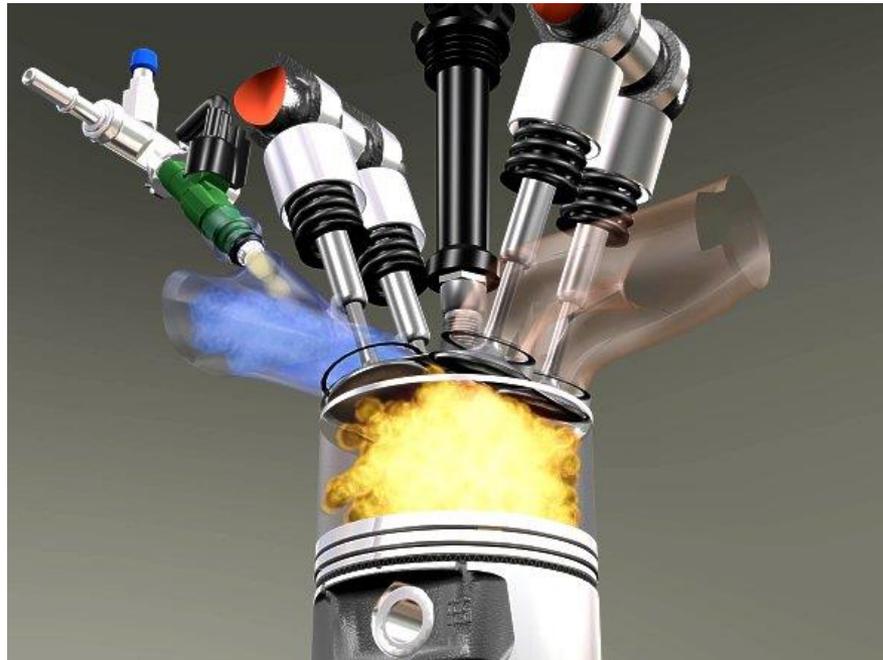


Motores de Combustión Interna

Universidad Carlos III de Madrid
Capítulo 7: Combustión en MEP- MIF

Profs.
Antonio Lecuona
Pedro Rodríguez
Mathieu Legrand
Rubén Ventas



Gentileza de General
Motors-Opel (El color
de la llama no es real)

La información contenida en este trabajo sirve de propósito exclusivo para la enseñanza y la de procedencia externa ha sido obtenida de las mejores fuentes que se han podido encontrar, generalmente de reconocido prestigio. No obstante los autores no garantizan la exactitud o perfección de su contenido. Por ello, no será/n responsable/s de cualquier error, omisión o daño causado por el uso de la información contenida, no tratando con este documento prestar ninguna clase de servicio profesional o técnico; antes bien, se ofrece como simple guía general de apoyo a la docencia. Cualquier indicación de error u omisión será bienvenida. El contenido del documento pudiera estar sujeto a derechos de autor o de propiedad industrial o intelectual.



COMBUSTIÓN

EN MEP

1. [Introducción](#)
2. [Fenomenología de la combustión en MEP](#)
3. [Velocidad de propagación y estructura de la llama laminar](#)
4. [Velocidad de propagación y estructura de la llama turbulenta](#)
5. [Etapas de la combustión en MEP](#)
6. [Modelado de la combustión – Influencia de las variables de diseño y operación.](#)
7. [Combustión anormal: detonación y encendido superficial](#)
8. [Contaminación y mitigación de la contaminación](#)

**Máquinas y
Motores
Térmicos**



COMBUSTIÓN EN MEP [volver](#)

1. [Introducción](#)
2. [Fenomenología de la combustión en MEP](#)
3. [Velocidad de propagación y estructura de la llama laminar](#)
4. [Velocidad de propagación y estructura de la llama turbulenta](#)
5. [Etapas de la combustión en MEP](#)
6. [Modelado de la combustión – Influencia de las variables de diseño y operación](#)
7. [Combustión anormal: detonación y encendido superficial](#)
8. [Contaminación y mitigación de la contaminación](#)
9. [Cuestiones de auto-evaluación](#)
10. [Anexos](#)

NOTAS

τ es tiempo. "crank angle" es α . $\langle \ \rangle$ indica dependencia funcional.

τ_{comb} es el tiempo que tarda en producirse la combustión \sim ms.



COMBUSTIÓN EN MEP

1. [Introducción](#)
2. [Fenomenología de la combustión en MEP](#)
3. [Velocidad de propagación y estructura de la llama laminar](#)
4. [Velocidad de propagación y estructura de la llama turbulenta](#)
5. [Etapas de la combustión en MEP](#)
6. [Modelado de la combustión – Influencia de las variables de diseño y operación.](#)
7. [Combustión anormal: detonación y encendido superficial](#)
8. [Contaminación y mitigación de la contaminación](#)

Máquinas y Motores Térmicos



COMBUSTIÓN EN MEP [volver](#)

Nomenclatura

Latinas

A Área de paso
 AE avance al encendido
 a velocidad del sonido, exponente
 b exponente
 c calor específico, constante
 D diámetro del émbolo
 d diámetro de la válvula de admisión
 E_a energía de activación
 EGR fracción másica de EGR
 F_R dosado relativo
 f fracción másica de gases residuales, frecuencia
 HR humedad relativa
 h entalpía específica
 J_c fracción de pérdidas de calor
 k conductividad térmica
 L_i poder calorífico inferior
 l longitud
 MBT avance al encendido mínimo para máximo par
 \dot{m} caudal másico
 n régimen de giro, exponente
 p presión
 Q calor
 Re número de Reynolds
 R_g constante del gas ideal
 r_c relación de compresión efectiva
 S velocidad de propagación relativa
 S_F velocidad de propagación absoluta
 T temperatura absoluta
 X fracción de masa quemada
 x fracción volumétrica
 y fracción másica

U Energía interna

u velocidad media del émbolo

u_{exp} velocidad de arrastre de la llama

u' componente turbulenta de la velocidad y fracción másica

Griegas

α : ángulo girado por el cigüeñal,

difusividad térmica

δ espesor de la zona de reacción

ϵ distancia entre electrodos

η rendimiento del motor

η_c rendimiento de combustión

$\eta_{v,e}$ rendimiento volumétrico de entrada

η_k escala de Kolmogórov

μ viscosidad dinámica

γ cociente de calores específicos

λ $1/F_R$

ω velocidad angular de giro

ρ densidad

τ tiempo

τ_{comb} es el tiempo que tarda en producirse la combustión ~ ms.

\mathcal{V} volumen

\mathcal{V} volumen específico

Subíndices

0 condiciones de referencia

a autoignición

ad admisión

d relativo a la válvula de admisión

comb combustible

e émbolo

ef efectiva

f de formación

i ignición

L laminar

lam laminar

max máximo

óp óptimo

p productos

p a presión constante

Q de activación química

r reactantes

r de retardo a la autoignición

T de agitación térmica, turbulenta

v a volumen constante

Superíndices

0 referencia para entalpías de formación

Adornos

· flujo o caudal

— valor medio

Acrónimos

EGR recirculación de gases de escape

MEP motores de encendido provocado =

MIF motores de ignición forzada

N.O. número de octano

PMS punto muerto superior

SCR reducción catalítica selectiva



COMBUSTIÓN EN MIF

Introducción – Fenomenología de la combustión

Velocidad de
propagación y
estructura de la
llama

Etapas de la
combustión.

Modelado de la
combustión –
Influencia de las
variables de
diseño y
operación.

Contaminación y
mitigación de la
contaminación

Combustión anormal:
detonación y
encendido
superficial.

Máquinas y Motores Térmicos



1.- Introducción volver

- Clásicamente, la combustión en MEPs ha sido con mezcla homogénea y con ignición por chispa eléctrica.
- Actualmente se emplea cada vez más la combustión estratificada para reducir contaminantes y mejorar la eficiencia del ciclo, que es mayor con mezcla globalmente pobre. Consiste en dos fase, la 1ª rica y la 2ª de oxidación de los productos para completar a CO₂ y H₂O. A plana carga en su lugar se usa mezcla homogénea.
- El amplio rango de funcionamiento de los MEP de automoción exige controles complejos y modos de funcionamiento distintos (arranque, calentamiento, ralentí, aceleración, retención por freno motor, carga parcial económica, plena carga y plena potencia, etc.
- Se sigue usando encendido por chispa eléctrica, pero cada vez depositando más energía en los gases, hasta 0,5 J y tratando de prolongar la duración de la chispa.
- La conversión de reactantes a productos ocurre casi completamente en una capa delgada ~ 1 mm de espesor, denominado llama. Quedan tan solo reacciones de terminación tras el frente de la llama.
- Durante la combustión aparecen llamas casi planas, llamadas laminares y llamas afectadas por el movimiento turbulento en el cilindro, por lo que adquieren forma compleja.
- Sin embargo, se pueden explicar las llamas turbulentas sobre la base de las laminares. Por eso se presentan antes.
- Las llamas normales en MEP son deflagrantes y no estacionarias, pues va subiendo la presión y temperatura según procede la combustión. Esto es, la presión a ambos lados es la misma. Son de premezcla; esto es, el combustible está mezclado con el aire.



**COMBUSTIÓN
EN MIF**

**Introducción –
Fenomenología
de la
combustión**

Velocidad de
propagación y
estructura de la
llama

Etapas de la
combustión.

Modelado de la
combustión –
Influencia de las
variables de
diseño y
operación.

Contaminación y
mitigación de la
contaminación

Combustión anormal:
detonación y
encendido
superficial.

**Máquinas y
Motores
Térmicos**

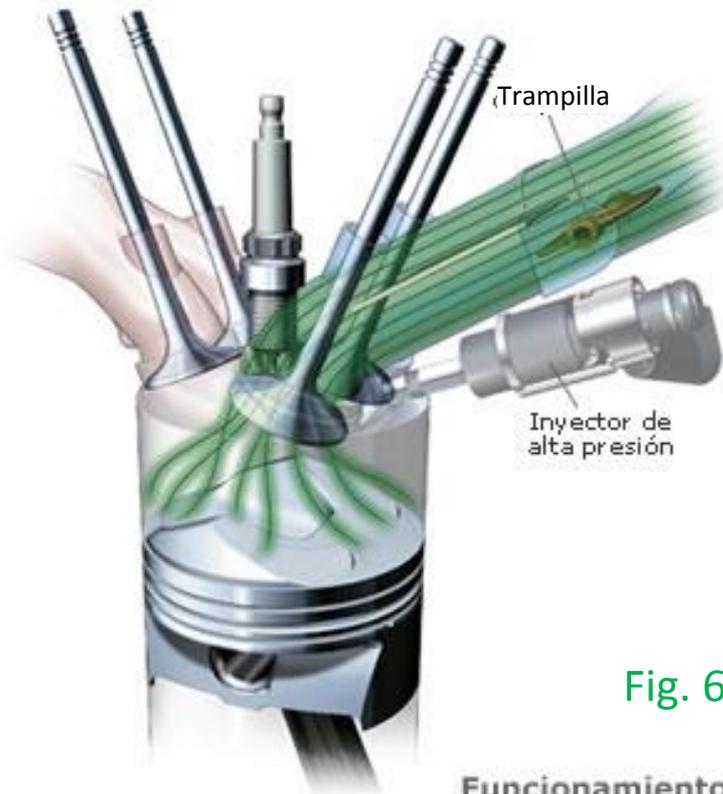


1.- Introducción (cont.) volver

Mezcla heterogénea o estratificada. Ejemplo de tecnología actual, ver.

Fuente: http://www.aficionadosalamecanica.net/inyeccion_directa.htm

Modo de carga homogénea



Modo de carga estratificada

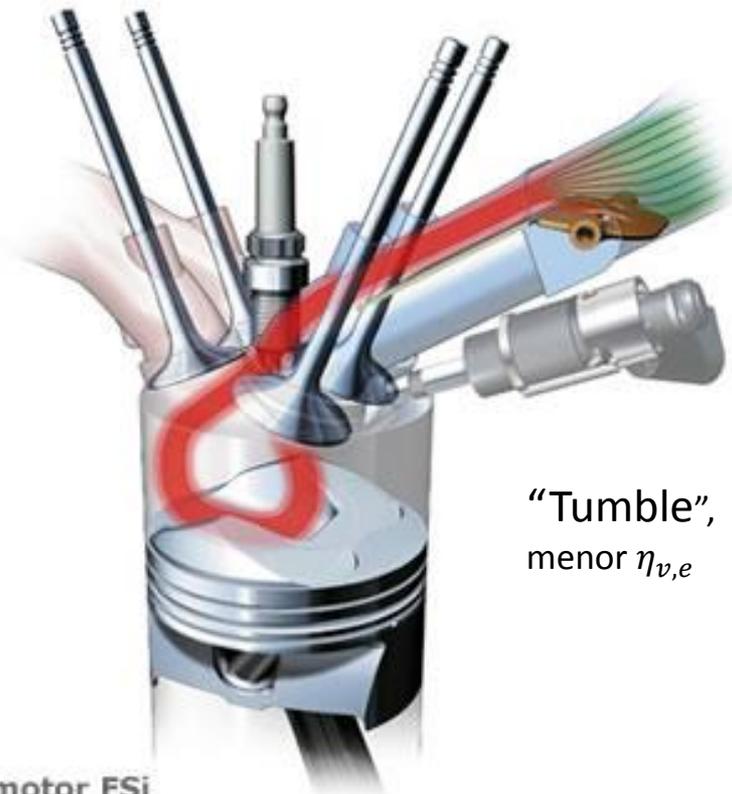


Fig. 6.1

Funcionamiento del motor FSI

El dosado relativo en este modo operativo es o pobre o $F_R = 1$. Se logra la máxima *p_{mi}*, útil a plena carga. La cabeza del émbolo tiene una zona periférica que es el negativo de la culata, aplastando los gases al llegar a PMS y proyectándolos hacia la cavidad interior “squish”. Al bajar se efectúa un rebose.

En el centro de la cámara de combustión se encuentra una mezcla con buenas cualidades inflamables en torno a la bujía, $F_R > 1$. Esta mezcla está rodeada de una capa exterior, que en el caso ideal está compuesta por aire fresco y gases de escape recirculados para minimizar pérdidas de calor a las paredes y apagado. Globalmente pobre. 5



COMBUSTIÓN EN MIF

Introducción – Fenomenología de la combustión

Velocidad de
propagación y
estructura de la
llama

Etapas de la
combustión.

Modelado de la
combustión –
Influencia de las
variables de
diseño y
operación.

Contaminación y
mitigación de la
contaminación

Combustión anormal:
detonación y
encendido
superficial.

Máquinas y
Motores
Térmicos



2.- Fenomenología de la combustión en MEP *volver*

1. En MEP de mezcla homogénea convencionales se comprime una mezcla de gases reactantes compuestos por: aire, combustible (parcialmente evaporado), gases residuales y eventualmente gases de escape recirculados (EGR), en equilibrio metaestable \Rightarrow reacción despreciable.
2. Se pueden alcanzar las condiciones de **autoignición** para los combustibles MEP ($T_a \sim 250-600$ °C a $p = 1$ bar), pero el **tiempo de retardo** a la autoignición $\tau_r \langle T_r \rangle$ es mayor frente al de combustión y normalmente no se auto-inflama la mezcla durante la compresión, ni durante la expansión. El tiempo de retardo se debe a un tiempo de activación química τ_Q aproximadamente constante ($\tau_Q < 0,1$ ms) y otro de agitación térmica $\tau_T \langle T \rangle$ fuertemente decreciente con aumentos de la temperatura. Véase **Sección 7**.
3. Un **bujía** genera un arco eléctrico entre sus electrodos, generando localmente un plasma a temperaturas del orden de 50.000 K. A estas temperaturas, $\tau_T \langle T_r \rangle \rightarrow 0$, con lo cual $\tau_r \sim \tau_Q$, y se inflama casi instantáneamente la mezcla entre los electrodos, separados por una distancia $\varepsilon \sim 0,7$ mm.
4. Se propaga la llama en la cámara de combustión, definiendo un volumen de gases **quemados** (productos) y un volumen de **gases de compresión** (reactantes_r), separados por el frente de llama deflagrante, por lo tanto, a igual presión.

