

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA**  
**DEPARTAMENTO DE MÁQUINAS Y MOTORES TÉRMICOS**



**Caracterización del Proceso de Formación  
de Hollín en una Llama de Difusión Diesel  
de Baja Temperatura**

**TESIS DOCTORAL**

**Realizada por:**

**Doña Christelle MONIN**

**Dirigida por:**

**Doctor Jean ARRÈGLE**

**Valencia, Julio de 2009**



**TESIS DOCTORAL**

**Caracterización del Proceso de Formación  
de Hollín en una Llama de Difusión Diesel  
de Baja Temperatura**

**presentada por**

**Christelle MONIN**

**en el**

**DEPARTAMENTO DE MÁQUINAS Y MOTORES  
TÉRMICOS de la UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE  
VALENCIA**

**Para la obtención del grado de**

**DOCTORA INGENIERA INDUSTRIAL**

**Valencia, Julio de 2009**



TESIS DOCTORAL

# **Caracterización del Proceso de Formación de Hollín en una Llama de Difusión Diesel de Baja Temperatura**

**Realizada por:** Doña Christelle MONIN

**Dirigida por:** Doctor Jean ARRÈGLE

TRIBUNAL CLASIFICADOR:

**Presidente:** Doctor José María DESANTES FERNÁNDEZ

**Secretario:** Doctor Jesús BENAJES CALVO

**Vocales:** Doctor Juan José HERNANDEZ ADROVER

Doctor Andrés MELGAR BACHILLER

Doctor Pedro Acisclo RODRÍGUEZ AUMENTE

**Vocales Suplentes:**

Doctor Octavio ARMAS VERGEL

Doctor Francisco Vicente TINAUT FLUIXÁ



## ABSTRACT

Pollutant emissions to the atmosphere, partly produced by the internal combustion engines used in transportation, is one of the main concerns in our society. Concerning diesel engines, their pollutant emissions are carbon monoxide, unburned hydrocarbons and, mainly, nitrogen oxides and soot particulates. The latter are the product of a complex balance between formation and oxidation. A promising path for the future is to achieve a low temperature diffusion combustion, which intrinsically produces nearly no soot. Both the soot formation and oxidation processes directly depend on the mixing process. In fact, the main parameter that seems to control the soot formation process is the oxygen entrained by the fuel spray between the injector and the beginning of the flame (lift-off). It was observed that a fast, non-sooting diffusion combustion can be achieved if the mixing process is enhanced by increasing the injection pressure and strongly reducing the injector orifices diameter. However no many things are known about the behavior of the lift-off and the other items affecting soot formation at low temperature combustion conditions with low oxygen mass fraction.

The main objective of this work is to improve the knowledge of these processes. To achieve this objective, four other specific objectives were defined:

- To characterize the effect of oxygen mass fraction on the lift-off length.
- To characterize its consequences on the soot formation process.
- To quantify the effect of increasing the injection pressure and strongly reducing the orifice diameter on the two previous aspects.
- For this purpose, it is necessary to develop:
  - A methodology to simultaneously measure the lift-off length and the soot content in the flame based on different optical techniques applied in an optically accessible engine.
  - A methodology that allows quantifying the studied physico-chemical mechanisms based on the spray mixing process analysis.

As a result of this last point, the main originality of this work is the definition and use of a parameter ( $F_{\text{soot}}$ ) that allows characterizing the soot formation process in a more quantitative way compared to other studies already published in the bibliography. Thanks to this parameter, the behavior of the flame at low oxygen mass fraction conditions was better characterized, and some criteria to achieve non-sooting conditions were defined.





## RESUMEN

Las emisiones contaminantes hacia la atmósfera, en parte debidas a los motores de combustión interna utilizados en el transporte, es una de las mayores preocupaciones de nuestra sociedad. En el caso de los motores diesel, las especies contaminantes son el monóxido de carbono, los hidrocarburos sin quemar y, principalmente, los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y las partículas de hollín. Estas últimas son el producto de un complejo balance entre su formación y su oxidación. Una vía de futuro es conseguir una combustión por difusión de baja temperatura, intrínsecamente de muy baja formación de hollín. Tanto la formación como la oxidación del hollín dependen directamente del proceso de mezcla. En efecto, el parámetro principal que parece controlar el proceso de formación de hollín es la cantidad de oxígeno englobado por el chorro de combustible en la distancia entre el inyector y el inicio de la llama (lift-off). Al acelerar la mezcla aire-combustible aumentando la presión de inyección y reduciendo fuertemente el diámetro de los orificios del inyector se ha visto que se puede conseguir una combustión por difusión rápida y sin formación de hollín. No obstante, se conoce muy poco sobre el comportamiento del lift-off y del resto del proceso de formación de hollín en condición de combustión de baja temperatura, con baja concentración de oxígeno.

El objetivo principal del trabajo es profundizar en la comprensión de estos procesos. Para lograrlo, se ha definido cuatro objetivos particulares:

- Caracterizar el efecto de la concentración de oxígeno sobre el lift-off.
- Caracterizar las consecuencias sobre el proceso de formación de hollín.
- Cuantificar el impacto del aumento de la presión de inyección y del uso de orificios de inyección extremadamente pequeños sobre los dos puntos anteriores.
- Para ello, se debe desarrollar:
  - una metodología de medida simultánea del lift-off y de la concentración de hollín en la llama basada en diferentes técnicas de visualización de la combustión en un motor con accesos ópticos.
  - una metodología basada en el análisis del proceso de mezcla en el chorro de combustible que permita cuantificar los mecanismos físico-químicos estudiados.

Fruto de este último punto, la principal originalidad del trabajo es la definición y el uso de un parámetro ( $F_{\text{soot}}$ ) que permite caracterizar el proceso de formación de hollín de manera mucho más cuantitativa que en los trabajos presentes en la bibliografía. Gracias a ello se ha podido caracterizar más en detalle el comportamiento de la llama con baja concentración de oxígeno, definiendo criterios para llegar a condiciones de formación de hollín nula.



## RESUM

Les emissions contaminant vers l'atmosfera, en part degudes als motors de combustió interna emprats al transport, és una de les més grans preocupacions de la nostra societat. En el cas dels motors diesel, les substàncies contaminants són el monòxid de carboni, els hidrocarburs sense cremar y, principalment, els òxids de nitrogen i les partícules de sutja. Aquestes últimes són el producte d'un complex balanç entre la seua formació i oxidació. Una via de futur es aconseguir una combustió per difusió a baixa temperatura, intrínsecament de molt baixa formació de sutja. Tant la formació com l'oxidació de la sutja depenen directament del procés de mescla. En efecte, el paràmetre principal que pareix controlar el procés de formació de sutja és la quantitat d'oxigen englobat pel doll de combustible a la distància entre l'injector i l'inici de la flama (lift-off). Quan s'accelera la mescla aire-combustible augmentant la pressió d'injecció i reduint fortament el diàmetre dels orificis de l'injector, s'ha vist que es pot aconseguir una combustió per difusió ràpida i sense formació de sutja. No obstant es coneix poc el comportament del lift-off i la resta del procés de formació de la sutja en condicions de combustió a baixa temperatura amb baixa concentració d'oxigen.

L'objectiu principal del treball és aprofundir en la comprensió de tots estos processos. Per aconseguir-ho, s'han definit quatre objectius particulars:

- Caracteritzar l'efecte de la concentració d'oxigen sobre el lift-off.
- Caracteritzar les conseqüències sobre el procés de formació de sutja.
- Quantificar l'impacte de l'augment de la pressió d'injecció i de l'ús d'orificis d'injecció extremadament xicotets sobre els dos punts anteriors.
- Per a això es déu desenvolupar:
  - una metodologia de mesura simultània del lift-off i de la concentració de sutja dins la flama, basada en diferents tècniques de visualització de la combustió en un motor amb accessos òptics.
  - una metodologia basada a l'anàlisi del procés de mescla al doll de combustible que permeti quantificar els mecanismes fisico-químics estudiats.

Fruit d'aquest darrer punt, la principal originalitat del treball és la definició i l'ús d'un paràmetre ( $F_{\text{soot}}$ ) que permeti caracteritzar el procés de formació de sutja de manera molt més quantitativa que als treballs presents a la bibliografia. Gràcies a això s'ha pogut caracteritzar més en detall el comportament de la flama amb baixa concentració d'oxigen, definint criteris per a arribar a condicions de formació nul·la de sutja.



## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar quiero agradecer a mi director de tesis, Jean Arrègle, por todo lo que de él ha aprendido durante estos 4 años.

También deseo agradecer a Francisco Payri Gonzáles y José María Desantes Fernández por la oportunidad que me han brindado al realizar mi tesis doctoral en el departamento.

En la parte experimental quiero agradecer a Dani, Salva, José Enrique, Carlos y Edu por todas las horas de laboratorio compartidas y por enseñarme la mayor parte de los que sé de inyección y motores.

En la parte óptica deseo dar las gracias a José María, Jean Guillaume y Gustavo por su valiosa ayuda y disponibilidad por colaborar en todo momento.

A Elena, Sjoerd, Antonio y Oscar, mis compañeros de línea con los cuales he compartido buenos momentos y que sin ellos hubiera sido todo muy diferente.

También quisiera agradecer a Romain, Maxime, Julien, Jonathan, Francisco, Lucile que con sus proyectos han contribuido en gran medida a este trabajo.

En la revisión del documento quiero agradecer a Javier López por su colaboración.

Y a todos los que no he citado, pero que seguramente son tan importantes como los que he citado.

En último lugar quiero agradecer a mis padres y a Gustavo por su apoyo y los consejos que me han proporcionado a lo largo de estos años.



# ÍNDICE GENERAL





<b>Introducción</b>	<b>13</b>
<b>1 – Formación de hollín y de partículas, aspectos generales</b>	<b>21</b>
1.1. Proceso de formación de partículas.....	23
1.2. Proceso de formación de hollín.....	27
1.2.1. Ideas generales sobre la formación de hollín.....	27
1.2.1.1. Proceso de pirólisis.....	28
1.2.1.2. Proceso de nucleación.....	30
1.2.1.3. Proceso de crecimiento.....	31
1.2.2. Tiempos característicos.....	32
1.2.3. Tamaño y densidad.....	33
1.2.3.1. Tamaño.....	33
1.2.3.2. Densidad.....	36
<b>2 – Formación de hollín en la llama de difusión diesel</b>	<b>37</b>
2.1. Modelos conceptuales de la llama de combustión por difusión: importancia del dosado en el lift-off para la formación de hollín.....	39
2.1.1. Antecedentes.....	39
2.1.2. Modelo conceptual de Dec.....	44
2.1.2.1. Esquema general.....	44
2.1.2.2. Evolución temporal.....	46
2.1.2.3. Formación de hollín.....	48
2.1.2.4. Choque contra la pared.....	49
2.2. Medidas del lift-off y del hollín.....	50
2.2.1. Instalaciones experimentales.....	50
2.2.1.1. Motor con pistón transparente.....	51
2.2.1.2. Máquina de compresión rápida.....	52
2.2.1.3. Motor con culata transparente.....	54
2.2.1.4. Cámara de combustión con volumen constante.....	55
2.2.2. Visualización del lift-off.....	57
2.2.3. Cuantificación de la concentración de hollín.....	60
2.2.3.1. Incandescencia Inducida por Láser (LII).....	61
2.2.3.2. Extinción de luz.....	64
2.2.3.3. Método de los 2 colores.....	69
2.2.3.4. Comparación de las diferentes técnicas.....	74
2.3. Efectos de los parámetros físicos sobre la formación de hollín.....	77
2.3.1. Estudio teórico sobre el lift-off.....	77
2.3.2. Efecto de la temperatura.....	79

2.3.3.	Efecto de la densidad.....	82
2.3.4.	Efecto de la presión de inyección.....	84
2.3.5.	Efecto del diámetro de la tobera.....	85
2.3.6.	Efecto de la concentración de oxígeno.....	87
<b>3 –</b>	<b>Planteamiento de la tesis</b>	<b>91</b>
3.1.	Síntesis del estudio bibliográfico.....	93
3.2.	Objetivos de la tesis.....	97
<b>4 –</b>	<b>Metodología general</b>	<b>99</b>
4.1.	Caracterización del lift-off y del hollín.....	101
4.1.1.	Caracterización del lift-off.....	101
4.1.2.	Caracterización del hollín.....	102
4.2.	Caracterización del proceso de mezcla .....	108
4.2.1.	Teoría básica de los chorros gaseosos estacionarios...109	
4.2.2.	Chorro diesel.....	112
4.2.2.1.	Chorro diesel reactivo virtual isoterma.....	113
4.2.2.2.	Chorro diesel reactivo real no isoterma.....	115
4.3.	Definición del parámetro $F_{SOOT}$ .....	120
<b>5 –</b>	<b>Herramientas experimentales y tratamiento de datos</b>	<b>129</b>
5.1.	Instalación experimental.....	131
5.1.1.	Toberas.....	131
5.1.2.	Motor óptico experimental.....	132
5.1.2.1.	Características del motor óptico.....	133
5.1.2.2.	Características de la culata.....	134
5.1.2.3.	Sistema de inyección.....	135
5.1.2.4.	Modo de funcionamiento.....	136
5.1.2.5.	Captadores.....	139
5.1.3.	Descripción de la instalación óptica.....	144
5.1.4.	Problemas encontrados.....	148
5.1.4.1.	Toberas.....	148
5.1.4.2.	Ventanas.....	152
5.1.4.3.	Ley de inyección.....	153
5.2.	Tratamiento de los datos.....	153
5.2.1.	Cálculo de las condiciones termodinámicas.....	154
5.2.2.	Tratamiento de las imágenes.....	158
5.2.2.1.	Segmentación y conectividad.....	159
5.2.2.2.	Calibración.....	160

---

5.2.2.3. Obtención de los perfiles.....	161
5.3. Plan de trabajo.....	165
<b>6 – Resultados</b>	<b>169</b>
6.1. Estudio de la longitud del lift-off.....	172
6.1.1. Tendencias.....	172
6.1.2. Cuantificación.....	174
6.1.3. Velocidad de frente de llama.....	183
6.2. Estudio de la longitud de llama – proceso de mezcla.....	188
6.3. Análisis del dosado en el lift-off.....	191
6.4. Consecuencia sobre $F_{SOOT}$ .....	193
6.5. Longitud de aparición de hollín.....	197
6.6. Condiciones “Cero-soot”.....	199
<b>Conclusión</b>	<b>205</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>211</b>



## **TABLA DE SÍMBOLOS**



---

$C_a$	coeficiente de área
$C_{Fr1}$	concentración de combustible en condiciones estequiométricas
$C_{fuel}$	concentración másica de fuel inyectado en un chorro no reactivo
$C_n$	densidad del hollín
$C_v$	coeficiente de velocidad
$C_1, C_2$	constantes de Planck para la radiancia espectral de un cuerpo negro
$D$	difusividad térmica
$d_h$	diámetro medio del hollín
$d_{ve}$	diámetro del volumen equivalente
EGR	exhaust gas recirculation
Fr	dosado
FrLO	dosado en el lift-off
$F_{soot}$	parámetro representativo de la proporción de combustible no quemado presente en forma de hollín
$f_v$	fracción volumétrica del hollín
HCCI	homogeneous charge compression ignition
$I$	intensidad transmitida por el láser
$I_{cn}$	radiación espectral de un cuerpo negro
$I_o$	intensidad de la luz
$I_{soot}$	radiación espectral del hollín
$K$	coeficiente de extinción
$k_e$	coeficiente de proporcionalidad en el proceso de mezcla
$k_e$	coeficiente óptico de extinción
KL	factor de cantidad de hollín empleado en el método de los 2 colores
$KL_{max}$	factor de cantidad de hollín empleado en el método de los 2 colores – valor máximo
$K_{mix}$	coeficiente de mezcla
$K_{tray}$	coeficiente de corrección de trayectorias
$K_1, K_2$	constantes
$l$	escala de turbulencia
$l$	ancho de la llama
$L$	camino óptico recorrido por la radiación
LII	laser induced incandescence
$L_{llama}$	longitud de la llama
LOL	longitud del lift-off
LTC	low temperature combustion

---

$L_{\text{soot}}$	longitud de aparición del hollín
$m$	índice de refracción del hollín
$m_{\text{fuel}}$	masa de combustible
$\dot{m}_{\text{fuel}}$	caudal de combustible
$\dot{M}_{\text{fuel}}, \text{CdM}$	flujo de cantidad de movimiento
$\dot{m}_{\text{fuel\_total}}$	caudal total de combustible inyectado
$m_{\text{hollín}}$	masa de hollín
$m_{\text{O}_2}$	masa de oxígeno
$m_p$	masa de la partícula
$m_{\text{total}}$	masa total englobada por un elemento de combustible
$\text{ND}_{\text{fondo}}$	nivel digital del fondo de una imagen
$\text{ND}_{\text{max}}$	nivel digital máximo de una imagen
$\text{ND}_{\text{umbral}}$	nivel digital para el valor umbral de segmentación de una imagen
$P_{\text{adm}}$	presión del aire de admisión
$P_{\text{cil}}$	presión en el cilindro
PCR	presión de inyección common-rail
PMS	punto muerto superior
PPC	partially premixed combustion
$r$	camino óptico, espesor de la llama
$S_c$	numero de Schmidt
$S_{\text{LII}}$	señal LII
SOC	inicio de la combustión
$t$	el tiempo que invierte un elemento para alcanzar la posición $x$
$T$	temperatura
$T_{\text{ad}}$	temperatura adiabática
$T_{\text{adm}}$	temperatura del aire de admisión
$T_{\text{aire}}$	temperatura del aire
$T_{\text{cil}}$	temperatura en el cilindro
$T_{\text{fuel}}$	temperatura del combustible
$T_{\text{llama}}$	temperatura de la llama
$t_{\text{resid}}$	tiempo de residencia
$T_{\text{SD}}$	temperatura sin disociación
$T_{\text{SQ}}$	temperatura de los gases sin quemar
$u$	velocidad del paquete considerado
$u'$	intensidad turbulenta
$u_c$	velocidad de convección
$u_{\text{FF}}$	velocidad de propagación del frente de llama turbulento



---

$u_{FFlam}$	velocidad de propagación del frente de llama laminar
$u_{Fr1}$	velocidad del combustible en condiciones estequiométricas
$U_o$	velocidad de salida del chorro
$V_p$	volumen de la partícula
$V_{soot}$	fracción volumétrica de hollín
$x$	posición de un elemento de combustible
$X_{O_2}$	concentración volumétrica de oxígeno presente en el cilindro
$Y_{fuel}$	concentración másica de combustible inyectado en un chorro reactivo
$Y_{O_2}, Y_{O_2\_cil}$	concentración másica de oxígeno presente en el cilindro
$Z_{st}$	fracción de mezcla estequiométrica
$\alpha$	constante de ajuste empírico en la expresión de la emisividad de la llama de hollín ángulo del cigüeñal
$\alpha_{sa}$	término que representa la “dispersión-en-la-extinción”
$\beta_{umbral}$	porcentaje para la definición del umbral en una imagen
$\Delta T_{DISO}$	pérdida de temperatura debido a las disociaciones
$\varnothing$	diámetro de la tobera
$\varnothing_0$	diámetro equivalente de la tobera
$\varepsilon$	emisividad
$\gamma$	exponente de la adiabática
$\lambda$	longitud de onda
$\nu$	viscosidad
$\rho_{aire}$	densidad del aire
$\rho_{cil}$	densidad en el cilindro
$\rho_{fuel}$	densidad del combustible
$\rho_p$	densidad de la partícula



# INTRODUCCIÓN



## **CONTEXTO DEL ESTUDIO**

El medio ambiente es hoy en día una de las mayores preocupaciones para la perennidad de nuestras sociedades. El crecimiento de la actividad humana ha producido diversas variaciones climáticas en la tierra: calentamiento del planeta, deshielos de las masas glaciales en los polos, destrucción de la capa de ozono, desordenes meteorológicos, etc. Estos desajustes ambientales se han convertido en una preocupación permanente.

A priori no existen soluciones generales, ni universales a este problema; la solución se debe encontrar en cada actividad que produce contaminación.

La principal causa de contaminación del aire es generada por los motores de combustión que consumen hidrocarburos. En el caso de los motores diesel, los principales contaminantes emitidos son las partículas y los NO<sub>x</sub>, aunque en determinadas condiciones de operación también son importantes el CO y los HC. Estos cuatro compuestos son los que están regulados por las normativas de emisiones. Así que desde hace varios años existe un conjunto de requisitos que regulan los límites admisibles para las emisiones de gases de combustión de los vehículos nuevos vendidos. Aunque las principales legislaciones (europea, estadounidense, japonesa, etc...) establecen pruebas de certificación diferentes todos han seguido una evolución similar en cuanto a la reducción de los límites máximos.

Actualmente, en Europa, está en vigor la norma Euro4 (Tabla1). El programa Euro5 va a sustituir la norma Euro4 a partir de septiembre de 2009 y supone una disminución en las emisiones de partículas de 0.025 a 0.005 g/km. Además, la norma Euro6 que entrará en vigor (propuesta) en septiembre de 2014 supone una reducción de las emisiones de NO<sub>x</sub> de 0.18 a 0.08 g/km.

Existen varias estrategias para alcanzar las limitaciones impuestas por las normas. Esas estrategias se pueden dividir en estrategias que impiden la formación de las emisiones contaminantes (reducción directamente en el cilindro) o en estrategias que reducen esas especies una vez formadas (post-tratamiento).

Para poder reducir los NO<sub>x</sub> y alcanzar las limitaciones Euro6, varias alternativas se pueden considerar: sistemas de post-tratamiento como catalizadores de NO<sub>x</sub> (Selective Catalytic Reduccion SCR o trampas de NO<sub>x</sub>), o intentar obtener muy poca formación de NO<sub>x</sub> en la fuente.

El sistema SCR trabaja a partir de la dilución de urea acuosa que es rociada en los gases de escape, lo que proporciona una reducción de hasta 80% de los NOx. La dilución de urea se localiza en un depósito separado. Una unidad de mediación condiciona la dilución y la rocía hacia los gases de escape durante la operación del motor. La cantidad depende de la carga y las revoluciones del motor.

La trampa de NOx almacena los óxidos de nitrógeno NOx contenidos en los gases de escape y los atrapa químicamente mediante una impregnación específica en el catalizador. La trampa de NOx retiene en su interior los NOx originados durante el proceso de combustión, evitando que sean expulsados a la atmósfera. En su interior, se convierte el óxido de nitrógeno en nitrógeno, no perjudicial para la salud.

Sin embargo, el desarrollo de sistemas de post-tratamiento que permitan “limpiar” los gases de combustión resulta por el momento insuficiente para solucionar el problema de las emisiones de NOx. En efecto, incluso con el post-tratamiento, los NOx tienen que estar acotados (eficiencia de 60-80% de los sistemas de post-tratamiento, mala eficiencia durante la fase de calentamiento del motor...).

DIESEL	FECHA	CO	HC+NOX	NOX	PM
<b>EURO 1</b>	07.1992	2.72	0.97	-	0.14
<b>EURO 2, IDI</b>	01.1996	1	0.7	-	0.08
<b>EURO 2, DI</b>	01.1996	1	0.9	-	0.1
<b>EURO 3</b>	01.2000	0.64	0.56	0.5	0.05
<b>EURO 4</b>	01.2005	0.5	0.3	0.25	0.025
<b>EURO 5</b>	09.2009	0.5	0.23	0.18	0.005
<b>EURO 6 (propuestos)</b>	09.2014	0.5	0.17	0.08	0.005

*Tabla1: Normativas de emisiones, vehículos ligeros (g/km).*

Las estrategias para disminuir la formación de NOx directamente en la fuente son numerosas. Los parámetros siguientes son típicamente optimizados para obtener reducciones en las emisiones:

- configuración de las toberas de inyección (geometría, número de orificios, localización de los orificios...)
- forma de la cámara de combustión
- forma del circuito seguido por el aire (sobrealimentación, gestión de la turbulencia, movimiento del swirl en el cilindro...)
- estrategia de combustión.

Los 3 primeros parámetros ayudan a disminuir los contaminantes en el cilindro, sin embargo, la clave reside en las estrategias de combustión.

Existen 3 principales estrategias de combustión, que se han ilustrado en la Figura 1.

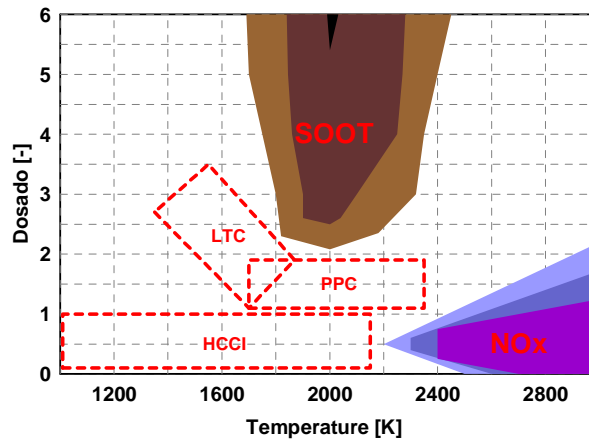


Figura 1: Estrategias de combustión para alcanzar bajas emisiones de NOx en el diagrama “dosado/temperatura” [Dronniou 2008].

HCCI (Homogenous Charge Compression Ignition) hace referencia a estrategias durante las cuales la totalidad del combustible se mezcla con el aire antes de iniciarse la combustión [Epping 2002, Hasegawa 2003, Kawano 2005]. Esta última se desarrolla en dosado relativamente pobre y se forma poco hollín. Además, las temperaturas bajas alcanzadas durante la combustión permiten limitar la formación de NOx. Sin embargo, el inicio de la combustión no se controla muy bien y un pico brusco de presión al iniciarse la misma provoca mucho ruido. Además, cuando la carga y el caudal de inyección aumentan (así como la temperatura y la presión en la cámara de combustión), la homogenización de la mezcla se hace más difícil. Esos motores funcionan bien principalmente con cargas y regímenes bajos.

PPC (Partially Premixed Combustion) reagrupa varios conceptos diferentes tal como la inyección precoz [Takeda 1996, Singh 2005] o la post-inyección [Benajes 2001, Desantes 2007]. Esta estrategia permite una homogenización parcial de la carga, es decir que la combustión va a realizarse en parte en combustión por difusión. Hoy en día, el desafío reside en controlar el tiempo de retraso y la velocidad de combustión así como el impacto del combustible en las paredes debido a la inyección precoz. También hace falta extender esa estrategia a cargas altas.

La implementación de las estrategias HCCI y PPC es muy restringida ya que son eficientes sobre todo a velocidad y cargas bajas.

Otro proceso que parece más adecuado es la LTC (Low Temperature Combustion) [Wagner 2003, Minato 2005]. Se refiere a una estrategia durante la cual las emisiones de hollín y de NOx se controlan con una temperatura baja de llama. Al contrario de las dos estrategias presentadas anteriormente, la LTC no necesita la existencia de una mezcla premezclada, y se puede aplicar totalmente a la combustión diesel. Las temperaturas bajas se obtienen al introducir gases de escape en el conducto de admisión lo que engendra una dilución de la carga y una disminución de la concentración de oxígeno en la cámara de combustión. El hecho de introducir una alta tasa de EGR provoca una disminución de la temperatura y limita la formación de NOx. Sin embargo engendra una mala oxidación del hollín.

