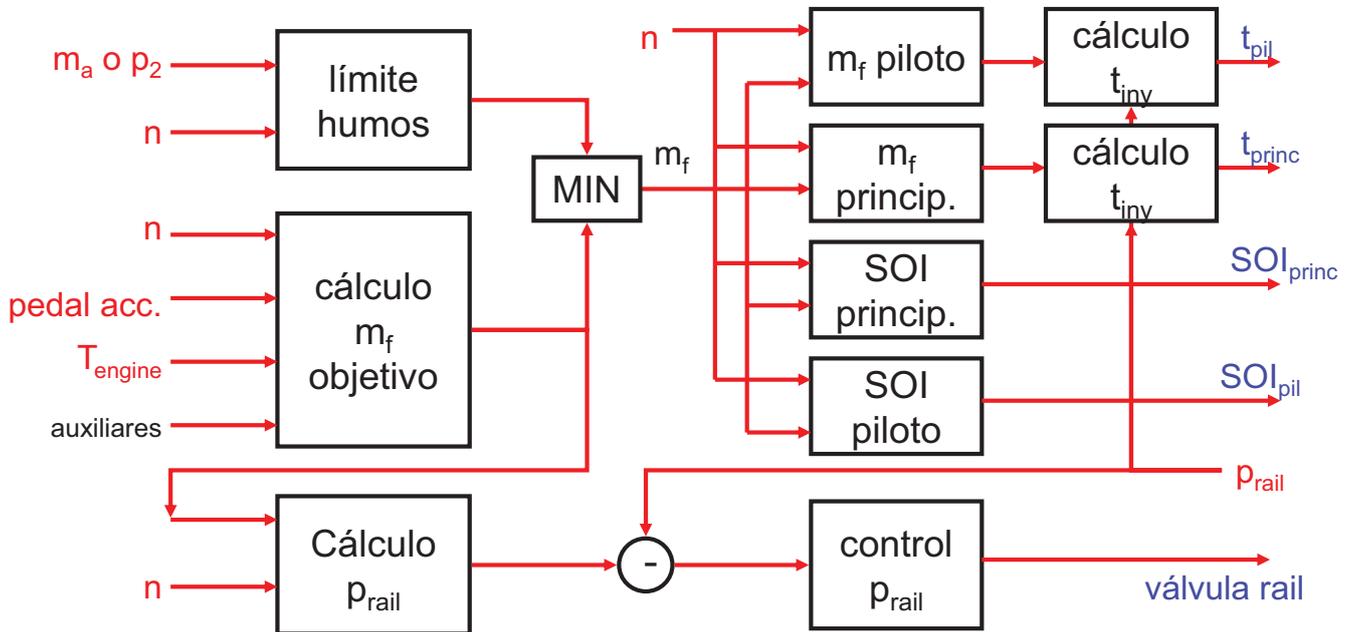


INTRODUCCIÓN	SISTEMAS CONTROLADOS	SENSORES	<b>CONTROL ELECTRÓNICO</b>	R
--------------	----------------------	----------	----------------------------	---

# CONTROL ELECTRÓNICO

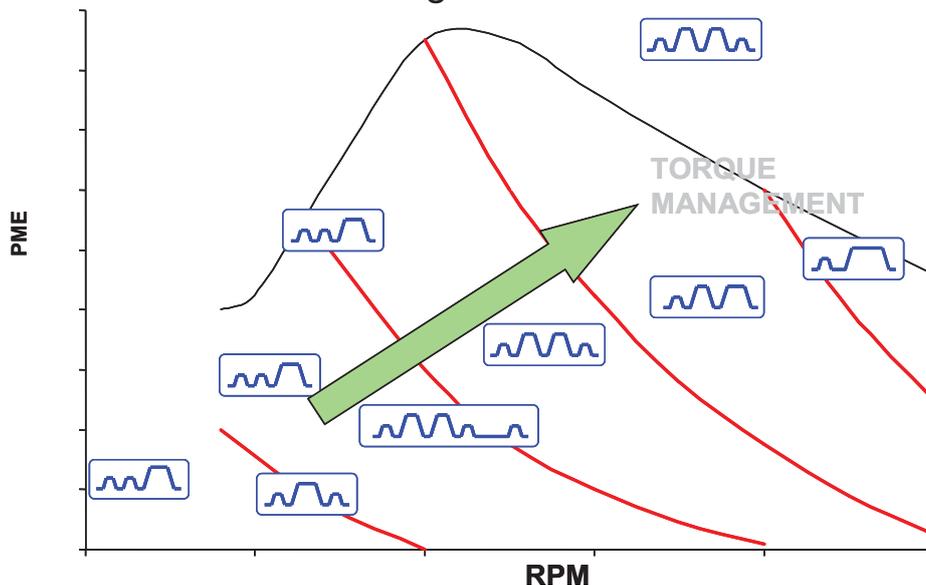
sensores  
actuadores

## Control inyección y limitación de humos



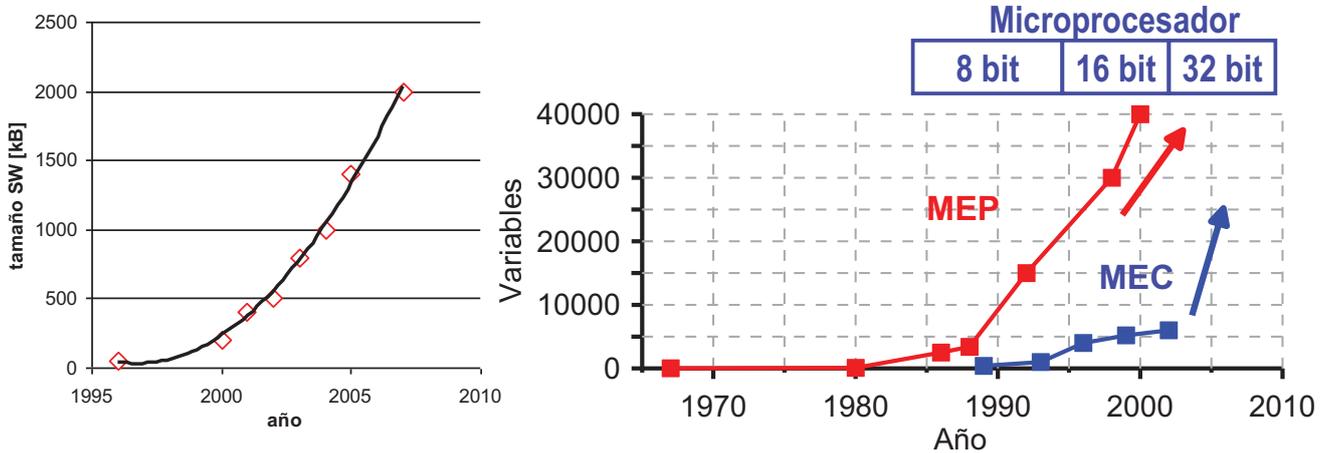
# CONTROL ELECTRÓNICO

En el caso real → la gran flexibilidad del sistema supone aumentar el número de cartografías