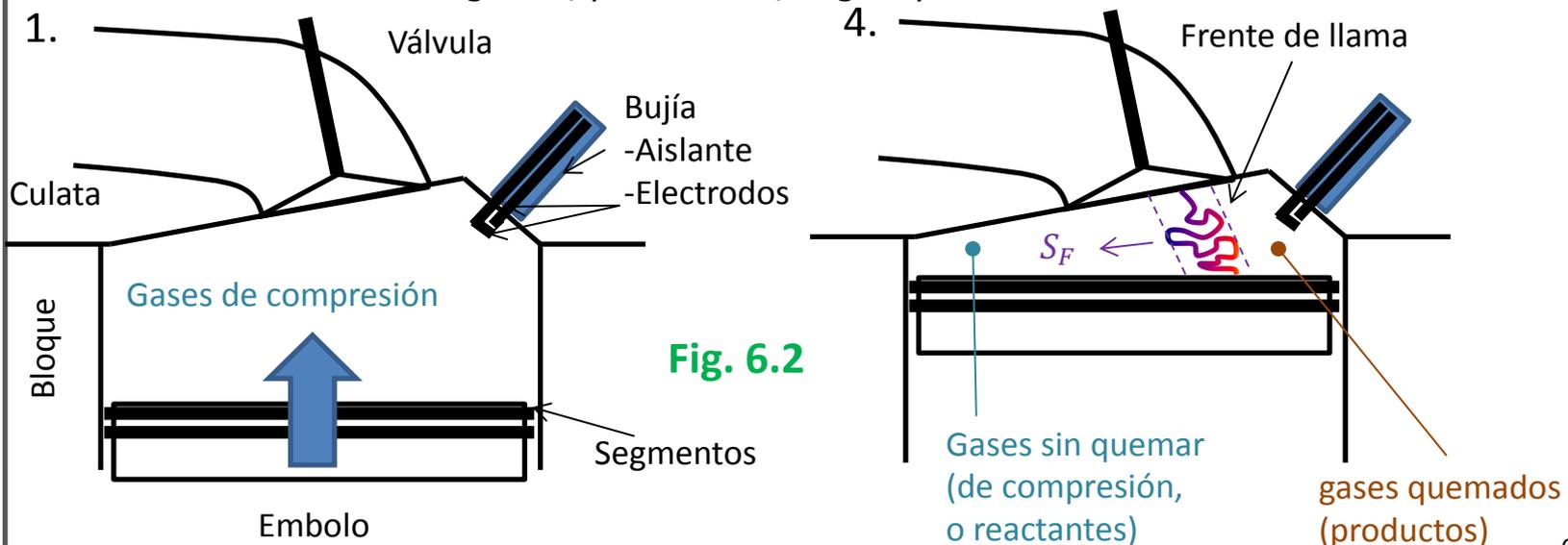


Fig. 6.2



**COMBUSTIÓN
EN MIF**

**Introducción –
Fenomenología
de la
combustión**

Velocidad de
propagación y
estructura de la
llama

Etapas de la
combustión.

Modelado de la
combustión –
Influencia de las
variables de
diseño y
operación.

Contaminación y
mitigación de la
contaminación

Combustión anormal:
detonación y
encendido
superficial.

**Máquinas y
Motores
Térmicos**



2.- Fenomenología de la combustión en MEP (cont.) [volver](#)

5. Al subir la temperatura de los productos, éstos se dilatan, comprimiendo los reactantes, y con ello empujan el frente de llama. La velocidad aparente del frente de llama S_F , que es el directamente visible, se debe a ambas componentes: velocidad de propagación de llama S + velocidad debida a la expansión de los productos, o velocidad de arrastre u_{exp} :

$$S_F = S + u_{exp} \quad (6.1)$$

En condiciones normales de funcionamiento en MEP (sin detonación), S resulta muy inferior a la velocidad del sonido $a = \sqrt{\gamma R_g T}$; y por ello la presión no cambia apreciablemente a través del frente de llama, denominada deflagración. Se considera la presión de los reactantes y productos sensiblemente iguales.

1. Al llegar cerca de las paredes más frías (~ 150 °C) del cilindro, embolo y culata, se extingue la llama por no lograrse las condiciones de ignición T_i en la llama, $T_r < T_i \sim 480$ °C con gasolina y mezcla estequiométrica:
- a) A causa de la transferencia de calor a la pared.
 - b) Por haber bajado demasiado T y p en la cámara por la expansión del cilindro
 - c) Por ser la relación local superficie de contacto a volumen muy alta, intersticios.

La extinción ocurre especialmente en los [intersticios](#) de la cabeza del embolo con el cilindro, en la junta de culata, entre válvulas y sus asientos y en el interior de la bujía.



**COMBUSTIÓN
EN MIF**

[Introducción – Fenomenología de la combustión](#)

[Velocidad de propagación y estructura de la llama](#)

[Etapas de la combustión.](#)

[Modelado de la combustión – Influencia de las variables de diseño y operación.](#)

[Contaminación y mitigación de la contaminación](#)

[Combustión anormal: detonación y encendido superficial.](#)

Máquinas y Motores Térmicos



3.- Velocidad de propagación y estructura de la llama laminar [volver](#)

Una vez establecida la llama, se propaga indefinidamente. Cuando la llama es lisa, se tiene régimen laminar. La llama se puede modelar con la teoría de [Mallard-Le Chatelier](#), como una estructura adiabática auto-mantenida y controlada por equilibrio entre [conducción](#) y [reacción](#):

- Balance de energía y de masa a través de la llama. El calor necesario para llegar a la ignición es proporcionado por la conducción desde los productos.
- Además, la liberación de calor se realiza en un espesor δ .

Para un combustible dado:

- Temperatura de ignición: $T_i \langle F_R, p, f, EGR, HR \rangle$
- Difusividad térmica: $\alpha \langle T, p, composición \rangle$
- Tiempo de combustión: $\tau_{comb} \langle F_R, p, f, EGR, HR \rangle$

$$\underbrace{\dot{m} c_p (T_i - T_r)}_{\text{q recibido por reactantes}} = \underbrace{kA \frac{T_p - T_i}{\delta}}_{\text{conducción desde la llama}}$$

$$S_L = \left(\frac{k}{\rho c_p} \right) \left(\frac{T_p - T_i}{T_i - T_r} \right) \frac{1}{\delta} \Rightarrow S_L = \sqrt{\frac{\alpha}{\tau_{comb}} \left(\frac{T_p - T_i}{T_i - T_r} \right)}$$

$\delta = S_L \tau_{comb}$

$$\Rightarrow S_L \langle F_R, p, T_r, f, EGR, HR, combustible \rangle$$

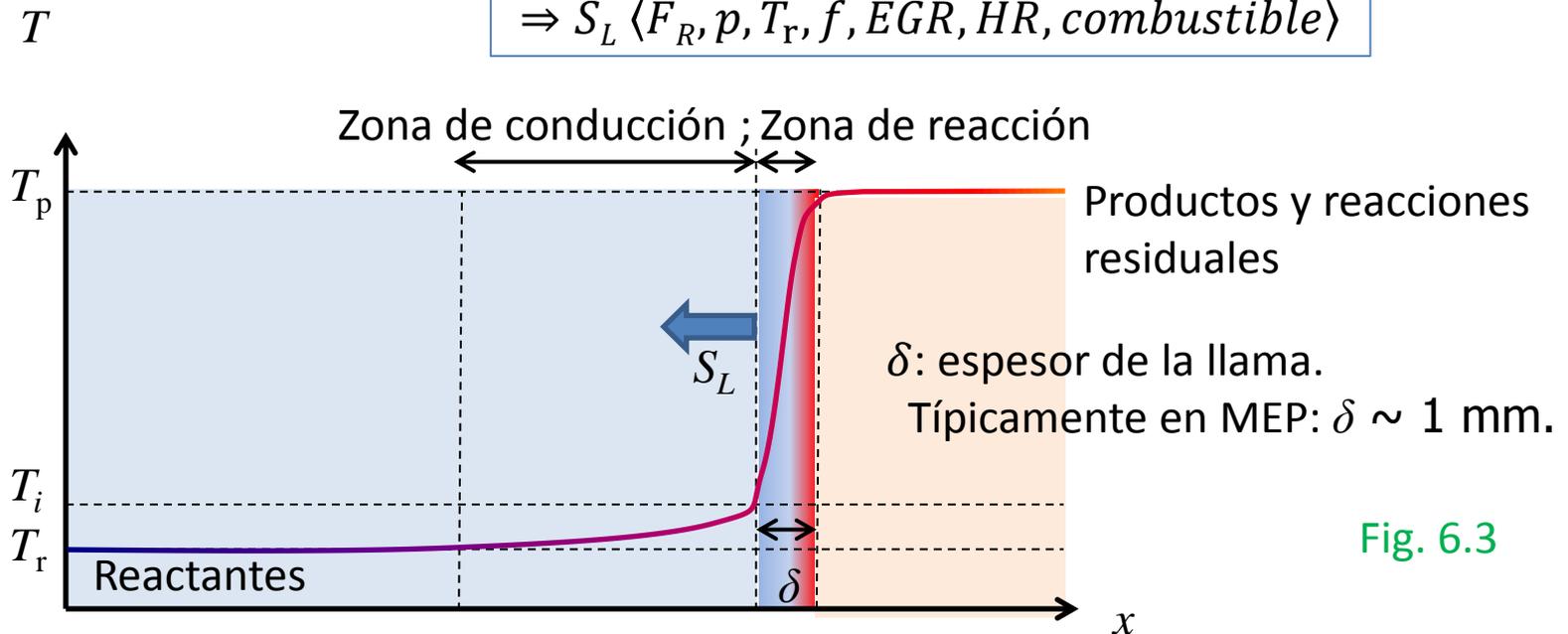


Fig. 6.3



COMBUSTIÓN EN MIF

[Introducción –
Fenomenología
de la combustión](#)

[Velocidad de
propagación y
estructura de la
llama](#)

[Etapas de la
combustión.](#)

[Modelado de la
combustión –
Influencia de las
variables de
diseño y
operación.](#)

[Contaminación y
mitigación de la
contaminación](#)

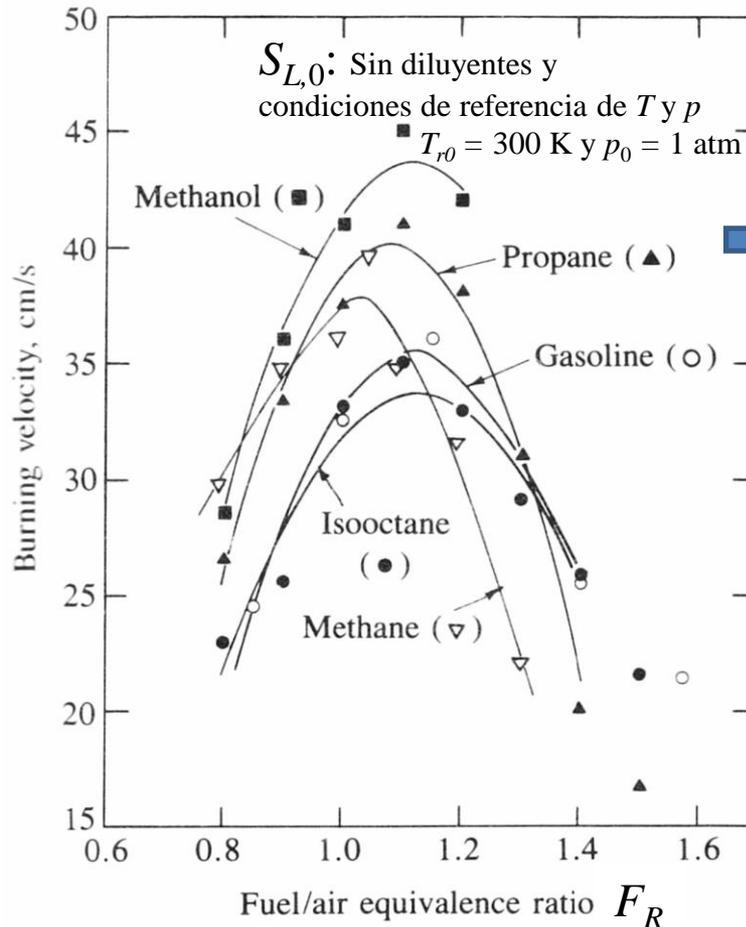
[Combustión anormal:
detonación y
encendido
superficial.](#)

Máquinas y Motores Térmicos



3.- Velocidad de propagación y estructura de la llama laminar (cont.) [volver](#)

La velocidad de [propagación](#) de llama de premezcla S_L depende de:



$S_L \langle F_R, p, T_r, f, EGR, HR, combustible \rangle$:

- Si solo tenemos efecto de F_R y el combustible es:
 $S_{L,0} \langle F_R, p_0, T_{r,0}, 0, 0, 0, combustible \rangle$.
- S_L máximo para $F_R \sim 1,1$.

Además

- S_L sube con T_r .
- S_L poco sensible a p (baja).
- S_L baja mucho con diluyentes (f , EGR y HR). La humedad relativa HR es un diluyente, pero influye poco dentro de las variaciones atmosféricas.
- Cuantificación de estas influencias:

Fig. 6.4.- Fuente: "Internal Combustion Engines Fundamentals" - J. B. Heywood - 1988.



**COMBUSTIÓN
EN MIF**

[Introducción – Fenomenología de la combustión](#)

[Velocidad de propagación y estructura de la llama](#)

[Etapas de la combustión.](#)

[Modelado de la combustión – Influencia de las variables de diseño y operación.](#)

[Contaminación y mitigación de la contaminación](#)

[Combustión anormal: detonación y encendido superficial.](#)

Máquinas y Motores Térmicos



3.- Velocidad de propagación y estructura de la llama laminar (cont.) [volver](#)

Efecto de T_r , p y diluyentes (solo gases quemados, y_p):

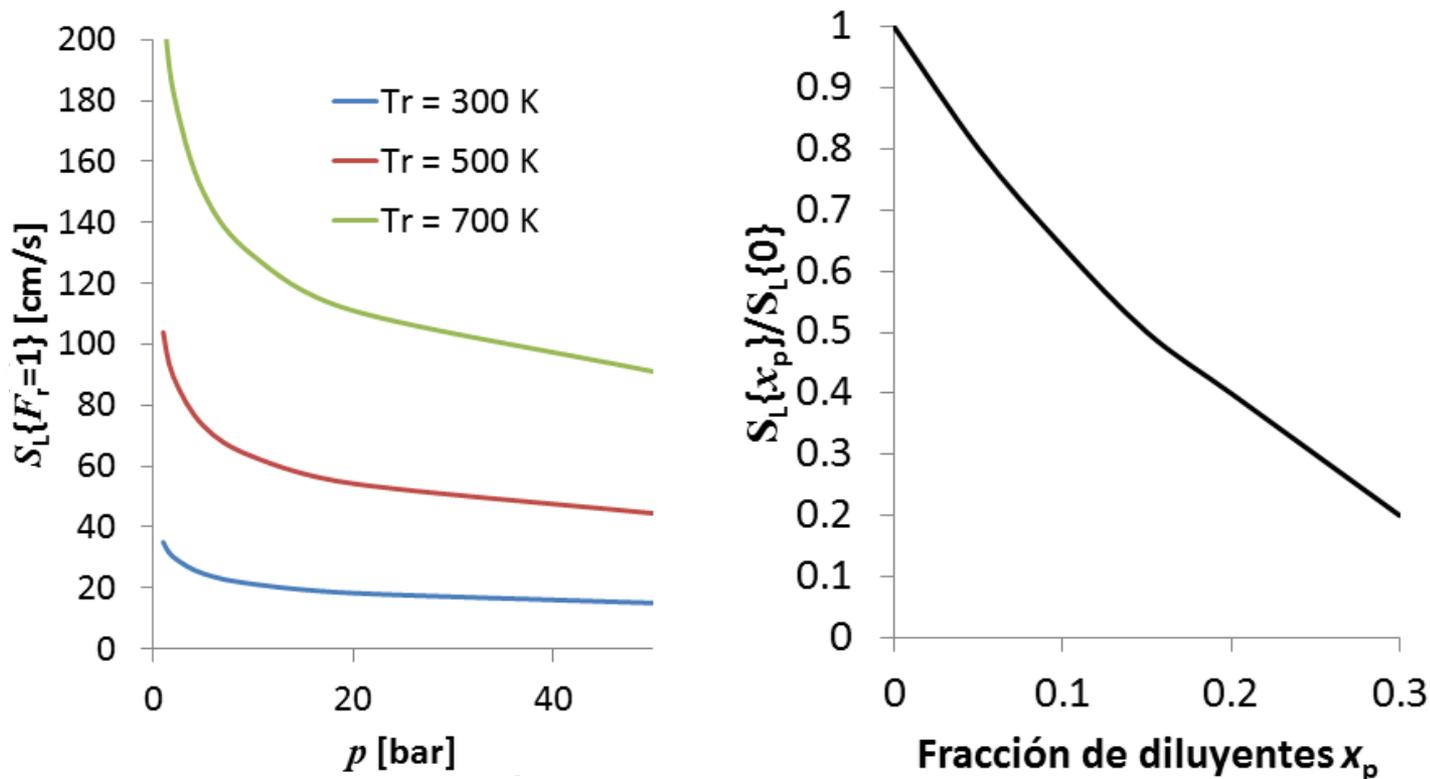


Fig. 6.5.- Efecto de la temperatura de reactantes, presión de la combustión y de la presencia de diluyentes