Así que hay que encontrar una buena estrategia que permita que no se dispare la formación de hollín. Una solución es alcanzar una temperatura de combustión tan baja que se reduzca o elimine completamente la formación de hollín, limitando la producción de NOx.

## **ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO**

Esta tesis se divide en 6 capítulos aparte de la introducción y de la conclusión.

Se presenta en los dos primeros capítulos el análisis bibliográfico.

En el primer capítulo se realiza una introducción general a los fenómenos de formación de hollín y de partículas. Luego, se profundizan los aspectos generales de formación de hollín desarrollando los diferentes mecanismos que llevan a su producción.

En el capítulo 2, se enfoca el estudio bibliográfico en el proceso de formación de hollín en la llama de combustión por difusión diesel. Se presenta el modelo conceptual de Dec [Dec 1997], especie de imagen del proceso de combustión por difusión en el cual especifica la manera de formarse del hollín. Luego se analizan las diferentes técnicas que han sido utilizadas para caracterizar el proceso de formación de hollín, y por último se estudia los efectos de los parámetros físicos en la formación de hollín.

Del análisis del estado del arte, se desprende la solución adoptada para abordar los objetivos planteados en el capítulo 3.

En los capítulos 4 y 5 se detalla tanto la información teórica como experimental que se ha manejado para responder a los objetivos propuestos.



En el capítulo 4 se profundiza en la metodología de análisis para adquirir la información necesaria a la caracterización de la formación de hollín en la llama de difusión diesel. Se presenta primero la metodología de caracterización de los parámetros importantes para la formación de hollín, y luego se desarrolla la información necesaria a la optimización del análisis. Esta información consiste en la mejora de la determinación de la concentración de hollín basado en el proceso de mezcla.

El capítulo 5 se centra principalmente sobre la información experimental, tanto la instalación como los datos; se desarrolla la manera de obtener y tratar los datos adquiridos.

Los resultados se presentan en el capítulo 6. Permiten aportar nuevos elementos en el proceso de formación de hollín en la llama diesel de difusión con baja temperatura. Se centran principalmente en la identificación y cuantificación de los principales mecanismos involucrados en el proceso de formación de hollín.

Para terminar, se realiza un resumen del trabajo realizado y se exponen las conclusiones fundamentales a las que se ha llegado durante la elaboración de este documento. También se plantean vías por las que continuar el trabajo, para enfocar el conjunto de posibles desarrollos futuros.

En este último párrafo, se van a exponer con antelación los objetivos del documento. En efecto, esos objetivos se definen en el capítulo 3 pero con el fin de facilitar su identificación durante la lectura de los dos capítulos de revisión bibliográfica (capítulos 1 y 2), se van a introducir a continuación.

El objetivo principal es profundizar en el conocimiento y en la comprensión de la formación de hollín en una llama de difusión diesel en condiciones de baja temperatura, con baja concentración de oxígeno.

Para alcanzar este objetivo principal, se han identificado diferentes objetivos particulares:

- Relacionar entre sí los diferentes procesos que conducen a la formación de hollín.
- Caracterizar el efecto de la concentración de oxígeno sobre diferentes parámetros característicos como: la longitud del lift-off, la velocidad de propagación del frente de llama, la longitud de la llama o bien el dosado en el lift-off.
- Caracterizar las consecuencias sobre el proceso de formación de hollín.

- Cuantificar el impacto sobre los dos puntos anteriores del aumento de la presión de inyección y del uso de orificios pequeños.

Con el fin de obtener toda esa información, se quiere desarrollar:

- Una metodología de medida simultánea del lift-off y de la concentración de hollín en la llama basada en diferentes técnicas de visualización de la combustión en un motor de accesos ópticos.
- Un análisis del proceso de mezcla de combustible que permita cuantificar los mecanismos físico-químicos estudiados.

# CAPÍTULO 1

## FORMACIÓN DE HOLLÍN Y DE PARTÍCULAS, ASPECTOS GENERALES

### Contenido

---

1.1. Proceso de formación de partículas.....	23
1.2. Proceso de formación de hollín.....	27
1.2.1. Ideas generales sobre la formación de hollín.....	27
1.2.1.1. Proceso de pirólisis.....	28
1.2.1.2. Proceso de nucleación.....	30
1.2.1.3. Proceso de crecimiento.....	31
1.2.2. Tiempos característicos.....	32
1.2.3. Tamaño y densidad.....	33
1.2.3.1. Tamaño.....	33
1.2.3.2. Densidad.....	36

---



## **1.1. PROCESO DE FORMACIÓN DE PARTÍCULAS**

Es muy frecuente considerar el motor diesel como una fuente de contaminación debido a sus emisiones de partículas. Así pues, en los últimos años, las partículas diesel han sido objeto de gran atención científica.

Haciendo referencia a su naturaleza propia, es decir independientemente del método de medida utilizado para su caracterización, se pueden definir las partículas como un tipo de aerosol atmosférico, considerando una dispersión de compuestos líquidos y sólidos de diversa composición en el seno del gas de escape emitido por el motor. La diversidad en la composición de las partículas engendra estructuras y tamaños muy variados.

Para entender las causas de esa diversa composición, es importante conocer cuáles son los fenómenos que intervienen en su proceso de formación. De manera simplificada, el proceso de formación de partículas se puede dividir en tres ejes principales: primero se forma el hollín (pirólisis, nucleación, crecimiento), luego o de manera simultánea a la formación, se oxida el hollín (todo o en parte) y finalmente tiene lugar un proceso de absorción y condensación (con el hollín que no se ha oxidado).

La Figura 1.1 ilustra las relaciones existentes entre cada uno de esos procesos. En el esquema, los procesos se han representado como procesos distintos y sucesivos; sin embargo, realmente se solapan los unos con los otros y ocurren simultáneamente en la llama de difusión diesel.

Los procesos de formación y oxidación tienen lugar durante la combustión en la cámara de combustión.

El hollín se forma si durante el proceso de combustión existen zonas con dosados muy ricos y al alcanzar elevadas presiones y temperaturas con falta de oxígeno, puede suceder que la cadena del hidrocarburo comience a fracturarse y deshidrogenarse, pudiendo quedar fácilmente convertida en carbón. Este fenómeno suele darse en la zona interior del chorro de combustible que proviene del inyector, donde es muy rico el dosado y por tanto hay falta de oxígeno.

La formación de hollín es un proceso complejo en el cual tienen lugar reacciones y procesos físicos y químicos. La secuencia más probable para la formación de hollín es la siguiente: pirólisis, nucleación, crecimiento (crecimiento superficial, coagulación y aglomeración).

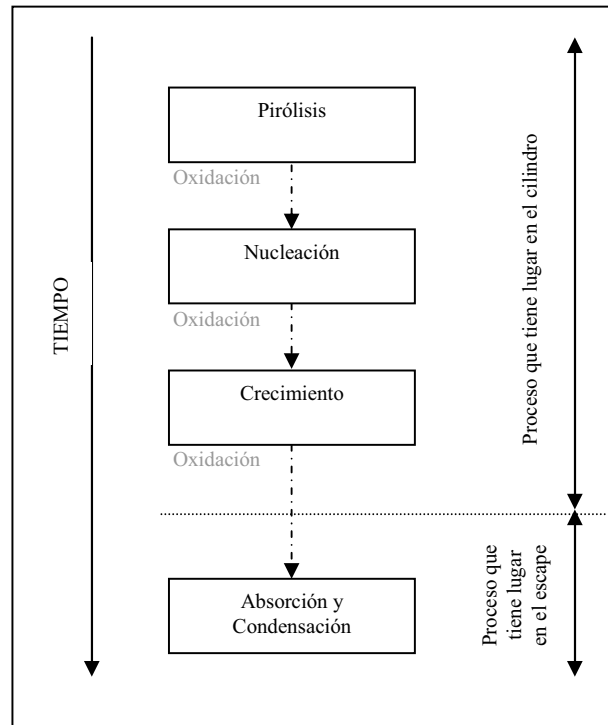


Figura 1.1: Procesos que conducen a la formación de partículas diesel.

Durante la pirólisis se forman los precursores de hollín. Luego, esos precursores van a engendrar núcleos (pequeñas partículas de hollín) que van creciendo poco a poco con los procesos de crecimiento superficial, coagulación y aglomeración. Alcanzan su tamaño máximo al aproximarse al frente de llama, donde afortunadamente gran parte de estas partículas de hollín se oxidan.

La oxidación es un proceso de conversión de un carbono o hidrocarburo en productos de la combustión como CO, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O. Tiene lugar en la superficie del hollín y puede suceder durante todas las etapas de formación del hollín, desde la pirólisis hasta la aglomeración. Sin embargo, durante la pirólisis, el proceso de oxidación es poco significativo a pesar de la presencia de especies oxigenadas [Tree 2007]. Inicialmente, se había determinado que la oxidación se producía por un ataque de especies oxidantes como el oxígeno molecular O<sub>2</sub> [Nagle 1962]. Luego, Fenimore y Jones [Fenimore 1969], en 1969, fueron los

primeros en ver la importancia del OH para la oxidación del hollín. Y además, dependiendo de las condiciones, otras especies como átomos de oxígeno O, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, NO y NO<sub>2</sub> pueden tener su importancia en determinadas condiciones.

También, Nagle y Strickland-Constable [Nagle 1962] declaran que otra condición es necesaria para que la oxidación ocurra: las temperaturas en la llama deben superar los 1100 K. Si esta temperatura es inferior, se produce un bloqueo térmico y las partículas formadas ya no se oxidan.

La emisión total de hollín depende del balance entre los dos procesos de formación y oxidación.

El proceso de formación de partículas concluye con los fenómenos de absorción y condensación que tienen lugar durante el recorrido de las partículas por el sistema de escape donde el descenso de temperatura se hace más rápido.

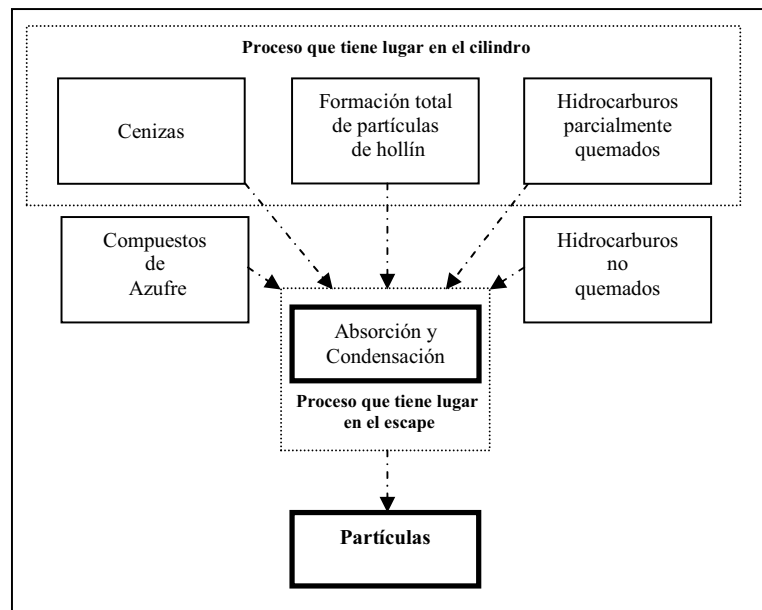
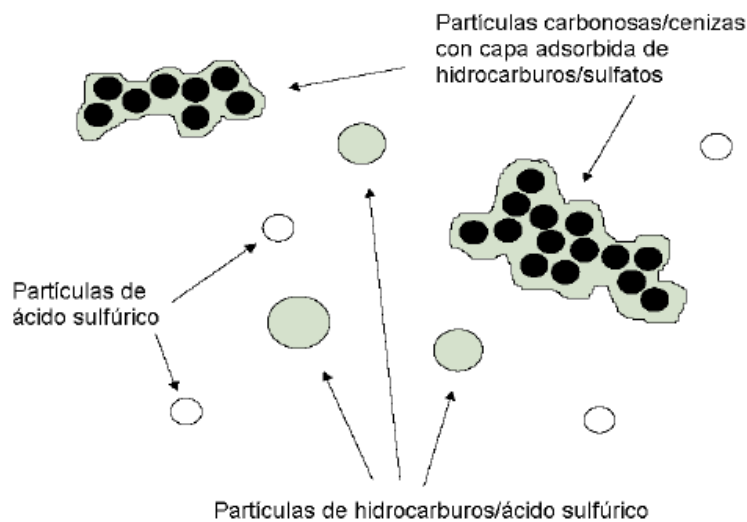


Figura1.2: Especies que intervienen en los procesos de absorción y condensación para la formación de partículas.

En la Figura1.2, están representadas las diferentes especies que intervienen en los procesos de condensación y absorción; se citan a continuación:  
 -el hollín total (balance entre la formación y la oxidación),

- las cenizas, que tienen como origen los aditivos del combustible o del aceite. Se forman, al igual que el hollín, en la llama de combustión diesel.
- los hidrocarburos parcialmente quemados procedentes del combustible,
- los hidrocarburos no quemados procedentes del aceite del sistema de lubricación o del combustible,
- los compuestos conteniendo azufre, que se forman a partir de la hidrólisis en presencia de agua de los óxidos de azufre procedentes del contenido de azufre en el combustible.

Durante los procesos de condensación y absorción, esas especies se agrupan de tal manera, que a su salida a la atmósfera, la estructura de las partículas es la siguiente (representada en la Figura 1.3): principalmente se componen de hollín y cenizas rodeados por una capa formada por compuestos orgánicos volátiles (HC) y por compuestos de azufre han sido adsorbidos. También están presentes compuestos líquidos de menor tamaño como las partículas de ácido sulfúrico, de sulfato o también de hidrocarburos.



*Figura 1.3: Estructura típica de las partículas recogidas en el escape de un motor diesel [Kittelson 1999].*

El tema de la presente tesis está enfocado exclusivamente en el primer proceso de formación de partículas: se centra el estudio **en la formación de hollín**.

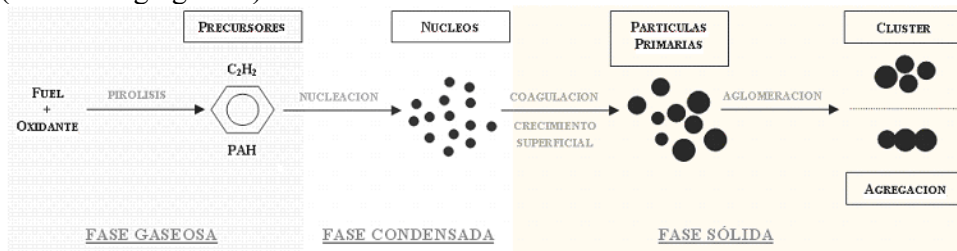


## **1.2. PROCESO DE FORMACIÓN DE HOLLÍN**

En este apartado se va a introducir la problemática general de formación de hollín: se presentará a continuación el esquema de formación de hollín en condiciones uniformes y estacionarias.

### **1.2.1. IDEAS GENERALES SOBRE LA FORMACIÓN DE HOLLÍN**

El conocimiento en la formación de hollín ha ido evolucionando con la mejora en las técnicas de diagnóstico óptico en los motores a lo largo del tiempo. A partir del conjunto de resultados obtenidos en la literatura, varias teorías han sido propuestas para la formación de hollín. La teoría más probable para explicar esa formación, en un sistema de combustión premezclada (aire-combustible), con evolución temporal y espacial constante, consiste en los procesos siguientes (Figura 1.4): las primeras partículas de hollín (o núcleos) se forman a partir de la colisión de los PAHs (hidrocarburos policíclicos aromáticos), considerados como precursores del hollín. Luego, aumenta la superficie de los núcleos, debido a reacciones que ocurren en su superficie formando partículas primarias. Y esas partículas primarias se aglomeran para formar aglomerados de gran tamaño (cluster o agregación).



*Figura 1.4: Procesos que intervienen en la formación de hollín.*

A continuación se describe con más detalles los diferentes procesos de formación de hollín.

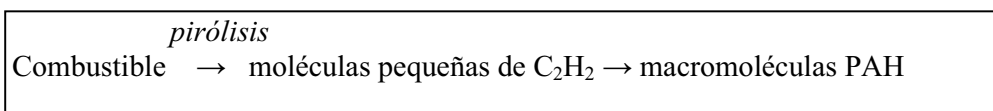
### 1.2.1.1. PROCESO DE PIRÓLISIS

Independientemente del tipo de llama y del combustible utilizado, este último sufre un proceso de pirólisis oxidativa.

La pirólisis es un proceso durante el cual el combustible altera su estructura molecular en presencia de temperaturas altas.

Así pues, el combustible que sufre la pirólisis se degrada en cadenas cortas, particularmente en acetileno  $C_2H_2$ . Sin embargo, etileno  $C_2H_4$  y propargil  $C_3H_3$  también son especies que se forman durante la pirólisis del combustible [Flynn 1999].

De manera simplificada, la pirólisis va a afectar la estructura molecular del combustible de la manera siguiente:



Se consideran el acetileno  $C_2H_2$  y los hidrocarburos policíclicos aromáticos PAH como las especies precursoras directas para la formación de hollín [Heywood 1988]. Los hidrocarburos policíclicos aromáticos PAH, son moléculas compuestas de una multitud de moléculas de benceno  $C_6H_6$ , también llamados “anillos”.

Para la formación de PAH se han planteado varios mecanismos químicos en fase gaseosa a través de los cuales los pequeños fragmentos de hidrocarburos de combustible dan lugar al primer anillo aromático:

- 1/ reacción de ciclación de Diels-Alder: la molécula de acetileno  $C_2H_2$  reacciona con butadieno  $C_4H_6$  para formar benceno  $C_6H_6$  (Figura 1.5).

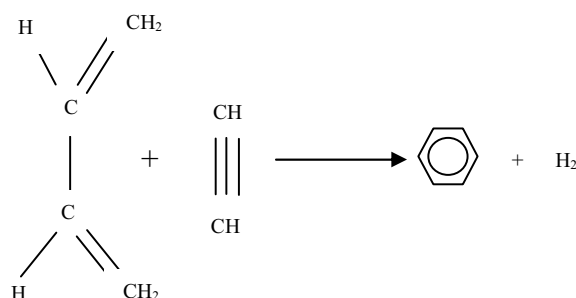


Figura 1.5: Reacción de Diels-Alder para la formación del primer anillo aromático [Frenklach 1990].

- 2/ ataque de  $C_2H_2$  sobre el radical  $n-C_4H_3$  o el radical  $n-C_4H_5$  [Wang 1994]: la formación del primer anillo empieza con el empalme entre acetileno  $C_2H_2$  y vinilo  $C_2H_3$ . Si la temperatura es alta, el anillo se forma por combinación de acetileno  $C_2H_2$  con el radical  $n-C_4H_3$ . Si la temperatura es baja, la interacción del acetileno  $C_2H_2$  con el radical  $n-C_4H_5$  conduce a la formación de benceno (Figura1.6).

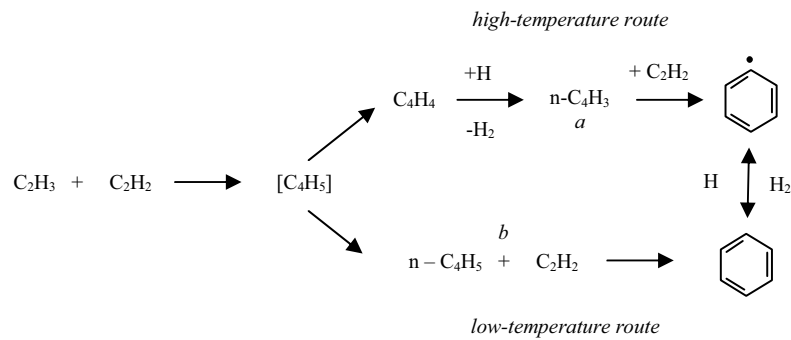


Figura1.6: Posibles mecanismos de reacción para la formación del primer anillo aromático via (a)  $n-C_4H_3$  y (b)  $n-C_4H_5$  [Wang 1994].

- 3/ combinación de radicales de propargil (Figura1.7).

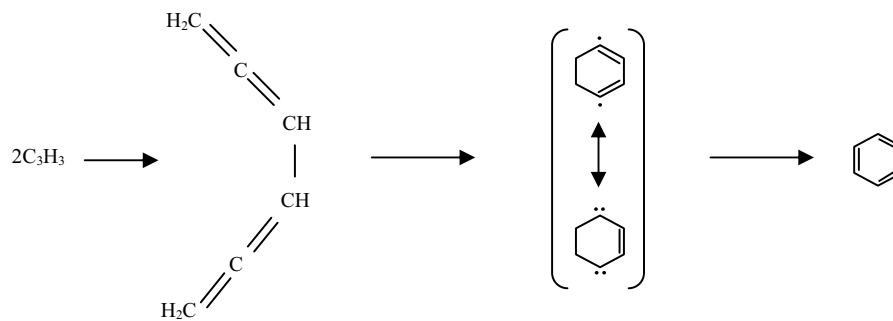


Figura1.7: Mecanismo de formación del primer anillo aromático a través de la combinación de radicales de propargil [Miller 1992].

Una vez el primer anillo formado, se forman especies aromáticas formadas de 2 o más anillos. El crecimiento de esos hidrocarburos policíclicos aromáticos PAH puede darse por un aumento del número de anillos a través del mecanismo HACA (hydrogen abstraction – acetylen addition) [Miller 1992]. El mecanismo

HACA consta de un proceso secuencial de dos pasos para la formación de los anillos aromáticos: en primer lugar ocurre la liberación de un hidrógeno, que activa las moléculas aromáticas, seguido de la adición de acetileno, lo que promueve el crecimiento molecular y la ciclación del PAH (ver Figura 1.8 siguiente). La repetición del proceso HACA puede dar lugar así a estructuras aromáticas de un número elevado de anillos.

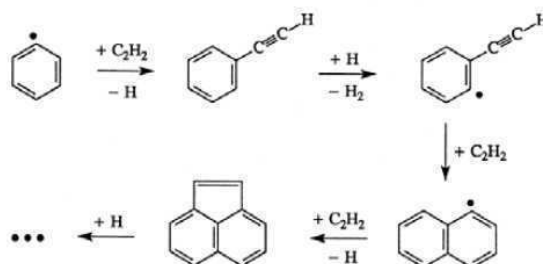


Figura 1.8: Mecanismo HACA de formación de moléculas de PAH [Millar 1992].

### 1.2.1.2. PROCESO DE NUCLEACIÓN

La nucleación es el proceso de formación de las primeras partículas de hollín a partir de los precursores macromoleculares, proceso homogéneo que tiene lugar en fase gaseosa.

Aún no se conoce con certeza el mecanismo a través del cual tiene lugar la transición de macromoléculas PAH a partículas de hollín. Sin embargo, en general, los investigadores coinciden en la mayor probabilidad de colisión de dos PAH, haciendo que las moléculas condensen físicamente para dar lugar a una fase líquida de hollín. Los núcleos de hollín se forman para una temperatura que varía entre 1300 y 1600 K y espacialmente, se restringen en la región cerca de las primeras reacciones (zona de pirólisis) donde la temperatura y las concentraciones de radicales son más altas [Tree 2007].

Los núcleos de hollín así formados se componen de partículas carbonosas estructuradas en redes cristalinas que contienen alrededor de 1% en peso de hidrógeno, es decir la proporción correspondiente a la fórmula empírica media de  $C_8H$  [Heywood 1988].

Durante ese proceso, numerosos núcleos se han formado, pero tienen tamaños muy pequeños y no participan de manera significativa en la masa total de hollín

final, sino que tienen una influencia en la masa que se añade después proporcionando sitio para el crecimiento superficial.

### **1.2.1.3. PROCESO DE CRECIMIENTO**

El crecimiento de las partículas puede deberse al propio crecimiento superficial de las partículas, a la coagulación o a la agregación.

El crecimiento superficial es un proceso en el cual se añade masa en la superficie de los núcleos de hollín.

El principio de este proceso no se distingue realmente del final del proceso de nucleación ya que ocurren de manera casi simultánea.

Durante el proceso de crecimiento superficial, el número de partículas va a quedar constante; sin embargo las partículas van a incrementar su masa: hidrocarburos, y principalmente poliacetilenos se van a depositar en la superficie de las esferas, de modo que los núcleos de hollín van a crecer desde 1-2 nm hasta 10-30 nm [Heywood 1988].

La mayoría de la masa del hollín se consigue durante esta fase y el tiempo de residencia tiene un papel muy importante sobre la masa y el volumen total de hollín.

Además, la tasa de crecimiento disminuye desde el momento de la formación del núcleo de hollín, debido a la pérdida de reactividad de las partículas por un proceso de envejecimiento. De esta forma las partículas recién formadas crecen más rápidamente que las que son maduras [Fuentes 2006].

La fase de coagulación se produce simultáneamente al crecimiento superficial pero solamente cuando las partículas son jóvenes y de pequeño tamaño.

Durante este proceso dos partículas sólidas y esféricas colisionan y se funden en una de mayor tamaño. Las dos partículas originarias pierden su identidad morfológica [Martos 2006].

El número total de partículas disminuye durante este proceso mientras que su masa aumenta.

Una vez finalizado el proceso de crecimiento superficial y de coagulación se produce la fase de aglomeración durante la cual las partículas colisionan para formar aglomerados. Debido a la reducción en el número de centros activos en la superficie de las partículas, cuando las partículas de hollín colisionan se aglomeran sin fundirse ni perder su forma original, dando lugar a formas más o menos ramificadas, que pueden contener hasta 200 partículas primarias [Martos 2006].

Se pueden identificar 2 tipos de aglomeración diferentes:

- formación de racimos o cluster: las pequeñas esferas sólidas iniciales colisionan y pueden unirse por medio de fuerzas de cohesión débiles, como la tensión superficial, formando aglomerados en forma de racimos (cluster) de pequeña estabilidad, en el que las esferas originales mantienen su identidad.

- agregación: se puede producir la unión de un reducido número de partículas con distribución de cargas asimétricas a través de fuerzas cohesivas atómicas o moleculares produciendo agregados lineales de gran estabilidad.

A medida que la temperatura de los gases va disminuyendo el proceso de formación de aglomerados-cluster va perdiendo importancia frente al mecanismo de agregación, estos procesos suponen un obstáculo para la oxidación, ya que la superficie de contacto de las partículas con el oxígeno se va reduciendo [Haynes 1981].

### 1.2.2. TIEMPOS CARACTERÍSTICOS

En 1982, Smith [Smith 1982] hizo un estudio y caracterizó los tiempos de formación y oxidación de hollín. Esos procesos complejos tienen lugar con tiempos característicos diferentes. Smith analizó la formación de precursores, la nucleación, la coagulación, la formación de partículas primarias, la aglomeración así como la oxidación, en condiciones típicas de una llama diesel con valores característicos que sólo pueden llevar a datos de tiempo muy aproximados para cada proceso. El resumen de esos valores se encuentra en la Tabla 1.1.