# CONTROL ELECTRÓNICO

❑ En el caso real → la gran flexibilidad del sistema supone aumentar el número de cartografías



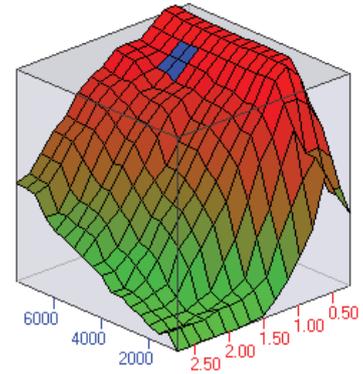
# CONTROL ELECTRÓNICO

❑ Número de parámetros en la ECU. Ejemplos

	DV4 (2002)	DV6 (2003)	DW12 (2006)
<b>variables</b>	4027	6477	11274
<b>mapas</b>	144	325	681
<b>curvas</b>	200	389	863
<b>valores modificables</b>	~50000	~90000	~190000

## CONTROL ELECTRÓNICO

- ❑ Existen decenas de miles de parámetros calibrables
- ❑ La **calibración** es el proceso que permite la selección de estos valores, principalmente en base a ensayos experimentales
- ❑ Es un proceso complejo debido a la gran cantidad de grados de libertad del sistema



INTRODUCCIÓN

SISTEMAS  
CONTROLADOS

SENSORES

CONTROL  
ELECTRÓNICO

R

## RESUMEN

- ❑ El control de los motores ha evolucionado paralelamente a los motores. En la actualidad se emplean sistemas electrónicos basados en unidades de control electrónico (ECU – electronic control unit)
- ❑ La ECU gobierna todos los sistemas que componen el motor y permite la interacción entre diferentes sistemas del vehículo
- ❑ Para controlar y diagnosticar los diferentes sistemas del motor es preciso el empleo de sensores
- ❑ El control electrónico permite gran flexibilidad: es posible optimizar el funcionamiento del motor en cada punto de operación
- ❑ La calibración de los sistemas de control es un problema importante que debe resolverse en el proceso de diseño

INTRODUCCIÓN

SISTEMAS  
CONTROLADOS

SENSORES

ECU

R

---

## BIBLIOGRAFÍA

- F. Payri y J.M. Desantes  
"Motores de Combustión Interna Alternativos" (Cap. 23)
  
  - R. van Basshuysen y F. Schäfer  
"Internal Combustion Engine Handbook: Basics, Components, Systems and Perspectives" (Cap. 16, 17, 18 y 19)
  
  - L. Guzzella y C.H. Onder  
"Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems"
-



## CONTENIDO

- Introducción
- Bases que definen la semejanza
- Consecuencias de la semejanza
- Efectos de la subdivisión de la cilindrada
- Consideraciones finales
- Resumen

INTRODUCCIÓN	BASES SEMEJANZA	CONSE- CUENCIAS	SUBDIVISIÓN CILINDRADA	CONSIDERAC. FINALES	R
--------------	--------------------	--------------------	---------------------------	------------------------	---

## INTRODUCCIÓN

- Teoría de semejanza específica para MCIA, con gran número de simplificaciones para su desarrollo
- Tendencias** en los MCIA al variar su cilindrada
- Herramienta útil para diseño de motores y para la elección de motor en una determinada aplicación

INTRODUCCIÓN	BASES SEMEJANZA	CONSE- CUENCIAS	SUBDIVISIÓN CILINDRADA	CONSIDERAC. FINALES	R
--------------	--------------------	--------------------	---------------------------	------------------------	---

## INTRODUCCIÓN

□ Aunque de tamaños muy dispares, hay motores que son comparables (aunque otros NO)

$V_D = 390.07 \text{ cm}^3 \text{ (x 4)}$   
 $D = 75.0 \text{ mm}$   
 $S = 88.3 \text{ mm}$   
 $N_e = 20 \text{ kW/cil}$   
 $n_{\max} = 4500 \text{ rpm}$



$V_D = 2687.2 \text{ cm}^3 \text{ (x 6)}$   
 $D = 144.0 \text{ mm}$   
 $S = 165.0 \text{ mm}$   
 $N_e = 74.7 \text{ kW/cil}$   
 $n_{\max} = 1850 \text{ rpm}$

$V_D = 6.36 \text{ cm}^3 \text{ (x 1)}$   
 $D = 21.0 \text{ mm}$   
 $S = 18.3 \text{ mm}$   
 $N_e = 735 \text{ W}$   
 $n_{\max} = 16000 \text{ rpm}$



$V_D = 1.81 \text{ m}^3 \text{ (x 14)}$   
 $D = 0.96 \text{ m}$   
 $S = 2.5 \text{ m}$   
 $N_e = 5720 \text{ kW/cil}$   
 $n_{\max} = 102 \text{ rpm}$

INTRODUCCIÓN

BASES  
SEMEJANZA

CONSE-  
CUENCIAS

SUBDIVISIÓN  
CILINDRADA

CONSIDERAC.  
FINALES

R

## BASES QUE DEFINEN LA SEMEJANZA

□ Semejanza geométrica

$$\frac{D_1}{S_1} = \frac{D_2}{S_2} \Rightarrow \frac{D_1}{D_2} = \frac{S_1}{S_2}$$

□ Condiciones adicionales

- Mismas condiciones ambientales
- Mismos reglajes ( $F$ ,  $T_{\text{ref}}$ , etc)
- Misma **velocidad media del pistón** ( $c_m$ )
- Mismo diagrama de distribución

⇒ pmi  
pme

INTRODUCCIÓN

BASES  
SEMEJANZA

CONSE-  
CUENCIAS

SUBDIVISIÓN  
CILINDRADA

CONSIDERAC.  
FINALES

R

## DEMOSTRACIÓN (I) - pmi

### □ Presión media indicada (pmi)

$$pmi = \eta_v \cdot \rho_a \cdot F \cdot Hc \cdot \eta_i$$

- Densidad del aire:  $\rho_a$
- Dosado: F
- Poder calorífico del combustible: Hc
- Rendimiento volumétrico:  $\eta_v$ 
  - Flujo en la válvula
  - Efectos de inercia
  - Otros factores
- Rendimiento indicado:  $\eta_i$

INTRODUCCIÓN	BASES SEMEJANZA	CONSE- CUENCIAS	SUBDIVISIÓN CILINDRADA	CONSIDERAC. FINALES	R
--------------	--------------------	--------------------	---------------------------	------------------------	---

## DEMOSTRACIÓN (II) - $\eta_v$

### □ Rendimiento volumétrico ( $\eta_v$ )

- N° de mach en válvula (Taylor):

$$M_v = \left( \frac{D}{D_v} \right)^2 \cdot \frac{c_m}{a \cdot C_D}$$

- D / D<sub>v</sub> constante por semejanza geométrica
- c<sub>m</sub> la misma por hipótesis
- Velocidad del sonido es la misma ya que depende de T
- El coeficiente de descarga en la válvula (Taylor):

$$C_D = K \cdot \frac{L_{\max}}{D_v}$$

- Efectos de inercia (parámetro de inercia):