Resultado:

$$S_L = S_{L,0} \langle F_R, combustible \rangle \left(\frac{T_r}{T_0} \right)^a \left(\frac{p}{p_0} \right)^{-b} (1 - cy_p)$$

Para gasolina:

$$a \sim 2,4 - 0,27 F_R^{3,51}$$

$$b \sim 0,357 - 0,14 F_R^{2,77}$$

Limitación EGR en MEP $\rightarrow c \sim 2,1$ y $S_L \sim 0$ si $y_p > 0,45$



**COMBUSTIÓN
EN MIF**

- [Introducción – Fenomenología de la combustión](#)
- [Velocidad de propagación y estructura de la llama](#)
- [Etapas de la combustión.](#)
- [Modelado de la combustión – Influencia de las variables de diseño y operación.](#)
- [Contaminación y mitigación de la contaminación](#)
- [Combustión anormal: detonación y encendido superficial.](#)

Máquinas y Motores Térmicos



3.- Velocidad de propagación y estructura de la llama laminar (cont.) [volver](#)

Ejercicio 6.1.- Considerar un MIF (MEP) funcionando con catalizador de 3 vías ($F_R = 1$) con relación de compresión efectiva $r_c = 7$. La tasa de residuales es $f = 5\%$ y el $EGR = 15\%$. La temperatura y presión en el cierre de la admisión son $T_{1'} = 75\text{ °C}$ y $p_{1'} = 0,7\text{ atm}$. Determinar la velocidad de propagación de llama laminar S_L al iniciar la combustión. Tomar $\gamma = 1,35$.

Para gasolina:

$$a \sim 2,4 - 0,27 F_R^{3,51}$$

$$b \sim 0,357 - 0,14 F_R^{2,77}$$

$$c \sim 2,1$$

$$\left. \begin{aligned}
 S_L &= S_{L,0} \left(\frac{T_r}{T_0} \right)^a \left(\frac{p_r}{p_0} \right)^{-b} (1 - c \cdot y_p) \\
 T_r &= T_{1'} \cdot r_c^{\gamma-1} = 688\text{ K} \\
 p_r &= p_{1'} \cdot r_c^\gamma = 9,68\text{ atm}
 \end{aligned} \right\} S_L$$

Asumimos igual peso molecular de reactantes que de productos, con lo que

$$x_p = y_p \frac{PM_p}{PM_r} \approx y_p$$

Fig 5. I. 1:
$$y_p = \frac{m_r + m_{EGR}}{m} = f + EGR = 0,05 + 0,15 = 0,2$$

Fig.6.4

$$S_L = 0,3 \frac{\text{m}}{\text{s}} \left(\frac{688}{300} \right)^{2,13} \left(\frac{9,68}{1} \right)^{-0,217} (1 - 2,1 \cdot 0,2) = 0,62\text{ m/s}$$

Se duplica la velocidad de propagación de llama laminar S_L . Se verá que con aproximadamente las mismas consecuencias en la turbulenta S_T .

Al ir progresando la combustión T_r y p_r aumentan, hasta que llega la expansión, después del PMS.



COMBUSTIÓN EN MIF

[Introducción –
Fenomenología de
la combustión](#)

[Velocidad de
propagación y
estructura de la
llama](#)

[Etapas de la
combustión.](#)

[Modelado de la
combustión –
Influencia de las
variables de
diseño y
operación.](#)

[Contaminación y
mitigación de la
contaminación](#)

[Combustión anormal:
detonación y
encendido
superficial.](#)

Máquinas y Motores Térmicos



4.- Velocidad de propagación y estructura de la llama turbulenta [volver](#)

- El flujo de gases de admisión a través de la válvula ocasiona un desprendimiento de la corriente entrante que ocasiona:
 - Velocidades coherentes de tamaño del orden del calibre D , como giro “[swirl](#)” y “[tumble](#)” y otros torbellinos de menor tamaño que se mantienen en el tiempo, luego tienen valor medio no nulo.
 - Velocidades caóticas y por ello incoherentes, denominado [turbulencia](#), alrededor del valor medio del campo fluido.
- La turbulencia puede ser concebida como la **superposición de torbellinos incoherentes de distintos tamaños e intensidades**, induciendo más velocidad cuanto mayor es su tamaño. Inducen velocidades que hacen que ellos se muevan de forma incoherente también. Engendran un campo de velocidades que alrededor del valor medio posee un rms denominado u' .
- El elevado número de Reynolds Re (cociente entre fuerzas de inercia y viscosas) hace que esta turbulencia decaiga lentamente en comparación con los tiempos del motor.
- Hay torbellinos de todos los tamaños.
 - Los torbellinos de menor tamaño que pueden existir son aquellos en los que $Re \sim 1$ de diámetro η_k , denominada escala de [Kolmogórov](#).
 - Los torbellinos de mayor diámetro (escala integral) tienen un tamaño que depende de las fronteras físicas, en este caso, el diámetro de la válvula de admisión d . En los MCIAs $d \propto D$.
- Si consideramos que el émbolo se mueve con velocidad media u , la velocidad media del gas de admisión puede estimarse por continuidad con un flujo incompresible:

$$uA_e = u_{ad}A_{ad} \Rightarrow u_{ad} = u \left(\frac{D}{d}\right)^2 \quad (6.2)$$

- La llama deflagrante es arrastrada por la velocidad local, tanto la coherente como u' .



COMBUSTIÓN EN MIF

[Introducción – Fenomenología de la combustión](#)

[Velocidad de propagación y estructura de la llama](#)

[Etapas de la combustión.](#)

[Modelado de la combustión – Influencia de las variables de diseño y operación.](#)

[Contaminación y mitigación de la contaminación](#)

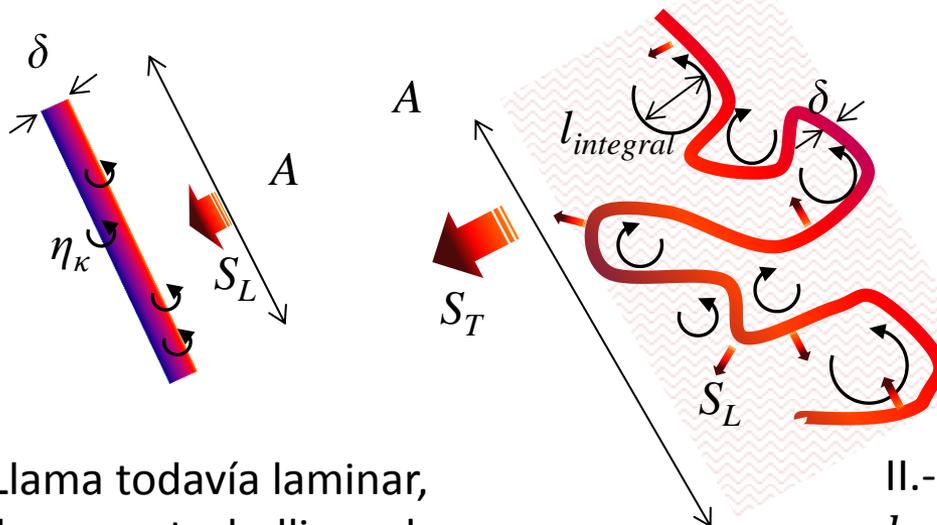
[Combustión anormal: detonación y encendido superficial.](#)

Máquinas y Motores Térmicos



4.- Velocidad de propagación y estructura de la llama turbulenta [volver](#)

1. La llama en MEP no es laminar, sino que se ve arrastrada por la turbulencia en el cilindro que forma torbellinos de diferentes tamaños, los cuales originan oscilaciones de velocidad locales de valor rms u' . Establece un frente:



La turbulencia incrementa el área efectiva A_{ef} de la llama, aumentando con ello la velocidad de avance del conjunto del frente S_T :

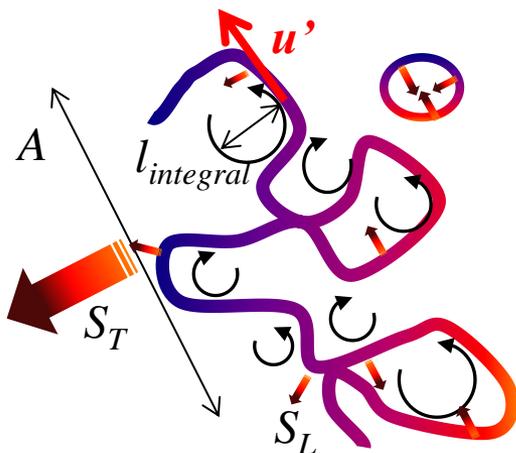
$$\frac{S_T}{S_L} \approx \frac{A_{ef}}{A}$$

I.- Llama todavía laminar, incluso con torbellinos de Kolmogórov $\eta_k < \delta$ no afectan.

II.- Llama turbulenta corrugada $l_{integral} > \delta$

Fig. 6.6

Si $\tau_{comb} > \tau_{integral} \Rightarrow$ formación de bolsas ($\delta/S_L > l_{integral}/u'$)



Resultado principal:

$$S_T/S_L = A_{ef}/A \propto u'$$

Luego $S_T \sim S_L u'$

Además $S_T \gg S_L$

u' escala con $u = 2nl$,

velocidad media del pistón. Quiere decir que es aproximadamente proporcional. Se debe a que la velocidad de paso por las válvulas de admisión escala con u también, véase Ec. (6.2).

Ilbis.- ... e incluso con formación de bolsas (MEP)



**COMBUSTIÓN
EN MIF**

[Introducción –
Fenomenología
de la combustión](#)

[Velocidad de
propagación y
estructura de la
llama](#)

[Etapas de la
combustión.](#)

[Modelado de la
combustión –
Influencia de las
variables de
diseño y
operación.](#)

[Contaminación y
mitigación de la
contaminación](#)

[Combustión anormal:
detonación y
encendido
superficial.](#)

**Máquinas y
Motores
Térmicos**



4.- Velocidad de propagación y estructura de la llama turbulenta (*cont.*) [volver](#)

- La propagación de una llama turbulenta puede ser visualizada con el paradigma de los rodillos giratorios (en este caso ordenados e iguales, por simplicidad) y tinta que emula la llama. Dentro de cada rodillo la llama es laminar. Cuando alcanza la periferia, donde la velocidad es alta, se deforma y propaga más rápido, repartiendo los puntos de ignición.

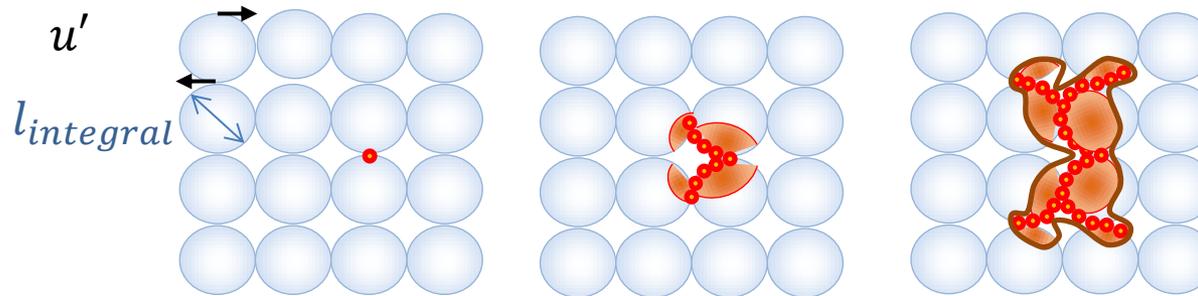


Fig. 6.7.- Tres instantes sucesivos de símil de propagación de llama turbulenta que comienza en la periferia de un torbellino. La envolvente representa el frente de llama. Adaptado de "Internal Combustion Engines Fundamentals" - J. B. Heywood - 1988

Se ha verificado que: $S_T \sim S_L u'$

Consecuencias:

- u' proporcional a n [rpm].
- Si S_T sube a $n = \text{cte.}$, se acerca a Otto \Rightarrow
 - ✓ Más eficiencia, pero $p_{m\acute{a}x} \uparrow$, y $T_{m\acute{a}x} \uparrow$.
 - ✓ Más disociación y $\text{NO}_x \uparrow$.



COMBUSTIÓN EN MIF

[Introducción – Fenomenología de la combustión](#)

[Velocidad de propagación y estructura de la llama](#)

[Etapas de la combustión.](#)

[Modelado de la combustión – Influencia de las variables de diseño y operación.](#)

[Contaminación y mitigación de la contaminación](#)

[Combustión anormal: detonación y encendido superficial.](#)

Máquinas y Motores Térmicos



4.- Velocidad de propagación y estructura de la llama turbulenta (*cont.*) [volver](#)

1. La turbulencia se genera principalmente durante la admisión (en menor medida en el escape), también por el movimiento del embolo y por el de la propia combustión. La turbulencia generada durante la admisión tiende a decaer con el tiempo, pero subsiste hasta la combustión. Además se ve acrecentada por el movimiento del pistón cerca del PMS. Se fomenta la turbulencia con la geometría de la admisión ("[swirl](#)" y "[tumble](#)") y de la cabeza del embolo (p. e. "[squish](#)"), aislada o combinadamente, ver [Fig. 6.1](#).
2. Las escalas grandes de turbulencia $l_{integral}$ son del orden de magnitud del calibre del pistón D , y/o del diámetro de la válvula de admisión $d \gg \delta \sim 1$ mm, dependiendo del mecanismo usado para generarla.