Si se considera un proceso con un ciclo completo de combustión de 3-4 ms, la formación de hollín estará completa después de 1-2 ms después de la nucleación local, lo que corresponde a un ángulo de cigüeñal de 10°.

Por supuesto esos valores van a variar en función de una multitud de parámetros que son primero el tipo de motor y segundo los parámetros de funcionamiento.

PROCESOS	ESCALA DE TIEMPO
Formación de precursores / Nucleación	~ pocos $\mu$ s
Coagulación	~ 0.05 ms después de la nucleación local
Formación de partículas primarias	una vez que terminó la coagulación
Aglomeración	~ pocos ms después de la coagulación
Oxidación del hollín	~ 4 ms
Ciclo completo de combustión	3-4 ms
Deposición de hidrocarburos	durante la expansión y el proceso de escape

*Tabla 1.1: Tiempos característicos de los procesos que conducen a la formación de hollín y de partículas para un ciclo completo de combustión en un motor diesel [Smith 1982].*

Además, el tiempo característico de oxidación del hollín encontrado por Smith no parece muy razonable: la oxidación tarda lo mismo que un ciclo completo de combustión. Esta oxidación debería tardar muchísimo menos ya que se oxidan las partículas de hollín exclusivamente al atravesar la periferia de la llama, lo que podría durar algunos  $\mu$ s.

También, hoy en día, todos esos tiempos deben haberse reducido bastante ya que hace desde más de veinte años hasta ahora, los tiempos de combustión, por supuesto muy dependientes de las condiciones de operación, se han dividido por aproximadamente 4.

### **1.2.3. TAMAÑO Y DENSIDAD**

#### **1.2.3.1. TAMAÑO**

Las primeras partículas de hollín, es decir los **núcleos**, tienen un tamaño muy pequeño con un diámetro inferior a 2 nm [Schraml 1999].

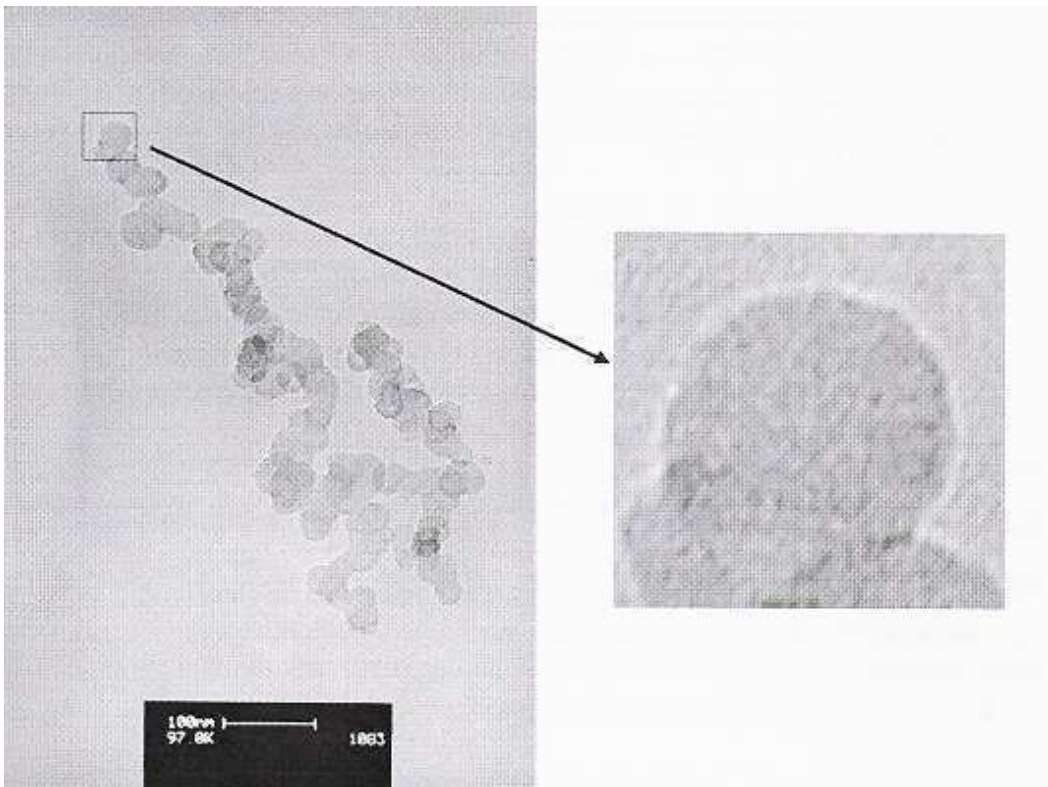
Según ese mismo autor [Schraml 1999], las **partículas primarias** son esféricas (o más o menos esféricas) con un diámetro aproximado entre 20-30 nm, y compuestas por del orden de 1 millón de átomos de carbonos.

Sin embargo, parece que su tamaño varía en función de los parámetros de funcionamiento del motor, y varios estudios han sido realizados llegando a los resultados siguientes: hay una disminución del tamaño de las partículas primarias cuando:

- la relación aire/combustible aumenta [Martos 2006, Zhu 2003],
- el régimen de giro aumenta [Martos 2006, Schraml 1999, Lee 2002],
- la carga aumenta [Zhu 2003, Lee 2002],
- la tasa de EGR es baja [Zhu 2003]. En el estudio de [Martos 2006], el efecto de las tasas de EGR sobre el tamaño medio de las partículas primarias no ha resultado significativo, probablemente debido a una superposición de efectos contrapuestos [Martos 2006].

Zhu et al. [Zhu 2003] y Lee et al. [Lee 2002] justifican la disminución del diámetro con el hecho de que cuando aumentan el régimen o la carga del motor, las altas temperaturas de combustión provocan una oxidación más efectiva. Mientras que [Schraml 1999] afirma que las reacciones de crecimiento superficiales no tienen tanto tiempo para ocurrir cuando el régimen aumenta.

Se realizaron varios análisis de diámetros de partículas primarias a partir de unas muestras analizadas con microscopio o con medidas ópticas con incandescencia introducida por láser. Esas muestras se obtienen mediante los gases de escape en los cuales se encuentran partículas diesel típicas compuestas por partículas primarias esféricas (Figura 1.9).



*Figura 1.9: Fotografía de una partícula diesel típica (o aglomerado) compuesta por partículas primarias esféricas [Martos 2006].*

Esos análisis han revelado que para cualquier parámetro de funcionamiento de motor diesel de automóvil, régimen de giro, tasa de EGR, etc..., los valores se encuentran en un rango de 19 a 36 nm [Schraml 1999, Zhu 2003].

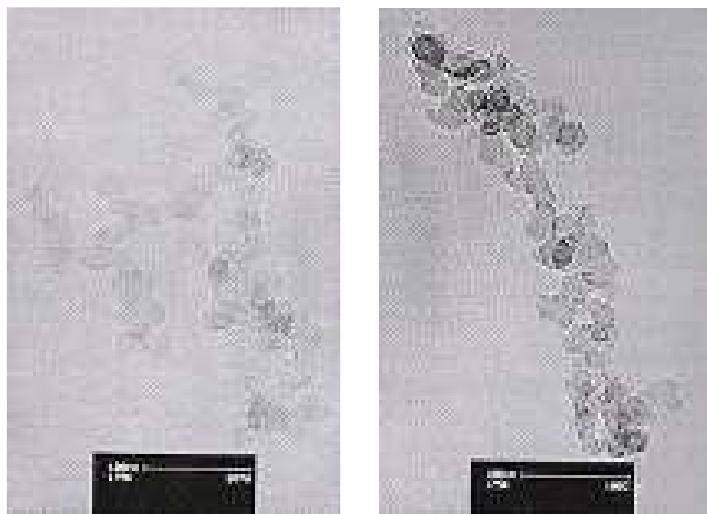
De acuerdo con lo anterior, varios autores coinciden en decir que la variación del diámetro de las partículas primarias es muy débil en función de las condiciones



de funcionamiento del motor por lo que se podría considerar un diámetro medio del orden de 25 nm [Martos 2006].

Otras medidas realizadas en el cilindro con medidas de extinción de luz han estimado el diámetro de las partículas primarias entre 30 y 50 nm [Tree 1994]. Parece que la técnica de medida tiene una influencia en el tamaño estimado de las partículas primarias de hollín.

Y aunque dos **aglomerados** tengan el mismo número de partículas primarias, éstas se disponen en cada aglomerado de manera distinta, haciendo que cada uno tenga una forma irregular distinta, con diferente compactación y tamaño (Figura1.10). Contrariamente a las partículas primarias, los aglomerados no son uniformes ni en tamaño ni en forma y es muy difícil obtener un diámetro medio. Una vez el proceso de combustión terminado, se han medido los diámetros de aglomerados y se han encontrado valores entre 100 nm y 2  $\mu\text{m}$  [Ladammatos 1994] pero pueden ser incluso más grandes.



*Figura1.10: Fotografías de unas partículas diesel típicas (o aglomerados) [Martos 2006]. La foto en la izquierda representa un aglomerado compuesto de 80.89 partículas primarias mientras que la foto en la derecha representa un aglomerado compuesto de 77.63 partículas primarias. Se puede observar que los aglomerados, a pesar de tener un número de partículas primarias similares, tienen una morfología muy diferente.*

### 1.2.3.2. DENSIDAD

En 1976, Surovikin [Surovikin 1976] definió el parámetro de **densidad de un núcleo** en el estudio que hizo a propósito de un modelo matemático sobre la formación de partículas de carbono negro. Sin embargo no dio ningún valor aproximado de esa densidad.

En cuanto a la **densidad de partículas primarias**, se pueden encontrar valores en varios estudios.

Moss et al. [Moss 1995] asumen una densidad de  $1.8 \text{ g/cm}^3$  en su modelo teórico de formación de hollín en una llama de difusión laminar. También, Corcione et al. [Corcione 2002] proponen el mismo valor de  $1.8 \text{ g/cm}^3$  en su modelo semi-empírico de formación y oxidación de hollín en motor diesel.

Otros autores definen un valor de densidad de  $2 \text{ g/cm}^3$ , como por ejemplo Smith [Smith 1982] para el cálculo de un modelo físico y también Shurupov [Shurupov 2000] en sus experimentos.

En 1994, Choi et al. [Choi 1994] han medido un valor de densidad para las partículas primarias de  $1.84 \text{ g/cm}^3$ , valor coherente y muy similar al asumido por otros autores.

Sin embargo, es muy poco común encontrar estudios en los que se hayan estudiado valores de **densidad de los aglomerados** [Lapuerta 2003].

La densidad del aglomerado se puede definir como el ratio entre la masa y el volumen del mismo:

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p} = \frac{m_p}{\frac{\pi}{6} \cdot d_{ve}^3} \quad (\text{EC1.1})$$

siendo  $\rho_p$  densidad de la partícula,  $m_p$  masa de la partícula,  $V_p$  volumen de la partícula y  $d_{ve}$  diámetro del volumen equivalente.

Hay que tener en cuenta que la densidad del aglomerado es diferente de la densidad del material cuando en el aglomerado existen huecos; de manera que en este caso la densidad del material sólida será mayor que la del aglomerado.

Así pues, se define para las partículas (o aglomerados) porosas no esféricas el concepto de densidad aparente. Su determinación depende de las densidades de las partículas primarias, de la morfología, de la porosidad, y también de la técnica de medida utilizada [Fuentes 2006].

# CAPÍTULO 2

## FORMACIÓN DE HOLLÍN EN LA LLAMA DE DIFUSIÓN DIESEL

### Contenido

---

<b>2.1. Modelos conceptuales de la llama de combustión por difusión: importancia del dosado en el lift-off para la formación de hollín.....</b>	<b>39</b>
<b>2.1.1. Antecedentes.....</b>	<b>39</b>
<b>2.1.2. Modelo conceptual de Dec.....</b>	<b>44</b>
2.1.2.1. Esquema general.....	44
2.1.2.2. Evolución temporal.....	46
2.1.2.3. Formación de hollín.....	48
2.1.2.4. Choque contra la pared.....	49
<b>2.2. Medidas del lift-off y del hollín.....</b>	<b>50</b>
<b>2.2.1. Instalaciones experimentales.....</b>	<b>50</b>
2.2.1.1. Motor con pistón transparente.....	51
2.2.1.2. Máquina de compresión rápida.....	52
2.2.1.3. Motor con culata transparente.....	54
2.2.1.4. Cámara de combustión con volumen constante.....	55
<b>2.2.2. Visualización del lift-off.....</b>	<b>57</b>
<b>2.2.3. Cuantificación de la concentración de hollín.....</b>	<b>60</b>
2.2.3.1. Incandescencia Inducida por Láser (LII).....	61
2.2.3.2. Extinción de luz.....	64
2.2.3.3. Método de los 2 colores.....	69
2.2.3.4. Comparación de las diferentes técnicas.....	74
<b>2.3. Efectos de los parámetros físicos sobre la formación de hollín..</b>	<b>77</b>
2.3.1. Estudio teórico sobre el lift-off.....	77
2.3.2. Efecto de la temperatura.....	79

<b>2.3.3. Efecto de la densidad.....</b>	<b>82</b>
<b>2.3.4. Efecto de la presión de inyección.....</b>	<b>84</b>
<b>2.3.5. Efecto del diámetro de la tobera.....</b>	<b>85</b>
<b>2.3.6. Efecto de la concentración de oxígeno.....</b>	<b>87</b>

---

En el capítulo anterior, se introdujo la problemática general de la formación de hollín, y se presentó el esquema que parece gobernar su formación en condiciones uniformes y estacionarias.

En este capítulo se introducirá la problemática específica de la formación de hollín en una llama de difusión diesel. En la llama de difusión diesel, las condiciones en la cámara son variables y no uniformes a causa de las variaciones locales de temperatura, densidad y concentración originadas por el proceso de mezcla.

La complejidad del desarrollo de una llama de difusión diesel condujo a los investigadores a elaborar un modelo conceptual, es decir, una especie de esquema de la llama de difusión diesel que representa los diferentes mecanismos involucrados. Así se pudo averiguar la importancia de las variaciones de las condiciones locales en la llama de difusión para la formación de hollín. El parámetro que parece tener una importancia primordial en la formación del hollín es el dosado en el lift-off (el lift-off es la zona que existe entre el inyector y el principio de la llama de combustión). Así que se desarrollaron varias herramientas experimentales (instalaciones, cámaras...) que permiten a la vez medir el lift-off y la concentración de hollín. Esos puntos se presentan en los dos primeros apartados de este segundo capítulo.

En la última parte de este capítulo se estudiarán los efectos que tienen los parámetros de funcionamiento, como la presión de inyección, la temperatura, la densidad, el diámetro de la tobera y la concentración de oxígeno, en la formación de hollín.

## **2.1. MODELOS CONCEPTUALES DE LA LLAMA DE COMBUSTIÓN POR DIFUSIÓN: IMPORTANCIA DEL DOSADO EN EL LIFT-OFF PARA LA FORMACIÓN DE HOLLÍN**

### **2.1.1. ANTECEDENTES**

La combustión diesel es un proceso complejo, turbulento en tres dimensiones, compuesto de varias fases, que tiene lugar a altas temperaturas y presiones.

Desde hace varios años ya, se ha intentado desarrollar “modelos conceptuales”, para tener una imagen clara de lo que ocurría durante esa combustión. Un

modelo preciso y exacto podría servir de ayuda para la interpretación de los ensayos experimentales, y además podría guiar en el desarrollo de modelos numéricos.

Sin embargo, es sólo desde hace pocos años que se han desarrollado técnicas de medida que han permitido entender mejor lo que ocurría durante la combustión. Antes de la aparición de esas técnicas avanzadas, la información y las medidas eran muy limitadas.

Las primeras tentativas y primeros experimentos para describir la combustión diesel, fueron adaptados a partir de estudios y resultados obtenidos en condiciones cuasi-estacionarias para una llama de turbina de gas o de horno [Agnew 1984]. En efecto, varios investigadores tenían la intuición de que la parte cuasi-estacionaria de la combustión diesel, es decir después de la fase transitoria y antes del final de la inyección, ocurría de la misma forma que la parte cuasi-estacionaria de la combustión de una turbina de gas o de un horno. Esas hipótesis se relatan en [Faeth 1977, Agnew 1984, Kuo 1986]. Para el estudio de esa parte cuasi-estacionaria también se hizo la suposición de que no habían interacciones con la pared.

El concepto y la descripción del primer “modelo conceptual” pueden encontrarse en el artículo de Faeth [Faeth 1977] y un esquema de ese modelo está representando a continuación en la Figura2.1.

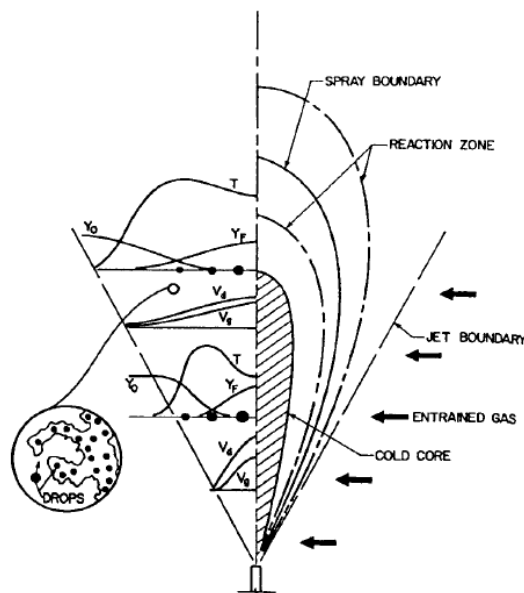


Figura2.1: Esquema representativo de una llama de difusión coaxial [Faeth 1977].

Se pueden distinguir varias zonas:

- en el centro del chorro está representada una zona fría muy rica en la cual sólo se encuentra combustible
- alrededor de esa primera zona, el combustible se va mezclando con el aire englobado. Se forman zonas con niveles de mezcla distintos; y la concentración de combustible decrece poco a poco al alejarse del centro del chorro y acercarse a su periferia.
- la zona de combustión tiene lugar a una cierta distancia del centro del chorro cuando la mezcla aire/combustible está apropiada.

En su artículo, Faeth [Faeth 1977] declara que al analizar la mayoría de los experimentos se puede afirmar que las gotitas de combustible de fuel desaparecen al acercarse a la zona de temperatura máxima. Sin embargo no especifica si la combustión ocurre con un conjunto de pequeñas llamas de difusión alrededor de cada gotita o con una llama de difusión grande (o vaina) que rodea la periferia del chorro y que está alimentada por el vapor del combustible de todas las gotas. Luego, esos dos modos de combustión han sido objeto de varios estudios como los de Kuo [Kuo 1986] o de Chiu et al. [Chiu 1982], no obstante no han llegado a un consenso sobre la naturaleza de la llama de combustión por difusión diesel.

Aunque hay varios detalles que no están completamente definidos o verificados, la descripción hecha por Faeth [Faeth 1977] parece coherente con la mayoría de los experimentos de la época. Ese primer “modelo conceptual” ha dado lugar a varias discusiones en la comunidad científica diesel y ha sido aceptado como una descripción de la combustión por difusión diesel de inyección directa y también ha sido al origen del primer modelo de simulación [Chiu 1976].

Chiu et al. [Chiu 1976], han adoptado en parte el modelo anterior teniendo principalmente en cuenta la vaporización del combustible, la mezcla y las zonas de combustión. Su “modelo conceptual” está representado en la Figura 2.2 y es muy similar al modelo de Faeth [Faeth 1977]: propone un chorro diesel formado por un centro rico exclusivamente compuesto de combustible que está rodeado progresivamente por una mezcla aire/combustible más y más pobre al acercarse a la periferia del chorro, y que se quema cuando el oxígeno englobado es suficiente para reaccionar con el fuel.

No está especificada la localización de la formación de hollín. Sin embargo, según Wagner [Wagner 1981], la formación de hollín resulta de la pirólisis del combustible para temperaturas aproximadamente de 1300 K. Como la

temperatura máxima alcanzada por la mezcla aire/combustible es de alrededor de 1000K, se dedujo que la formación de hollín debía tener lugar en las zonas de combustión donde las temperaturas son más elevadas. Así pues, se suponía generalmente que el hollín aparecía en las zonas ricas de combustión por difusión en las cuales las temperaturas son suficientemente altas.

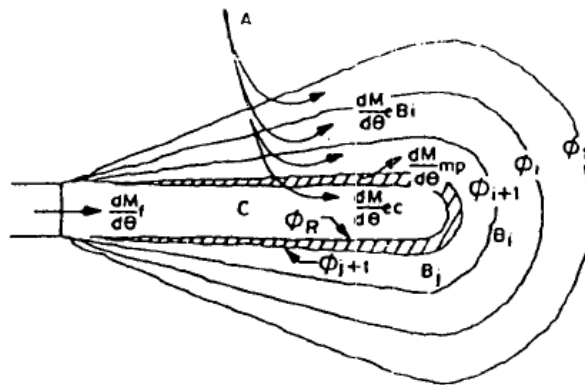


Figura2.2: Esquema representativo de las diferentes zonas de mezcla y de combustión en la llama de difusión [Chiu 1976].

Más tarde, otro modelo ha sido desarrollado por Dec [Dec 1997], antes de los estudios con imágenes láser, y está representado en la Figura2.3. Dec especifica que el modelo propuesto no se puede considerar como un “modelo conceptual” completo sino más bien como una imagen o “un esquema que intenta capturar los conceptos generales” de la combustión por difusión diesel. Declara que su modelo no puede ser exacto porque existen incertidumbres considerables en los detalles y además afirma que varios datos experimentales e imágenes [Heywood 1988, Kamimoto 1988, Kamimoto 1991] sugieren que la combustión diesel es más compleja, pero que no tiene información suficiente para desarrollar un “modelo conceptual” fiable.

La Figura2.3, representa un chorro diesel durante la combustión por difusión. La parte central representada en color negro representa la región de combustible líquido. Está rodeada por una zona donde las gotitas líquidas están más dispersas y se vaporizan al acercarse de la periferia del chorro. La combustión tiene lugar cuando el combustible evaporado y el aire entran en contacto en la periferia de la llama.



Para el proceso de combustión, el modelo propuesto por Dec se puede interpretar de dos maneras:

- **la combustión ocurre como una llama de difusión grande (o vaina) que rodea la periferia del chorro:** la llama de difusión se forma alrededor de la periferia del chorro donde el aire y el combustible vaporizado se encuentran como se ha representado en la Figura2.3. La formación de hollín se espera alrededor de la periferia del chorro en el lado rico de la zona de reacción.
- **la combustión ocurre como un conjunto de pequeñas llamas de difusión alrededor de cada gotita:** en este caso, habría una cantidad menor de combustible evaporado antes de la zona de llama, y en esa última una multitud de pequeñas llamas alrededor de cada gota. La formación de hollín ocurriría alrededor de cada gota (o grupo de gotas) pero las interacciones con el flujo de gas podrían parcialmente o completamente apagar las pequeñas llamas antes de la producción de hollín. Eso provocaría una distribución de hollín más homogénea alrededor de la periferia del chorro similar a la del caso anterior.

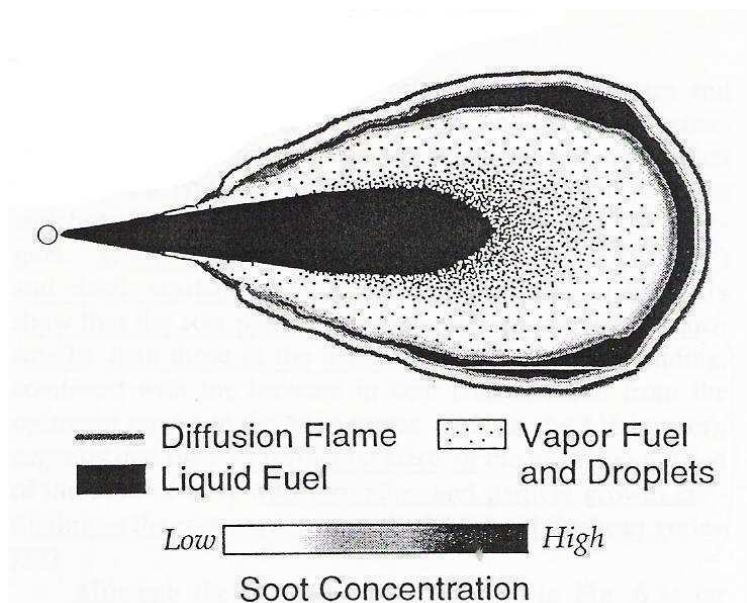


Figura2.3: Esquema general de la antigua representación de la llama de combustión por difusión diesel (antes de los estudios con imágenes láser) [Dec 1997].

Es a partir de los años 90, que el desarrollo de las herramientas de medidas ópticas como las técnicas láser y sus aplicaciones a la combustión diesel, ha permitido, por primera vez, obtener detalles en el proceso de combustión diesel. Un modelo conceptual ha sido desarrollado a través del análisis de una multitud de imágenes, que hoy en día, es el “modelo conceptual” aceptado por toda la comunidad diesel y llamado “modelo conceptual de Dec”.

## 2.1.2. MODELO CONCEPTUAL DE DEC

### 2.1.2.1. ESQUEMA GENERAL

La Figura2.4 muestra la imagen conceptual representativa de la llama de difusión sobre la que se marcan tres zonas distintas:

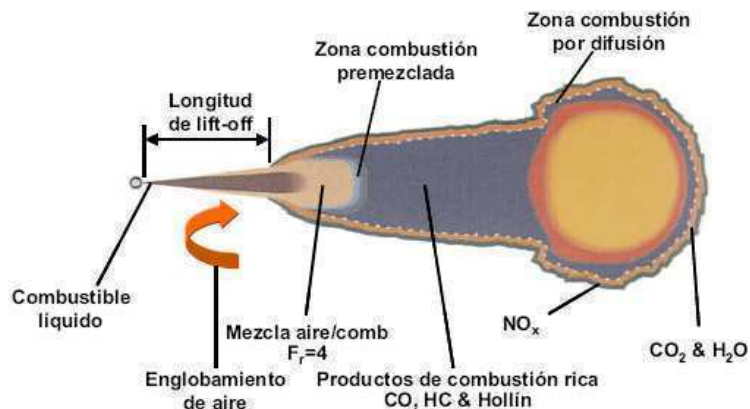


Figura2.4: Esquema de la estructura de la llama Diesel durante la parte cuasi-estacionaria de la fase de combustión por difusión [Dec 1997].

- **Zona de lift-off:** esta primera zona está en contacto inmediato con la tobera de inyección. En esta zona no hay llama de combustión ya que esta última no llega hasta el inyector debido a las elevadas turbulencias que tienen lugar. En efecto, la distancia entre la tobera y el inicio de llama, denominada longitud del lift-off, está definida por un equilibrio entre la velocidad de convección aguas abajo generada por el propio

proceso de inyección y la velocidad del frente de llama de combustión premezclada turbulenta que trata de remontar aguas arriba.