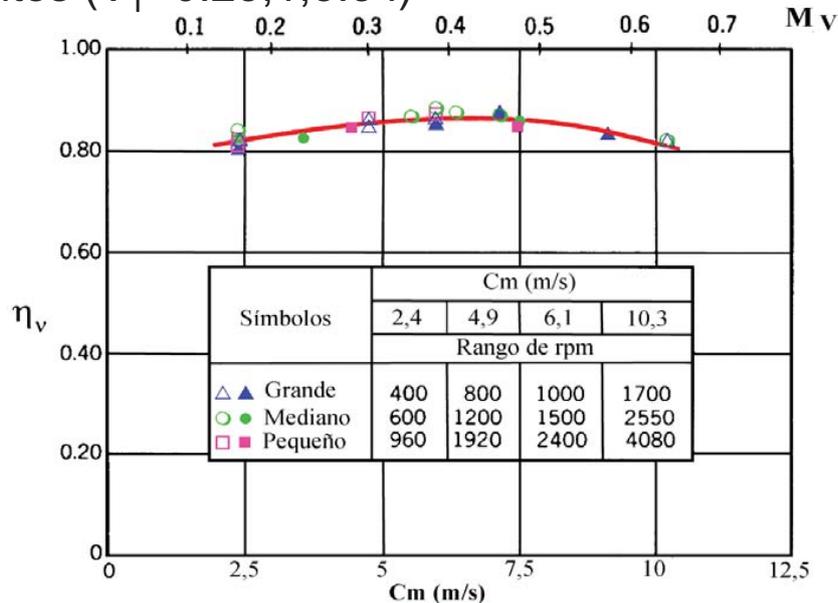
$$\Phi = \frac{E c_{\text{fluido}}}{V_D} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{L_c}{S} \cdot \left( \frac{D}{d_c} \right)^2 \cdot c_m^2$$

- Otros: condiciones amb., reglajes, combustible...

INTRODUCCIÓN	BASES SEMEJANZA	CONSE- CUENCIAS	SUBDIVISIÓN CILINDRADA	CONSIDERAC. FINALES	R
--------------	--------------------	--------------------	---------------------------	------------------------	---

## DEMOSTRACIÓN (III) - $\eta_v$

□ Ejemplo de evolución del  $\eta_v$  para un grupo de motores semejantes ( $V_T=0.25, 1, 3.3$  l)



INTRODUCCIÓN

**BASES  
SEMEJANZA**
CONSE-  
CUENCIASSUBDIVISIÓN  
CILINDRADACONSIDERAC.  
FINALES

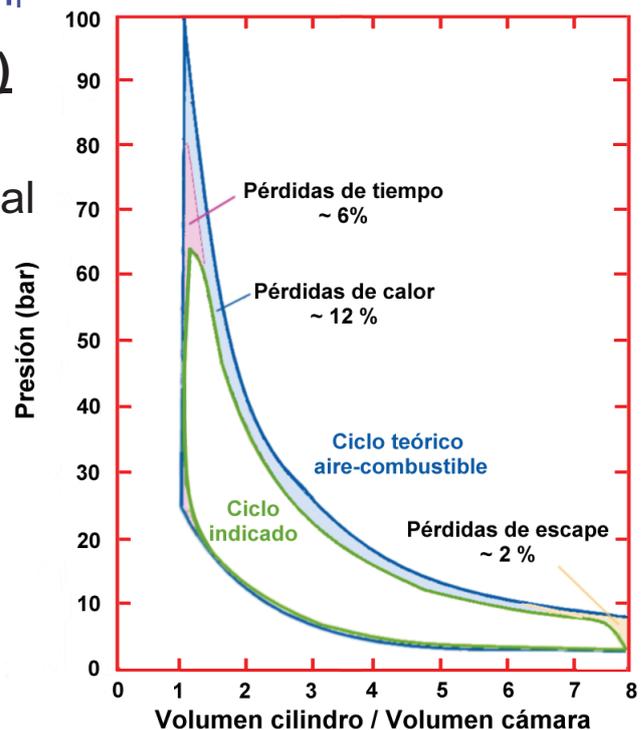
R

## DEMOSTRACIÓN (IV) - $\eta_i$

□ Rendimiento indicado ( $\eta_i$ )

➤ Ciclo real  $\leftrightarrow$  Ciclo ideal

- Pérdidas de tiempo
- Pérdidas de escape
- Pérdidas de calor



INTRODUCCIÓN

**BASES  
SEMEJANZA**
CONSE-  
CUENCIASSUBDIVISIÓN  
CILINDRADACONSIDERAC.  
FINALES

R

## DEMOSTRACIÓN (V) - pme

### □ Presión media efectiva (pme) y pérdidas mecánicas (pmpm)

$$pme = pmi - pmpm$$

$$pmpm = pmR + pma + pmb + pmc$$

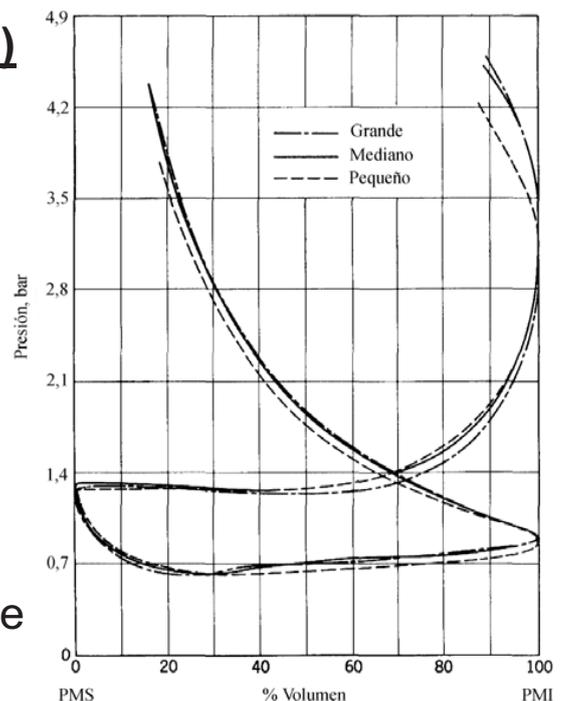
- presión media fricción (pmR)
- presión media admisión (pma) →  $N_a \propto N_i$
- presión media bombeo (pmb)
- presión media admisión (pmc) →  $N_c \propto N_i$

INTRODUCCIÓN	BASES SEMEJANZA	CONSE- CUENCIAS	SUBDIVISIÓN CILINDRADA	CONSIDERAC. FINALES	R
--------------	--------------------	--------------------	---------------------------	------------------------	---