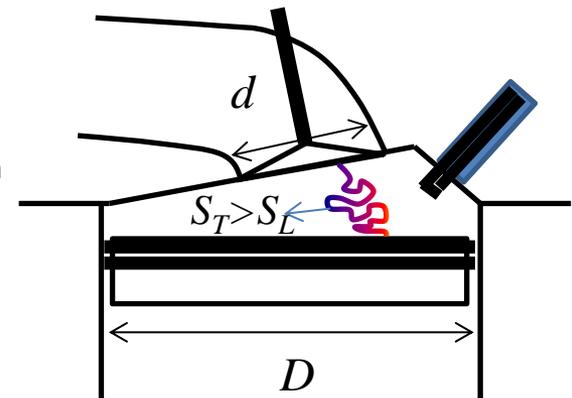
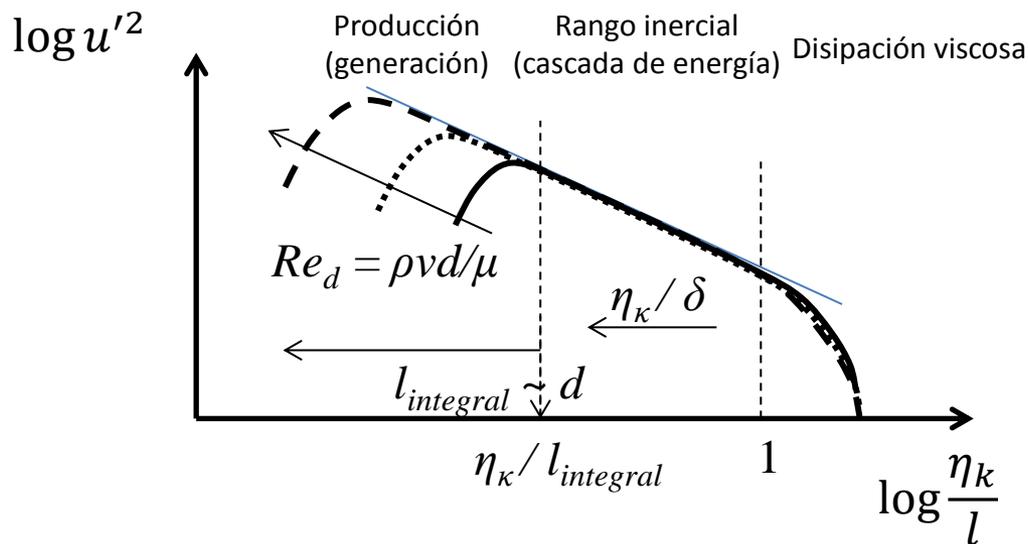


Fig. 6.8.- Espectro de la energía turbulenta (homogénea e isotropa) (*a título informativo*)

A mayor n aumenta u' , luego cabe esperar una llama más deformada. Efecto del movimiento dentro del cilindro:



COMBUSTIÓN EN MIF

[Introducción –
Fenomenología
de la combustión](#)

[Velocidad de
propagación y
estructura de la
llama](#)

[Etapas de la
combustión.](#)

[Modelado de la
combustión –
Influencia de las
variables de
diseño y
operación.](#)

[Contaminación y
mitigación de la
contaminación](#)

[Combustión anormal:
detonación y
encendido
superficial.](#)

Máquinas y
Motores
Térmicos



5.- Etapas de la combustión en un MEP [volver](#)

Tres fases consecutivas

- FASE LENTA** (“laminar”): En el encendido, el arco eléctrico de la chispa de la bujía “rompe” las moléculas de aire y de combustible, formando radicales libres, precursores de la combustión. Después de un muy breve tiempo químico $\tau_Q \sim 0$, empieza la combustión. En este momento, la escala de la llama es del orden del espacio entre electrodos $\varepsilon \sim 0,7$ mm, muy inferior a la escala de la turbulencia $l_{integral}$.

La llama no se ve afectada por la turbulencia de gran escala ($A_{ef}/A \sim 1$), y se propaga lentamente a velocidad laminar: S_L . El área de frente de llama es pequeño ($A \sim \varepsilon^2$) y la tasa de liberación de calor $\rho_r A S_L (h_{f,r}^0 - h_{f,p}^0)$ es muy pequeña (S_L pequeño y $A \sim \varepsilon^2$). Además, existe una gran dispersión cíclica debido a la turbulencia, por la incertidumbre de saltar la chispa dentro o en la periferia de un torbellino, [Fig. 6.7](#).

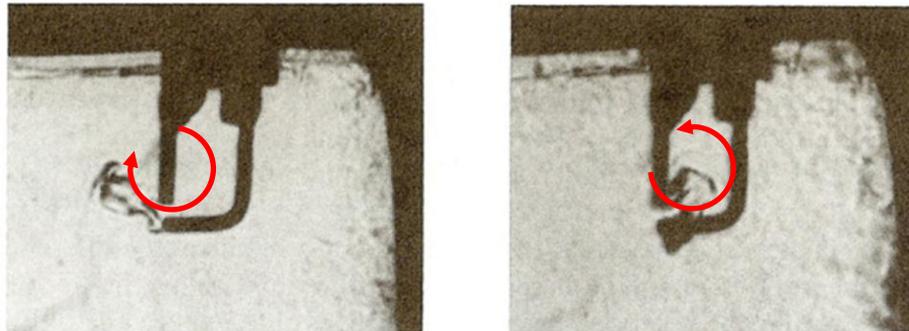


Fig. 6.10.- Micro-umbroscopía de la llama entre los electrodos de la bujía. Fuente: “Internal Combustion Engines Fundamentals” - J. B. Heywood - 1988

Duración: hasta llegar al tamaño de los torbellinos mayores $l_{integral}$.

$$\tau_{lam} \sim \tau_Q + l_{integral} / S_L \sim l_{integral} / S_L$$

Para una geometría dada: $l_{integral} \propto d$.

Luego su dependencia es: $S_L = S_L \langle F_R, p, T, y_p \rangle$.

⇒ Para composición y geometría dada τ_{lam} es constante.

⇒ En ángulo de cigüeñal ocupado por esta fase: $\Delta\alpha_{lam} = \tau_{lam} \overbrace{2\pi n}^{\omega} \propto n$



COMBUSTIÓN EN MIF

[Introducción –
Fenomenología
de la combustión](#)

[Velocidad de
propagación y
estructura de la
llama](#)

[Etapas de la
combustión.](#)

[Modelado de la
combustión –
Influencia de las
variables de
diseño y
operación.](#)

[Contaminación y
mitigación de la
contaminación](#)

[Combustión anormal:
detonación y
encendido
superficial.](#)

Máquinas y
Motores
Térmicos



5.- Etapas de la combustión en un MEP (cont.) [volver](#)

- 2. FASE RÁPIDA** (“turbulenta”): Al ir creciendo la llama, el tamaño alcanzado supera la escala grande de turbulencia y empieza la combustión turbulenta. La tasa de liberación de calor $\rho_r A S_T (h_{f,r}^0 - h_{f,p}^0)$ es muy alta, por quemar en régimen turbulento (S_T) y con una gran superficie de llama ($A \sim D^2$). Por otro lado, suben T_r y p por la compresión de los reactantes, afectando a S_T . $T_r/T_0 \sim (\vartheta_r/\vartheta_0)^{\gamma-1}$ y $p/p_0 \sim \vartheta_r/\vartheta_0$.

Duración: $\tau_{turb} \sim D/S_F \sim D/(S_T + u_{exp}) \sim D/(kS_T) \sim D/(kS_L u')$

⇒ Para composición y geometría dada τ_{turb} es inversamente proporcional a n [rpm].

⇒ En ángulo de cigüeñal ocupado por esta fase: $\Delta\alpha_{turb} \sim \text{cte.}$

- 3. FASE de EXTINCIÓN:** Al acercarse a las paredes del cilindro, del embolo y de los intersticios, el frente de llama se encuentra la capa límite, donde velocidades y temperaturas son inferiores, disminuyendo la velocidad de propagación (por bajar u' y transferencia de calor “llama no adiabática”) e incluso imposibilitando su propagación (T_i no se alcanza).

Se combina con este efecto la disminución importante del área de frente de llama al finalizar la combustión.

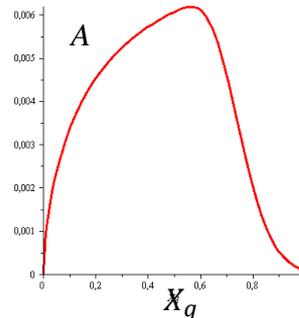


Fig. 6.10bis.- Área del frente de llama como función de la fracción de masa en el cilindro quemada.

Duración: Difícil de evaluar el apagado de llama. En cualquier caso, es terminada por la apertura de la válvula de escape. Luego $\Delta\alpha_{ext} \approx \text{indeterminado}$. Se genera una zona cerca de las paredes del cilindro donde no se puede desarrollar la combustión con normalidad. Deja una zona del orden del espesor de frente de llama con radicales libres e inquemados HC. También hay liberación de calor residual tras la llama, [Fig. 3.11](#).



COMBUSTIÓN EN MIF

[Introducción –
Fenomenología
de la combustión](#)

[Velocidad de
propagación y
estructura de la
llama](#)

[Etapas de la
combustión.](#)

[Modelado de la
combustión –
Influencia de las
variables de
diseño y
operación.](#)

[Contaminación y
mitigación de la
contaminación](#)

[Combustión anormal:
detonación y
encendido
superficial.](#)

**Máquinas y
Motores
Térmicos**



5.- Etapas de la combustión en un MEP (cont.) [volver](#)

Endoscopio en cilindro MEP 4T y émbolo transparente. La llama se ve azul, por ser de premezcla. La combustión residual aparece blanquecina.

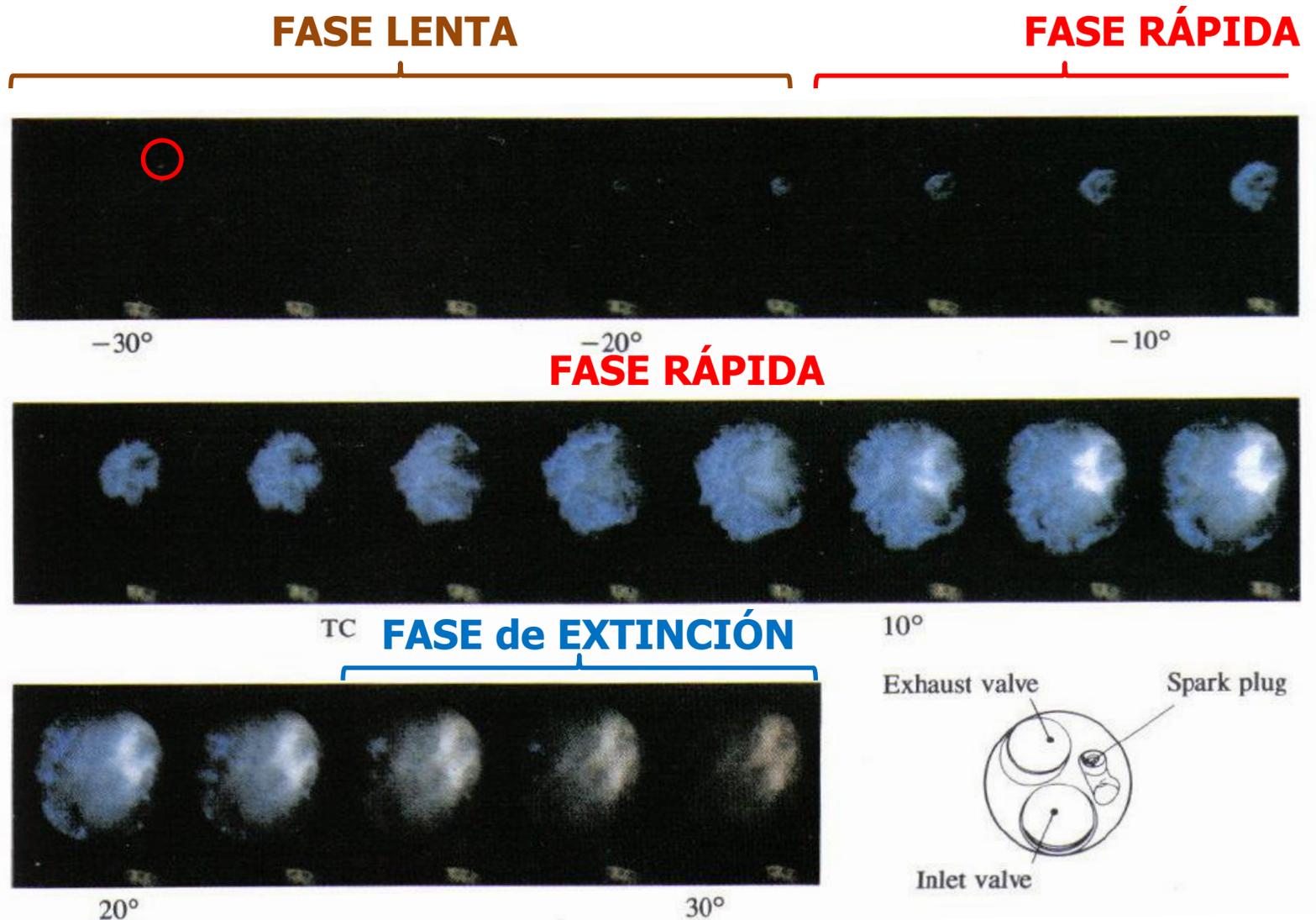


Fig. 6.11.- Visualización de la llama y esquema del fondo. Fuente: "Internal Combustion Engines Fundamentals" - J. B. Heywood - 1988



COMBUSTIÓN EN MIF

[Introducción –
Fenomenología
de la combustión](#)

[Velocidad de
propagación y
estructura de la
llama](#)

[Etapas de la
combustión.](#)

[Modelado de la
combustión –
Influencia de las
variables de
diseño y
operación.](#)

[Contaminación y
mitigación de la
contaminación](#)

[Combustión anormal:
detonación y
encendido
superficial.](#)

Máquinas y
Motores
Térmicos



5.- Etapas de la combustión en un MEP (cont.) [volver](#)

Ejercicio 6.2a.- En un MEP a plena carga (asumir $F_R = 1$, $f \sim 0$, $EGR = 0$) girando a $n_1 = 2.000$ rpm, la fase lenta de la combustión ocupa un ángulo $\Delta\alpha_{lam,1} = 10^\circ$. Determinar cuanto tiempo duraría esta fase si el motor girase a $n_2 = 4.000$ rpm.

$$\left. \begin{aligned} \Delta\alpha_{lam,2} &= \Delta\alpha_{lam,1} \frac{n_2}{n_1} \\ \Delta t_2 &= \frac{60 \frac{\text{s}}{\text{min}} \Delta\alpha_{lam,2}}{360^\circ n_2} \end{aligned} \right\} \Delta t_1 = \Delta t_2 = \frac{\Delta\alpha_{lam,1}}{6n_1} \frac{\text{s}}{^\circ \text{min}} = \frac{10^\circ}{6 \frac{2.000}{\text{min}} \text{ } ^\circ \text{min}} \frac{\text{s}}{\text{min}} = 0,83 \text{ ms}$$

El ángulo ocupado por la fase lenta aumenta con n , pero el tiempo es constante

Ejercicio 6.2b.- En el mismo MEP, operando ahora a carga parcial, y girando a $n_1 = 2.000$ rpm, se recirculan gases de escape con $EGR+f = 25\%$ para mitigar emisiones de NO_x . Estimar el ángulo ocupado por la fase lenta y las repercusiones sobre el adelanto al encendido AE .

$$\left. \begin{aligned} \Delta\alpha_{lam,3} &= \Delta\alpha_{lam,1} \frac{S_{L,1}}{S_{L,3}} \\ \frac{S_{L,3}}{S_{L,1}} &\sim 1 - c \cdot (EGR + f) \\ c &= 2,1 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \Delta\alpha_{lam,3} = \frac{\Delta\alpha_{lam,1}}{1 - c(EGR + f)} = 21^\circ > 10^\circ$$

Este mayor ángulo hace que convenga saltar la chispa antes del PMS \equiv aumentar el AE .



COMBUSTIÓN EN MIF

[Introducción –
Fenomenología
de la combustión](#)

[Velocidad de
propagación y
estructura de la
llama](#)

**[Etapas de la
combustión.](#)**

[Modelado de la
combustión –
Influencia de las
variables de
diseño y
operación.](#)

[Contaminación y
mitigación de la
contaminación](#)

[Combustión anormal:
detonación y
encendido
superficial.](#)

**Máquinas y
Motores
Térmicos**



5.- Etapas de la combustión en un MEP (cont.) [volver](#)

Fase lenta (laminar):

- Lenta.
- Pocos radicales libres.

$$\Delta\alpha_{lam} \langle F_R, p, T_r, y_p \rangle \propto n.$$

- Origina [Dispersión cíclica](#):

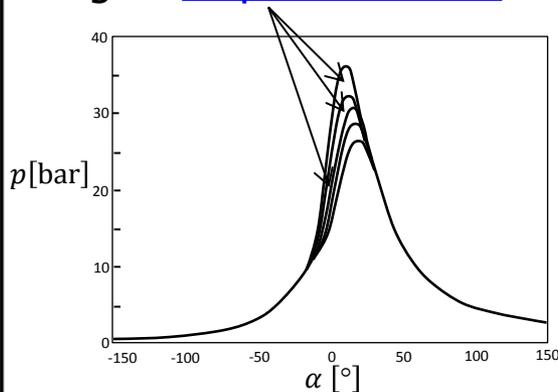


Fig. 6.12a.- Diagramas sucesivos $p - \alpha$, mostrando la dispersión cíclica

Fase rápida (turbulenta):

- Ver Ec. (6.1).
- $S_F \sim S_T + u_{exp} \sim S_T(1 + k_A) \sim cte.$
- $\Delta\alpha_{turb} \langle F_R, p, T_r, y_p \rangle \sim cte.$

Fase de extinción:

- Limitada por apagado de llama y apertura de la válvula de escape.