Es en esta zona que los procesos de atomización, englobamiento de aire y evaporación tienen lugar.

- **Zona de combustión por premezcla:** esa zona es una región de pequeño espesor y de dosado muy rico (del orden de 2 a 5 según Dec [Dec 1998] y según Flynn et al. [Flynn 1999]). En esta zona tiene lugar una reacción premezclada que está al origen de la formación de especies CO, H<sub>2</sub>O y fragmentos de combustible. Es una región en la cual se consume todo el oxígeno englobado por el chorro en la primera zona no reactiva de forma que en el interior de la tercera zona se supone que la concentración de oxígeno es nula (el oxígeno se encontrará de manera virtual en forma de CO<sub>2</sub>, CO y H<sub>2</sub>O). Además, los hidrocarburos parcialmente quemados (principalmente C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> y C<sub>3</sub>H<sub>3</sub>) formados durante la reacción sirven de base para la formación de precursores de hollín.
- **Zona de combustión por difusión:** Según el estudio de Dec [Dec 1998], *“una estructura típica de llama por difusión, consta de una zona interna ocupada por productos parciales de combustión, combustible sin quemar y hollín, rodeados de la superficie de reacción. En dicha superficie, estas sustancias se oxidan totalmente a dióxido de carbono y agua al encontrar la proporción de oxígeno necesaria”*. En su trabajo, Dec y Coy [Dec 1996] muestran que la zona de reacción tiene la apariencia de una superficie de espesor muy pequeño (de menos de 120 μm). Además, el frente de llama se establece en una posición en la que la relación oxígeno/combustible es la estequiométrica y donde las temperaturas alcanzadas son del orden de 2700 a 3000 kelvin. En la parte frontal de la llama de difusión se observa un vértice característico que presenta las concentraciones de hollín más elevadas. Ese hollín se va a oxidar en el frente de llama formando productos de la combustión, y va a seguir oxidándose en la medida que la concentración de oxígeno es alta y la temperatura suficiente para que los tiempos de reacción sean cortos. Además, es también en el frente de llama, en su parte externa más precisamente, donde se van a formar los óxidos de nitrógeno NO<sub>x</sub>, puesto que se dan las condiciones de temperatura elevada y disponibilidad de oxígeno necesarias para la aparición de dicha especie [Dec 1998].

### 2.1.2.2. EVOLUCIÓN TEMPORAL

A partir de la descripción general anterior de la estructura de la llama diesel cuasi-estacionaria se puede establecer la evolución temporal de una cantidad de masa (un paquete) de combustible inyectado conforme va pasando por todas estas zonas. Esta secuencia está descrita por Flynn et al. [Flynn 1999] y recogida por Molina [Molina 2003] y García [García 2004], mostrándose en las Figuras 2.5 y 2.6.

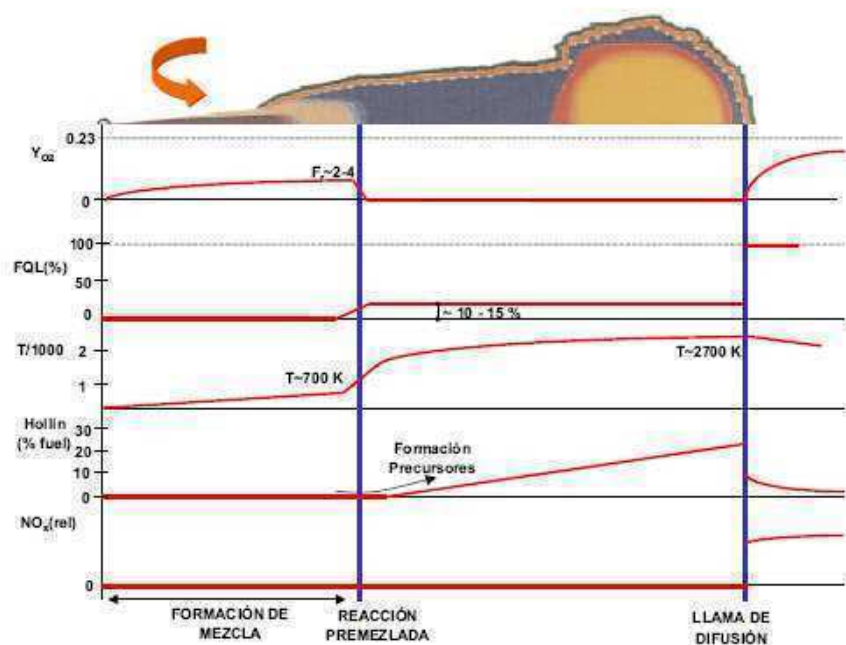


Figura2.5: Evolución espacio-temporal de un paquete de masa inyectado durante la parte cuasi-estacionaria de la fase de combustión por difusión. Adaptado por Dec [Dec 1997] y Molina [Molina 2003].

Inicialmente el paquete de combustible, inyectado a una temperatura cercana a 350K, va atomizándose y mezclándose con el aire. Debido a la atomización de las gotitas de combustible y al englobamiento de aire caliente, del orden de 950K, se incrementa la temperatura del combustible líquido y va evaporándose hasta que desaparece a una cierta distancia de la tobera. A partir de dicha distancia, el combustible en fase vapor continúa mezclándose con aire hasta llegar al final de la primera zona. Al alcanzar la zona de combustión por premezcla, la masa inicial de combustible se ha diluido con el aire hasta un

dosado relativo del orden de 4 [Dec 1997, Flynn 1999], calentándose desde la temperatura de inyección hasta alcanzar una temperatura del orden de 825K.

Al atravesar la zona de combustión premezclada, la masa anterior se quema elevando su temperatura hasta unos 1600K. Puesto que el dosado local es rico, el oxígeno englobado se quema totalmente y se forma en gran proporción productos parcialmente quemados procedentes del combustible. Estos últimos son principalmente monóxido de carbono e hidrocarburos de cadena corta no saturados ( $C_2H_2$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_3H_3$ ), considerados como especies que llevan a la formación de hidrocarburos poli-aromáticos, los cuales constituyen los auténticos precursores de hollín.

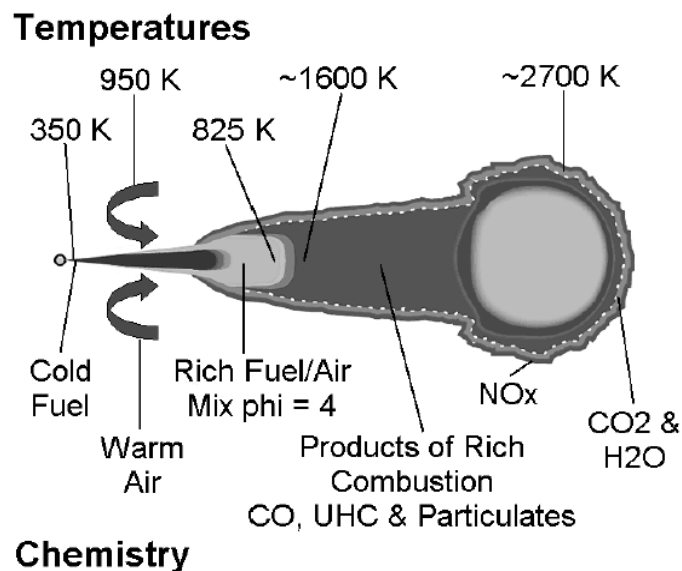


Figura 2.6: Resumen de los diferentes procesos que ocurren durante la combustión [Flynn 1999].

Según estimaciones de Flynn et al. [Flynn 1999], en este proceso de combustión se libera del orden del 10-15% de la energía química que contiene el combustible. A continuación el paquete entra en la zona de la llama de difusión, donde sigue mezclándose y englobando gases, aunque aquí no hay aportación de oxígeno. En efecto, la llama de difusión existente en la periferia impide que el oxígeno penetre en esta zona. Debido a esta ausencia de oxígeno, es muy poco probable que exista liberación de calor en el interior de esta zona. Paralelamente a este proceso de englobamiento, el hollín va creciendo en el interior de la llama

de difusión, cuyo tamaño será máximo al aproximarse al contorno estequiométrico. Cuando finalmente el paquete atraviesa el frente de la llama de difusión, se quema completamente debido al aporte de oxígeno por difusión de la parte exterior del frente, liberando el resto (alrededor de 85%) de energía química que quedaba del combustible inicial. Con ello se alcanza en este frente la temperatura máxima, del orden de la adiabática de llama (2700-3000K). Al atravesar la zona de combustión, el hollín se oxida, formando dióxido de carbono y agua, fundamentalmente debido a las altas temperaturas y a la presencia del radical OH, como indican resultados de Dec y Coy [Dec 1996]. Además, la tasa de formación de NO<sub>x</sub>, igualmente muy dependiente de la temperatura, se activa de manera considerable en el frente de llama.

### 2.1.2.3. FORMACIÓN DE HOLLÍN

Como ya se ha detallado anteriormente, los precursores de hollín se forman en la parte premezclada rica de la llama de difusión a partir de fragmentos de combustible con una temperatura aproximada de 1600K. Son el acetileno C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, etileno C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> y propargil C<sub>3</sub>H<sub>3</sub> que se consideran como especies que llevan a la formación de hidrocarburos poli-aromáticos, precursores de hollín. En su trabajo, Flynn [Flynn 1999] afirma que en la parte de premezcla, 45% del combustible se oxida parcialmente en fragmentos de fuel que darán lugar a precursores. Luego, la colisión de esos precursores engendra núcleos de hollín. Experimentos realizados por Dec y Espey [Dec 1995] demuestran que el tamaño del hollín es pequeño en la región próxima a la zona premezclada y que van creciendo poco a poco al acercarse de la periferia de la llama, hasta alcanzar su tamaño máximo cerca del contorno estequiométrico. La ausencia de oxígeno en esta zona premezclada favorece la formación y la aglomeración del hollín. Al atravesar el contorno estequiométrico, la totalidad del hollín se oxida formando dióxido de carbono y agua. En efecto, durante la combustión por difusión el hollín se forma y se oxida y al final no se produce nada. No obstante, cuando aparece la configuración de difusión tardía (es decir a partir del momento que se termina la inyección), la llama de combustión por difusión es menos estable, las temperaturas bajan y el hollín formado no se oxida completamente.

### 2.1.2.4. CHOQUE CONTRA LA PARED

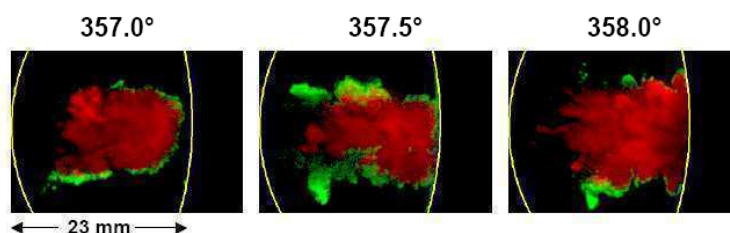
El modelo conceptual de Dec es un modelo que considera el desarrollo de un chorro diesel libre, sin interacciones con las paredes del pistón.

Al parecer, el hollín se forma principalmente en la llama de difusión diesel; sin embargo, en la mayoría de los casos, ésta no puede evolucionar completamente sin chocar contra las paredes del pistón o del cilindro y no se sabe que importante es esa interacción para la formación del hollín. Así pues, con el fin de conocer cual es el efecto de la interacción llama-pared en esa formación, varios estudios han sido realizados.

Kittelson et al. [Kittelson 1990] fueron los primeros en definir la termoforesis como el proceso de deposición de hollín en la pared durante la combustión de la llama. Han demostrado que una cantidad significativa de hollín se deposita contra la pared y no sufre el proceso de oxidación. Además afirman que durante el proceso violento de expansión el hollín se libera de la pared y está englobado en los gases de escape.

En 1992, Suhre y Foster [Suhre 1992], han experimentado varios mecanismos que podrían llegar a la deposición de hollín en la pared y han concluido que el mecanismo dominante es el de la termoforesis, en acuerdo con los resultados de Kittelson et al. [Kittelson 1990].

Dec y Tree [Dec 2001] y Tree y Dec [Tree 2001] demuestran que la llama no está soplada por la pared pero se separa, se deforma y se acopla a la forma de la pared quedándose encendida un tiempo corto (Figura2.7). Es a partir de ese proceso que se deposita el hollín contra la pared. Además han demostrado que la cantidad total de hollín depositada contra la pared y que se libera durante el proceso de expansión es pequeña en comparación a la cantidad total de hollín formada.



*Figura2.7: Secuencia temporal de dos imágenes simultáneas de OH y de hollín. Las curvas amarillas representan el borde de la ventana y la pared del pistón respectivamente. Se nota en la imagen tomada a 358° una llama deformada que se ha acoplado a la pared [Dec 2001].*

El hollín que se queda pegado contra la pared, forma una especie de depósito que se desprende y sale por el escape de vez en cuando. Esas partículas tienen un tamaño muy grande en comparación de las formadas y oxidadas durante la combustión. Pueden medir de 1 a 10 micras; sin embargo aunque sean de tamaño más grande, al estar presentes en cantidades despreciables no tienen mucho efecto sobre la cantidad total de partículas.

Así pues, a pesar de no considerar la interacción llama-pared, el modelo conceptual de Dec es totalmente válido para la formación de hollín ya que la mayoría de esas partículas se forma durante la combustión por difusión diesel.

## **2.2. MEDIDAS DE LIFT-OFF Y DEL HOLLÍN**

### **2.2.1. INSTALACIONES EXPERIMENTALES**

Las investigaciones, en el complejo dominio de la combustión de los motores diesel, han conducido al desarrollo de motores experimentales que permiten visualizar lo que ocurre durante la combustión.

Algunas veces los motores experimentales son derivados y modificados de motores de serie ya existentes, y otras veces pueden ser maquetas diseñadas especialmente para las necesidades de la investigación. En cualquier caso todos tienen una accesibilidad óptica muy grande y simulan condiciones de operación muy parecidas a las de un motor diesel.

La información principal que se puede obtener a partir de esos motores es la siguiente:

- progresión del frente de llama en la cámara de combustión,
- desarrollo y movimiento de las zonas de recirculación de los gases durante la fase de admisión,
- configuración de las turbulencias engendradas por la compresión o la expansión de los gases,
- perfil de los chorros de combustible,
- etc...

En el presente trabajo, la información que nos interesa es principalmente la visualización de la llama y la concentración de hollín. Los principales motores experimentales que se encuentran en la literatura y para los cuales se han realizado estos tipos de estudios son: el motor con pistón transparente, la



máquina de compresión rápida (MCR), el motor con culata transparente y la cámara de combustión de volumen constante.

En el apartado siguiente, se presentan con más detalles esos diferentes motores experimentales, precisando sus características y su procedimiento experimental.

### **2.2.1.1. MOTOR CON PISTÓN TRANSPARENTE**

#### **CARACTERÍSTICAS**

El motor con pistón transparente ha sido desarrollado en varios centros de investigación [Dec 1996, Choi 2001, Musculus 2003], y aunque el lugar donde ha sido desarrollado sea diferente, sus características y geometría son muy similares.

El motor con pistón transparente se basa en la estructura de un motor serie, lo que permite ensayar en condiciones de temperatura, presión y densidad usuales de los motores diesel. La modificación se localiza al nivel del pistón: ha sido alargado y levantado y se compone de una parte transparente (Figura 2.8). Un espejo colocado en la parte inferior del cilindro permite la visualización de la combustión a través del pistón.

El motor con pistón transparente es un motor mono-cilíndrico, así no se tiene en cuenta la dispersión que existe entre cada cilindro de un motor de serie, que puede ser originada, por ejemplo, por la dispersión en el proceso de inyección.

La cámara de combustión es de forma cilíndrica. El primer acceso óptico se sitúa al nivel del pistón transparente. Se pueden encontrar uno o varios accesos suplementarios en la culata. Las ventanas están generalmente hechas de cuarzo.

#### **PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

El procedimiento experimental es el mismo que el de un motor diesel experimental de serie. Se imponen la temperatura y presión de admisión con el fin de obtener las temperaturas y densidades deseadas en el cilindro.

Si se quiere obtener una concentración de oxígeno inferior a 21 % en volumen, sólo hace falta recircular los gases de escape, de la misma manera que en un motor de serie.

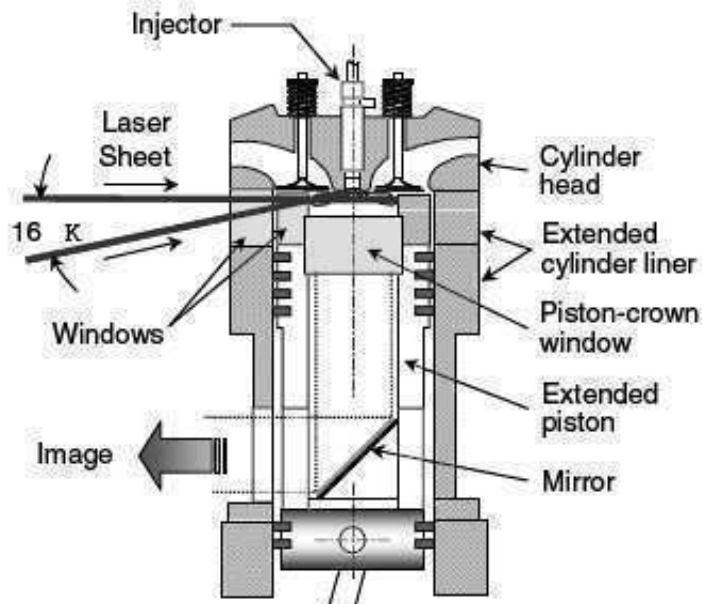


Figura 2.8: Esquema del motor con pistón transparente [Choi 2001].

### 2.2.1.2. MÁQUINA DE COMPRESIÓN RÁPIDA

#### CARACTERÍSTICAS

La máquina de compresión rápida (MCR) que se presenta a continuación es la descrita en [Iida 1993]; sin embargo otras máquinas han sido desarrolladas, como por ejemplo en [Kosaka 1996] o [Lu 2004].

La máquina de compresión rápida ha sido desarrollada para simular condiciones de motores diesel cuando el pistón se localiza en el punto muerto superior. Sin embargo también se pueden reproducir condiciones de compresión o expansión. La geometría de la cámara de combustión no es exactamente la de un motor diesel así que se pueden simular llamas diesel sin interacciones con las paredes. El rango de operación de la temperatura es del orden de 870 a 1100 K y el de la concentración de oxígeno (en volumen) de 17 a 25%. La MCR tiene una flexibilidad y una precisión en el control de las condiciones de operación tanto de temperatura y de presión como de velocidad del pistón, del volumen de la cámara de combustión o de relación de compresión.

La cámara de combustión es de forma cilíndrica y tiene dos accesos ópticos situados, uno en el pistón y otro en el cilindro. Las ventanas se componen de cuarzo y son muy grandes, lo que facilita la limpieza después de la combustión.

### PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

La máquina de compresión rápida presentada en [Iida 1993] se compone de un elemento que permite guiar el pistón, de un pistón, un cilindro, un orificio para la tobera y el inyector, y una cámara de combustión (Figura2.9).

Durante un ensayo experimental, se empuja el pistón a la derecha y los gases de la cámara de combustión se comprimen. En esa cámara, los gases se encuentran inicialmente en condiciones de presión y temperatura atmosférica, sin embargo, si necesario, se pueden calentar a la temperatura deseada antes del ensayo. Además, si se quiere variar la concentración de los gases, hay que realizar la preparación de la mezcla fuera de la cámara de combustión.

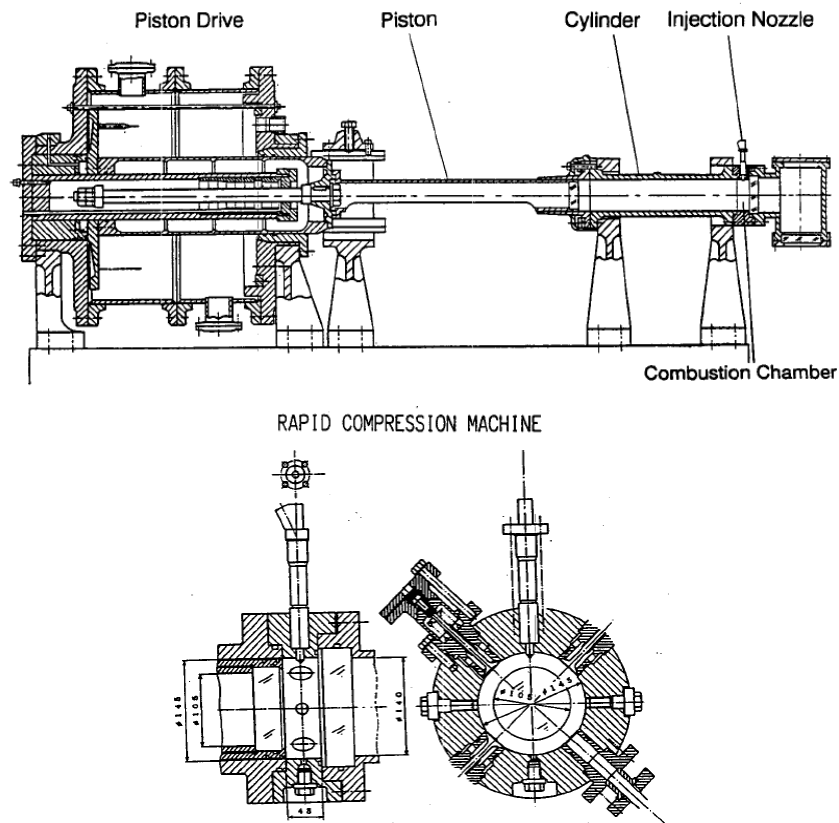


Figura2.9: Esquema de la máquina de compresión rápida y de la cámara de combustión [Iida 1993].

### 2.2.1.3. MOTOR CON CULATA TRANSPARENTE

#### CARACTERÍSTICAS

La maqueta presentada en este apartado ha sido desarrollada por el centro de investigación CMT - Motores Térmicos de la Universidad de Valencia [Bermúdez 2003, Martínez 2003, Pastor 2004, Pastor 2005], donde es posible reproducir las condiciones termodinámicas que posee el fluido de trabajo en un motor térmico real en funcionamiento ordinario (Figura 2.10). Ese motor maqueta está basado en una modificación del motor de dos tiempos de inyección directa Jenbacher JW50. Es un motor de 3 litros de cilindrada para el cual la cantidad de combustible inyectada es insuficiente para el funcionamiento autónomo del motor así que está arrastrado por un motor eléctrico con un régimen constante de 500 rpm.

El rango de operación, tanto de temperatura como de presión es del orden de 800 a 1100K y de 45 a 120 bares respectivamente, lo que significa que la densidad puede variar entre 18 y 30 kg/m<sup>3</sup>. Adicionalmente a eso, es posible ensayar con concentración de oxígeno de 0 (es decir en condiciones inertes) o de 21 % en volumen.

La cámara de combustión es de forma cilíndrica y tiene cuatro porta ventanas laterales ortogonales. En uno de ellos se suele poner siempre un captador de presión (y no una ventana de zafiro), con lo que queda sólo tres accesos ópticos.

Además, está montado sobre un sistema-soporte antisismo que permite atenuar las vibraciones generadas por el motor térmico con el fin de cumplir con las exigencias de las técnicas ópticas.

#### PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El modo de funcionamiento del motor maqueta es muy similar al modo de funcionamiento de cualquier motor de investigación: de manera simplificada, regulando la temperatura y presión en la admisión se pueden obtener las condiciones en la cámara de combustión deseadas.

Este motor tiene la originalidad de poder funcionar con dos modos de funcionamiento diferente:

- en condiciones atmosféricas de reacción, es decir que el gas considerado es aire conteniendo 21% de oxígeno en volumen.
- en condiciones atmosféricas inertes; se substituye el aire por nitrógeno puro, impidiendo cualquier reacción química.

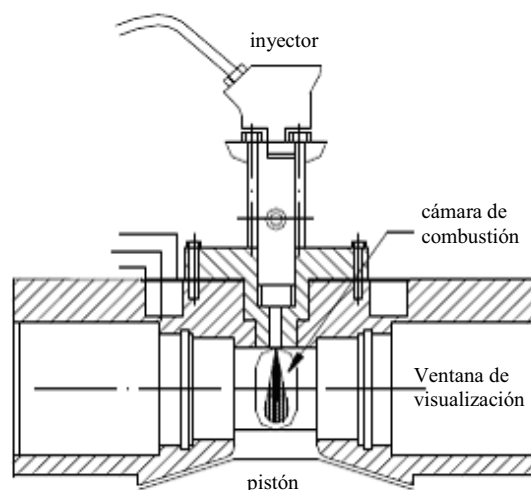


Figura2.10: Sección vertical de la culata del motor maqueta [Bermúdez 2003].

#### 2.2.1.4. CÁMARA DE COMBUSTIÓN CON VOLUMEN CONSTANTE

##### CARACTERÍSTICAS

La maqueta presentada en este apartado ha sido desarrollada por el centro de investigación Sandia National Laboratories y consiste en una cámara de volumen constante, donde es posible simular condiciones termodinámicas similares a las de un motor diesel (Figura2.11). Aplicaciones de esa maqueta se describen en [Siebers 2000, Higgins 2001, Siebers 2001, Pickett 2002, Siebers 2002, Siebers 2002a, Kitamura 2003, Pickett 2004, Pickett 2004a, Idicheria 2005, Pickett 2005, Pickett 2005a, Pickett 2006]. También se puede encontrar otra maqueta desarrollada por la Universidad de Doshisha [Kitamura 2003], maqueta que tiene aproximadamente las mismas características que la de Sandia pero con tamaño diferente.

Esas maquetas de volumen constante son diseñadas para reproducir las condiciones necesarias de la investigación, permitiendo simular condiciones de motor diesel en reposo. Para la cámara de volumen constante desarrollada por el centro de investigación de Sandia, el rango de operación, tanto de la temperatura como de la densidad es del orden de 600 a 1400 K y de 3.6 a 60 kg/m<sup>3</sup> respectivamente. Adicionalmente a eso es posible regular la concentración de oxígeno en el interior de la cámara, desde 0 (es decir para condiciones inertes)

hasta un valor superior a 21 % en volumen dependiendo del tipo de estudio que se desee realizar.

La cámara de combustión es de forma cúbica y tiene cuatro accesos ópticos colocados de forma ortogonal y equidistantes. Esas ventanas son de zafiro. En la cámara de combustión, además, se encuentran 2 bujías y un pequeño ventilador de mezcla. Las bujías son para iniciar la combustión premezclada, y el ventilador es para homogeneizar las condiciones.

### PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El procedimiento experimental se inicia cuando una primera mezcla aire-combustible (acetileno) se enciende a partir de una ignición provocada (por medio de las bujías) en la cámara de combustión. La forma de conseguir las condiciones termodinámicas apropiadas en el interior de la cámara es inusual pero permite alcanzar temperaturas altas y la densidad deseada. Se puede ver en la Figura 2.12 que se alcanzan esas condiciones en 0.1 s aproximadamente. Luego, los productos de la combustión se enfrían poco a poco y la presión en la cámara de combustión decrece también lentamente. Cuando se alcanzan las condiciones de presión y temperatura deseadas, el combustible diesel se inyecta y la combustión diesel tiene lugar (indicada en el esquema a 1.65 ms).

Durante cada ensayo, se utiliza el pequeño ventilador de mezcla con el fin de obtener una temperatura uniforme en toda la cámara de combustión.

La composición en la cámara de combustión se determina a partir de la composición de la mezcla aire-combustible que se ha quemado durante el encendido provocado. Por ejemplo, en el trabajo de Siebers y Higgins [Siebers 2001] se obtiene la composición siguiente en la cámara de combustión; 21% O<sub>2</sub>, 69.3 % N<sub>2</sub>, 6.1 % CO<sub>2</sub> y 3.6 % H<sub>2</sub>O y el peso molecular de esa mezcla (29.47) es muy similar a la del aire (28.96).

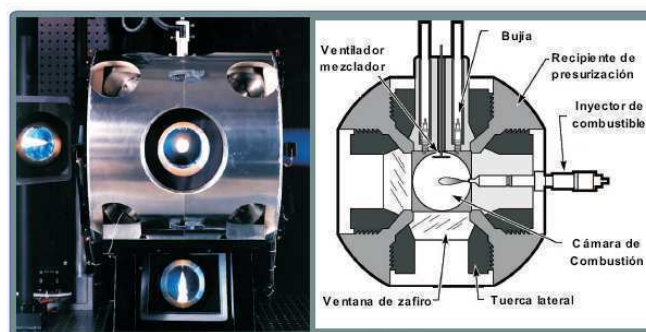


Figura 2.11: Esquema de la cámara de volumen constante y principales accesos ópticos (Laboratorios Nacionales de Sandía).

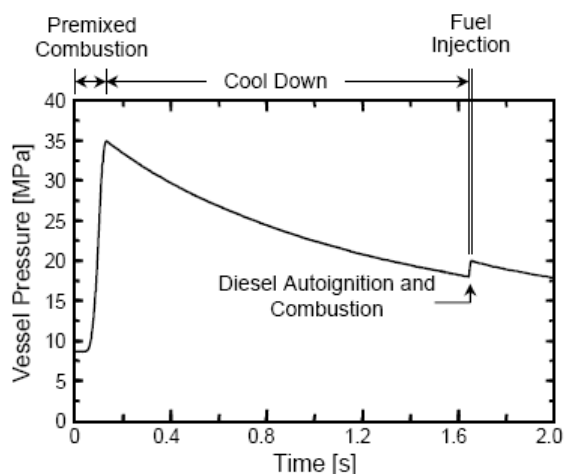


Figura 2.12: Representación de la presión en función del tiempo ilustrando el procedimiento de simulación de la combustión diesel en la cámara de volumen constante de los Laboratorios Nacionales de Sandia.

## 2.2.2. VISUALIZACIÓN DEL LIFT-OFF

Como ya se ha comentado en el apartado 2.1.2.1. anterior, la longitud del lift-off es una zona en la cual no hay combustión, así pues la llama está despegada de la tobera. Además, el lift-off se estabiliza en la región donde la mezcla ha alcanzado las condiciones estequiométricas, es decir en el contorno de la llama a alta temperatura.

Durante aproximadamente 10 años, varios métodos de visualización han sido empleados para estudiar la longitud del lift-off. En efecto, con el fin de tener una visión más concreta del fenómeno local que tiene lugar en la región estequiométrica de estabilización de la llama, diferentes métodos de diagnóstico por láser han sido utilizados, como por ejemplo:

- imágenes del radical CH [Namazian 1988]
- técnicas de Fluorescencia Inducida por Láser del radical OH [Dec 1996]
- radiación visible de la llama [Winklhofer 1996, Larsson 1999]

Son Siebers et al. a lo largo de una serie de trabajos experimentales [Siebers 2001, Siebers 2002a, Siebers 2002b] los que han estudiado el fenómeno de lift-off con más detalles para un chorro diesel inyectado en una cámara de volumen constante. En sus trabajos estudiaron la longitud del lift-off a partir de la radiación natural de la llama para distintas longitudes de onda representativas de

la incandescencia del hollín (532 y 695 nm) o de las especies CH (434nm) y OH (280, 310, 330 y 340 nm).

Siebers y Higgins demostraron que la visualización de la llama a partir de la incandescencia del hollín para cualquiera longitud de onda del rango visible no permite detectar correctamente el lift-off (Figura2.13 (a) y (b)). Confirman lo que había mencionado Dec en su “modelo conceptual” [Dec 97], es decir que el hollín no se forma a partir de la longitud del lift-off sino aguas abajo de la zona de premezcla. En efecto, el hollín necesita un tiempo para formarse y no es posible que este presente al principio de la aparición de la zona de combustión. La luminosidad emitida a la longitud de onda dominada por la incandescencia del hollín no puede proporcionar una longitud del lift-off real y es lo que se visualiza en la Figura2.13 (a) y (b).

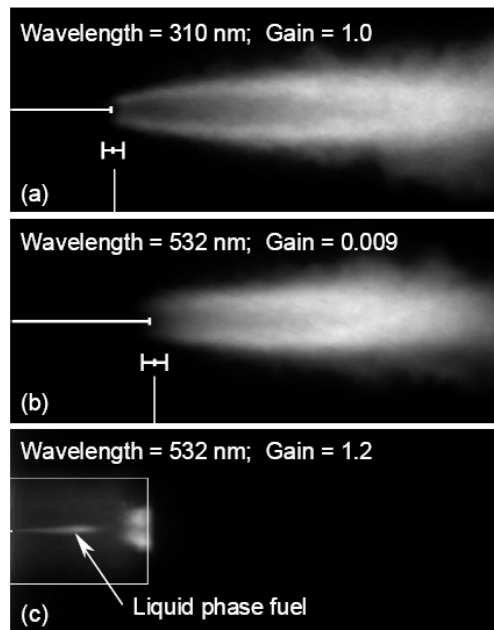


Figura2.13: Comparación de imágenes de emisión natural de la llama tomadas a 310nm (a) y 532 nm (b y c) en las mismas condiciones [Higgins 2001].

Siebers y Higgins comparan las diferentes longitudes de onda representándolas todas en una misma grafica (Figura2.14). La Figura2.14 (a) da la intensidad relativa entre las diferentes luces emitidas por el chorro para cada longitud de onda mientras que la Figura2.14 (b) representa los perfiles de intensidades normalizados.



Se puede observar que para la longitud de onda de 280 nm, la intensidad empieza a detectarse a una distancia axial más alejada del inyector que la longitud de onda de 310 nm. Además, para longitudes de onda mayor de 310 nm, la intensidad que se detecta cerca de la longitud del lift-off es muy debil y se podría confundir con la fase líquida de fuel como está representado en la Figura 2.13 (c). Así pues, los autores concluyen que es a partir de la radiación de la llama en la longitud de onda de 310 nm que la medida de la longitud del lift-off es la mejor y la más real.

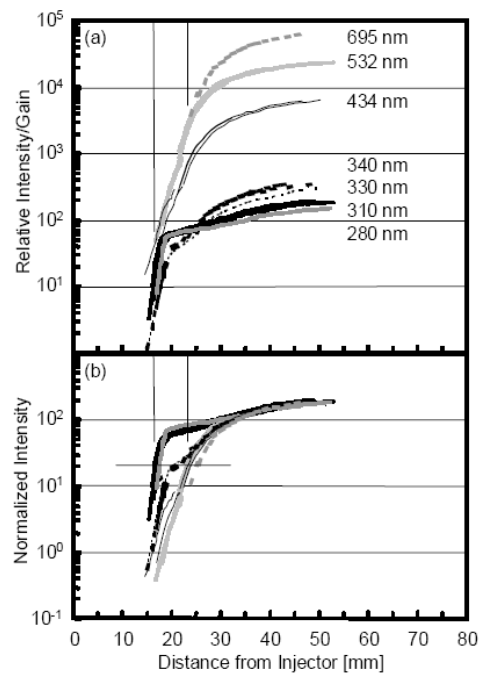
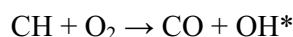


Figura 2.14: Representación de las diferentes longitudes de onda estudiadas para la visualización del lift-off [Higgins 2001].

Así pues, la longitud de onda de 310 nm es una de las bandas de emisión de quimioluminiscencia más intensa del radical OH. Este radical aparece en procesos de combustión en condiciones estacionarias de temperatura elevada, condiciones que se alcanzan en el lift-off. A esa distancia, la combustión de los hidrocarburos engendra una importante elevación de la temperatura y una liberación de calor considerable debido a la reacción química de las especies en

estado excitado como el OH, presente en forma de OH\*. El primer paso para formar las especies OH\* es la reacción exotérmica siguiente:



Una vez formadas, las especies OH\* vuelven rápidamente a su estado original, una parte a través del fenómeno de quimioluminiscencia y otra parte por colisión de las especies entre sí. La quimioluminiscencia solo dura 1 microsegundo [Gaydon 1974]. Está mucho más rápida que el movimiento de la mezcla aire-combustible así pues **la visualización de la quimioluminiscencia del radical OH parece un muy buen método para la determinación de la longitud del lift-off.**

### 2.2.3. CUANTIFICACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE HOLLÍN

Durante la combustión diesel, el rango de luz emitida por la llama es amplio, desde longitudes de onda del ultravioleta UV hasta el infrarrojo IR.

Esa luminosidad se compone principalmente de quimioluminiscencia e incandescencia de hollín. En efecto, la temperatura del hollín presente en la llama diesel es muy parecida a la de los gases que le rodean [Zhao 1998], emitiendo una radiación térmica como cualquier otro cuerpo. Esta radiación térmica domina la quimioluminiscencia de las otras especies presentes, como por ejemplo H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> u OH. Así pues la luz emitida por la llama diesel es principalmente luminosidad de hollín y eso simplifica su visualización: se puede observar con técnicas ópticas convencionales en el rango de las longitudes de onda visible.

Tres técnicas principales se presentan a continuación, métodos que han sido muy a menudo utilizados para estudios de concentración de hollín: el método de incandescencia inducida por láser, la técnica de extinción de luz y el método de los 2 colores. Para cada método se presentan a continuación los fundamentos, sus características y la instalación experimental.

Hay que ser consciente de que el mejor método de medida en el cilindro tiene incertidumbres hasta un 40 ó 50% [Tree 2007]. Esas incertidumbres resultan de hipótesis consideradas para el índice de refracción, la forma o las características (composición, tamaño, etc...) del hollín.

### 2.2.3.1. INCANDESCENCIA INDUCIDA POR LÁSER (LII)

#### FUNDAMENTOS

La técnica de visualización de incandescencia inducida por láser es una herramienta útil de diagnóstico para medidas de alta resolución, tanto espacial como temporal, de hollín. Mediante esta técnica es posible obtener información sobre **la masa, la fracción de volumen** (TI-LII - time integrated LII), así como **el tamaño del hollín** (TR-LII - time resolved LII).

El método se basa en el calentamiento del hollín contenido en un cierto volumen, hasta aproximadamente la temperatura de vaporización (por supuesto mayor que la temperatura de llama) por medio de un pulso láser de alta energía. La energía del láser es absorbida por la nube de hollín y este último emite una radiación cercana a la de un cuerpo negro. La radiación emitida se registra con un sistema apropiado.

Resolviendo las ecuaciones de balance de energía y de masa, y teniendo en cuenta los fenómenos relevantes en la absorción de la energía y las pérdidas de calor, es posible determinar la temperatura y el diámetro del hollín en cualquier instante de tiempo. Así que se puede estudiar las relaciones entre la señal LII, la concentración volumétrica de hollín y su tamaño: considerando la ley de Planck para un cuerpo negro, y con algunas simplificaciones (por ejemplo que **el hollín es esférico**), y también considerando que el hollín absorbe la suficiente energía láser como para elevar al máximo su temperatura, y para longitudes de onda entre 400 y 700  $\mu\text{m}$ , la señal LII es proporcional al diámetro medio  $d_h$  del hollín elevado a la potencia 3 y a la densidad del hollín  $C_n$ , es decir que es aproximadamente igual a la fracción volumétrica  $f_v$ . La relación fundamental de la señal LII para la medida de concentración de hollín se escribe de la manera siguiente [Melton 1984]:

$$S_{\text{LII}} \propto f_v \approx C_n \cdot d_h^3 \quad (\text{EC2.1})$$

Del comportamiento temporal del enfriamiento se deduce la distribución de tamaño del hollín (Figura 2.15). Sin embargo, se necesita una **temperatura de referencia para el enfriamiento que está desconocida**. Se puede estimar mediante otro método como por ejemplo el método de los 2 colores o a partir de un cálculo teórico. Sin embargo para el cálculo hace falta conocer el índice de refracción.

La determinación del tamaño y de la concentración de hollín se realizan considerando que el hollín se compone de **partículas primarias**.

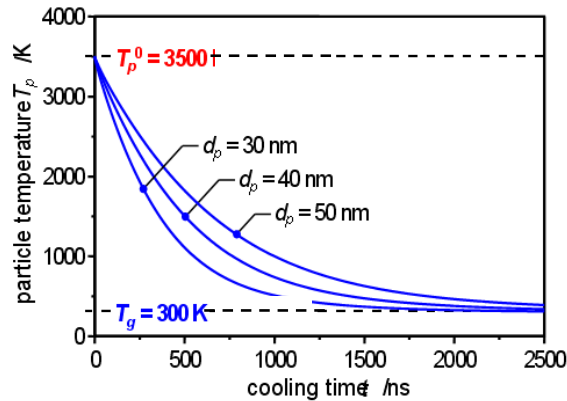


Figura 2.15: Tiempo de enfriamiento para diferentes partículas.

#### ENERGÍA DE EXCITACIÓN LASER Y LONGITUD DE ONDA

La longitud de onda de excitación es un factor que afecta directamente la relación señal-ruido. Cuando la luz interactúa con el hollín en la cámara de combustión de un motor diesel, la luz dispersada está dentro del régimen de Rayleigh (es decir que la dimensión del hollín es muy pequeña en comparación con la longitud de onda), donde la eficacia de absorción del hollín varía aproximadamente de forma inversa con la longitud de onda **a valores constantes de índice de refracción y tamaño** [Dec 1992]. Por lo tanto, el hollín se calentará más eficientemente a medida que la longitud de onda se haga más corta. A pesar de este límite, cuando se utiliza la luz UV (bajas longitudes de onda) para calentar el hollín pueden aparecer interferencias, más precisamente fluorescencias, causadas por los hidrocarburos poli-aromáticos (PAHs) y moléculas  $C_2$  generadas por el láser [Shaddix 1996, Schraml 2000, Bengtsson 1995]. Al trabajar con una longitud de onda infrarroja, la eficacia de absorción del hollín es menor, lo que significa que se necesita una mayor cantidad de energía para calentarlo y elevar su temperatura a niveles de incandescencia, lo que viene a ser una gran desventaja al utilizar este tipo de fuentes láser. El uso del segundo armónico de un láser Nd:YAG (532nm) permite obtener un buen equilibrio entre la eficacia de excitación y la relación señal-ruido.

### SISTEMA EXPERIMENTAL

Debido a que la técnica involucra el rápido calentamiento de una partícula absorbente usando un láser pulsado de alta energía y seguidamente la foto-detección de la incandescencia resultante de la partícula, el sistema para la implementación de la técnica es muy sencillo. **De hecho, la simplicidad del método LII es uno de sus aspectos más atractivos:** el montaje experimental consiste en un láser pulsado de alta energía, una óptica de focalización, una óptica de recepción, un sistema de adquisición de datos apropiado y un foto-detector. La Figura2.16 muestra la disposición de los elementos del sistema LII. Se puede verificar que para la aplicación de ese método **hacen falta 3 ventanas de visualización** (1 para el foto-detector y 2 para la entrada y salida de la señal láser).

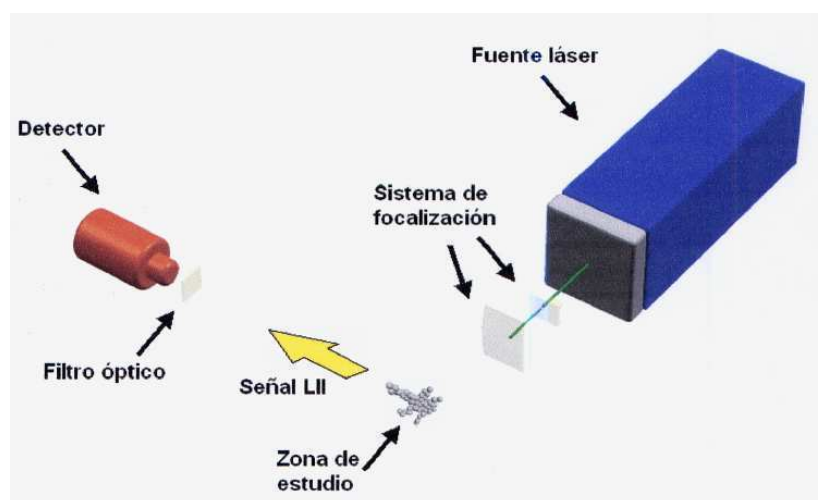


Figura2.16: Diagrama del montaje experimental para aplicaciones de LII.

**El método LII puede ser aplicado como un punto, una línea o para medidas con lamina láser para visualización 2D** [Kohse-Höinghaus 2002, Dec 1991, Smallwood 2002]. Los elementos experimentales son similares en cada caso con apenas algunas diferencias en la óptica de focalización y recepción para obtener unas medidas en concreto.

### MEDIDAS CUALITATIVAS Y CUANTITATIVAS DE LII

Las medidas cualitativas se establecen a partir de la relación directa entre la señal de incandescencia emitida por el hollín y su concentración volumétrica.

De forma general, la mayoría de los autores utilizan el método LII para obtener medidas directas de la concentración de hollín y sólo en pocos casos realizan la calibración previa y necesaria para obtener resultados en base **cuantitativa**. A pesar de ello, las medidas realizadas sin calibración permiten establecer relaciones entre los diferentes fenómenos estudiados y evaluar de forma adecuada la influencia de ciertos parámetros que afectan directamente a los procesos de formación del hollín en la cámara de combustión.

### 2.2.3.2. EXTINCIÓN DE LUZ

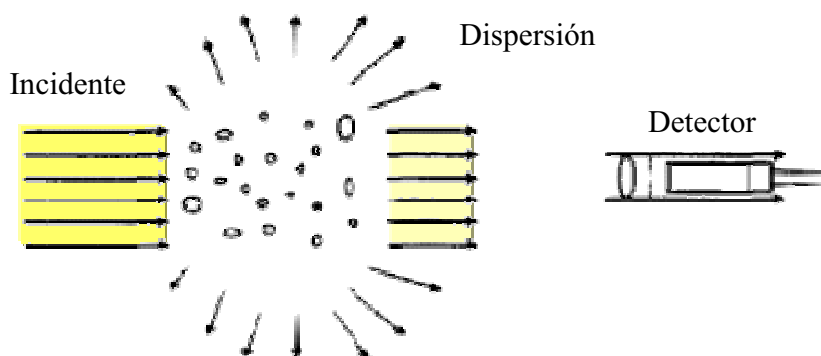
#### FUNDAMENTOS

Durante la aplicación del método de extinción de luz no hay intercambio de energía entre el rayo de luz láser incidente y el hollín, contrariamente a lo que ocurriría con la técnica de incandescencia inducida por láser.

El fundamento de este método se basa en el hecho de que si un rayo de luz atraviesa una nube de hollín, su intensidad (o potencia) se verá reducida. En este caso, se dice que la presencia del hollín tiene como consecuencia la extinción de la luz incidente.

Hay que tener en cuenta que la atenuación o extinción del rayo de luz láser se obtiene tanto por el proceso de dispersión como por el de absorción, como está representado en la Figura2.17.

$$\text{Extinción} = \text{dispersión} + \text{absorción}$$



*Figura2.17: Representación del método de extinción de luz que se obtiene a partir de la dispersión y de la absorción del rayo de luz.*

Se puede expresar la intensidad de la luz  $I$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) una vez que ha atravesado la nube de hollín de la manera siguiente:

$$I = I_0 \cdot \exp(-KL) \quad (\text{EC2.2})$$

o más frecuentemente se escribe

$$I / I_0 = \exp(-KL) \quad (\text{EC2.3})$$

$I_0$ ,  $K$  et  $L$  son respectivamente la intensidad transmitida por el láser ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), el coeficiente de extinción para una nube de hollín ( $\text{m}^{-1}$ ) y el recorrido óptico de la radiación ( $\text{m}$ ).

Hay que tener en cuenta que una **limitación del método reside en el parámetro  $L$** . En efecto, si el parámetro  $L$  es demasiado elevado, es decir si el espesor de la nube de hollín es demasiado grande, no se puede medir correctamente: la extinción de la luz es demasiado importante. En su trabajo, Siebers y Pickett [Siebers 2002a] consideran que si el factor  $KL$  supera el valor de 4, no se pueden realizar medidas fiables.

La **fracción volumétrica de hollín  $f_v$**  se puede determinar a partir del valor del coeficiente de extinción de la manera siguiente:

$$f_v = \frac{K \cdot \lambda}{k_e} \quad (\text{EC2.4})$$

con,

$\lambda$ : longitud de onda del láser,  $k_e$ : coeficiente óptico de extinción que se puede definir de la manera siguiente:

$$k_e = 6 \cdot \pi \cdot I \cdot m \cdot \frac{(m^2 - 1)}{(m^2 + 2)} \quad (\text{EC2.5})$$

y  $m$ : índice de refracción del hollín

La ecuación que permite expresar la fracción volumétrica de hollín se obtiene mediante relaciones derivadas de la teoría de pequeñas partículas Mie (es decir

que la luz absorbida por una nube de hollín depende de su concentración y del tamaño de las partículas dispersoras a lo largo del recorrido por el rayo).

Así que se hicieron varias aproximaciones que conducen a un análisis más o menos riguroso:

- se considera **el hollín como partículas primarias esféricas**. De esta manera es posible considerar el proceso de extinción sólo dependiente de la absorción sin necesidad de tener en cuenta la dispersión [Zhao 1998].
- como la composición del hollín varía, el índice de refracción es aproximado.

Esas dos aproximaciones conducen a errores en el cálculo de las propiedades y en el análisis experimental. Así que la relación cuantitativa entre el factor  $K$  y la fracción volumétrica de hollín  $f_v$  está afectada por las incertidumbres debidas a las propiedades del hollín. Sin embargo, la relación entre varias condiciones de funcionamiento es válida si las propiedades ópticas del hollín no cambian de manera significativa con cambios en esas condiciones [Pickett 2006].

### ÍNDICE DE REFRACCIÓN

**Una gran aproximación se realiza a través de la estimación del índice de refracción y puede ser fuente de un error bastante considerable.**

En los artículos [Zhao 1998] y [Smyth 1996], se mencionan varios estudios, tanto experimentales como teóricos, que se han realizado y han conducido a una expresión del índice de refracción en función de la longitud de onda del láser utilizado y que se han resumido en la Tabla2.1.

Longitud de onda $\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	Índice de refracción $m = n - ki$
0.337	1.48-0.77i
0.435	1.6-0.6i
0.532	1.75-0.6i
0.633	1.8-0.58i
0.81	1.85-0.57i
1.064	1.91-0.59i
	1.9-0.55i

Tabla2.1: Tabla resumen del índice de refracción obtenido en función de la longitud de onda del láser.



Además, en [Smyth 1996], especifican que la variación del coeficiente  $f_v / k_e$  a partir de las medidas experimentales puede alcanzar un factor 2. Así que es comprensible que la estimación del índice de refracción sea bastante sensible. Sin embargo, se consideró que  $m = 1.57 - 0.56i$  era un valor medio suficientemente representativo para la estimación del índice de refracción y es ese valor el que es utilizado muy a menudo en los trabajos de investigación, como se especifica en [Pickett 2004a].

#### CONSIDERACIÓN DEL PROCESO DE DISPERSIÓN EN EL PROCESO DE EXTINCIÓN

Al considerar el hollín como partículas primarias para la extinción de luz, se asume que es la absorción la que domina la dispersión en el proceso de extinción para propiedades ópticas típicas.

Al considerar que el hollín crece y forma aglomerados (lo que son realmente), se ha visto [Zhu 2000] que hay una contribución significativo de la dispersión en el fenómeno de extinción.

Así, Musculus y Pickett [Musculus 2005], considerando **el hollín como aglomerados**, introducen un nuevo término  $\alpha_{sa}$  que representa la “dispersión-en-la-extinción” y que se integra de la manera siguiente en las ecuaciones anteriores:

$$k_e = (1 + \alpha_{sa}) \cdot 6 \cdot \pi \cdot I \cdot m \cdot \frac{(m^2 - 1)}{(m^2 + 2)} \quad (\text{EC2.6})$$

#### SISTEMA EXPERIMENTAL

Con el método de extinción de luz, se mide **un solo punto** en la llama. El montaje (simplificado), ilustrado en la Figura 2.18, se compone de un láser, un foto-detector, un diafragma, una lente y un filtro interferencial. El diafragma permite controlar el diámetro del rayo de luz emitido por el láser. Una vez que el rayo láser atravesó la nube de hollín, la lente permite concentrar ese rayo y dirigirlo al filtro interferencial. Este último sirve para filtrar la longitud de onda del láser y así suprimir la influencia de la radiación de la llama sobre las intensidades de luz medidas.

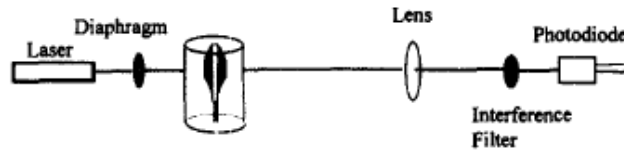


Figura2.18: Montaje de extinción de luz. La señal se registra con fotodiodo [Zhao 1998].

Una limitación del método reside en las interferencias **que pueden ocurrir entre el rayo láser y el fuel líquido, o gotas de agua, y también de la suciedad,** presente en la cámara de combustión. Se han ilustrado esos procesos en la Figura2.19 siguiente:

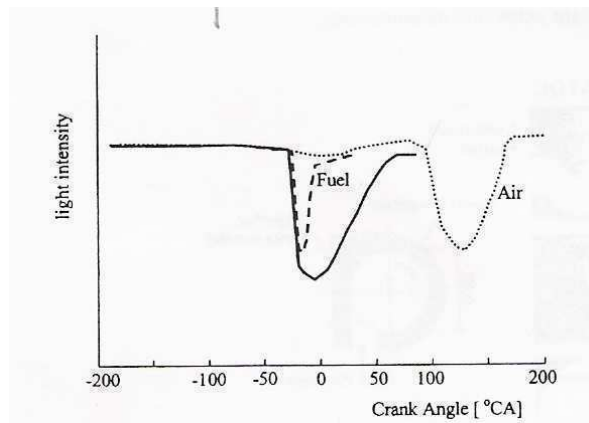


Figura2.19: Fuentes de interferencias que pueden ocurrir durante las medidas de extinción de luz en un motor diesel [Zhao 1998].