## DEMOSTRACIÓN (VI) - pme

### □ Presión media efectiva (pme)

- Presión media de bombeo:
  - Mismo  $\eta_v$
  - Mismas pérdidas de carga en válvula ( $c_d$ )
  - Mismos efectos de compresibilidad e inercia
  - Mismas condiciones operativas
- Motores semejantes
- lazo de bombeo coincidente



INTRODUCCIÓN	BASES SEMEJANZA	CONSE- CUENCIAS	SUBDIVISIÓN CILINDRADA	CONSIDERAC. FINALES	R
--------------	--------------------	--------------------	---------------------------	------------------------	---

## DEMOSTRACIÓN (VII) - pme

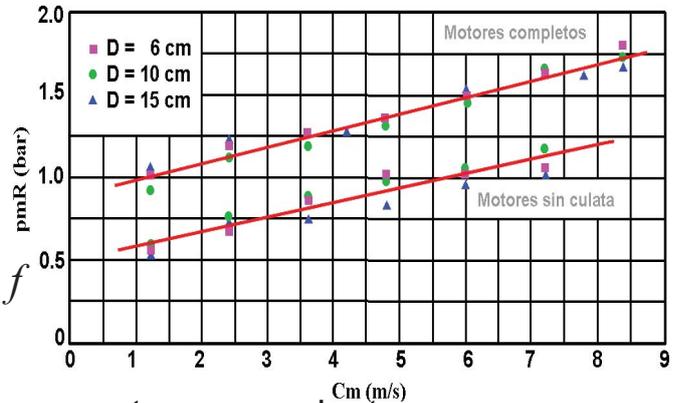
### Presión media efectiva (pme)

#### Presión media de fricción (pmR)

$$F_T = F_N \cdot f = F_N \cdot \left[ f_0 + f_1 \cdot \left( \frac{\mu \cdot u}{p \cdot L} \right)^n \right]$$

$$\frac{\mu}{L} = cte$$

$$pmR \approx \sum \left[ k_1' \cdot L + k_2' \cdot c_m^2 + k_3' \cdot p_{mi} \right] \cdot f$$



Igual para motores semejantes

Depende del tamaño

INTRODUCCIÓN	<b>BASES SEMEJANZA</b>	CONSECUENCIAS	SUBDIVISIÓN CILINDRADA	CONSIDERAC. FINALES	R
--------------	------------------------	---------------	------------------------	---------------------	---

## CONCLUSIÓN

### Presión media efectiva (pme)

#### Ante la igualdad de pmR, pmb, pmc y pma

→ igualdad de pmpm

#### Como además pmi era igual → motores semejantes mantienen la **pme**

#### Motores semejantes geoméricamente

#### Condiciones adicionales:

##### reglajes

##### funcionamiento

#### Aproximaciones simplificadoras

misma  
**pme**

INTRODUCCIÓN	<b>BASES SEMEJANZA</b>	CONSECUENCIAS	SUBDIVISIÓN CILINDRADA	CONSIDERAC. FINALES	R
--------------	------------------------	---------------	------------------------	---------------------	---

## CONSECUENCIAS DE LA SEMEJANZA

Estudiaremos motores semejantes

$$\lambda = \frac{S_2}{S_1} = \frac{D_2}{D_1} \quad \zeta = \frac{z_2}{z_1}$$

**Geometría**

$$\frac{A_{p,2}}{A_{p,1}} = \lambda^2 \quad \frac{V_{D,2}}{V_{D,1}} = \lambda^3 \quad \frac{V_{T,2}}{V_{T,1}} = \zeta^3$$

INTRODUCCIÓN	BASES SEMEJANZA	<b>CONSECUENCIAS</b>	SUBDIVISIÓN CILINDRADA	CONSIDERAC. FINALES	R
--------------	-----------------	----------------------	------------------------	---------------------	---

## CONSECUENCIAS DE LA SEMEJANZA

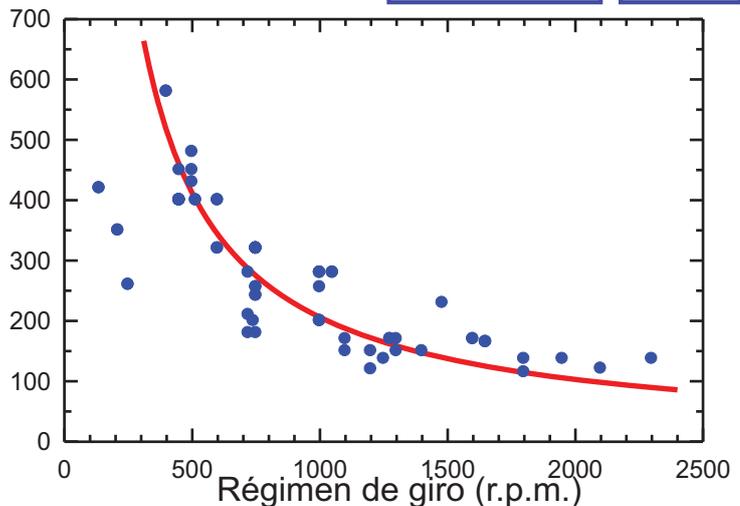
**Régimen de giro**

$$\lambda = \frac{S_2}{S_1} = \frac{D_2}{D_1} \quad \zeta = \frac{z_2}{z_1}$$

$$c_{m,1} = c_{m,2}$$

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{c_{m,2}/2S_2}{c_{m,1}/2S_1} = \frac{S_1}{S_2} = \lambda^{-1}$$

Diámetro (mm)



Los motores son más lentos a medida que crece su dimensión geométrica

INTRODUCCIÓN	BASES SEMEJANZA	<b>CONSECUENCIAS</b>	SUBDIVISIÓN CILINDRADA	CONSIDERAC. FINALES	R
--------------	-----------------	----------------------	------------------------	---------------------	---

## CONSECUENCIAS DE LA SEMEJANZA

### □ Potencia

$$\lambda = \frac{S_2}{S_1} = \frac{D_2}{D_1} \quad \zeta = \frac{z_2}{z_1}$$

$$\frac{N_{e,2}}{N_{e,1}} = \frac{z_2}{z_1} \frac{A_{p,2}}{A_{p,1}} \frac{c_{m,2}}{c_{m,1}} \frac{p_{me,2}}{p_{me,1}} = \zeta^2$$

$$\frac{N_{e,2}/z_2 A_{p,2}}{N_{e,1}/z_1 A_{p,1}} = \frac{N_{e,2}}{N_{e,1}} \frac{z_1}{z_2} \frac{A_{p,1}}{A_{p,2}} = \zeta^2 \zeta^{-1} \lambda^{-2} = 1$$

La potencia crece con el cuadrado de las dimensiones geométricas y la carga térmica es constante

### □ Par

$$M_e = \frac{p_{me} \cdot V_T \cdot i}{2\pi} \quad \frac{M_{e,2}}{M_{e,1}} = \frac{V_{T,2}}{V_{T,1}} = \zeta^3$$