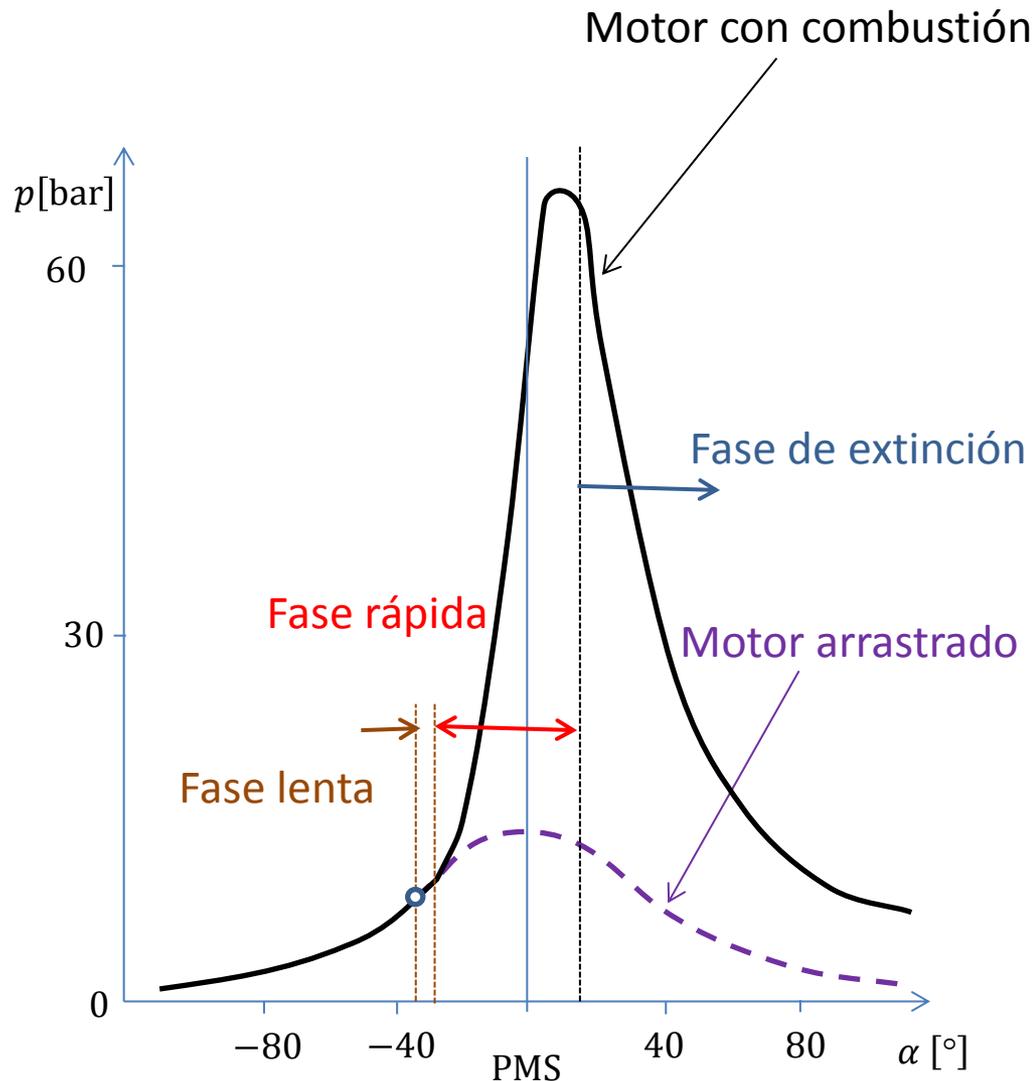


Fig. 6.12b.- Diagrama $p - \alpha$ mostrando el punto de divergencia de presiones y la sobrepresión debida a la combustión.



COMBUSTIÓN

EN MIF

[Introducción – Fenomenología de la combustión](#)

[Velocidad de propagación y estructura de la llama](#)

[Etapas de la combustión.](#)

[Modelado de la combustión – Influencia de las variables de diseño y operación.](#)

[Contaminación y mitigación de la contaminación](#)

[Combustión anormal: detonación y encendido superficial.](#)

Máquinas y Motores Térmicos



6.- Modelado de la combustión – Influencia de las variables de diseño y operación [volver](#)

Balace de energía aplicado a los gases en el cilindro. Se considera la mezcla GICP, sin distinguir zona de reactantes y de productos. La presión en cámara es uniforme, y se toma un valor medio de la temperatura:

$$\frac{dU}{dt} = \dot{Q} - p \frac{d\mathcal{G}}{dt}$$

$$\dot{Q} \sim m_0 c_v \frac{d\bar{T}}{dt} + p \frac{d\mathcal{G}}{dt}$$

$$d\bar{T} = \bar{T} \left(\frac{d\mathcal{G}}{\mathcal{G}} + \frac{dp}{p} \right) = \frac{p\mathcal{G}}{m_0 R_g} \left(\frac{d\mathcal{G}}{\mathcal{G}} + \frac{dp}{p} \right)$$

$$d\bar{T} = \frac{1}{m_0 R_g} (p d\mathcal{G} + \mathcal{G} dp)$$

$$\dot{Q} = \frac{c_v}{R_g} \left(p \frac{d\mathcal{G}}{dt} + \mathcal{G} \frac{dp}{dt} \right) + p \frac{d\mathcal{G}}{dt}$$

$$\dot{Q} = p \frac{d\mathcal{G}}{dt} \left(\frac{c_v}{R_g} + 1 \right) + \frac{c_v}{R_g} \mathcal{G} \frac{dp}{dt}$$

$$\dot{Q} = \frac{\gamma}{\gamma-1} p \frac{d\mathcal{G}}{dt} + \frac{1}{\gamma-1} V \frac{dp}{dt}$$

$$\frac{dQ}{d\alpha} = \frac{\gamma}{\gamma-1} p \frac{d\mathcal{G}}{d\alpha} + \frac{1}{\gamma-1} \underset{\text{Cinemát.}}{\mathcal{G}} \frac{dp}{d\alpha}$$

Resultado →

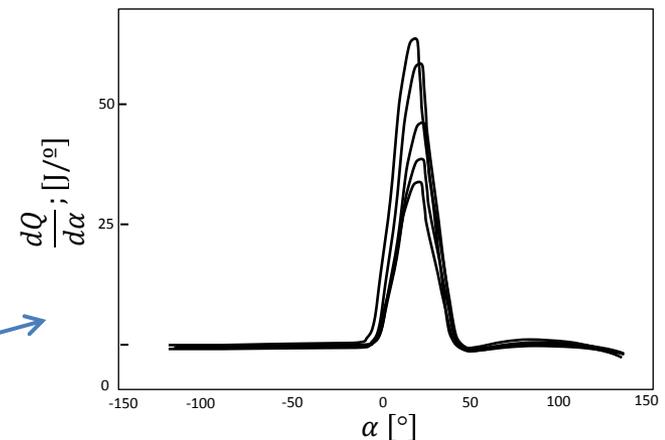
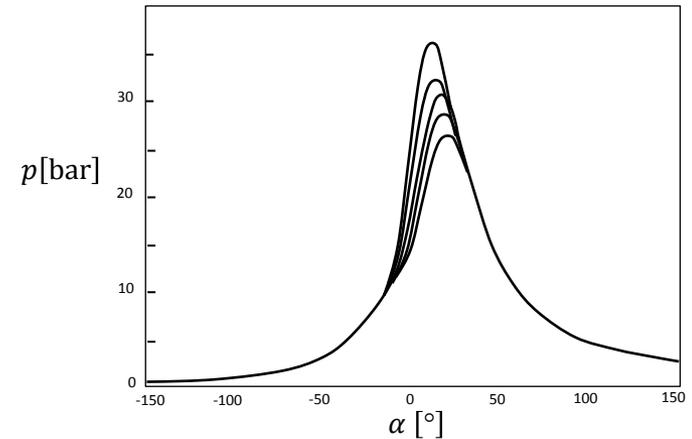


Fig. 6.13.- Diagramas $p - \alpha$ y diagramas $\frac{dQ}{d\alpha} - \alpha$ resultantes.

Adaptado de "Internal Combustion Engines Fundamentals" - J. B. Heywood - 1988

➤ Permite obtener el calor liberado por la combustión, a partir de la evolución de presión en el cilindro (presión indicada), véase la [Fig. 6.14](#).



COMBUSTIÓN EN MIF

[Introducción –
Fenomenología
de la combustión](#)

[Velocidad de
propagación y
estructura de la
llama](#)

[Etapas de la
combustión.](#)

[Modelado de la
combustión –
Influencia de las
variables de
diseño y
operación.](#)

[Contaminación y
mitigación de la
contaminación](#)

[Combustión anormal:
detonación y
encendido
superficial.](#)

Máquinas y
Motores
Térmicos



6.- Modelado de la combustión – Influencia de las variables de diseño y operación [volver](#)

La dispersión cíclica:

- La chispa (arco eléctrico) salta estadísticamente:
 - En el interior de un torbellino, luego tarda en llegar a su periferia, durando más la **fase lenta**, Fig. [6.10](#).
 - En la periferia de un torbellino; luego, la **fase lenta** dura menos.
 - Para un AE dado, esto hace que la **fase rápida** comience antes o después, aleatoriamente, dando lugar a que aparezca la dispersión cíclica.
 - Estando el AE optimizado, la dispersión cíclica hace que los ciclos que no coincidan con la media, no sean óptimos.
- La dispersión cíclica aumenta si hay una heterogeneidad en el mezclado, que ocasione diferencias de dosado a escala pequeña.
- La dispersión cíclica aumenta al empobrecerse la mezcla, pues el encendido se hace más precario. El fallo por mezcla pobre (límite de empobrecimiento) ocurre cuando aleatoriamente el motor se para, por fracasar el encendido o no sobrevivir la llama. También se para si la mezcla es excesivamente rica. Ambos establecen los **límites de inflamabilidad** en el motor.



COMBUSTIÓN EN MIF

[Introducción – Fenomenología de la combustión](#)

[Velocidad de propagación y estructura de la llama](#)

[Etapas de la combustión.](#)

[Modelado de la combustión – Influencia de las variables de diseño y operación.](#)

[Contaminación y mitigación de la contaminación](#)

[Combustión anormal: detonación y encendido superficial.](#)

Máquinas y Motores Térmicos



6.- Modelado de la combustión – Influencia de las variables de diseño y operación [volver](#)

Calor neto liberado acumulado medio $\bar{Q}(\alpha)$ y rendimiento de combustión η_c .

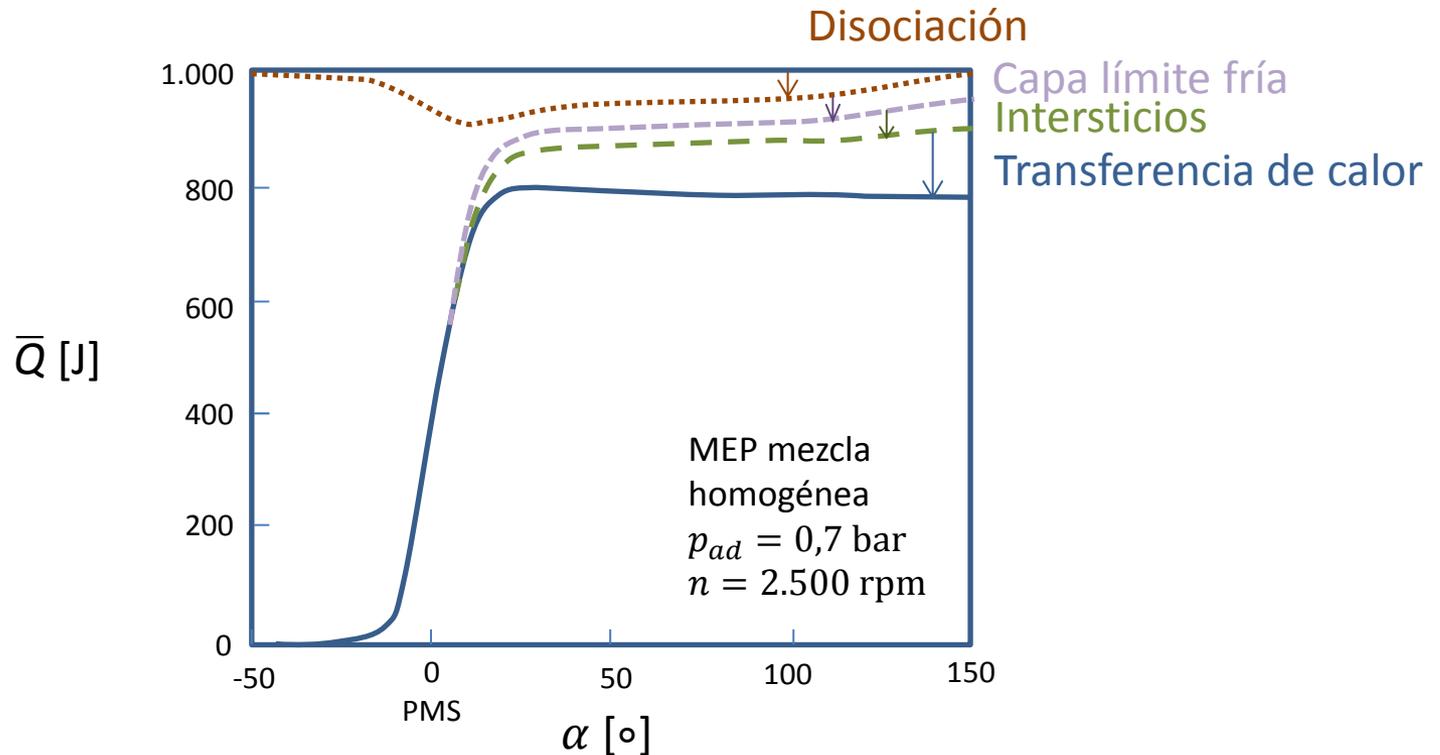


Fig. 6.14.- Balance energético de una combustión. Adaptado de "Internal Combustion Engines Fundamentals" - J. B. Heywood - 1988

Ineficiencias:

- Inherentes a la reacción (disociación), reversible.
- Capa límite fría, donde la llama se apaga.
- Intersticios, donde la llama no penetra.
- Transferencia de calor ($\sim 5-15 \% L_i \Rightarrow \approx J_c$ en el **Cap. 3** de ciclos de MACIs)



COMBUSTIÓN EN MIF

[Introducción – Fenomenología de la combustión](#)

[Velocidad de propagación y estructura de la llama](#)

[Etapas de la combustión.](#)

[Modelado de la combustión – Influencia de las variables de diseño y operación.](#)

[Contaminación y mitigación de la contaminación](#)

[Combustión anormal: detonación y encendido superficial.](#)

Máquinas y Motores Térmicos



6.- Modelado de la combustión – Influencia de las variables de diseño y operación [volver](#)

Avance al encendido AE :

- La chispa ha de saltar antes del PMS para lograr una liberación de calor cerca del PMS.
- El AE para máximo par ($MBT = \mathbf{M}$ inimum spark advance for \mathbf{B} est Torque.) se determina a $n, F_R, p_{ad}, T_{ad}, \dots = \text{ctes}$. En esas circunstancias $\dot{m}_{comb} = \text{cte.} \Rightarrow$ máximo par $C \equiv$ máximo η .
- Se suele elegir un AE ligeramente menor, perdiendo algo de par, que reduzca el pico de presión y menores NOx, denominado AE óptimo. También reduce el riesgo de [detonación](#) c. r. al MBT , por alcanzarse menores p y T .