Se puede observar 3 señales diferentes en esta figura: la línea continua representa una señal que se obtiene cuando ocurre la combustión, la línea con puntitos se obtiene a partir de un ensayo en arrastre y con la última línea se puede ver las interferencias del combustible. Si no había ninguna interferencia, las líneas quedarían rectas.

Cuando el motor está en arrastre (primera parte de la línea con puntitos), la intensidad del rayo emitido por el láser disminuye ligeramente debido a la dispersión de Rayleigh del aire comprimido en el cilindro. Si existe una combustión en condiciones ambientales con aire (segunda parte de la línea con puntitos), un segundo pico aparece durante la expansión debido a la presencia de

gotitas de agua provenientes de la condensación del vapor de agua en el aire. Otra fuente de interferencia en la medida de extinción de luz son las gotitas líquidas de combustible, como se puede observar en la Figura 2.19.

La intrusión de esos procesos en la medida produce una sobre-estimación en la medida de la cantidad de hollín. Sin embargo, eligiendo convenientemente el momento en el cual se quiere realizar la medida (por ejemplo una vez que se ha terminado el proceso de inyección para no tener interacciones con el fuel líquido) se pueden obtener medidas de la fracción volumétrica de hollín adecuadas.

Para ese montaje **sencillo**, hacen falta **2 accesos ópticos** para visualizar correctamente la llama.

Pero la medida del hollín en un solo punto, como lo presenta la Figura 2.18, es un **procedimiento muy largo, aburrido y fastidioso** si se quiere obtener una información fiable de una porción de la llama diesel.

### 2.2.3.3. MÉTODO DE LOS 2 COLORES (2C)

El método de los 2 colores ha sido desarrollado en los años 40 y permite estimar a la vez la **concentración de hollín presente en la llama diesel y la temperatura de la llama**.

#### FUNDAMENTOS

El punto de partida del método de los 2 colores se basa en la suposición de que la radiación proveniente de la llama de hollín y recibida por un observador puntual depende de la longitud de onda  $\lambda$ , de la temperatura  $T$  y de la cantidad de hollín presente en la llama; eso se puede traducir matemáticamente de la manera siguiente:

$$I_{\text{soot}}(\lambda, T, \text{cantidad de hollín}) = \varepsilon(\lambda, \text{cantidad de hollín}) \cdot I_{\text{cn}}(\lambda, T) \quad (\text{EC2.7})$$

Esta ecuación indica que la radiación espectral  $I_{\text{soot}}$  es proporcional a la radiación  $I_{\text{cn}}$  que emitiría un cuerpo negro a la misma temperatura y longitud de onda ponderada mediante la emisividad  $\varepsilon$ .

La ley de Planck indica que para el cuerpo negro:

$$I_{cn}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \cdot \left( \exp\left(\frac{C_2}{\lambda \cdot T}\right) - 1 \right)} \quad (\text{EC2.8})$$

con  $C_1$  y  $C_2$ , constantes de Planck, con valores:  $C_1 = 1.1910439 \cdot 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2 / \text{sr}$  y  $C_2 = 1.4388 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$

A partir de las leyes de las partículas de pequeño tamaño, Hottel y Broughton [Hottel 1932] han deducido una expresión empírica sencilla para la emisividad; ecuación a menudo empleada en el ámbito del método de los 2 colores.

La emisividad se expresa con la siguiente expresión:

$$\varepsilon(\lambda, K, L) = 1 - \exp\left[-\frac{KL}{\lambda^\alpha}\right] \quad (\text{EC2.9})$$

En esa ecuación se define el **factor KL** que se suele emplear como variable para definir la cantidad de hollín. Este factor es proporcional a la fracción volumétrica de hollín en la llama y al camino óptico recorrido por la radiación L.

El valor de  $\alpha$  depende de la longitud de onda, del tamaño de las partículas de hollín y de su índice de refracción. Zhao y Ladommatos [Zhao 1998, Zhao 2001], recopilan los valores de este parámetro propuestos por varios autores, y aconsejan un valor de 1,39 (valor de Hottel y Broughton [Hottel 1932]) que es válido para la mayoría de los combustibles y para longitudes de onda del espectro visible. En efecto, en este rango espectral, la solución es poco sensible al valor de  $\alpha$  elegido y la temperatura no está afectada por el parámetro  $\alpha$ . También, para longitudes de onda del rango del infrarrojo, se puede usar un valor de 0.95 para  $\alpha$  [Hottel 1932].

Finalmente a partir de las ecuaciones EC2.7, EC2.8 y EC2.9, la radiación procedente del hollín se puede cuantificar por la expresión:

$$I_{soot}(\lambda, T, KL) = \left[ 1 - \exp\left(-\frac{KL}{\lambda^\alpha}\right) \right] \cdot \frac{1}{\lambda^5} \cdot \frac{C_1}{\left[ \exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} \quad (\text{EC2.10})$$

Con el método de los 2 colores, se pretende obtener los valores de la temperatura y del factor KL. Así se resuelve un sistema de dos ecuaciones que se obtiene

gracias a la medida de dos valores de radiación  $I_{\text{soot1}}$  e  $I_{\text{soot2}}$ . Cada radiación de hollín se mide con una longitud de onda del espectro visible diferente  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$ .

#### ELECCIÓN DE LA LONGITUD DE ONDA

La elección de la longitud de onda se basa en las consideraciones siguientes [Yan 1988]:

- la radiación de hollín y la de los radicales  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  y  $\text{OH}$  no deben interferir entre sí mismas en las medidas. Las longitudes de onda para esos tres radicales son generalmente inferiores a 400 nm o superior a 1  $\mu\text{m}$ .
- la temperatura tiene una medida más fiable si se mide en el rango del visible. No es sensible al valor de  $\alpha$  en este rango.
- la influencia de los reflejos de la pared opuesta no es importante en el rango visible [Matsui 1980].

Así que para obtener medidas más fiables con el método de los 2 colores es mejor elegir longitudes de onda que pertenecen al rango del visible, de 400 a 750 nm.

#### LIMITACIÓN

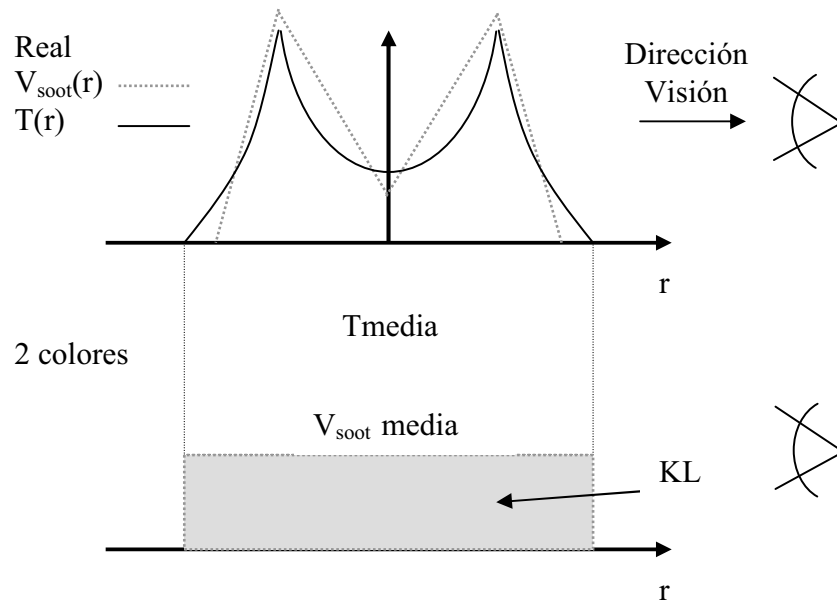
En los motores diesel, existe una variación bastante importante entre cada ciclo que se identifica con una radiación de la llama muy irregular provocada por un movimiento significativo de la nube de partículas de hollín. **Así que una irregularidad cíclica importante en la radiación engendra una variación en la medida del factor KL.** Yan y Borman [Yan 1988] afirman que la desviación máxima del factor KL puede ser aproximadamente igual a un tercio del valor del pico máximo de la concentración de hollín mientras que han notado que la temperatura no está tan afectada y que su variación máxima estándar para la zona de estudio era inferior a 40°C.

En el método de los 2 colores, se hace la hipótesis de que **la distribución de hollín (o fracción volumétrica) y la temperatura son uniformes a lo largo del recorrido óptico.**

Este hecho no ocurre en la realidad en ninguna de las dos variables. Tal como se ha esquematizado en la Figura 2.20, el factor KL medido representaría la integral de la fracción volumétrica de hollín  $V_{\text{soot}}$  a lo largo del camino óptico, mientras que la temperatura sería un valor promedio espacial realizado en base a la propagación de la radiación en el interior del hollín.

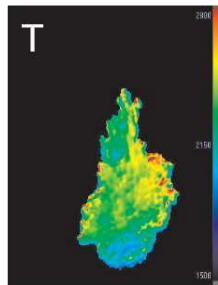
El método de los 2 colores supone que ninguna de las dos variables cambian espacialmente, sin embargo, realmente, ni la distribución de hollín ni la temperatura son uniformes (se puede apreciar en la Figura 2.21 la distribución no uniforme de la temperatura en la llama [García 2004]) y eso induce errores en las medidas.

Svensson y al. [Svensson 2005] han demostrado que en una misma llama, la diferencia de temperatura puede alcanzar los 200K. La superficie de la llama es fuertemente no uniforme en temperatura y las diferencias son demasiado grandes para ser explicadas exclusivamente por incertidumbres ópticas, así que parece ser que esas variaciones son reales.



*Figura 2.20: Esquema simplificado para la interpretación de los resultados del método de los 2 colores. Se muestra una llama (parte superior), así como la evolución real y la considerada por el método de los dos colores, de la temperatura y la fracción volumétrica de hollín a través del camino óptico (espesor de la llama) [García 2004].*

Además, Yan y Borman [Yan 1988] han demostrado que el efecto de la no-uniformidad de la temperatura sobre la concentración de hollín es menos severo que el efecto de la irregularidad del hollín sobre la temperatura.



*Figura 2.21: Representación de la distribución no uniforme de la temperatura en una llama, fotos tomadas con el método de los 2 colores [García 2004].*

Otra consideración importante para la interpretación del método de los 2 colores es la **opacidad de la llama (o espesor)**, es decir la opacidad de la nube de hollín medida.

Las técnicas de diagnóstico óptico han demostrado que el chorro diesel tiene una zona central de dosado rico con temperaturas muy inferiores a las de la llama de difusión. Así que si la llama es semitransparente, es decir que si la concentración de hollín es baja, la temperatura de los 2 colores se verá afectada por la temperatura interna baja de la llama. Al contrario, si la concentración de hollín es alta, la llama es opaca, y la temperatura de los 2 colores será muy cercana a la temperatura de contorno de la llama de difusión, es decir a la temperatura adiabática.

En cualquier caso, Yan y Borman [Yan 1988] y Matsui et al. [Matsui 1980] demostraron, a partir de cálculos teóricos, que las temperaturas cercanas a la superficie de la llama en la parte del receptor tienen un efecto más importante sobre la temperatura medida que las lejanas.

En su artículo, Musculus et al. [Musculus 2007] comparan la opacidad de una llama obtenida en combustión con temperaturas altas (HTC) y bajas (LTC), y concluyen que la transmitancia óptica de la nube es solamente de 15% para HTC mientras que es de 58 % para LTC.

Además, esos mismos autores, comparando resultados de temperaturas de los 2 colores medidas y otras simuladas, demuestran que la temperatura de los 2 colores es más próxima a la temperatura simulada (o real) en condiciones de baja temperatura. Sin embargo, **el error introducido a baja temperatura para el cálculo de la temperatura es muchísimo más grande.**

Un gran error en la temperatura va a engendrar otro error importante en la determinación del factor KL. Así que a baja temperatura, la medida de la temperatura es aún más heterogénea y el error en la determinación del factor KL se amplifica.

**SISTEMA EXPERIMENTAL**

Además de ser **sencillo**, **el montaje experimental es barato y es fácil de aplicar** [Zhao 1998]. Solo hace falta una cámara, para recuperar las imágenes, acoplada con un sistema (por ejemplo un estereoscopio, Figura 2.22) que permite duplicar las imágenes y aplicarles el filtro correspondiente para registrar las dos longitudes de onda por separado. Así que es necesario solamente **un acceso óptico** para obtener la información requerida y también hay que notar que el método da una **información de la superficie de la llama así que se puede considerar como un método 2D**.

Las intensidades de la llama obtenidas con las imágenes son intensidades digitales y hace falta proceder a una **calibración** con el fin de obtener imágenes de llama con intensidades reales.

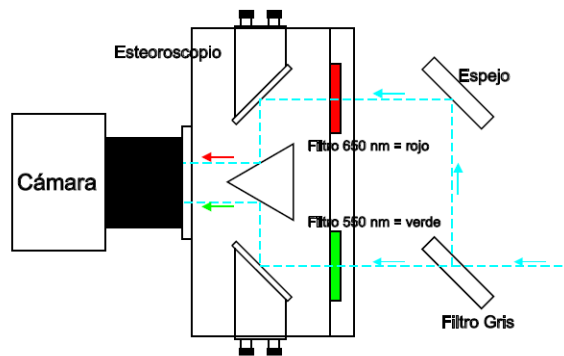


Figura 2.22: Representación de un estereoscopio; aparato que permite el registro de la llama con dos longitudes de onda diferentes.

#### 2.2.3.4. COMPARACIÓN DE LAS DIFERENTES TÉCNICAS

Las principales características de los tres métodos de visualización se han resumido a continuación en la Tabla 2.2. Se puede observar que cada una de esas técnicas tiene ventajas e inconvenientes así como hipótesis que engendran errores.

Antes de comparar cada una de las tres técnicas de visualización, hay que tener en cuenta que todas tienen un inconveniente común, que no ha sido mencionado anteriormente y que es el ensuciamiento de las ventanas. En efecto, el hecho de que las ventanas estén sucias puede interferir en las medidas, proporcionando



una cantidad de hollín superior (con la técnica de extinción de luz) o inferior (con el método de los 2 colores y el de la incandescencia inducida por láser).

Los montajes para las diferentes técnicas son bastante sencillos, compuestos de pocos elementos y fácil de aplicar. La técnica de incandescencia inducida por láser es la más exigente en cuanto a los accesos ópticos, ya que se necesitan 3 (2 para el láser y 1 para la cámara) mientras que el método de extinción de luz necesita 2, y para el método de los 2 colores hace falta 1 sola ventana.

El método de incandescencia inducida por láser se puede utilizar para aplicaciones puntuales, 1D o 2D. El método de los 2 colores se aplica para una resolución espacial 2D y el método de extinción de luz es una técnica larga y fastidiosa ya que sólo se puede medir punto a punto.

Cada método da un valor para la concentración de hollín diferente. Con el método de los 2 colores, se mide un factor KL, mientras que con los dos otros métodos se mide una concentración volumétrica de hollín  $f_v$ .

Las medidas con el método de incandescencia introducida por láser se limitan a concentración de partículas de hollín muy bajas. En efecto, hace falta que la luz del láser pueda penetrar en la nube de hollín, produzca incandescencia y pase a través de esa nube hasta alcanzar el detector. Con esa técnica, los valores de  $f_v$  son muchísimo más pequeños que los obtenidos con la técnica de extinción de luz.

Pero, las medidas con el método de extinción de luz realizadas por algunos autores [Tree 2007] muestran que la concentración de hollín en la llama diesel para condiciones típicas de funcionamiento también son muy delicados, y que no siempre se puede medir correctamente debido al hecho de que la nube de partículas es demasiado espesa.

Con el método de los 2 colores se puede medir concentraciones de hollín elevadas al contrario de los otros dos métodos. Sin embargo, el método de los 2 colores tiene incertidumbres en la medida de la temperatura cuando la temperatura en el cilindro es baja. Además, se introducen errores al nivel de la determinación de la temperatura y del factor KL cuando hay mucha dispersión cíclica. Sin embargo, Pastor et al. [Pastor 2005] demuestran con sus resultados, analizando imágenes instantáneas de la llama diesel, que con el método de incandescencia inducida por láser hay más dispersión en las medidas que con el método de los 2 colores.

Así que cada método de visualización tiene ventajas e inconvenientes y hay que elegir el más adaptado en función del estudio que se quiere realizar.

	<b>LII</b>	<b>EXTINCIÓN</b>	<b>2 colores</b>
<b>DATOS OBTENIDOS</b>	· fracción volumétrica de hollín · distribución de tamaño	· fracción volumétrica de hollín	· concentración de hollín (factor KL) · temperatura de la llama
<b>DIMENSIÓN</b>	· puntual · 1D · 2D	· puntual	· 2D – resolución espacial
<b>MONTAJE</b>	· sencillo	· sencillo	· sencillo · barato
<b>ACCESOS ÓPTICOS NECESARIOS</b>	· 3 (2 para el láser, 1 para la cámara)	· 2	· 1
<b>VENTAJAS DEL MÉTODO</b>	· distribución de tamaño · puede ser cuantitativo	· se pueden considerar aglomerados · método fiable y preciso	· temperatura de la llama · aplicación fácil
<b>INCONVENIENTES DEL MÉTODO</b>	· Tref no conocida	· la nube de hollín no tiene que ser demasiado espesa para la determinación del parámetro L	· calibración · sensibilidad de KL a la dispersión cíclica · sensibilidad del método a la opacidad de la llama · error considerable en la temperatura cuando se opera en LTC
<b>HIPÓTESIS QUE ENGENDRAN INCERTIDUMBRES</b>	· partículas primarias esféricas de diámetro constante · índice de refracción constante	· partículas esféricas · índice de refracción constante · interacción con gotas de agua o fuel o suciedad · fastidioso si método puntual	· distribución de hollín y temperatura uniformes a lo largo del recorrido óptico

*Tabla 2.2: Resumen de las características principales de las 3 principales técnicas de visualización de hollín.*

## **2.3. EFECTOS DE LOS PARÁMETROS FÍSICOS SOBRE LA FORMACIÓN DE HOLLÍN**

Varias investigaciones han demostrado que la longitud del lift-off es un fenómeno que tiene un papel significativo en los procesos de combustión y de emisión de partículas en los motores diesel.

Se cree que la longitud del lift-off afecta a los procesos de combustión y de emisión de partículas diesel permitiendo al combustible y al aire mezclarse antes del lift-off (es decir antes de la combustión) y por consiguiente influir en el dosado en el lift-off y en la región de premezcla donde se forman los precursores de hollín.

Estudios recientes de la luminosidad de la llama muestran que la cantidad de hollín depende en parte de los parámetros que afectan la cantidad de mezcla aire-combustible antes del lift-off.

Estas medidas sugieren que si la mezcla aire-combustible antes del lift-off aumenta, es decir que el dosado en el lift-off disminuye, la concentración de hollín formada disminuye también y que eventualmente no hay formación de hollín si el dosado en el lift-off es inferior a 2.

A continuación se describe el papel que tienen diferentes parámetros, como la temperatura y densidad en el cilindro, la presión de inyección, el tamaño del orificio de la tobera y la concentración de oxígeno, sobre la mezcla aire-combustible antes del lift-off y su consecuencia en la formación de hollín.

### **2.3.1. ESTUDIO TEÓRICO SOBRE EL LIFT-OFF**

Antes de empezar con la descripción de los efectos de los diferentes parámetros sobre la longitud del lift-off, se presenta primero un estudio teórico que realizó Peters [Peters 2000] y que conduce a una expresión de la longitud del lift-off. Esta expresión se comparará luego con los efectos cuantitativos experimentales de algunos parámetros.

En el apartado 2.1.2.1. se definió la longitud del lift-off al estabilizarse la llama a lo largo del contorno estequiométrico en un punto donde hay un equilibrio entre la velocidad de convección aguas abajo generado por el propio proceso de inyección y la velocidad del frente de llama de combustión premezclada turbulenta que trata de remontar aguas arriba.

A partir de una serie de razonamientos basados en este balance, y suponiendo que el número de Damköhler turbulento es pequeño (este parámetro se define como el cociente de la tasa de reacción química local y la de la mezcla; si el número de Damköhler es pequeño, el fenómeno no está controlado por la mezcla sino por el proceso químico de combustión), Peters obtiene que la longitud del lift-off sigue la ley de escalado según la siguiente ecuación:

$$LOL \sim \frac{U_o \cdot Z_{st} \cdot D}{u_{FFlam}^2(Z_{st})} \quad (EC2.11)$$

con:

LOL: longitud del lift-off,

$U_o$ : velocidad de salida del chorro,

$Z_{st}$ : fracción de mezcla estequiométrica,

$D$ : difusividad térmica,

$u_{FFlam}(Z_{st})$ : velocidad de propagación del frente de llama laminar con una fracción de mezcla estequiométrica.

Aunque esta expresión se obtiene a partir de razonamientos teóricos, es capaz de explicar resultados experimentales como los de Kalghatgi [Kalghatgi 1984].

Además para tener una expresión en función de los parámetros que tienen un efecto sobre el lift-off y que se van a estudiar a continuación (temperatura y densidad en el cilindro, presión de inyección, diámetro del orificio de la tobera y concentración de oxígeno), se puede asumir que [Siebers 2001]:

- para una densidad  $\rho_{aire}$  constante, el coeficiente de difusividad térmica depende de la temperatura con una potencia 0.5, y la velocidad de propagación del frente de llama laminar es proporcional a la temperatura con un exponente 2.
- para una temperatura  $T_{aire}$  constante, el coeficiente de difusividad térmica depende de la densidad con una potencia -1, y la velocidad de propagación del frente de llama laminar es proporcional a la densidad con un exponente -0.36.

Así se puede describir la expresión de Peters de la manera siguiente:

$$LOL \sim \frac{U_o \cdot T_{aire}^{0.5} \cdot \rho_{aire}^{-1}}{(T_{aire}^2 \cdot \rho_{aire}^{-0.36})^2} \approx \frac{U_o \cdot T_{aire}^{0.5} \cdot \rho_{aire}^{-1}}{T_{aire}^4 \cdot \rho_{aire}^{-0.7}} \approx U_o \cdot T_{aire}^{-3.5} \cdot \rho_{aire}^{-0.3} \quad (EC2.12)$$

### 2.3.2. EFECTO DE LA TEMPERATURA

#### EFECTO SOBRE EL LIFT-OFF

La temperatura tiene un efecto muy importante en la longitud del lift-off: al aumentar la temperatura, se nota una disminución significativo de la longitud del lift-off [Larsson 1999, Siebers 2001, Pickett 2002, Pickett 2004, Siebers 2004], y al acercarse el lift-off a la tobera, la cantidad de aire englobado antes del lift-off disminuye. Se han representado variaciones del lift-off en función de la temperatura en el Figura2.23 [Siebers 2004].

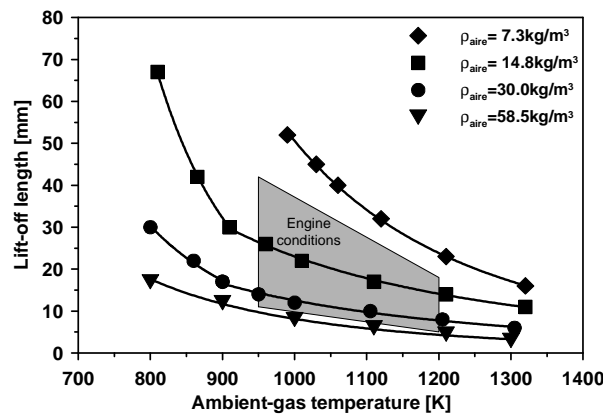


Figura2.23: Representación de la longitud del lift-off en función de la temperatura [Siebers 2004] con  $XO_2=21\%$ ,  $PCR=138 \text{ MPa}$  y  $\phi=180 \mu\text{m}$ . La región en gris representa la longitud del lift-off para condiciones convencionales de funcionamiento del motor diesel.

Siebers y Higgins explican que al aumentar la temperatura, se produce una aceleración de las reacciones químicas engendrando el acercamiento del lift-off a la tobera. También afirman que cuando la temperatura es baja, la longitud del lift-off no es tan sensible a un cambio en la variación de la temperatura.

Siebers et al. [Siebers 2001, Siebers 2002] estiman que el efecto de la temperatura sobre el lift-off se puede cuantificar con una potencia -3.74, es decir:

$$LOL \sim T_{aire}^{-3.74}$$

Este coeficiente es muy cercano al de la expresión de Peters:  $LOL \sim T_{aire}^{-3.5}$ . La pequeña diferencia debe ser debida a incertidumbres experimentales.

Otros autores como Musculus [Musculus 2003] y García [García 2004] también han cuantificado el efecto de la temperatura sobre la longitud del lift-off. Los valores se han resumido en la Tabla 2.3. Llama la atención el hecho de que en todos los casos el exponente para la temperatura es del orden de -3. Ese coeficiente de -3 indica la gran influencia que la temperatura puede tener sobre la longitud del lift-off.

#### **EFFECTO SOBRE EL HOLLÍN**

El efecto de la temperatura sobre la formación de hollín ha sido estudiado muy temprano por Yan y Borman [Yan 1988]. Estos autores han mostrado que al aumentar la temperatura, la formación de hollín era mayor y han encontrado muy interesante el hecho de que al aumentar la temperatura de la llama la tasa de formación de hollín era más importante que la de oxidación.

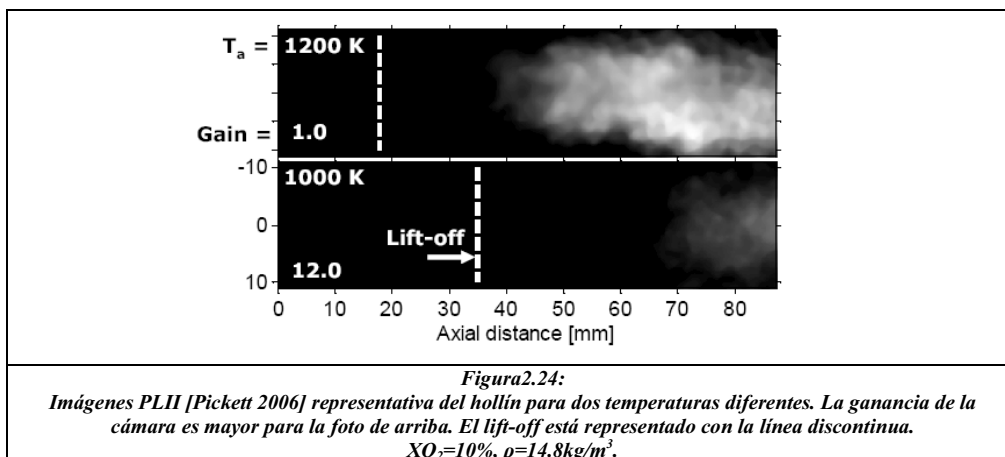
Afirman que la concentración de hollín aumenta al subir la temperatura, porque a mayor temperatura han visto en sus experimentos que la combustión tarda un poco más. Piensan que se debe a un fenómeno que ocurre en el proceso de inyección y más precisamente identifican un desfase de la inyección para temperaturas más altas. Afirman que este fenómeno puede ser debido a un efecto de expansión térmico.