INTRODUCCIÓN	BASES SEMEJANZA	CONSECUENCIAS	SUBDIVISIÓN CILINDRADA	CONSIDERAC. FINALES	R
--------------	-----------------	---------------	------------------------	---------------------	---

## CONSECUENCIAS DE LA SEMEJANZA

### □ Potencia específica

$$\lambda = \frac{S_2}{S_1} = \frac{D_2}{D_1} \quad \zeta = \frac{z_2}{z_1}$$

➤ Potencia específica por unidad de cilindrada

$$\frac{N_{e,2}/V_{T,2}}{N_{e,1}/V_{T,1}} = \frac{N_{e,2}}{N_{e,1}} \frac{V_{T,1}}{V_{T,2}} = \zeta^2 \zeta^{-1} \lambda^{-3} = \lambda^{-1}$$

La potencia específica de los motores varía en razón inversa a la relación de semejanza geométrica

	$S$ (mm)	$D$ (mm)	$z$	$N_e$ (kW)	$N_e/zA_p$ (kW/m <sup>2</sup> )	$N_e/V_T$ (kW/m <sup>3</sup> )	$\lambda^{-1} = \frac{S_1}{S_2}$	$\frac{N_{e,2}/V_{T,2}}{N_{e,1}/V_{T,1}}$
MEC 4T turismo	88.3	75	4	80	4527	51269	1	1
MEC 4T transporte	165	144	6	448	4587	27799	0,535	0,542
MEC 2T lento	2500	960	14	80080	7902	3161	0,035	0,062

INTRODUCCIÓN	BASES SEMEJANZA	CONSECUENCIAS	SUBDIVISIÓN CILINDRADA	CONSIDERAC. FINALES	R
--------------	-----------------	---------------	------------------------	---------------------	---

## CONSECUENCIAS DE LA SEMEJANZA

### □ Transmisión y pérdidas de calor

$$\lambda = \frac{S_2}{S_1} = \frac{D_2}{D_1} \quad \zeta = \frac{z_2}{z_1}$$

$$Nu = \frac{h_m D}{k_g} \quad Re = \frac{\rho u D}{\mu}$$

➤  $Re, Nu = f(D, \dots) \rightarrow$  los motores semejantes no mantienen la transmisión de calor

➤ Si se admite la expresión de Taylor y Toong para  $Q_r$

$$\dot{Q}_r = h_m \cdot A_p \cdot (T_g - T_r)$$

$$h_m = 10,4 \cdot \frac{k_g}{\mu^{0,75}} \cdot (\rho c_m)^{0,75} \cdot D^{-0,25}$$

$$Nu = 10,4 \cdot Re^{0,75}$$

$$\dot{Q}_r = 10,4 \cdot \frac{k_g}{\mu^{0,75}} \cdot (\rho c_m)^{0,75} \cdot D^{-0,25} \cdot A_p \cdot (T_g - T_r) \quad (\text{TyT})$$

INTRODUCCIÓN	BASES SEMEJANZA	CONSECUENCIAS	SUBDIVISIÓN CILINDRADA	CONSIDERAC. FINALES	R
--------------	-----------------	---------------	------------------------	---------------------	---

## CONSECUENCIAS DE LA SEMEJANZA

### □ Transmisión y pérdidas de calor

$$\lambda = \frac{S_2}{S_1} = \frac{D_2}{D_1} \quad \zeta = \frac{z_2}{z_1}$$

$$\frac{\dot{Q}_r}{z A_p} = 10,4 \frac{k_g}{\mu^{0,75}} (\rho c_m)^{0,75} D^{-0,25} (T_g - T_r)$$

➤ En motores semejantes

$$\frac{\dot{Q}_{r,2}/z_2 A_{p,2}}{\dot{Q}_{r,1}/z_1 A_{p,1}} = \lambda^{-0,25} \frac{(T_{g,2} - T_r)}{(T_{g,1} - T_r)} \quad \frac{\dot{Q}_{r,2}/z_2 A_{p,2}}{\dot{Q}_{r,1}/z_1 A_{p,1}} = \lambda^{-r} \quad -0,25 < r < 0$$

La energía cedida al refrigerante por unidad de superficie/potencia disminuye al aumentar el tamaño del motor

INTRODUCCIÓN	BASES SEMEJANZA	CONSECUENCIAS	SUBDIVISIÓN CILINDRADA	CONSIDERAC. FINALES	R
--------------	-----------------	---------------	------------------------	---------------------	---

## CONSECUENCIAS DE LA SEMEJANZA

❑ Al aumentar el tamaño, disminuyen las pérdidas de calor relativas

- (T<sub>g</sub>-T<sub>r</sub>) aumenta → Aumentan tensiones térmicas → Mayores problemas de materiales y de engrase.
- La energía disponible en gases de escape aumenta → Sobrealimentación por turbina de escape

- El rendimiento aumenta, pero también los problemas térmicos (y por tanto las hipótesis de la semejanza no son rigurosas)
- MEP: aumenta la tendencia a la detonación
- MEC:
  - Se reduce el tiempo de retraso → Se reduce la marcha dura
  - Menos problemas de arranque en frío

INTRODUCCIÓN	BASES SEMEJANZA	CONSECUENCIAS	SUBDIVISIÓN CILINDRADA	CONSIDERAC. FINALES	R
--------------	-----------------	---------------	------------------------	---------------------	---

## SUBDIVISIÓN DE LA CILINDRADA

❑ Comparación motores con distinto n° de cilindros, pero de igual cilindrada total

$$\frac{V_{T,2}}{V_{T,1}} = \zeta^3 = 1 \quad \lambda = \zeta^{-1/3}$$

Entonces:

$$\frac{N_{e,2}/V_{T,2}}{N_{e,1}/V_{T,1}} = \lambda^{-1} = \zeta^{1/3}$$

El motor con mayor número de cilindros tiene mayor potencia específica

INTRODUCCIÓN	BASES SEMEJANZA	CONSECUENCIAS	SUBDIVISIÓN CILINDRADA	CONSIDERAC. FINALES	R
--------------	-----------------	---------------	------------------------	---------------------	---

## SUBDIVISIÓN DE LA CILINDRADA

□ Ejemplo: Reglamento de Superbikes (hasta 2004)

➤ Se limita:

- Peso mínimo
- Cilindrada máxima, en función del número de cilindros

2 cilindros	1000 cm <sup>3</sup>
3 cilindros	900 cm <sup>3</sup>
4 cilindros	750 cm <sup>3</sup>

Con ello se igualan las prestaciones de las diferentes configuraciones (*de forma teórica*)

INTRODUCCIÓN	BASES SEMEJANZA	CONSECUENCIAS	SUBDIVISIÓN CILINDRADA	CONSIDERAC. FINALES	R
--------------	-----------------	---------------	------------------------	---------------------	---

## SUBDIVISIÓN DE LA CILINDRADA

□ Ejemplo: Reglamento de Superbikes (hasta 2004)