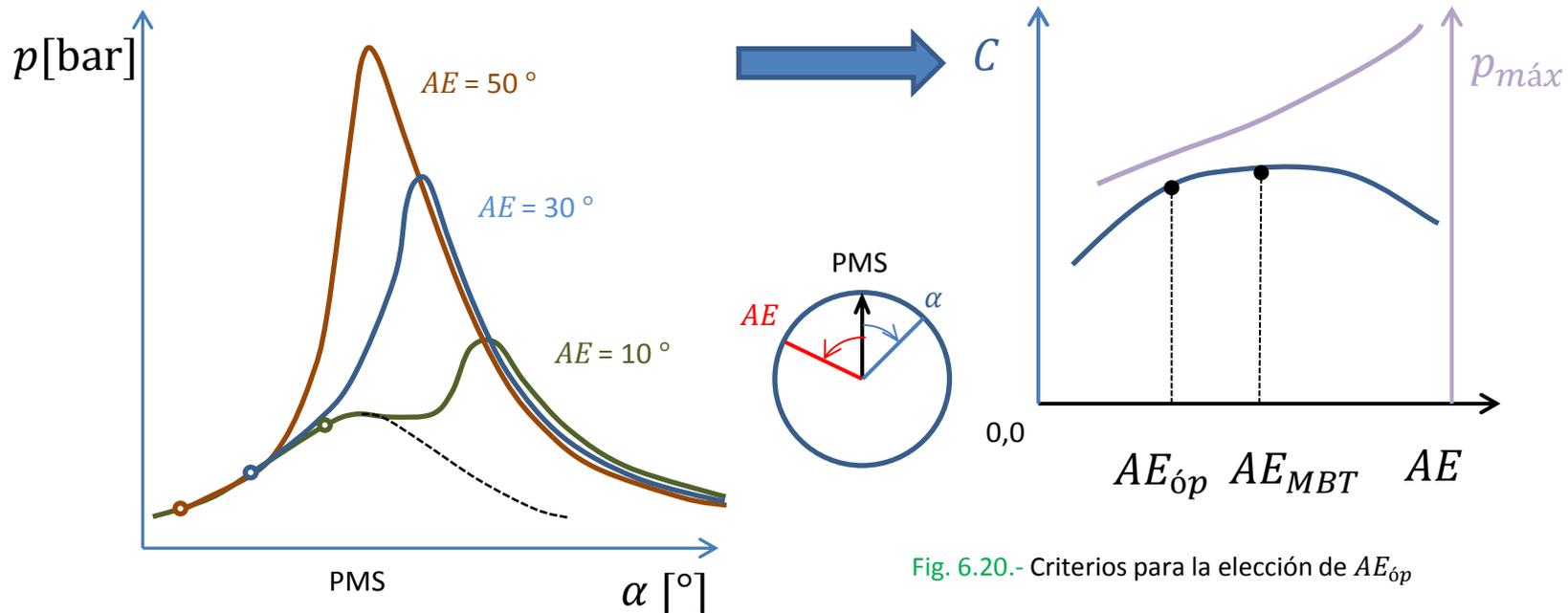


Fig. 6.20.- Criterios para la elección de $AE_{\acute{o}p}$



COMBUSTIÓN EN MIF

[Introducción –
Fenomenología
de la combustión](#)

[Velocidad de
propagación y
estructura de la
llama](#)

[Etapas de la
combustión.](#)

[Modelado de la
combustión –
Influencia de
las variables de
diseño y
operación.](#)

[Contaminación y
mitigación de la
contaminación](#)

[Combustión anormal:
detonación y
encendido
superficial.](#)

Máquinas y
Motores
Térmicos



6.- Modelado de la combustión – Influencia de las variables de diseño y operación [volver](#)

Influencia sobre el $AE_{\acute{o}p}$:

• Dosado de la mezcla F_R :

La máxima velocidad de combustión se obtiene para mezcla ligeramente rica ($F_R \sim 1,15$ para gasolina). Es necesario aumentar el AE para motores de mezcla pobre, o mezcla muy rica.

Si $\uparrow F_R \Rightarrow \Delta\alpha_{turb}$ cte., $\downarrow \Delta\alpha_{lam} \Rightarrow AE_{\acute{o}p} \downarrow$

• Fracción de gases residuales f y humedad HR :

Los gases diluyentes disminuyen la velocidad de combustión. Es necesario aumentar el AE cuando aumenta el EGR , f o HR . Si $\uparrow y_{diluyentes} \Rightarrow \uparrow \Delta\alpha_{turb}$, $\uparrow \Delta\alpha_{lam} \Rightarrow AE_{\acute{o}p} \uparrow$

• Régimen de giro n :

Si $\uparrow n \Rightarrow \Delta\alpha_{turb}$ cte., $\uparrow \Delta\alpha_{lam} \Rightarrow AE_{\acute{o}p} \uparrow$ (antiguo avance centrífugo).

• Presión de admisión p_{ad} (operación a carga parcial):

La disminución de p_{ad} (con [mariposa de gases](#)) produce dos efectos relacionados con la combustión:

- Aumenta la fracción de gases residuales $f \Rightarrow$ velocidad de combustión reducida.
- Disminuye la presión inicial de combustión \Rightarrow velocidad de combustión ligeramente mayor.

Si $\downarrow p_{ad} \Rightarrow \Delta\alpha_{turb}$ cte., $\uparrow \Delta\alpha_{lam} \Rightarrow AE_{\acute{o}p} \uparrow$ (corrección por depresión en admisión o por grado de sobrealim.)

• Temperatura de admisión T_{ad} :

La velocidad de propagación de llama es sensible a la temperatura de los reactantes, que es proporcional a T_{ad} ([detalle](#)).

Si $\uparrow T_{ad} \Rightarrow \Delta\alpha_{turb}$ cte., $\downarrow \Delta\alpha_{lam} \Rightarrow AE_{\acute{o}p} \downarrow$

• Relación de compresión r_c :

Si $\uparrow r_c \Rightarrow \Delta\alpha_{turb}$ cte., $\downarrow \Delta\alpha_{lam} \Rightarrow AE_{\acute{o}p} \downarrow$

El aumento de r_c produce dos efectos relacionados con la combustión:

- Disminuye la fracción de gases residuales $\Rightarrow S_L$ sube ligeramente.
- Aumenta la presión inicial de combustión $\Rightarrow S_L$ baja ligeramente.

• Los motores con bujía central y/o elevado swirl, tumble y/o squish necesitan un menor $AE_{\acute{o}p}$.

• El $AE_{\acute{o}p}$ es controlado por un microprocesador.



COMBUSTIÓN EN MIF

[Introducción –
Fenomenología
de la combustión](#)

[Velocidad de
propagación y
estructura de la
llama](#)

[Etapas de la
combustión.](#)

[Modelado de la
combustión –
Influencia de las
variables de
diseño y
operación.](#)

[Contaminación y
mitigación de la
contaminación](#)

[Combustión
anormal:
detonación y
encendido
superficial.](#)

Máquinas y
Motores
Térmicos



7.- Combustión anormal: detonación e ignición superficial [volver](#)

Tipos de combustión

Normal

Se inicia a partir de la chispa de la bujía y a partir de ahí se propaga al resto de la cámara mediante un frente de llama que evoluciona sin cambios bruscos en su velocidad o en su forma.

Anormal, se subdivide en dos tipos:

Detonante:

Se inicia como la anterior pero en cierto instante los gases aún por quemar, calentados y comprimidos por la dilatación de los quemados, alcanzan espontáneamente la autoignición, tras consumirse el tiempo de retardo. Arden instantáneamente en masa, generando una brusca elevación de presión, acompañada de un ruido metálico (picado de bielas). **No es una llama detonante**. El motor HCCI ha normalizado este tipo de combustión, ver [Anexo III](#).

Por ignición superficial:

Se inicia en un instante aleatorio por la energía aportada por superficies calientes (p. e. carbonilla). Pre-encendido (antes del AE) o post-encendido: más peligroso el primero porque aumenta p y T mucho y empeora en los sucesivos ciclos, pudiendo degenerar en detonación. Ver [Anexo II](#).



COMBUSTIÓN EN MIF

[Introducción –
Fenomenología
de la combustión](#)

[Velocidad de
propagación y
estructura de la
llama](#)

[Etapas de la
combustión.](#)

[Modelado de la
combustión –
Influencia de las
variables de
diseño y
operación.](#)

[Contaminación y
mitigación de la
contaminación](#)

[Combustión anormal:
detonación y
encendido
superficial.](#)

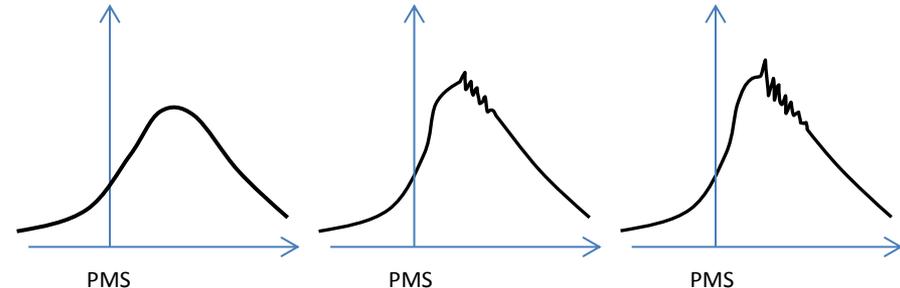
**Máquinas y
Motores
Térmicos**



7.- Combustión anormal: detonación e ignición superficial (cont.) [volver](#)

- **Autoignición simultánea** de una fracción grande de la masa en el cilindro, **sin** que haya sido alcanzada por el **frente de llama (por lo tanto reactantes)**. La fracción arde a $V = \text{cte}$. Generando elevadas p y T locales $>$ que las de la masa anteriormente quemada. Esta diferencia de presión genera una [onda de choque](#).
- Ocurre cuando, habiéndose alcanzado las condiciones de temperatura y presión necesarias, ha transcurrido el **tiempo de retardo** a la autoignición τ_r . Su valor depende tanto del **estado termodinámico** como de la **composición de la mezcla** reactante. P. e. el número de octano N. O. (actualmente 95 y 98 en España) aumenta τ_r .
- La **oscilación** de la presión se debe a los sucesivas reflexiones de la onda de choque en las paredes de la cámara de combustión.

Fig. 6.25.- Diagramas $p - \alpha$ sin detonación, detonación incipiente y detonación intensa, a base de aumentar AE , ceteris paribus.



La frecuencia oscilatoria depende de la velocidad del sonido y del tamaño de la cámara:

$$f_{\text{detonación}} = \frac{u_{\text{sonido}}}{D} = \frac{\sqrt{\gamma \cdot R_g \cdot T_{\text{gas}}}}{D}$$

$$\left. \begin{array}{l} \gamma = 1,4 \\ R_g = 287 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \\ T_{\text{gas}} = 1.800 \text{ K} \\ D = 80 \text{ mm} \end{array} \right\} \Rightarrow f_{\text{detonación}} = 10,63 \text{ kHz}$$

- Aumenta la transferencia de calor hacia las paredes del motor y la temperatura de las paredes:
 - **Mayor temperatura** de los gases al liberarse más energía en menos tiempo.
 - Interacción **onda de choque – capa límite** → mayor transferencia de calor a las paredes.
- Provoca perforación por **fusión de la cabeza del émbolo**.
- Es un factor **limitador** de la **relación de compresión**, y con ello del **rendimiento** en MIF.



COMBUSTIÓN EN MIF

Introducción – Fenomenología de la combustión

Velocidad de propagación y estructura de la llama

Etapas de la combustión.

Modelado de la combustión – Influencia de las variables de diseño y operación.

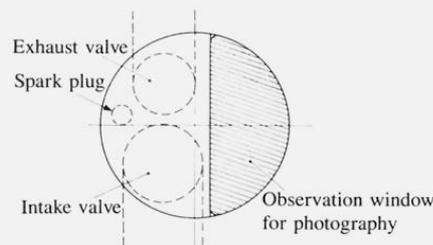
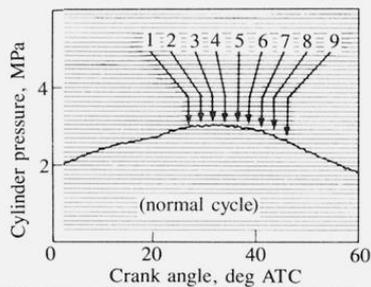
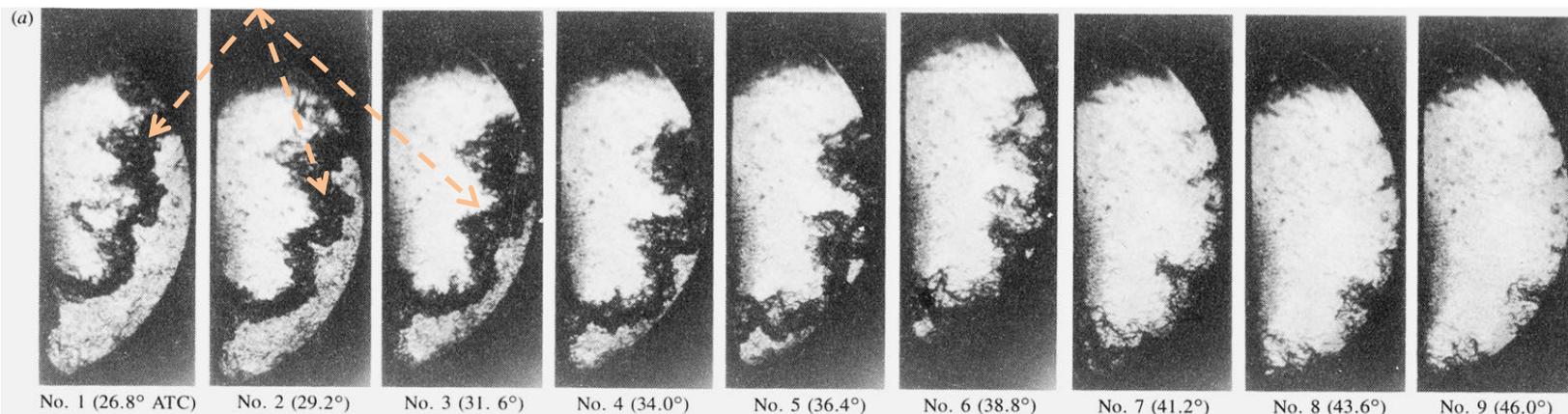
Contaminación y mitigación de la contaminación

Combustión anormal: detonación y encendido superficial.