Más tarde, Siebers y Higgins [Siebers 2001] relacionan la concentración de hollín directamente con la cantidad de aire englobada antes del lift-off.

Parten del hecho de que al aumentar la temperatura, disminuye la longitud del lift-off así que la cantidad de aire englobado antes del lift-off, y que eso provoca un aumento en la concentración de hollín. Al disminuir la cantidad de aire englobado, el dosado en el lift-off y en la zona de premezcla se hace más rico y se produce una cantidad de hollín más importante.

Sin embargo, como ya lo habían notado Yan y Borman en su estudio, afirman que para llamas de difusión diesel, la temperatura tiene un efecto muy pronunciado sobre la formación de hollín. El aumento de la temperatura ambiente produce un aumento en la temperatura **adiabática de llama** y en la temperatura de la zona de dosado rico favoreciendo la formación de hollín.

Además, Pickett y Siebers [Pickett 2004] demuestran que para temperaturas bajas, es posible que no haya formación de hollín ninguna. Para una temperatura de 850 K (densidad de  $14.8 \text{ kg/m}^3$ , presión de inyección de 138 MPa, diámetro del orificio de  $100 \mu\text{m}$  y concentración de oxígeno de 21%) calculan un dosado en el lift-off de 1.4 y no detectan ningún hollín. Esos resultados son coherentes con con anteriores ensayos en los cuales no había formación de hollín si el dosado era inferior al valor de 2 [Siebers 2000, Siebers 2001, Siebers 2002]. También en la Figura 2.24, se pueden observar 2 imágenes tomadas durante los trabajos de Pickett y Idicheria [Pickett 2006] en los cuales se acercan a las condiciones “cero-soot” al bajar la temperatura.



### 2.3.3. EFECTO DE LA DENSIDAD

#### EFECTO SOBRE EL LIFT-OFF

Los resultados en cuanto al efecto de la densidad ambiente muestran que si aumenta la densidad, simultáneamente la longitud del lift-off disminuye y la cantidad de aire englobado decrece también (Figuras 2.23, 2.25, 2.26 y 2.27).

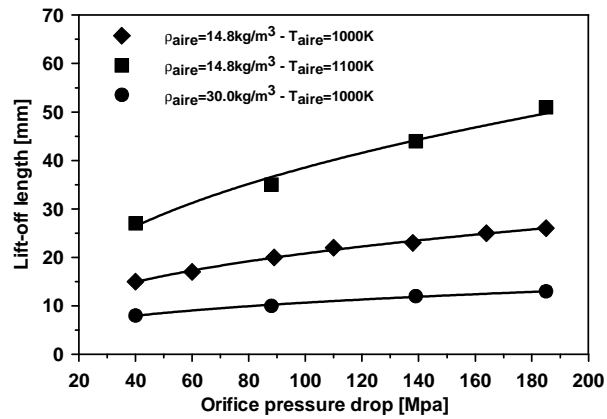


Figura 2.25: Representación la longitud del lift-off en función de la presión de inyección [Siebers 2004] con  $X_{O_2}=21\%$  y  $\varnothing=180 \mu\text{m}$ .

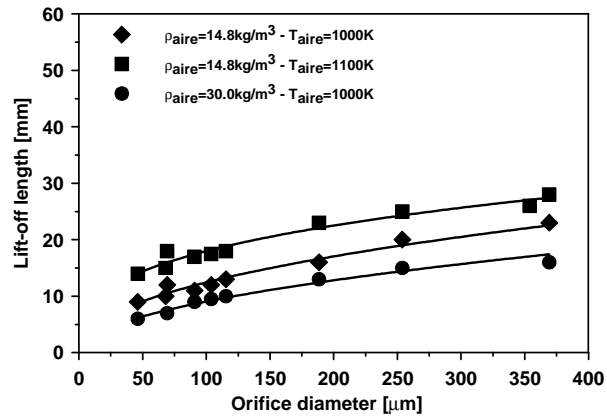


Figura 2.26: Representación de la longitud del lift-off en función del diámetro del orificio [Siebers 2004] con  $X_{O_2}=21\%$  y  $PCR=138 \text{ MPa}$ .



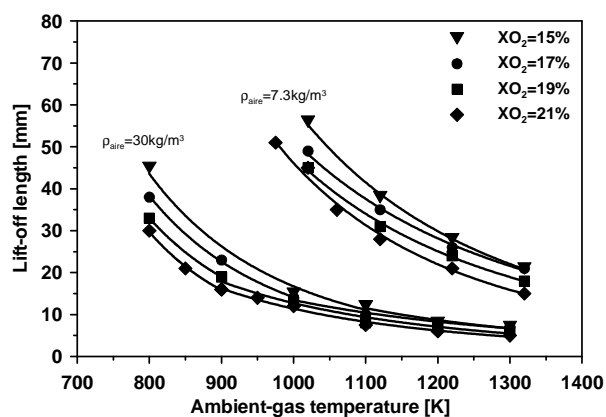


Figura 2.27: Representación de la longitud del lift-off en función de la temperatura [Siebers 2004] para diferentes concentraciones de oxígeno y densidades, con  $\varnothing=180 \mu\text{m}$  y  $PCR=138 \text{ MPa}$ .

Siebers y Higgins [Siebers 2001] han notado que el efecto de la densidad sobre el lift-off no es lineal sino que sigue la tendencia siguiente:  $LOL \sim \rho_{\text{aire}}^{-0.85}$ . En su estudio teórico, Peters había encontrado una tendencia del orden de  $\rho_{\text{aire}}^{-0.3}$ , tendencia muchísimo menos significativa. Así que los coeficientes teórico y experimental, esta vez no corresponden y el efecto de la densidad no se puede explicar de manera teórica. Siebers y Higgins piensan que se puede explicar esa diferencia de dos maneras:

- 1/ el impacto de las diferentes densidades del combustible y del aire sobre la mezcla del chorro.
- 2/ el estudio teórico ha sido realizado para chorros gaseosos turbulentos isotermos mientras que el diesel es un combustible que se evapora en condiciones de temperatura no isotermas.

Otros autores también han estudiado el efecto de la densidad en la longitud del lift-off y han encontrado tendencias como  $LOL \sim \rho_{\text{aire}}^{-1.38}$  [García 2004] y  $LOL \sim \rho_{\text{aire}}^{[0.6;-1.3]}$  [Musculus 2003]. Se puede observar que para esos resultados hay mucha variabilidad y que ninguno se acerca a la teoría (Tabla 2.3). La diferencia entre los resultados experimentales y la teoría podrían ser debido, como se ha comentado anteriormente, a las hipótesis de cálculo (chorros gaseosos).

Sin embargo se necesitan más estudios para aclarar la diferencia que existe entre los dos coeficientes.

**EFFECTO SOBRE EL HOLLÍN**

Al aumentar la densidad, la longitud del lift-off disminuye, la cantidad de aire englobado disminuye también, el dosado en el lift-off aumenta y tiene como consecuencia un aumento en la formación de hollín [Pickett 2004, Pastor 2005].

Pickett y Siebers demuestran que ocurre lo mismo que con la temperatura: al alcanzar una densidad suficientemente baja, el dosado en el lift-off es inferior a 2 y no se forma hollín en la llama.

También, se puede notar que al aumentar la densidad en el cilindro, la longitud de la llama disminuye lo que puede ser positivo ya que es posible que se reduzcan las interferencias con las paredes y que casi todo lo que se forma se puede oxidar.

**2.3.4. EFECTO DE LA PRESIÓN DE INYECCIÓN****EFFECTO SOBRE EL LIFT-OFF**

En sus varios estudios Siebers y Higgins [Siebers 2000, Siebers 2001, Siebers 2004] han notado que al aumentar la presión de inyección, la longitud del lift-off aumenta (Figura2.25).

En efecto, al aumentar la presión de inyección, la velocidad de salida del chorro se hace más importante y la zona inicial de combustión es empujada aguas abajo, lo que produce que la longitud del lift-off se alargue.

Siebers y Higgins en sus estudios han definido un parámetro representativo del aire englobado en el chorro, y demuestran que este parámetro aumenta linealmente con la velocidad de inyección. Eso indica que el aumento de la presión de inyección permite aportar más oxígeno a la combustión.

El hecho de que el efecto de la velocidad de inyección en el lift-off sea lineal (o proporcional a la raíz cuadrada de la presión de inyección), va totalmente en acuerdo con el estudio teórico de Peters.

Por su parte, García [García 2004] observa una tendencia bastante diferente, variando la longitud del lift-off con la raíz cuadrada de la velocidad de inyección (Tabla2.3). Se podría explicar esa diferencia comparando los rangos de medida de los diferentes autores: Siebers y Higgins cubren un rango de 400 a 1900 bar para la presión de inyección mientras que García ensayó con presiones inferiores a 1100 bars. Por lo tanto, podría ocurrir que este cambio de tendencia tuviese que ver con el hecho de trabajar con diferentes presiones de inyección.

### EFFECTO SOBRE EL HOLLÍN

Como ya se ha comentado anteriormente, al aumentar la presión de inyección, el lift-off aumenta; el aire englobado aumenta también y disminuye el dosado en el lift-off así como la formación de hollín si no hay choque contra las paredes o interacciones entre los chorros.

Varios investigadores [Pastor 2004, Pastor 2005] obtienen resultados para diferentes presiones de inyección que indican una clara tendencia a la reducción de la cantidad de hollín a medida que aumenta la presión de inyección.

Sin embargo, Pickett y Siebers, y Siebers y Pickett [Siebers 2002a, Pickett 2004] no sólo atribuyen la disminución de la cantidad de hollín a una mayor masa de aire englobada en el chorro, sino también a un **tiempo de residencia** que decrece.

Justifican la disminución del tiempo de residencia en primer lugar por el simple hecho de que el tiempo de residencia es inversamente proporcional a la presión de inyección. Y en un segundo lugar porque al aumentar la presión de inyección, la longitud de la llama se mantiene constante pero la longitud del lift-off aumenta; así que al aumentar la presión de inyección el tiempo de residencia disminuye, lo que contribuye a limitar la formación de hollín en la llama.

## 2.3.5. EFECTO DEL DIÁMETRO DE LA TOBERA

### EFFECTO SOBRE EL LIFT-OFF

Al disminuir el diámetro de la tobera, la longitud del lift-off disminuye (Figura 2.26). Sin embargo, el lift-off disminuye muy poco y la cantidad de aire englobada antes del lift-off es casi constante, pero de la misma manera disminuye un poco.

Este efecto ha sido cuantificado por Siebers y Higgins [Siebers 2001] y esos autores encuentran que el lift-off es proporcional al diámetro con  $\varnothing^{0.34}$ . En efecto, se puede ver que la influencia del diámetro de la tobera es mínimo en cuanto al lift-off, sin embargo no puede ser explicado por la teoría ya que en la expresión de Peters no aparece ninguna influencia del diámetro de la tobera. Se afirma que esa influencia podría ser causada por el efecto de la vaporización que no se tiene en cuenta en la expresión teórica que ha sido escrita para chorros gaseosos.

Un efecto similar ha sido despejado por García [García 2004] siendo proporcional el lift-off al diámetro con  $\varnothing^{0.12}$ . Ese parámetro de estudio muestra una influencia sobre la longitud del lift-off casi despreciable.

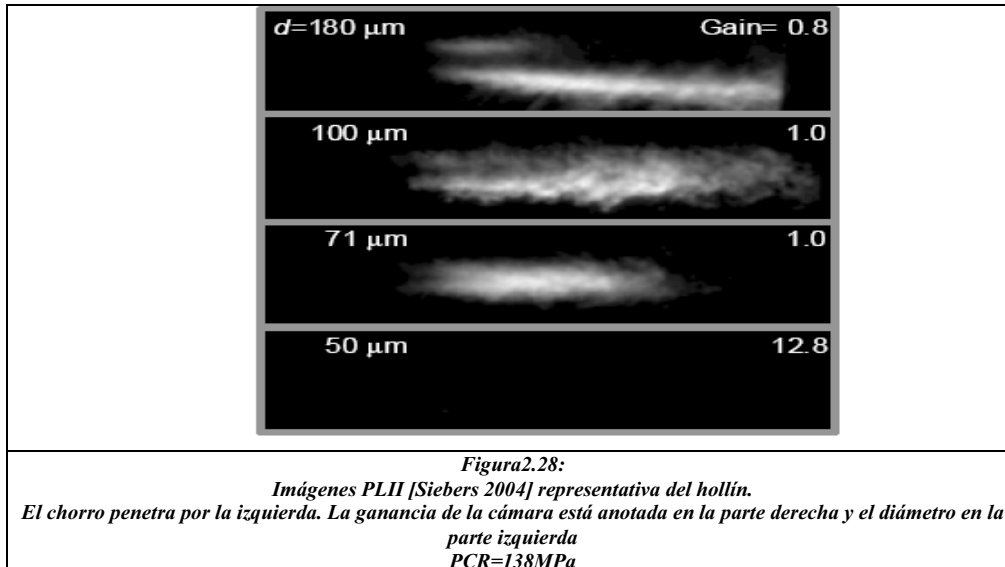
**EFEECTO SOBRE EL HOLLÍN**

En 1995, Wiartalla et al. [Wiartalla 1995] estudiaron el efecto del diámetro de la tobera sobre la formación de partículas. Concluyeron que un aumento en la presión de inyección combinado con un aumento en la duración de inyección debido a una reducción del diámetro de la tobera no tiene una tendencia muy clara en la formación de hollín. Sin embargo no han aislado bien cada parámetro y no han estudiado el efecto únicamente del diámetro de la tobera sino de varios parámetros combinados.

Si seguimos el razonamiento de Siebers y Higgins [Siebers 2001], al disminuir el diámetro de la tobera, la longitud del lift-off disminuye en pequeña proporción y la cantidad de aire englobada antes del lift-off es casi constante, pero de la misma manera disminuye un poco. Hay que ser conciente que la cantidad de combustible también disminuye al disminuir el diámetro de la tobera y esa cantidad de combustible decrece más rápidamente que el aire englobado. Este resultado provoca un aumento del porcentaje de aire estequiométrico y dosados pobres en el lift-off y en la zona de premezcla. Dicho de otra manera, no es la longitud del lift-off que depende del diámetro de la tobera sino la longitud de mezcla. Eso conduce a una disminución de la cantidad de hollín formado.

En varios estudios, investigadores [Pickett 2002, Siebers 2002a, Siebers 2004] demostraron que bajo ciertas condiciones en el cilindro, al bajar el diámetro de la tobera, la concentración de hollín disminuye hasta que para un diámetro de tobera de 50  $\mu\text{m}$  no se detecta hollín (Figura 2.28). Lo justifican analizando el dosado en el lift-off que para ese diámetro es inferior a 2.

Además, afirman que el **tiempo de residencia** también tiene un papel muy importante en esa disminución de hollín. En efecto, el tiempo de residencia disminuye de manera aproximadamente lineal con el diámetro de la tobera, lo que resulta en una formación de hollín más baja en la región de combustión del chorro. Sin embargo, el efecto del tiempo de residencia no se ha comprendido aún completamente, con lo que su estudio aún no ha concluido, ya que algunos aspectos tienen que ser investigados con mayor detalle.



## 2.3.6. EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE OXÍGENO

### EFECTO SOBRE EL LIFT-OFF

El efecto de la concentración de oxígeno en el aire en la cámara de combustión ha sido investigado por Siebers et al. [Siebers 2002, Siebers 2004] y luego por Idicheria y Pickett [Idicheria 2005] simulando la concentración de oxígeno y variando la concentración de oxígeno desde 21% (volumétrico) hasta 8%.

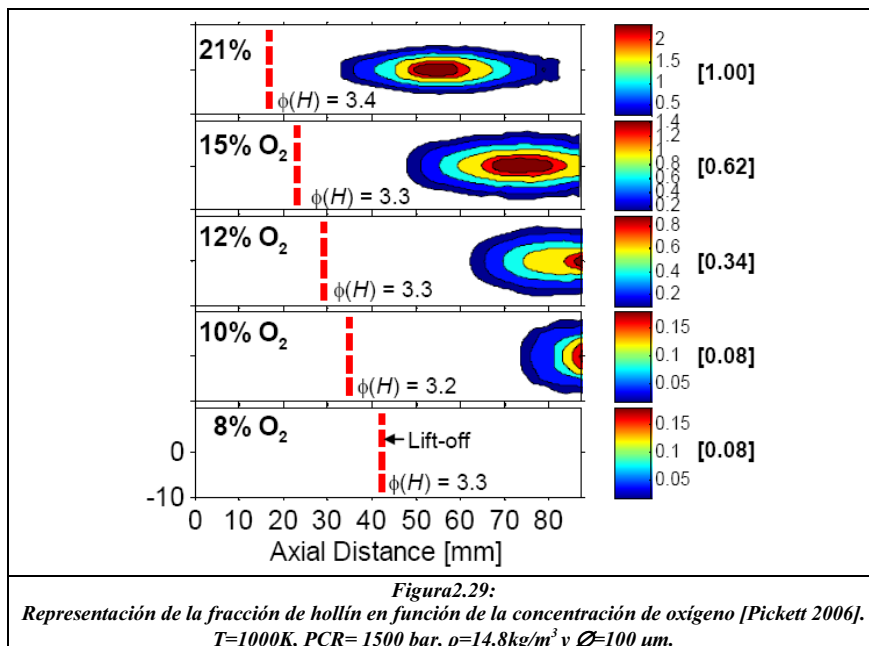
Constatan que al decrecer la concentración de oxígeno aumenta la longitud del lift-off (Figura 2.27).

Siebers et al. demuestran que la cantidad de oxígeno antes del lift-off sigue siendo la misma a pesar de que aumenta la longitud del lift-off al bajar la concentración de oxígeno.

Es decir que al bajar la concentración de oxígeno el dosado en el lift-off que esos autores calculan es siempre idéntico cualquiera que sean la concentración de oxígeno. No obstante, hay que tener en cuenta que para el cálculo del dosado en el lift-off esos autores no consideran efectos térmicos en esta zona, lo que puede influir en el resultado.

### EFEECTO SOBRE EL HOLLÍN

Los resultados de varios investigadores [Siebers 2002, Singh 2005, Pickett 2006, Musculus 2007] muestran que al bajar la concentración de oxígeno en la llama diesel, la longitud del lift-off aumenta y la concentración de hollín disminuye. Además, la zona de combustión y la de formación de hollín son empujadas aguas abajo y la llama se estira (Figura2.29). El hecho de bajar la concentración de oxígeno disminuye la tasa de combustión local y aumenta la longitud del chorro y el tiempo requerido para completar el proceso de combustión.



Además, al disminuir la concentración de oxígeno, la **temperatura adiabática** de llama disminuye [Pickett 2002] lo que conduce a una tasa de formación reducida del hollín. Pero al mismo tiempo el **tiempo de residencia** aumenta para la formación de hollín [Idicheria 2005], lo que permite una acumulación de hollín más importante. Según esos autores, cuando la concentración de oxígeno disminuye, la formación de hollín es una competición entre los dos procesos (disminución de la temperatura de llama y aumento del tiempo de residencia).

Además han estudiado la influencia de la temperatura y la densidad al disminuir la concentración de oxígeno:

- el hollín aumenta cuando la temperatura aumenta con cada nivel de concentración de oxígeno, pero el aumento es muchísimo más alto si la concentración de oxígeno es baja (10%) que si no lo es (21%).
- aumentar la densidad al variar la concentración de oxígeno también conduce a un aumento en la formación de hollín, sin embargo el fenómeno no es tan pronunciado como lo es para la temperatura.

Además, Pickett y Siebers [Pickett 2004a] han demostrado que si la concentración de oxígeno es suficientemente baja no se forma hollín.

		<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>	<b>d</b>
<b>TEORICO</b>	[Peters 2000]	-	1	-0.3	-3.5
<b>SIEBERS Y HIGGINS</b>	[Siebers 2001, Siebers 2002]	0.34	1	-0.85	-3.74
<b>MUSCULUS</b>	[Musculus 2003]	-	-	[-0.6;-1.3]	[-2.3;-3.3]
<b>GARCÍA</b>	[García 2004]	0.12	0.5	-1.38	-3.1

Tabla2.3: Cuantificación de diferentes parámetros sobre la longitud del lift-off a partir del análisis teórico realizado por Peters y a partir de varios estudios experimentales. Se supone que estas dependencias se pueden escribir de la forma

$$LOL = k \cdot \phi^a \cdot U_o^b \cdot \rho_{aire}^c \cdot T_{aire}^d$$

siendo:  $\phi$  el diámetro del orificio,  $U_o$  la velocidad de inyección,  $\rho_{aire}$  la densidad en la cámara de combustión y  $T_{aire}$  la temperatura en la cámara de combustión.





# **CAPÍTULO 3**

## **PLANTEAMIENTO DE LA TESIS**

### **Contenido**

---

<b>3.1. Síntesis del estudio bibliográfico.....</b>	<b>93</b>
<b>3.2. Objetivos de la tesis.....</b>	<b>97</b>

---



### **3.1. SÍNTESIS DEL ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO**

Como se ha visto a lo largo del capítulo anterior, la formación de hollín es un proceso complejo en el cual están involucrados tanto fenómenos físicos como químicos y que hoy en día no está aún completamente entendido.

Se piensa que el proceso de formación de hollín en condiciones uniformes empieza por la formación de núcleos a través de la colisión de los precursores. Una vez formados, los núcleos crecen poco a poco aumentando su superficie mediante reacciones como el crecimiento superficial, la coagulación y la aglomeración.

El proceso de formación de hollín en la llama diesel es más complejo porque las condiciones ya no son uniformes sino que existe una evolución temporal y espacial. Esa evolución está engendrada por las condiciones en la cámara variables, como la temperatura, la densidad o la concentración de especies debido al proceso de mezcla.

Es Dec [Dec 1997], en 1997, quien desarrolló un modelo conceptual de la llama en combustión por difusión. Realizó la descripción general de la estructura de la llama diesel cuasi-estacionaria para la cual precisó la manera de formarse del hollín: primero se forman los precursores a partir de la pirólisis del combustible en la parte premezclada de la llama de difusión diesel, justo después del lift-off; y luego, de la colisión de los precursores se forman los núcleos de hollín que van creciendo a lo largo de su recorrido dentro de la llama diesel, hasta alcanzar su tamaño máximo al acercarse al contorno estequiométrico.

El modelo conceptual de Dec ha sido también de gran ayuda para la interpretación de numerosos estudios experimentales. En efecto, el hollín ha dado lugar a varios trabajos de los cuales se ha analizado la influencia de las condiciones de funcionamiento del motor sobre su formación. En la mayoría de los trabajos, se pueden destacar 5 parámetros de funcionamiento principales que han sido objeto de estudio: la densidad y la temperatura en la cámara de combustión, la presión de inyección, el diámetro de la tobera y la concentración de oxígeno.

Los valores de cada condición de funcionamiento para la mayoría de los trabajos presentados en la parte del estudio bibliográfico se han anotado en la Tabla 3.1.

Se puede observar que esos estudios se han realizado para rangos de valores de los diferentes parámetros totalmente aceptables para el estudio de la llama diesel actual.

Artículos	$T_{adm}$ o $T_{cil}$ [K]	$\rho_{aire}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	PCR [MPa]	$\varnothing$ [ $\mu$ m]	$X_{O_2}$ %vol
Siebers 2001	800 a 1300	7.3 a 60	40 a 190	100 a 363	21
Siebers 2001a	800 a 1200	7.3 a 60	138	180	21 a 15
Larsson 1999	299 a 319	-	141 a 161	195 a 227	21
Siebers 2000	1000	14.8	40 a 185	100 y 246	21
Yan 1988	333 a 393	-	-	-	-
Pickett 2002	850 a 1200	14.8	138	50 a 180	21 a 10
Pastor 2004	-	30	70 a 130	115	21
Pickett 2004	850 a 1300	7.3 a 30	43 a 184	100	21
Siebers 2002	800 a 1300	7.3 a 60	40 a 180	100 y 180	21 a 15
Pastor 2005	353 / 780	25 a 34	70 a 130	115	21
Siebers 2002a	1000	14.8	40 a 190	50 y 180	21
Wiertalla 1995	823	-	20 a 30	150 a 270	21
Pickett 2005	1000	14.8	1500	100	21 a 5
Idicheria 2005	1000	14.8	1500	100	21 a 8

Tabla3.1: Resumen de las condiciones de funcionamiento del motor para diferentes estudios.

Sin embargo, si se quiere estudiar la formación de hollín con baja temperatura, harían falta más estudios con diámetros de tobera inferiores a 100  $\mu$ m y también con baja concentración de oxígeno, condiciones para las cuales se cree que se limitará la formación de hollín.

Las principales conclusiones en cuanto al efecto de los 5 parámetros de funcionamiento sobre la formación de hollín se han resumido en la Tabla3.2:

	CAMBIO EN LA VARIABLE	ENGLOBAMIENTO ANTES DEL LIFT-OFF	LONGITUD DEL LIFT-OFF	DOSADO EN EL LIFT-OFF	FORMACIÓN DE HOLLÍN
TEMPERATURA	↑	menor	↓	más rico	↑
DENSIDAD	↑	menor	↓	más rico	↑
PRESIÓN DE INYECCIÓN	↑	mayor	↑	más pobre	↓
DIÁMETRO DE LA TOBERA	↓	menor (no muy pronunciado)	↓ (no muy pronunciado)	más pobre	↓
CONCENTRACIÓN DE OXÍGENO	↓	idéntico	↑	idéntico	↓

Tabla3.2: Efecto de los diferentes parámetros de funcionamiento del motor sobre la formación de hollín.

Se puede observar que la formación de hollín y el dosado en el lift-off tienen una relación estrecha. La mayoría de los autores que han realizado estudios relacionados con el hollín, coinciden en decir que el dosado en el lift-off, que entre otras cosas depende de la longitud del lift-off, es uno de los parámetros más importantes para la formación de hollín. En efecto, parece ser que si la longitud del lift-off es pequeña, es decir si la distancia que permite englobar el aire que va a penetrar en el chorro es menor, el dosado a esa distancia aumenta. Al aumentar el dosado en el lift-off, aumenta también el dosado en la zona de premezcla en la llama de difusión y se forman más precursores, engendrando una cantidad de hollín mayor.

Así que hay que ser conscientes de que si se quiere estudiar de manera correcta la formación de hollín, es importante y necesario, no sólo caracterizar la formación de hollín presente en la llama de difusión, sino también determinar la longitud del lift-off y especialmente su dosado.