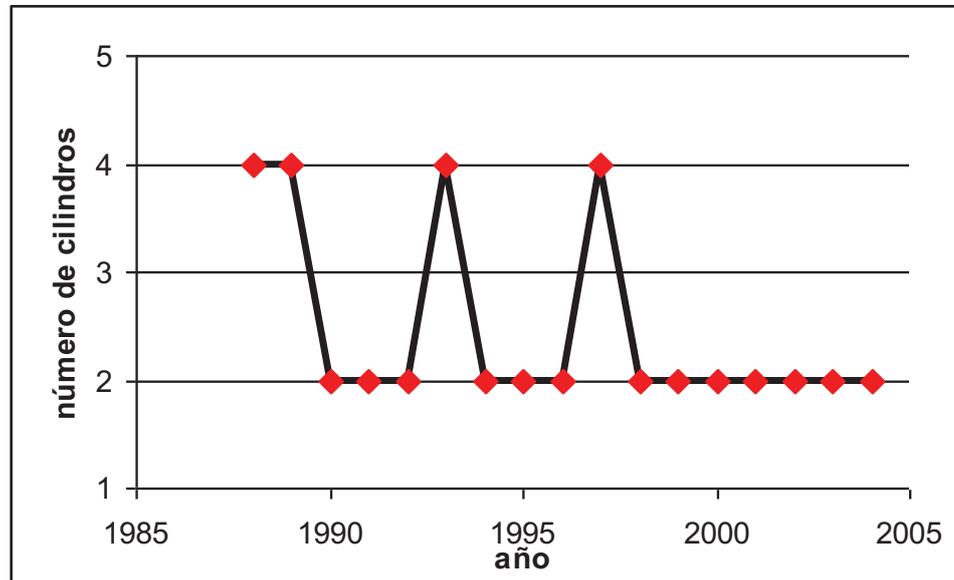
$z$ [-]	$V_T$ [cm <sup>3</sup> ]	$V_D$ [cm <sup>3</sup> ]	$\zeta$ [-]	$\lambda$ [-]	$\zeta \lambda^2$
<b>2</b>	<b>1000</b>	500	0.5	1.39	<b>0.96</b>
<b>3</b>	<b>900</b>	300	0.75	1.17	<b>1.03</b>
<b>4</b>	<b>750</b>	187.5	1	1	<b>1</b>

$$\frac{N_{e,2}}{N_{e,1}} = \zeta^2$$

INTRODUCCIÓN	BASES SEMEJANZA	CONSECUENCIAS	SUBDIVISIÓN CILINDRADA	CONSIDERAC. FINALES	R
--------------	-----------------	---------------	------------------------	---------------------	---

## SUBDIVISIÓN DE LA CILINDRADA

### ❑ Campeón de Superbikes (hasta 2004)



INTRODUCCIÓN

BASES  
SEMEJANZACONSE-  
CUENCIASSUBDIVISIÓN  
CILINDRADACONSIDERAC.  
FINALES

R

## SUBDIVISIÓN DE LA CILINDRADA

### ❑ Otras implicaciones de la subdivisión de la cilindrada:

➤ Al aumentar el número de cilindros y disminuir su tamaño

- Motor menos adiabático:
  - MEP: Disminuye la tendencia a la detonación → se puede elevar la relación de compresión → mejora del rendimiento (y de la potencia)
  - MEC: Aumenta el tiempo de retraso → aumenta la marcha dura. Más problemas de arranque en frío
- El régimen del motor aumenta
- Disposiciones constructivas más complicadas
- Aumenta el número de piezas
- Par motor más regular

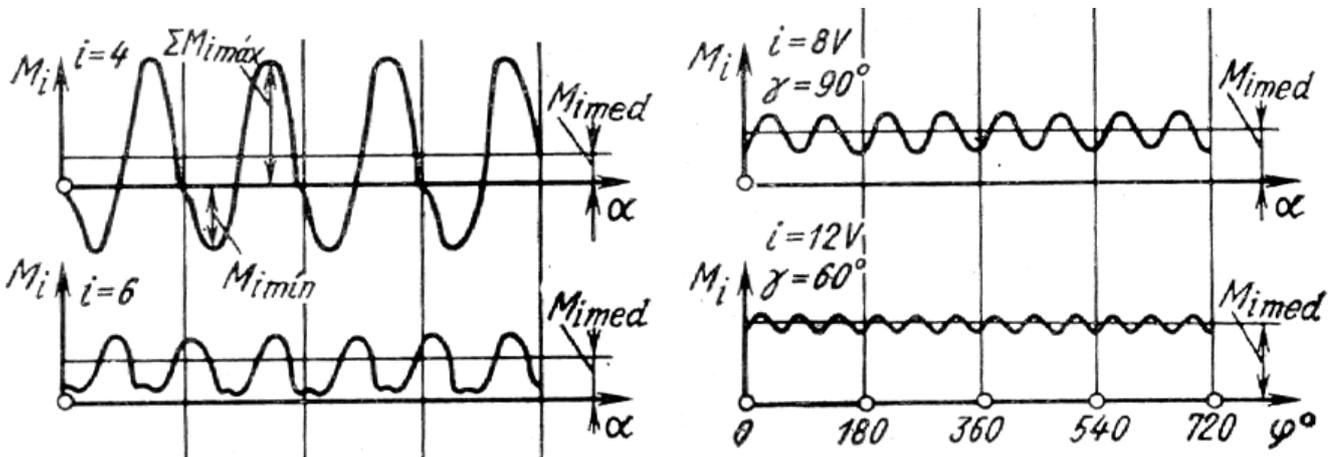
INTRODUCCIÓN

BASES  
SEMEJANZACONSE-  
CUENCIASSUBDIVISIÓN  
CILINDRADACONSIDERAC.  
FINALES

R

## SUBDIVISIÓN DE LA CILINDRADA

- Regularidad del par motor



INTRODUCCIÓN	BASES SEMEJANZA	CONSECUENCIAS	<b>SUBDIVISIÓN CILINDRADA</b>	CONSIDERAC. FINALES	R
--------------	-----------------	---------------	-------------------------------	---------------------	---