Máquinas y Motores Térmicos

7.- Combustión anormal: detonación e ignición superficial (cont.) [volver](#)

Frente de llama normal



Detonación

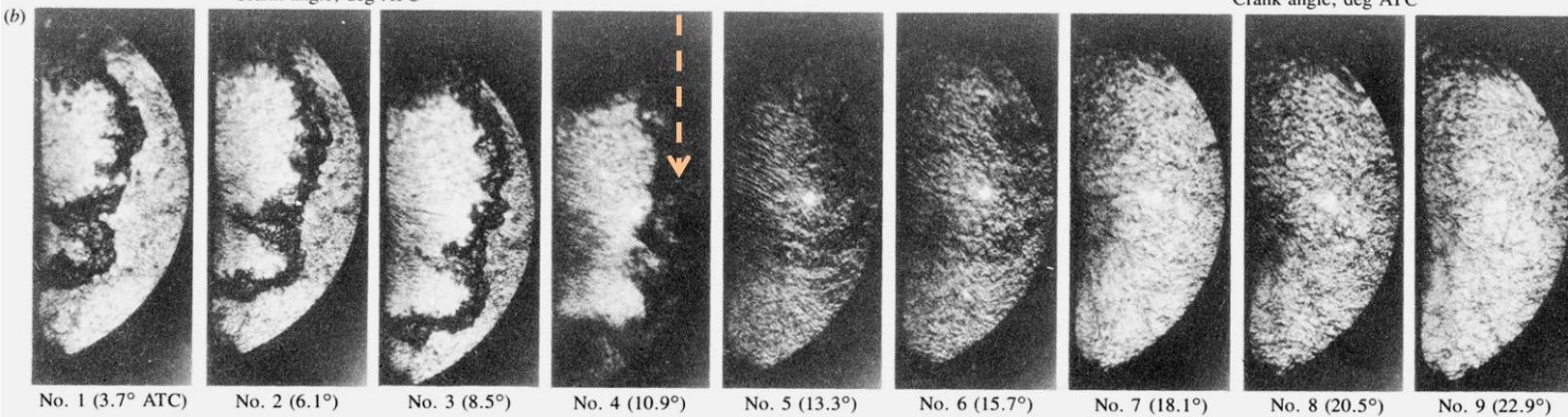
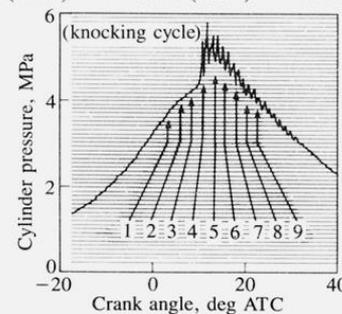


Fig. 6.26.- Umbruoscopia en la dirección del cilindro. Fuente: "Internal Combustion Engines Fundamentals" - J. B. Heywood - 1988





COMBUSTIÓN EN MIF

[Introducción –
Fenomenología
de la combustión](#)

[Velocidad de
propagación y
estructura de la
llama](#)

[Etapas de la
combustión.](#)

[Modelado de la
combustión –
Influencia de las
variables de
diseño y
operación.](#)

[Contaminación y
mitigación de la
contaminación](#)

[Combustión
anormal:
detonación y
encendido
superficial.](#)

Máquinas y
Motores
Térmicos



7.- Combustión anormal: detonación e ignición superficial (cont.) [volver](#)

• Tiempo de retardo a la auto-ignición:

$$\tau_r \approx \frac{A}{p^n} \cdot e^{\frac{E_a}{RT_r}}$$

- $E_a \gg RT_0$, A así como $n \sim 1$ y > 0 : dependen del combustible y de F_R .
 p es la presión en la cámara de combustión, cambiante al igual que T_r .
- τ_r es muy sensible a la temperatura de reactantes T_r , pues cuando $E_a \sim RT_r \rightarrow \tau_r$ disminuye drásticamente.

Condición de detonación: $\tau_r \langle \text{variables} \rangle \leq \tau_{residencia}$ de los reactantes a alta T_r .

Influencia de las variables:

• Composición del combustible:

- [Número de octano](#) 95, 98, etc.. Mayor N. O. Indica τ_r mayores. L_i igual.

• Dosado:

- El tiempo de retardo mínimo se obtiene para $F_R = 1$. Por ello enriquecer a plena carga es interesante para evitar detonación también.

• Estado termodinámico de los reactantes:

- Relación de compresión r_c y grado de sobrealimentación ($\uparrow T_r$ y $\uparrow p_r \Rightarrow \tau_r \downarrow$). **La detonación es factor limitante al rendimiento y potencia de los MIF.**
- Presión (carga con mariposa). A carga parcial, p_{ad} disminuye $\Rightarrow \uparrow \tau_r$ y aumenta $f \Rightarrow \tau_r \uparrow$.
- Temperatura del refrigerante (enfía las paredes y los reactantes $\Rightarrow \tau_r \uparrow$), posición relativa de bujía (mejor central) y válvula de escape (muy caliente, malo), inyección de H_2O o $CH_3OH \downarrow T_r \Rightarrow \tau_r \uparrow$.

• Tiempo de residencia de los reactantes antes de ser quemados $\tau_{residencia}$:

- Velocidad de giro, turbulencia y velocidad de propagación de llama \rightarrow detonación más fácil a regímenes bajos, pues el tiempo de residencia de los reactantes es mayor.
- Avance al encendido exagerado, aumenta T_r y $p_r \Rightarrow \tau_r \downarrow$.
- Geometría de la cámara de combustión. Interesa compacta y D bajo (motores pequeños y cuadrados).



COMBUSTIÓN EN MIF

[Introducción –
Fenomenología
de la combustión](#)

[Velocidad de
propagación y
estructura de la
llama](#)

[Etapas de la
combustión.](#)

[Modelado de la
combustión –
Influencia de las
variables de
diseño y
operación.](#)

[Contaminación y
mitigación de la
contaminación](#)

[Combustión anormal:
detonación y
encendido
superficial.](#)

Máquinas y
Motores
Térmicos



8.- Contaminación y mitigación de la contaminación [volver](#)

- El CO_2 se considera un contaminante por su efecto invernadero, por lo que su reducción pasa por lograr: mayores eficiencias del motor, emplear combustibles con menos carbono (H_2 y CH_4) o que previamente hayan capturado CO_2 atmosférico (biocombustibles).
- Los contaminantes principales de los MCIAs son los NO_x , CO y HC :
 - I. Los NO_x (NO , NO_2 y N_2O) se forman a alta temperatura. Aunque deberían haber desaparecido en la recombinación durante la expansión, las reacciones son tan lentas que queda una parte sustancial. Su producción es máxima con mezcla ligeramente pobre, [Fig. 6.21](#), pues se junta una temperatura de la combustión alta y presencia de O_2 .
 - II. El CO es alto con mezcla rica, por lo que hay que evitarla. Es alto con mezclas pobre cercanas al límite de empobrecimiento, pues estadísticamente aparecen apagados de la llama que originan compuestos de una combustión incompleta. Aparece incluso con mezcla pobre por el enlentecimiento de las reacciones de terminación de la combustión durante la expansión.
 - III. Los hidrocarburos inquemados (HCs) son altos con mezcla rica, a evitar. Pero con mezclas apropiadas aparece a causa de la tercera fase de la combustión, apagado por cercanía de cuerpos fríos. Son especialmente altos cerca del límite de empobrecimiento, por fracasos estadísticos de la llama.
- El humo negro (hollín) solo aparece con mezclas extraordinariamente ricas, a evitar.
- El humo azul es combustible inquemado. Aparece en arranque en frío.



8.- Contaminación y mitigación de la contaminación (cont.) [volver](#)

COMBUSTIÓN EN MIF

- [Introducción – Fenomenología de la combustión](#)
- [Velocidad de propagación y estructura de la llama](#)
- [Etapas de la combustión.](#)
- [Modelado de la combustión – Influencia de las variables de diseño y operación.](#)

Contaminación y mitigación de la contaminación

- [Combustión anormal: detonación y encendido superficial.](#)

Máquinas y Motores Térmicos



Equilibrio termoquímico

Cinética química

$T_{p,max}$ [K], para inicio de combustión: p_0 y T_0 .
A presión constante

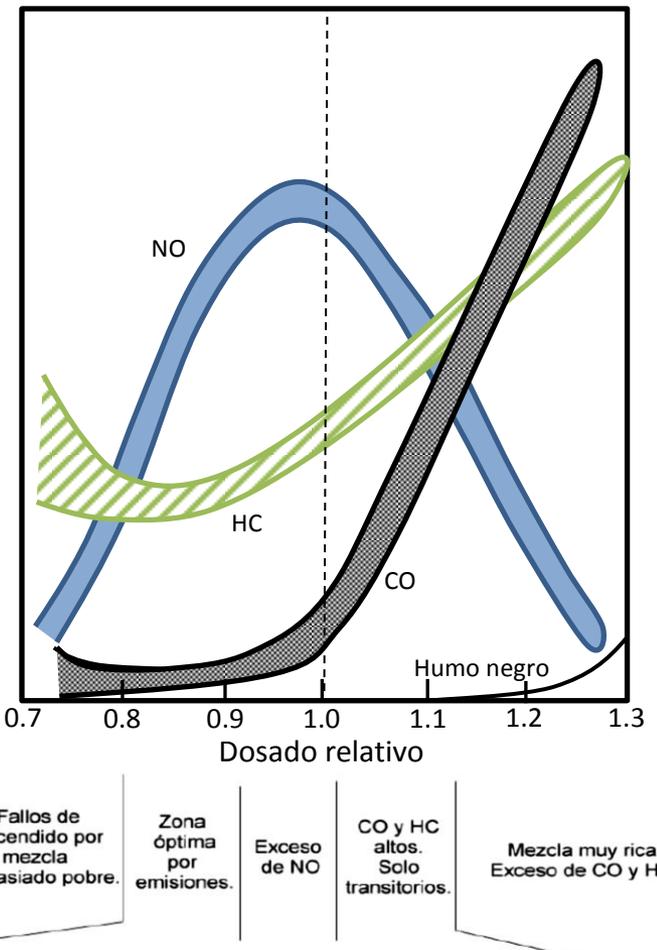
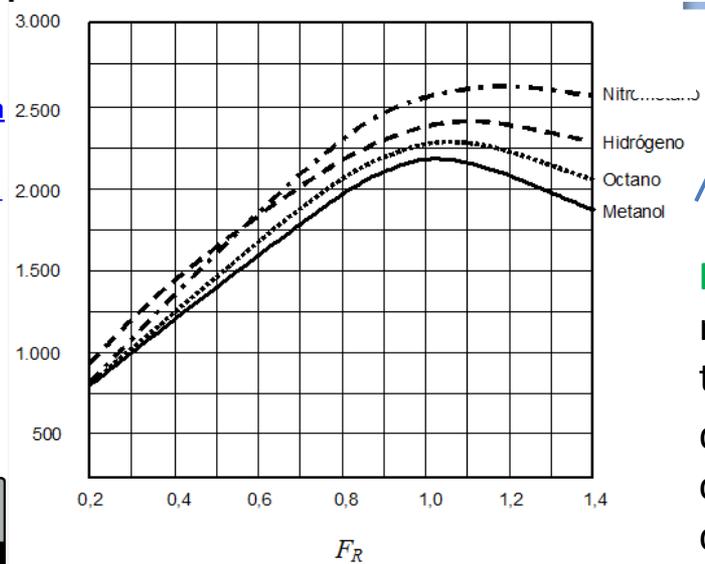


Fig. 6.21.- Esquema de contaminación de un MEP de mezcla homogénea convencional. La máxima temperatura $T_{p,max}$ alcanzada durante la combustión depende de: $f, EGR, r_c, F_R, T_{ad}, p_{ad}, combustible$. La conjunción de temperatura, equilibrio y cinética químicos da lugar a la concentración en escape.



COMBUSTIÓN EN MIF

[Introducción –
Fenomenología
de la combustión](#)

[Velocidad de
propagación y
estructura de la
llama](#)

[Etapas de la
combustión.](#)

[Modelado de la
combustión –
Influencia de las
variables de
diseño y
operación.](#)

[Contaminación y
mitigación de la
contaminación](#)

[Combustión anormal:
detonación y
encendido
superficial.](#)

Máquinas y
Motores
Térmicos



8.- Contaminación y mitigación de la contaminación (cont.) [volver](#)

- La contaminación en los MEP se reduce:
 - Destruyendo los contaminantes formados, técnicas “end of pipe”:
 - Catalizador de tres vías. Reduce los NO_x y a la vez oxida los HC y CO.
 - Catalizador de urea (SCR o “Selective Catalytic Reduction”) para reducir los NO_x .
 - Catalizador de oxidación. Reduce solamente los CO y HC con mezcla pobre.
 - Catalizador de almacenamiento de NO_x . Posibilita su reducción en motores de mezcla pobre.
 - Reduciendo la producción de contaminantes:
 - Ciclo Miller.
 - EGR.
 - Motores de mezcla estratificada con dosado global pobre.

Además

- Los catalizadores no admiten azufre en las gasolinas, ni plomo-tetraetilo como mejorador del N. O.
- El vapor que se desprende del depósito de combustible son HCs; debe evitarse su fuga.
- El arranque en frío y calentamiento debe reducirse, pues se forman muchos HCs. La necesaria mezcla rica hace que el CO sea alto también.
- Los catalizadores necesitan un tiempo de calentamiento para actuar.
- La ITV busca evitar vehículos muy contaminantes.



COMBUSTIÓN EN MIF

[Introducción –
Fenomenología
de la combustión](#)

[Velocidad de
propagación y
estructura de la
llama](#)

[Etapas de la
combustión.](#)

[Modelado de la
combustión –
Influencia de las
variables de
diseño y
operación.](#)

[Contaminación y
mitigación de la
contaminación](#)

[Combustión anormal:
detonación y
encendido
superficial.](#)

Máquinas y
Motores
Térmicos



8.- Contaminación y mitigación de la contaminación (cont.) [volver](#)

Efecto del dosado:

- Con mezcla homogénea se dan las condiciones de mínimas [emisiones](#) para $0,8 < F_R = \frac{1}{\lambda} < 0,9$, [Fig. 6.21](#). El motor de mezcla pobre posibilita $F_R \sim 0,6$, reduciendo los NOx y aumentando η .
- A máxima potencia, aceleración y marcha en frío, se enriquece $F_R \sim 1,15 \Rightarrow \text{CO}, \text{HC} \uparrow$.

Reducción de los contaminantes con catalizadores (solamente se implementan los necesarios, dependiendo del motor):

- [Catalizador de tres vías](#). Para simultáneamente poder oxidar los CO y HC y reducir los NO_x se requiere $0,95 < F_R < 1,05$. Para ello necesita medida de oxígeno en el escape ([sonda lambda](#)) para regular con precisión la inyección de combustible y mantener $F_R = 1$. El motor opera fuera de las condiciones de $\eta_{\text{máx}}$ por lo que es una técnica en regresión.
- Catalizador de urea, solo necesario actualmente en MEC, Diésel.
- Catalizador de oxidación, útil en motores de mezcla pobre. Similar al de tres vías.
- Catalizador de [almacenamiento](#) de NOx. Tras adsorberlos, los reduce pasando momentáneamente a mezcla estequiométrica o rica. Similar al de tres vías.
- [Filtro de partículas](#). Retiene las partículas carbonosas y las quema periódicamente. Solo necesario en MEC, Diésel.

Reducción de la producción de contaminantes

- Con turbo + ciclo Miller: $\downarrow r_c, \downarrow T_r = T_1 \cdot r_c^{\gamma-1} \rightarrow T_{\text{max}} \downarrow \rightarrow \text{NOx} \downarrow$.
- Con [EGR](#), $\uparrow y_p, T_{\text{max}} \downarrow \rightarrow \text{NOx} \downarrow \text{HC} \uparrow$.
- Mitigación de los contaminantes con combustión estratificada:



COMBUSTIÓN EN MIF

Introducción – Fenomenología de la combustión

Velocidad de propagación y estructura de la llama

Etapas de la combustión.

Modelado de la combustión – Influencia de las variables de diseño y operación.

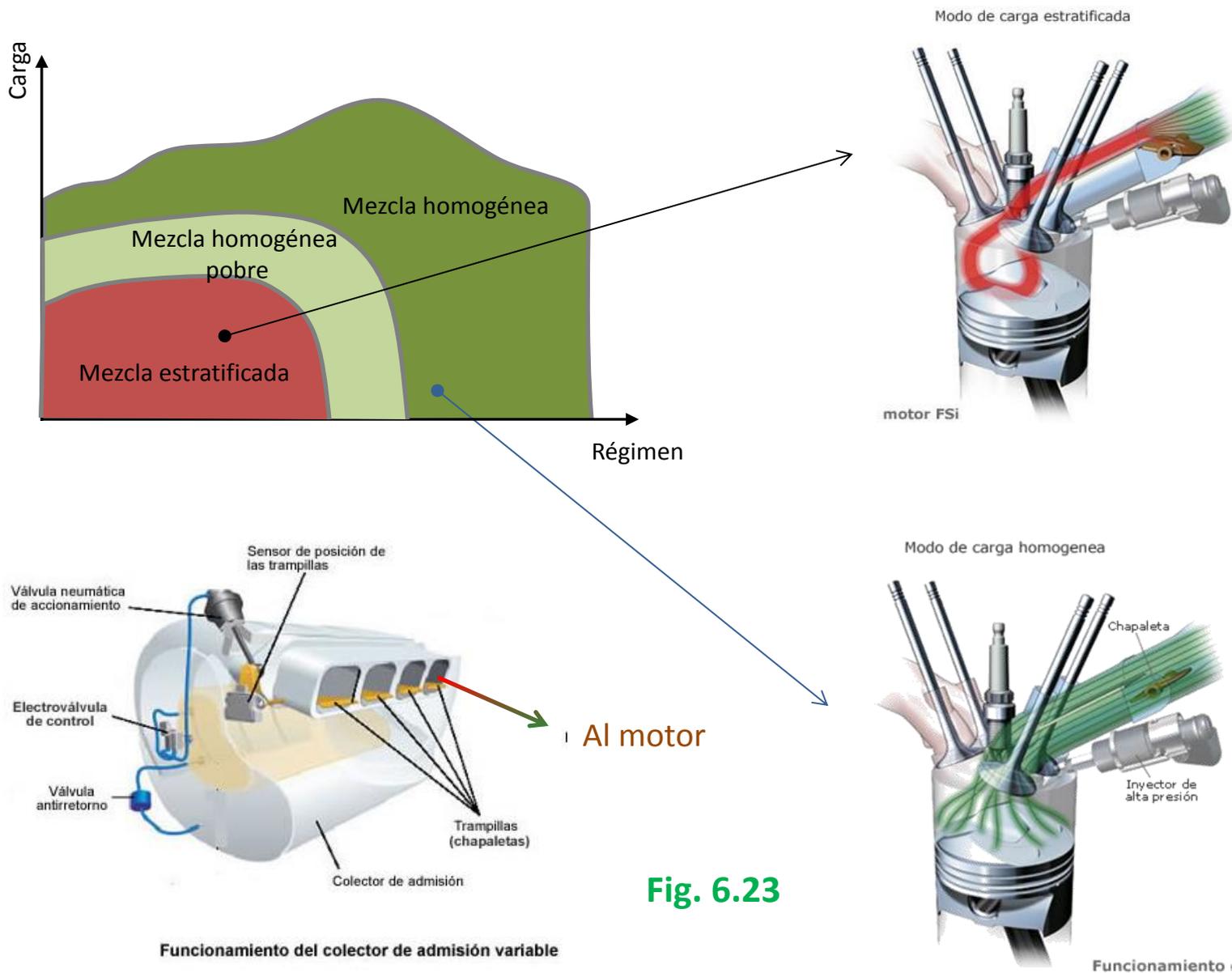
Contaminación y mitigación de la contaminación

Combustión anormal: detonación y encendido superficial.

Máquinas y Motores Térmicos

8.- Contaminación y mitigación de la contaminación (cont.) [volver](#)

Carga estratificada y homogénea en modos de funcionamiento, [Fuente](#).



Al motor

Fig. 6.23

Funcionamiento del colector de admisión variable

Funcionamiento





COMBUSTIÓN EN MIF

[Introducción –
Fenomenología
de la combustión](#)

[Velocidad de
propagación y
estructura de la
llama](#)

[Etapas de la
combustión.](#)

[Modelado de la
combustión –
Influencia de las
variables de
diseño y
operación.](#)

[Contaminación y
mitigación de la
contaminación](#)

[Combustión anormal:
detonación y
encendido
superficial.](#)

Máquinas y
Motores
Térmicos



8.- Contaminación y mitigación de la contaminación (cont.) [volver](#)

- **Modo estratificado:** En el centro de la cámara de combustión se encuentra una mezcla con buena inflamabilidad (mezcla rica) en torno a la bujía. Esta mezcla está rodeada de una capa exterior, que en el caso ideal está compuesta por aire fresco y gases de escape recirculados (mezcla globalmente muy pobre). El volumen a quemar es pequeño \rightarrow la combustión dura menos $\tau_{residencia}$ es menor.
- La combustión se desarrolla con dosado rico en una primera etapa (pocos NOx por alcanzar menos T localmente, pero mucho CO y HC). La mezcla con el aire acaba de oxidar el CO y HC ([equilibrio termoquímico](#)). La llama no alcanza las paredes del cilindro, generando menos HC en zonas frías. La trampilla en admisión favorece el “tumble”. Se inyecta con spray estrecho dirigido al centro.

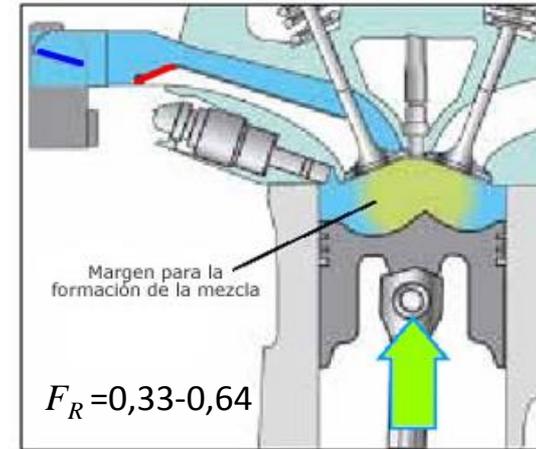


Fig 6.24a

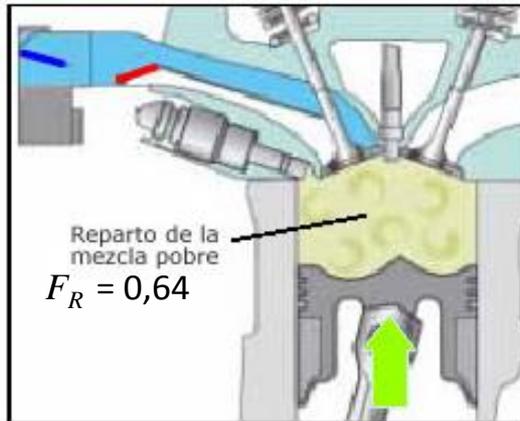


Fig 6.24b

- **Modo homogéneo pobre:** mezcla homogénea, como en el funcionamiento normal, pero con dosado cercano al límite pobre. $\downarrow T_{max} \rightarrow NOx \downarrow$. Requiere de un AE importante, no necesita EGR $\rightarrow (\eta \uparrow)$. Permite mitigar NOx sin perjudicar al rendimiento del motor. La posición de la trampilla favorece la turbulencia. Se inyecta con un spray amplio para homogeneizar.

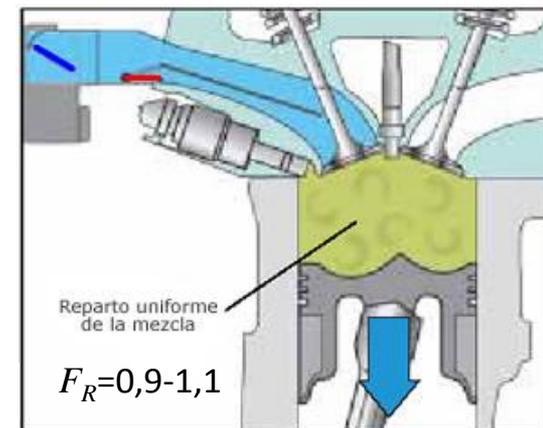


Fig 6.24c

- **Modo homogéneo (normal):** usado en alta carga y régimen, donde las emisiones no son problemáticas (paredes del cilindro/embolo calientes \rightarrow pocos HC y CO). Trampilla abierta para favorecer el llenado. Spray amplio.



COMBUSTIÓN EN MIF

[Introducción –
Fenomenología
de la combustión](#)

[Velocidad de
propagación y
estructura de la
llama](#)

[Etapas de la
combustión.](#)

[Modelado de la
combustión –
Influencia de las
variables de
diseño y
operación.](#)

[Contaminación y
mitigación de la
contaminación](#)

[Combustión anormal:
detonación y
encendido
superficial.](#)

Máquinas y Motores Térmicos



9.- Cuestiones de autoevaluación [volver](#)

#	Cuestión	V/F
1	La combustión en MEPs trata de evitar la autoignición	V
2	La autoignición tiene un tiempo de retardo, una vez alcanzadas las condiciones para que se dé.	V
3	El tiempo de retardo ha de ser $<$ que el de residencia en las condiciones de autoignición, para que la detonación no se produzca	F
4	La premezcla permite que nos e formen llamas amarillas	V
5	La presión en la cámara de combustión de un MEP es espacialmente homogénea, salvo que aparezca detonación	V
6	La temperatura en la combustión real de un MEP es espacialmente homogénea en la cámara	F
7	En los MEP conviene empobrecer la mezcla al efecto de lograr buen rendimiento del ciclo	V
8	La mezcla en los MEP se puede empobrecer fin límite	F
9	En los MEP de mezcla estratificada, la combustión pasa de ser rica a ser pobre en un mismo ciclo	V
10	Los MEP de mezcla estratificada permiten mezclas globalmente más pobres que los de mezcla homogénea.	V
11	Al sobrealimentar un motor, aumenta su tendencia a detonar, ceteris paribus.	V
12	La aparición de gases contaminantes en el escape de los MEP se debe no solo a cuestiones explicadas por la termoquímica, sino además a aspectos de cinética química.	V



**COMBUSTIÓN
EN MIF**

[Introducción –
Fenomenología
de la combustión](#)

[Velocidad de
propagación y
estructura de la
llama](#)

[Etapas de la
combustión.](#)

[Modelado de la
combustión –
Influencia de las
variables de
diseño y
operación.](#)

[Contaminación y
mitigación de la
contaminación](#)

[Combustión anormal:
detonación y
encendido
superficial.](#)

**Máquinas y
Motores
Térmicos**



9.- Cuestiones de autoevaluación [volver](#)

#	Cuestión	V/F
13	El catalizador de tres vías es válido para motores de mezcla pobre	F
14	El EGR permite bajar los NOx, pero aumentan los HC por reducirse la temperatura de la llama	V
15	En un motor convencional de mezcla homogénea, la producción de NOx es máxima con mezcla ligeramente pobre	V
16	Según va progresando la combustión en la fase rápida, la velocidad de propagación se va enlenteciendo.	F
17	El uso de gasolina de mayor N. O. permite mayor potencia, por aumentar su poder calorífico	F
18	Un MEP con hidrógeno como combustible no emitiría NOx.	F
19	La relación de compresión en los MEP está limitada por la aparición de la detonación	V
20	Agregar swirl o tumble al diseño de un motor beneficia la combustión, pero aumenta las pérdidas de calor a las paredes, ceteris paribus	V
21	Agregar swirl o tumble al diseño de un motor reduce su rendimiento volumétrico	V
22	El avance al encendido óptimo suele ser mayor que el MBT	F
23	En un MEP, al producirse la autoignición espontánea de los reactantes, aparecen dos presiones distintas en la cámara de combustión	V
24	Las llamas laminares de premezcla son más rápidas que las turbulentas	F
25	En un MEP lento, el tiempo de residencia en condiciones de autoignición es mayor que en uno rápido	V



COMBUSTIÓN EN MIF

[Introducción –
Fenomenología
de la combustión](#)

[Velocidad de
propagación y
estructura de la
llama](#)

[Etapas de la
combustión.](#)

[Modelado de la
combustión –
Influencia de las
variables de
diseño y
operación.](#)

[Contaminación y
mitigación de la
contaminación](#)

[Combustión anormal:
detonación y
encendido
superficial.](#)

Máquinas y Motores Térmicos

9.- Cuestiones de autoevaluación [volver](#)

#	Cuestión	V/F
26	Un motor está diseñado para usar gasolina con N. O. 95. Si se le alimenta con N. O. 98 sufrirá daños	F
27	Un motor está diseñado para usar gasolina con N. O. 95. Si se le alimenta con N. O. 98 funcionará mejor	F
28	Un motor está diseñado para usar gasolina con N. O. 98. Si se le alimenta con N. O. 95 puede sufrir daños	V
29	Una pequeña cantidad de combustible Diésel a gasolina de N. O. 95, la mejora en su capacidad anti-detonación	F
30	La presencia de oxígeno en los gases de escape, cuando se actúa con mezcla globalmente pobre, dificulta su reducción catalítica sin aditivos	V
31	Como el gas natural y el propano disfrutan de un N. O superior a las gasolinas, la conversión de motores de gasolina a operar con estos combustible no necesita rebajar la relación de compresión	V
32	Un MEP con D mayor que otro y con la misma n tiene más riesgo de detonación, ceteris paribus	V
33	Los MEP de gran tamaño tienen D mayor, salvo que tuvieran muchos cilindros y suelen tener igual velocidad media del árbol u . Ambos efectos aumentan el tiempo de residencia en condiciones de autoignición, ceteris paribus.	V
34	Se desea modificar un MEP, añadiéndole EGR. Su encendido deberá producirse más cerca del PMS	F
35	Se desea turboalimentar un MEP de aspiración normal. Es razonable que se tenga que bajar su r_c salvo que a plena carga se tomen medidas anti-detonación, como reducir el AE .	V





COMBUSTIÓN EN MIF

[Introducción –
Fenomenología
de la combustión](#)

[Velocidad de
propagación y
estructura de la
llama](#)

[Etapas de la
combustión.](#)

[Modelado de la
combustión –
Influencia de las
variables de
diseño y
operación.](#)

[Contaminación y
mitigación de la
contaminación](#)

[Combustión anormal:
detonación y
encendido
superficial.](#)

Máquinas y
Motores
Térmicos



10.- Anexos [volver](#)

Anexo I:

- La temperatura de autoignición T_a no coincide con la temperatura de ignición justo antes de la llama T_i . En este último caso, los reactantes son no solamente calentados por conducción de parte de los productos muy próximos, sino que son atacados por radicales libres que los “desmontan”, principalmente por el radical menor que existe: H. Como resultado la liberación de calor por combustión empieza a temperaturas menores y se forma mayoritariamente CO y H₂ ya dentro de la llama. De ahí que:
 - Los distintos combustible muestren composición de los productos muy similar, véase la Termoquímica.
 - Aparezca CO en los gases tras la llama, pues su oxidación es lenta a temperaturas moderadas.

ANEXO II

- Las bujías de encendido se producen con diferentes “[grados térmicos](#)”. Tiene que ver con su capacidad de disipar calor durante la marcha del motor.
 - Si es excesivo, la bujía enfría los gases perjudicando la ignición y los depósitos de residuos sobre ella pueden originar fallos, al conducir la electricidad.
 - Si es insuficiente, puede originar pre-encendido por punto caliente, que por ser incontrolado perjudica.



COMBUSTIÓN EN MIF

[Introducción –
Fenomenología
de la combustión](#)

[Velocidad de
propagación y
estructura de la
llama](#)

[Etapas de la
combustión.](#)

[Modelado de la
combustión –
Influencia de las
variables de
diseño y
operación.](#)

[Contaminación y
mitigación de la
contaminación](#)

[Combustión anormal:
detonación y
encendido
superficial.](#)

Máquinas y
Motores
Térmicos



10.- Anexos [volver](#)

Anexo III:

- El sistema de combustión [HCCI](#) (Homogeneous Charge Compression Ignition) utiliza un modo de autoencendido simultáneo en toda la cámara sin bujía. Está provocado por una alta recirculación de gases de escape, EGR, y una alta r_c . En realidad es un MEC, pero de premezcla homogénea. [Información.](#)
- Destinado a quemar mezclas pobres con buen rendimiento de combustión y sin una gradiente de presiones $dp/d\alpha$ exagerado.
- Logra bajos NOx por la baja temperatura de los productos; sin embargo, el CO y HC necesitan catalizador de oxidación. No emite humo negro.
- Este modo se emplea a ralentí y carga parcial, una vez caliente el motor.
- No usa mariposa de admisión, eliminando el bucle de bombeo.
- El reducido margen operativo de este modo de autoignición se ve ampliado con diagrama de la distribución variable.
- Puede quemar gasolina, alcohol etílico, [E85](#), mezclas e incluso gasóleo. [Un ejemplo.](#) [Otro ejemplo.](#)