## CONSIDERACIONES FINALES

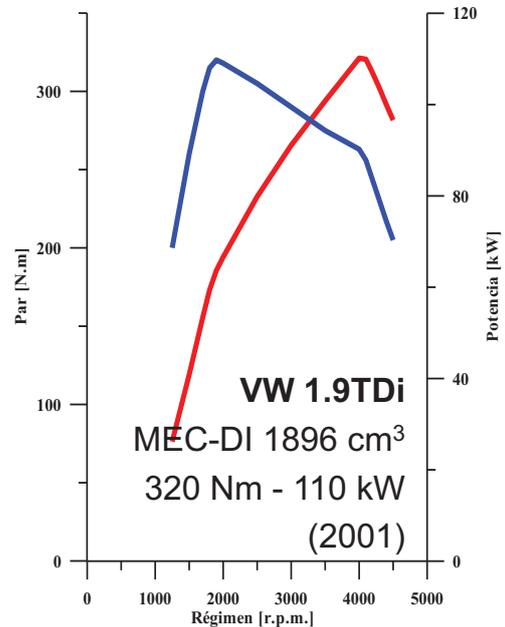
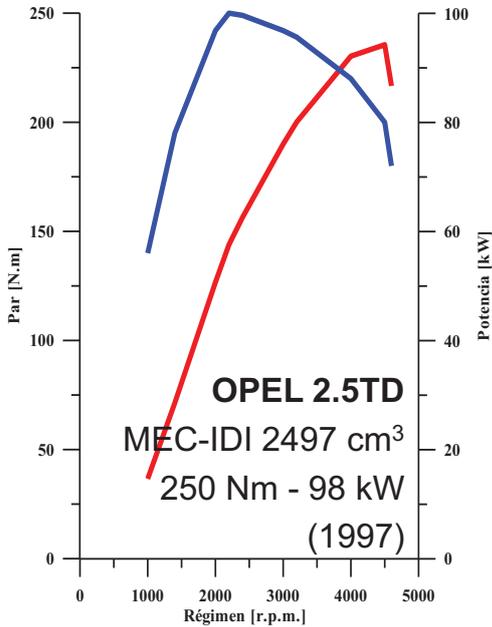
- Al aumentar el tamaño suelen aplicarse criterios más conservadores de diseño
- Los motores se diseñan en base a su tipo de aplicación. Así, motores de diversos fabricantes para una misma aplicación poseen parámetros de diseño muy similares

Tipo de motor	S/D	$c_m$ m/s	pme bar	$Ne/V_t$ kW/l	$Ne/A_p$ kW/cm <sup>2</sup>	gef g/kWh	rpm min <sup>-1</sup>
MEP automoción 4t (1000 cc 4 cilindros)	0,9	13	10	40	0,2	300	5800
MEP automoción 4t (2000 cc)	0,9	14	9	35	0,2	300	5500
MEP competición (400 kw)	0,6	23	12	130	0,5	430	12000

INTRODUCCIÓN	BASES SEMEJANZA	CONSECUENCIAS	SUBDIVISIÓN CILINDRADA	<b>CONSIDERAC. FINALES</b>	R
--------------	-----------------	---------------	------------------------	----------------------------	---

## CONSIDERACIONES FINALES

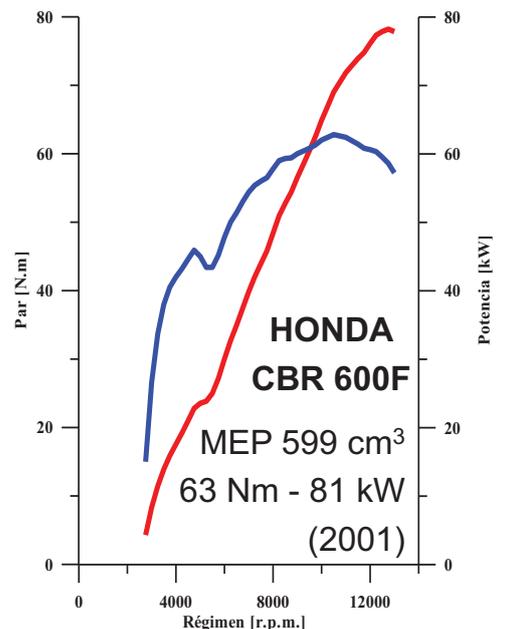
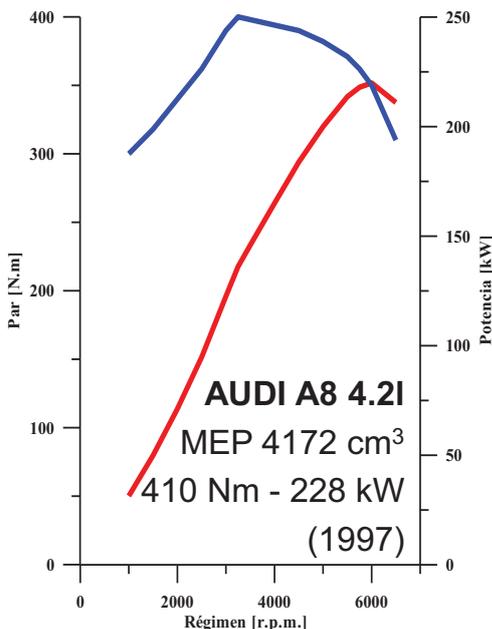
### Comparación de motores con diferentes características



INTRODUCCIÓN	BASES SEMEJANZA	CONSECUENCIAS	SUBDIVISIÓN CILINDRADA	<b>CONSIDERAC. FINALES</b>	R
--------------	-----------------	---------------	------------------------	----------------------------	---

## CONSIDERACIONES FINALES

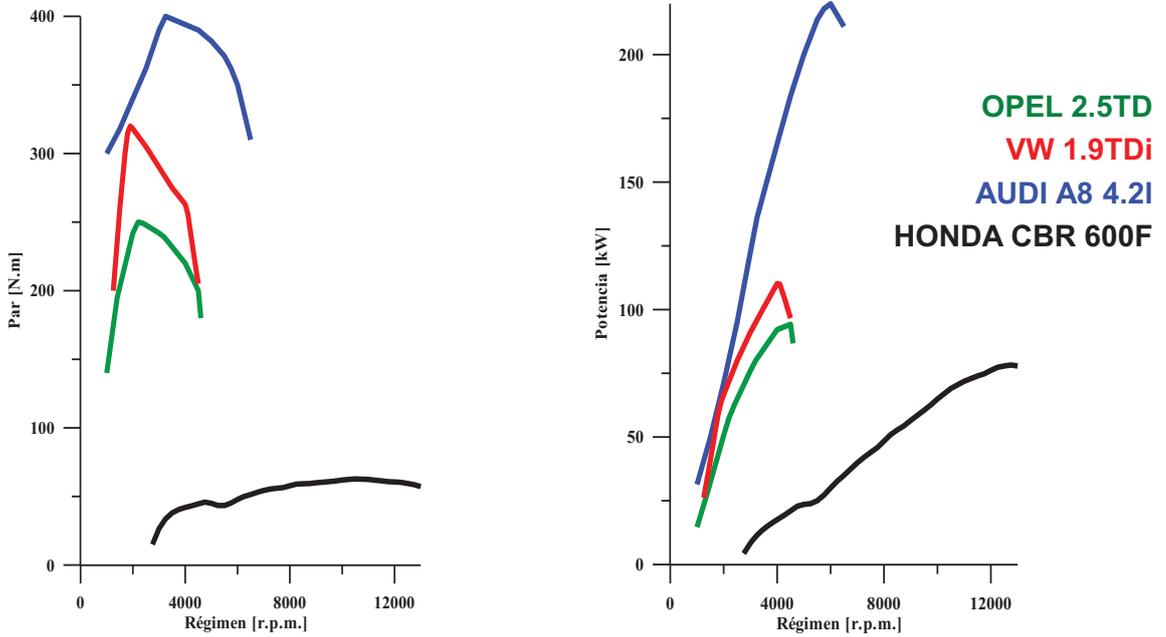
### Comparación de motores con diferentes características



INTRODUCCIÓN	BASES SEMEJANZA	CONSECUENCIAS	SUBDIVISIÓN CILINDRADA	<b>CONSIDERAC. FINALES</b>	R
--------------	-----------------	---------------	------------------------	----------------------------	---

## CONSIDERACIONES FINALES

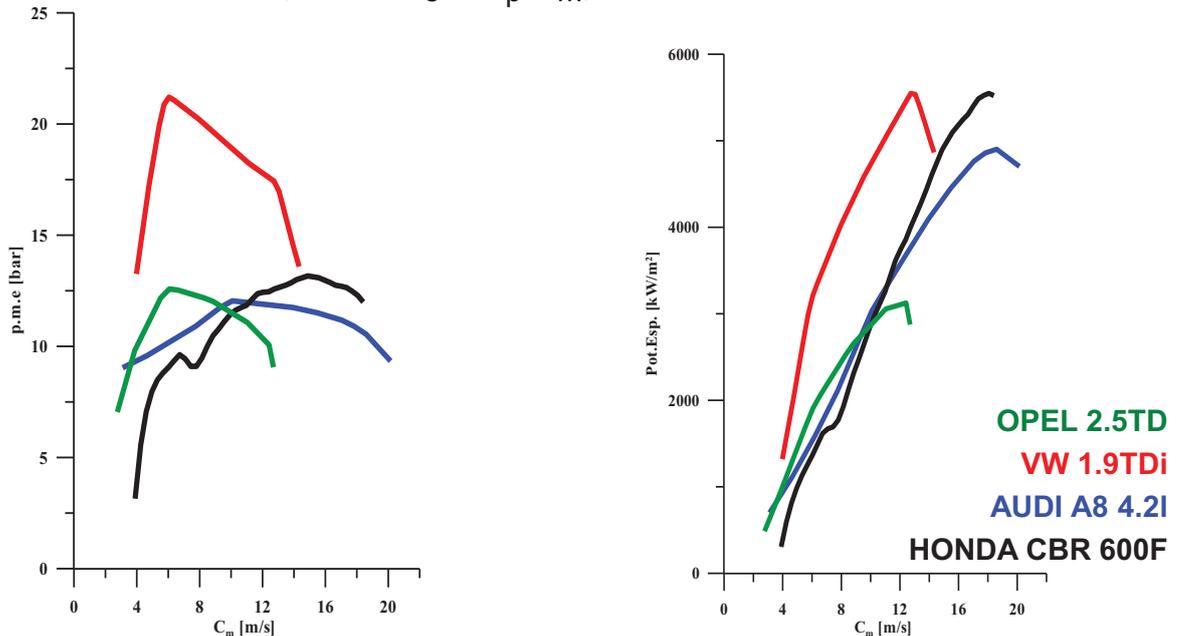
### Comparación ( $N_e, M_e, n$ )



INTRODUCCIÓN	BASES SEMEJANZA	CONSECUENCIAS	SUBDIVISIÓN CILINDRADA	<b>CONSIDERAC. FINALES</b>	R
--------------	-----------------	---------------	------------------------	----------------------------	---

## CONSIDERACIONES FINALES

### Comparación ( $p_{m.e}, N_e/zA_p, c_m$ )



INTRODUCCIÓN	BASES SEMEJANZA	CONSECUENCIAS	SUBDIVISIÓN CILINDRADA	<b>CONSIDERAC. FINALES</b>	R
--------------	-----------------	---------------	------------------------	----------------------------	---

## RESUMEN

- ❑ La teoría de la semejanza de MCIA justifica las tendencias encontradas en los motores al variar su tamaño
- ❑ Los motores semejantes, cuanto más grandes:
  - Giran más despacio
  - Disminuyen su potencia por unidad de volumen y de masa
  - Se hacen más adiabáticos, mejorando su rendimiento y aumentando cargas térmicas
- ❑ Estas tendencias también se cumplen comparando motores semejantes de la misma cilindrada y diferente número de cilindros

INTRODUCCIÓN	BASES SEMEJANZA	CONSECUENCIAS	SUBDIVISIÓN CILINDRADA	CONSIDERAC. FINALES	R
--------------	-----------------	---------------	------------------------	---------------------	---

## BIBLIOGRAFÍA

- ❑ F. Payri y J.M. Desantes  
"Motores de Combustión Interna Alternativos" (Cap. 25)
- ❑ C.F. Taylor  
"The Internal Combustion Engine in Theory and Practice"  
(Vol.1 , Cap. 6 y 11)

# Bibliografía

## Relativas a Turbomáquinas

- M.P. Boyce, *Gas turbine engineering handbook*, Gulf Professional Pub., 2006.
- H. Cohen, G.F.C. Rogers y H.I.H. Saravanamuttoo, *Teoría de las turbinas de gas*, Marcombo, 1983.
- S.L. Dixon, *Mecánica de fluidos: Termodinámica de las turbomáquinas*, Dossat 1981.
- M. El-Wakil, *Powerplant technology*, McGraw-Hill, 1984.
- P. Kiameh, *Power generation handbook: selection, applications, operation, and maintenance*, McGraw-Hill, 2002.
- M. Muñoz, M. Valdés y M. Muñoz, *Turbomáquinas térmicas: fundamentos del diseño termodinámico*, Universidad Politécnica de Madrid, 2001.
- J.I. Nogueira y A. Lecuona, *Turbomáquinas, Procesos, Análisis Y Tecnología*, Ariel, 2000.
- S. Ruiz, J.R. Serrano, J.M. Luján y J.M. García, *Problemas de flujo compresible y turbomáquinas térmicas*, Universitat Politècnica de València, 2008.

## Relativas a Motores de Combustión Interna Alternativos

- F. Payri y J.M. Desantes (Eds.), *Motores de combustión interna alternativos*, Reverté, 2011.
- L. Guzzella y C.H. Onder, *Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems*, Springer-Verlag, 2010.
- J. B. Heywood, *Internal combustion engine fundamentals*, McGraw-Hill, 1989.
- J.J. López, F.J. Salvador y R. Novella, *Cuestiones y problemas resueltos de motores de combustión interna alternativos*, Universitat Politècnica de València, 2008.
- Robert Bosch GmbH, *Diesel-engine management*, John Wiley & Sons, 2005.
- Robert Bosch GmbH, *Gasoline-engine management*, John Wiley & Sons, 2006.
- R. Stone, *Introduction to internal combustion engines*, Macmillan, 1985.
- C.F. Taylor, *The Internal Combustion Engine in Theory and Practice*, The MIT Press, 1985.
- R. van Basshuysen y F. Schäfer, *Internal combustion engine handbook: basics, components, systems, and perspectives*, Society of Automotive Engineers, 2004.
- N. Watson y M.S. Janota, *Turbocharging the internal combustion engine*, Macmillan, 1984.