Varios métodos de visualización permiten cuantificar la concentración de hollín presente en la llama de difusión diesel. Los principales son: el método de los 2 colores, el método de la extinción de luz y también la técnica de incandescencia inducida por láser.

Para visualizar la longitud del lift-off, el mejor método es el de la visualización de la radiación natural de la llama en la longitud de onda de 310 nm. Dicha longitud de onda es una de las bandas de emisión de quimioluminiscencia más intensas del radical OH.

Así pues, para poder caracterizar la concentración de hollín presente en la llama de difusión y también determinar la longitud del lift-off, se pueden considerar dos métodos:

- 1/ si la llama de difusión es estable y repetitiva, se puede plantear medir una vez para caracterizar la concentración de hollín, y luego, otra vez para visualizar la longitud del lift-off.
- 2/ encontrar una estrategia de medida que permita medir los dos parámetros a la vez.

El primer método es difícilmente aplicable ya que la llama es muy poco repetitiva, es decir que en general hay bastante variación entre cada repetición de una llama de un mismo ensayo cualquiera que sean las condiciones de funcionamiento del motor. Este hecho complica la aplicación del primer método propuesto engendrando una dispersión difícil de cuantificar.

La aplicación del segundo método, también puede ser problemática para la utilización del método de la extinción de luz o el de la incandescencia inducida por láser. En efecto, el láser proveniente de uno de esos dos métodos puede perturbar la radiación emitida por la llama y falsear las medidas de la longitud

del lift-off. Sin embargo, se puede perfectamente utilizar a la vez el método de los 2 colores y el de quimioluminiscencia del radical OH visualizando la misma llama. Así no hay ni problemas de dispersión, ya que los datos se obtienen a partir de la misma llama, y tampoco hay problemas de interferencia debido al láser, ya que al igual que la quimioluminiscencia del radical OH, el método de los dos colores se basa en la radiación natural de la llama.

Así pues, parece que el método de los 2 colores es la técnica de caracterización de la concentración de hollín más adecuada para su aplicación simultánea con el método de visualización de la longitud del lift-off.

Sin embargo, el método de los 2 colores, tiene algunas limitaciones para la determinación de la concentración de hollín a baja temperatura, ya que los valores del factor KL y de la “temperatura 2 colores” que se obtienen en esas condiciones no son tan precisas.

Otra limitación del método (aunque esa limitación es válida para cualquier método de visualización que caracterice la concentración de hollín en la llama) es que el factor KL, parámetro representativo de la concentración de hollín, no tiene en cuenta la concentración de combustible no quemado disponible para engendrar ese hollín. En efecto parece interesante tener en cuenta un parámetro que relacione estos dos aspectos. De esta manera se podría cuantificar la formación de hollín de manera mucho más precisa.

### **3.2. OBJETIVOS DE LA TESIS**

El objetivo principal de ese trabajo es profundizar en el conocimiento y en la comprensión de la formación de hollín en una llama de difusión diesel en condición de combustión con baja temperatura provocada por una alta tasa de EGR (o baja concentración de oxígeno), para determinar cómo alcanzar las condiciones “cero-hollín”.

Para lograr el objetivo principal se han planteado tres objetivos particulares:

- Desarrollar una estrategia de análisis con un(os) parámetro(s) más adecuado(s) para la descripción del proceso de formación de hollín permitiendo una mejor cuantificación de este último. Se trata de entender cuales son los procesos involucrados en la formación de hollín y cuantificarlos teniendo en cuenta el proceso de mezcla. Además, se quiere considerar tanto el hollín formado como la proporción de combustible disponible para generar ese hollín.
- Desarrollar una configuración de medida para la caracterización del hollín basada en la medida de la radiación de la llama de difusión. Esa configuración permitiría caracterizar, de manera precisa, a la vez la concentración de hollín presente en la llama de difusión y la longitud del lift-off, en condiciones de combustión con baja (o alta) temperatura. Se tratará de desarrollar una nueva configuración de medida, muy similar a la del método de los 2 colores, pero que permita tener resultados con buena precisión para la cuantificación de la concentración de hollín para cualquier condición de combustión, es decir combustión con baja o alta temperatura.
- Aplicar estas dos estrategias a un estudio paramétrico con alta tasa de EGR (o baja concentración de oxígeno) y diámetros de toberas de inyección pequeños (inferior a 100  $\mu\text{m}$ ) con el fin de analizar su influencia en la formación de hollín y averiguar si, y a partir de cuando, se alcanzan las condiciones para las cuales se obtiene “cero-hollín” en condiciones de baja temperatura.





# CAPÍTULO 4

## METODOLOGÍA GENERAL

### Contenido

---

4.1. Caracterización del lift-off y del hollín.....	101
4.1.1. Caracterización del lift-off.....	101
4.1.2. Caracterización del hollín.....	102
4.2. Caracterización del proceso de mezcla .....	108
4.2.1. Teoría básica de los chorros gaseosos estacionarios.....	109
4.2.2. Chorro diesel.....	112
4.2.2.1. Chorro diesel reactivo virtual isotermo.....	113
4.2.2.2. Chorro diesel reactivo real no isotermo.....	115
4.3. Definición del parámetro $F_{SOOT}$ .....	120

---



En este capítulo se va a presentar la metodología utilizada para lograr los objetivos propuestos en el apartado anterior.

Respecto al objetivo principal, que es profundizar en el conocimiento y en la comprensión de la formación de hollín en una llama de difusión diesel cuasi-estacionaria, se ha visto en el estudio bibliográfico que es importante caracterizar tanto el lift-off como el hollín. Así pues, se introducirá en una primera parte la metodología empleada para caracterizar esos dos parámetros y se desarrollará esos dos métodos.

Además, pareció importante entender cuáles eran los procesos involucrados en la formación de hollín para cuantificarlo de manera correcta y entenderlo mejor. Como ya se ha visto en el estudio bibliográfico, esos parámetros son principalmente el dosado en el lift-off, la temperatura adiabática y el tiempo de residencia. Así que ha sido necesario, en una segunda parte, describir el proceso de mezcla en la llama diesel para conseguir correlacionar cada uno de los parámetros entre sí y obtener la información necesaria a la cuantificación de la formación de hollín.

Por último, y en una tercera parte, se definirá un nuevo parámetro de estudio llamado  $F_{\text{soot}}$  para obtener una mejor precisión en el análisis del proceso de formación de hollín.

## **4.1. CARACTERIZACIÓN DEL LIFT-OFF Y DEL HOLLÍN**

### **4.1.1. CARACTERIZACIÓN DEL LIFT-OFF**

Durante el estudio bibliográfico se destacó el hecho de que para poder caracterizar correctamente la formación de hollín no sólo hacía falta medir la concentración de hollín, sino también la longitud del lift-off.

La longitud del lift-off es un parámetro importante ya que a partir de ésta se puede determinar el dosado en el lift-off y averiguar la relación entre ese dosado, es decir la cantidad de precursores que se forman en la zona de premezcla, y la cantidad de hollín en la llama.

Como ya se ha comentado en el estudio bibliográfico, varios métodos de visualización han sido empleados para estudiar la longitud del lift-off, como por

ejemplo, la radiación visible del hollín o los radicales OH y CH. Tal como lo han demostrado Siebers y Higgins [Siebers 2001], es la radiación medida a 310 nm que proporciona mayor exactitud a la hora de determinar donde empieza la zona de combustión de la llama diesel.

La radiación de longitud de onda de 310 nm es una de las bandas de emisión de quimioluminiscencia más intensas del radical OH. Ese radical aparece en procesos de combustión de elevadas temperaturas.

La técnica experimental para la visualización de OH es sencilla, limitándose a la toma de imágenes de la radiación de la llama a la longitud de onda de 310 nm; solo hacen falta una cámara (con suficientemente sensibilidad para detectar los radicales OH) y un filtro de longitud de onda de 310 nm.

Es por su facilidad de aplicación y por el hecho de que es el mejor método para la determinación de la longitud del lift-off que se utilizará, en este estudio, la visualización de la quimioluminiscencia del OH.

#### **4.1.2. CARACTERIZACIÓN DEL HOLLÍN**

El objetivo principal de la presente tesis es profundizar en el conocimiento y en comprensión de la formación de hollín en una llama de difusión diesel cuasi-estacionaria de baja temperatura. Para lograr este objetivo, hace falta tener un método de caracterización del hollín fiable y adaptado al presente estudio.

Primero, hay que recordar que el hollín se forma poco a poco y va evolucionando a lo largo de su recorrido en la llama de combustión. En efecto, inicialmente se forman los precursores de hollín en la parte premezclada rica de la llama de difusión. Luego, la colisión de esos precursores engendra núcleos de hollín. Su tamaño es pequeño en la región próxima a la zona premezclada [Dec 1995] y va creciendo poco a poco al acercarse a la periferia de la llama hasta alcanzar su tamaño máximo cerca del contorno estequiométrico. Así que la mayor parte del hollín se encuentra en la periferia de la llama. Es también en esta zona en la que la temperatura es la más elevada, como lo muestra la Figura 4.1. Al ser la radiación proporcional a la temperatura [Yan 1988, Siebers 2001], es efectivamente en esta sección que la concentración de hollín será mayor.

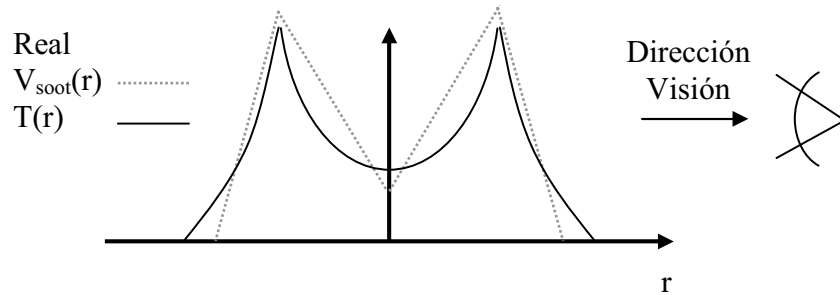


Figura 4.1: Esquema de la evolución real de la temperatura y fracción volumétrica de hollín a través del camino óptico de una llama de difusión.

Como ya se ha mencionado anteriormente, para una buena caracterización del proceso de formación de hollín, hace falta caracterizar a la vez la longitud del lift-off y la concentración de hollín. En efecto, la dispersión obtenida entre cada repetición de un mismo ensayo impone esa medida simultánea.

Existen 3 métodos de visualización principales que permiten cuantificar la concentración de hollín presente en la llama de difusión diesel: el método de los 2 colores, la técnica de extinción de luz y la de incandescencia inducida por láser. De estos 3 métodos, el más adecuado para la medida simultánea de la concentración de hollín y de la longitud del lift-off es el método de los 2 colores. En efecto, no hay rayo de luz láser (que habría en el caso de las otras 2 técnicas de medida) que perturbe la radiación emitida por la llama y que podría falsear las medidas de la longitud del lift-off.

El método de los 2 colores y la visualización de quimioluminiscencia del OH son dos métodos basados en la radiación de la llama así que son técnicas totalmente adecuadas para una aplicación simultánea, necesaria en el presente estudio.

Uno de los objetivos de la tesis es ver cómo varía la formación de hollín cuando varía la concentración de oxígeno. Sin embargo, a baja temperatura, es decir haciendo barridos de concentración de oxígeno, el método de los 2 colores tiene un inconveniente mayor que es de no ser fiable como se comentó en el estudio bibliográfico. En efecto, a baja temperatura, la medida de la temperatura es muy imprecisa y el error en la determinación del factor KL se amplifica.

Además a baja temperatura, un fenómeno de dispersión entre cada ciclo se puede añadir, amplificando el error sobre la medida de la temperatura de los 2 colores y la determinación del factor KL.

Así que para poder lograr los objetivos propuestos, se ha planteado una metodología de medida diferente a la de los 2 colores con el fin de limitar los errores de dispersión que engendra la temperatura en la determinación del factor KL.

Ese método que denominaremos método unicolor se basa principalmente en el método de los 2 colores: a partir de la radiación emitida por la llama y a partir de la temperatura se deduce el factor KL, proporcional a la concentración de hollín presente en la llama.

Sin embargo, en el método unicolor, la radiación del hollín  $I_{soot}$  se mide a partir de una sola longitud de onda  $\lambda$  y la temperatura de llama se determina de manera numérica, considerándola como la temperatura adiabática de llama  $T_{ad}$  que se define en función de la concentración de oxígeno (como se verá en 5.2.1.).

Así pues, el factor KL se deduce de la siguiente manera:

$$KL = \lambda^\alpha \cdot \ln \left[ 1 - \frac{\left( I_{soot} \cdot \lambda^5 \cdot \exp\left( \frac{C_2}{\lambda \cdot T_{llama}} - 1 \right) \right)}{C_1} \right] \quad (EC4.1)$$

Se puede elegir la temperatura adiabática como temperatura de llama porque las condiciones termodinámicas son constantes y solamente varía la concentración de oxígeno, y precisamente la temperatura adiabática se ha definido en función de esa concentración de oxígeno (apartado 5.2.1.).

Así que para cualquier variación de la concentración de oxígeno se puede determinar la temperatura adiabática. Incluso si el valor absoluto de la temperatura es incorrecto, su tendencia y valor relativo son correctos.

De esta manera, la determinación de las variaciones de la temperatura de llama durante el barrido de concentración de oxígeno es más fiable que utilizando la temperatura determinada con el método de los 2 colores, ya que se impone la temperatura de la llama en función de la concentración de oxígeno.

A continuación, para averiguar la variación que se introduciría en la determinación del factor KL por causa de un error en la temperatura adiabática se realizó un pequeño estudio.

Primero, se eligió un caso de referencia: se calculó la temperatura adiabática en función de la concentración de oxígeno (Figura4.2) como se presenta en el apartado 5.2.1 de la presente tesis para un ensayo típico del plan de trabajo que se propondrá más adelante en el apartado 5.3. Para ese punto las condiciones de funcionamiento son: temperatura en el cilindro en el PMS de 815K con una densidad de  $27.3 \text{ kg/m}^3$ .

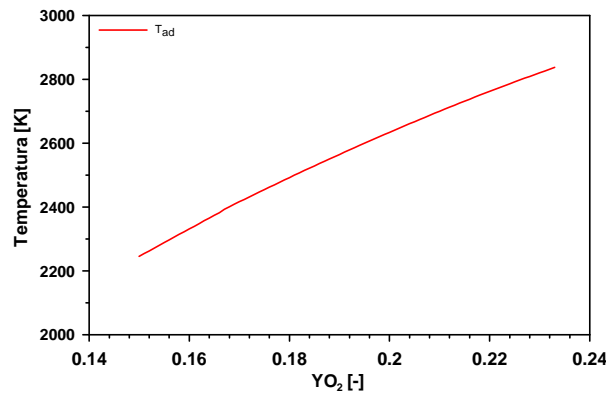


Figura4.2: Representación de la temperatura adiabática en función de la concentración de oxígeno másico. Se ha calculado a partir de lo expuesto en el apartado 5.2.1.

Luego, se consideró un factor KL constante en función de esa concentración de oxígeno (Figura4.3).

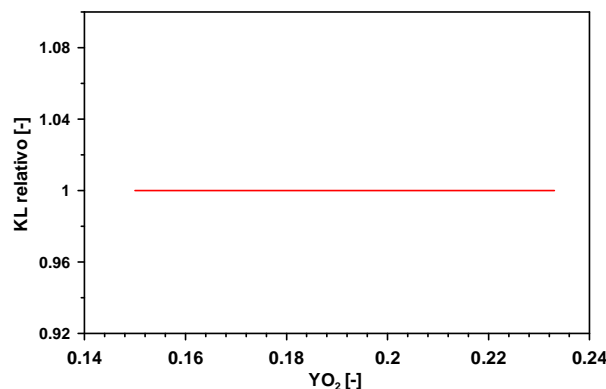


Figura4.3: Representación del factor KL impuesto en función de la concentración de oxígeno másico.

Y a partir de esos datos, de la temperatura adiabática y del factor KL en función de la concentración de oxígeno, se calculó la radiación del hollín  $I_{\text{soot}}$  en función de la concentración de oxígeno (Figura4.4).

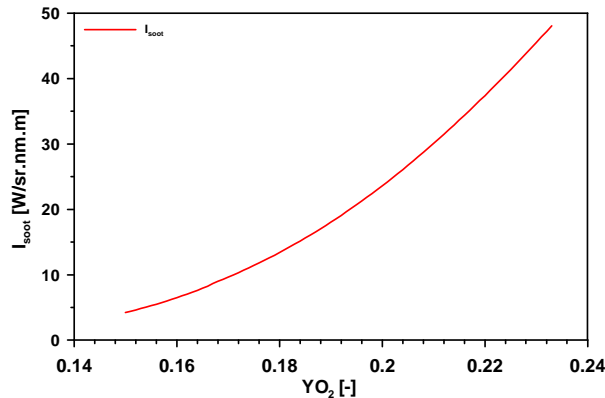


Figura4.4: Representación de la intensidad  $I_{\text{soot}}$  en función de la concentración de oxígeno másico. Se ha calculado a partir de la temperatura adiabática y del factor KL impuesto.

En un segundo tiempo, se analizó el efecto de un error en la temperatura adiabática y su consecuencia en el factor KL.

Para calcular la temperatura adiabática, primero hace falta calcular la temperatura de los gases sin quemar (apartado 5.2.1). El error que se puede cometer sobre el cálculo de la temperatura de los gases sin quemar es de  $\pm 50$  K. Un tal error engendra  $\pm 2\%$  de variación en la temperatura adiabática.

Así se consideraron 2 temperaturas adiabáticas de  $\pm 2\%$  de error respecto a la temperatura adiabática de referencia (Figura 4.5).

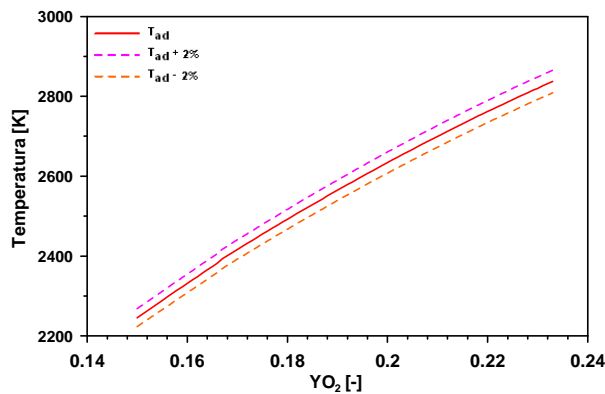


Figura4.5: Representación de las diferentes temperaturas adiabáticas en función de la concentración de oxígeno másico.



Y a partir de la misma radiación  $I_{\text{soot}}$  calculada anteriormente (Figura4.4) y de las temperaturas adiabáticas con  $\pm 2\%$  de error, se recalculó el factor KL correspondiente (Figura4.6).

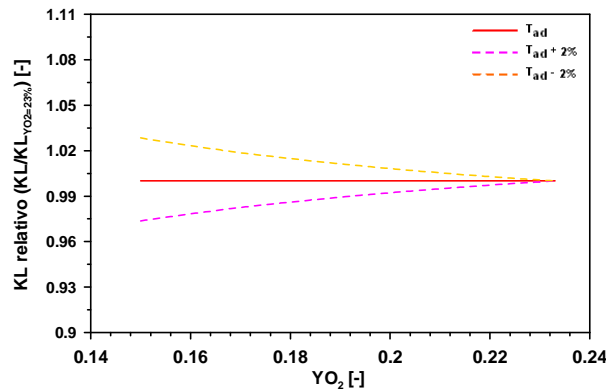


Figura4.6: Representación del factor KL relativo. Se ha calculado a partir de las temperaturas adiabáticas y de la intensidad  $I_{\text{soot}}$ .

Este procedimiento permite comparar el factor KL obtenido a partir de una misma radiación de la llama  $I_{\text{soot}}$  para un cálculo realizado con la temperatura adiabática y también considerando los errores que podrían ocurrir. Así se analiza el error engendrado por la temperatura adiabática.

Al analizar las gráficas, se puede observar que el error introducido por la variación de la temperatura adiabática es menor para alta concentración de oxígeno o altas temperaturas. En efecto, un error de 2% en la temperatura adiabática engendra un error en la estimación del factor KL casi nulo para 23% de oxígeno mientras que es de más o menos 3% para 15% de oxígeno. Así que para condiciones de baja temperatura se multiplica el error inicial por 3, lo que es considerable. Sin embargo, si se compara con la dispersión que se obtiene durante los ensayos (apartado 5.1.4.3) se puede considerar como insignificante.

También, hay que tener en cuenta que si se considera la temperatura de llama como temperatura adiabática, el valor del factor KL será mucho más pequeño que el calculado con la temperatura de los 2 colores para concentraciones de oxígeno bajas como lo han hecho otros investigadores. En efecto, se podrá verificar que los valores del factor KL son muy bajos en comparación con otros estudios. Sin embargo, si no se pueden analizar los resultados a nivel

cuantitativo, para comparaciones cualitativas los resultados son perfectamente aceptables.

## **4.2. CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE MEZCLA**

En esta parte se va a tratar de identificar y definir los diferentes procesos o parámetros involucrados en el proceso de formación de hollín, para luego averiguar de qué manera intervienen en su producción.

A partir de la caracterización del proceso de mezcla se van a expresar matemáticamente esos parámetros. Eso permitirá correlacionar cada uno de los parámetros y obtener así la información necesaria a la cuantificación de la formación de hollín.

Del estudio bibliográfico, se han identificado tres parámetros principales y relevantes en la formación de hollín:

- el dosado en el lift-off,
- el tiempo de residencia,
- y la temperatura de llama.

Estos 3 parámetros tienen una influencia conocida sobre la formación de hollín pero hacen falta más estudios para averiguar exactamente cuál es su efecto. Se sabe que si el tiempo de residencia aumenta el hollín tendrá más tiempo para formarse y acumularse en la llama de difusión [Pickett 2002, Siebers 2002a, Siebers 2004]. Además se sabe que un aumento en la temperatura de llama favorece la formación de hollín [Yan 1988]. El dosado en el lift-off es también un parámetro muy importante [Siebers 2001], y para estudiarlo es relevante conocer la longitud del lift-off. De esta manera se podrá analizar el englobamiento del aire antes del lift-off y calcular el dosado en el lift-off a partir de la caracterización del proceso de mezcla que se presenta a continuación.

A la hora de estudiar el comportamiento del chorro diesel es práctica habitual asemejar el comportamiento de este chorro, compuesto por un número elevado de pequeñas gotas que rápidamente se evaporan, al de un chorro gaseoso. Esta hipótesis hace que el problema se simplifique considerablemente, y está justificada ya que con la tecnología disponible actualmente, los chorros diesel se inyectan a presiones elevadas en un ambiente de alta densidad a través de orificios pequeños de las toberas de inyección. En esas condiciones, la atomización y la evaporación de las gotas se producen muy rápidamente, con lo que la similitud entre un chorro diesel y gaseoso es muy grande.

Así que, para entender mejor lo que ocurre en una llama de combustión por difusión diesel cuasi-estacionaria, es conveniente explicar primero la teoría básica de los chorros gaseosos estacionarios. Luego se va a introducir el chorro diesel. En una primera parte, se hará un estudio totalmente virtual presentando el chorro diesel reactivo isoterma. Eso permitirá luego entender mejor lo que ocurre en el caso del chorro diesel reactivo real no isoterma.

### 4.2.1. TEORÍA BÁSICA DE LOS CHORROS GASEOSOS ESTACIONARIOS

En el planteamiento propuesto por Spalding [Spalding 1979], se considera un chorro axisimétrico generado por un gas inyectado a través de un orificio en un ambiente con un gas en reposo (aire). Se estudia por tanto un chorro gaseoso, isotérmico, incompresible, laminar o turbulento. La mezcla se hace sin reacciones químicas (es decir que no hay combustión).

Se puede dividir el chorro en dos regiones (Figura4.7):

1-región inicial: esta región se extiende desde la salida del inyector hasta el final de la longitud intacta. La longitud intacta corresponde a una zona en la que el combustible inyectado no se ha mezclado con el gas ambiental, y se esquematiza con un cono cuya base se confunde con el orificio de salida y cuyo vértice se sitúa en el eje del chorro. La longitud intacta se define como la distancia en la que la velocidad del chorro en el eje se mantiene constante e igual a la velocidad de salida del inyector  $U_0$ .

2-región principal: en esta región se mezclan los dos gases, incluso en el eje del chorro. Debido al proceso de mezcla, la velocidad en el eje ya no es constante y va disminuyendo.

Las hipótesis planteadas por Spalding son las siguientes:

- la presión es uniforme en todo el recinto.
- las temperaturas del combustible y del gas ambiental son iguales. Así que no se considera transporte de calor.
- los coeficientes de difusión y de cantidad de movimiento son iguales (el número adimensional de Schmidt,  $Sc$ , que caracteriza la difusión de momento frente a la difusión de masa es igual a la unidad).
- debido a la alta velocidad axial, los fenómenos difusivos son despreciables frente a los convectivos en la dirección del eje del chorro. En la dirección radial no se desprecian los fenómenos difusivos frente a

los convectivos al ser la componente de la velocidad baja en esta dirección.

- las propiedades de mezcla (densidad, viscosidad...) son uniformes en el recinto.

Partiendo de esas hipótesis, se resuelven las ecuaciones de continuidad, conservación de la cantidad de movimiento en dirección axial y conservación de la especie de combustible. Con ello, se obtiene una serie de ecuaciones que se asume que siguen siendo válidas para la resolución del chorro gaseoso estacionario turbulento con la introducción de los coeficientes de la viscosidad cinemática y difusividad másica efectivos.

Del desarrollo teórico de [Desantes 2006], la penetración de un elemento de combustible  $x$  se puede escribir con la expresión siguiente:

$$x = K \cdot \phi_0^{1/2} \cdot \left( \frac{\rho_{fuel}}{\rho_{aire}} \right)^{1/4} \cdot U_0^{1/2} \cdot t^{1/2} \quad (EC4.2)$$

siendo

$K$ , un coeficiente de proporcionalidad,

$U_0$ , la velocidad de salida del orificio del combustible,

$\phi_0$ , el diámetro geométrico,

$\rho_{fuel}$ , densidad del combustible,

$\rho_{aire}$ , densidad del aire,

$t$ , tiempo que invierte un elemento para alcanzar la posición  $x$ .

A partir de esta expresión, se pueden deducir la velocidad de un elemento de combustible:

$$u = \frac{dx}{dt} = \frac{1}{2} \cdot K \cdot \phi_0^{1/2} \cdot \left( \frac{\rho_{fuel}}{\rho_{aire}} \right)^{1/4} \cdot U_0^{1/2} \cdot t^{-1/2} \quad (EC4.3)$$

Además, la conservación de la cantidad de movimiento para un elemento se puede escribir:

$$\frac{m_{total}}{m_{fuel}} = \frac{U_0}{u} \quad (EC4.4)$$

Con  $m_{total}$  siendo la masa total (combustible + aire) asociada a un elemento de combustible.

Esta ecuación se puede reescribir de la forma siguiente:

$$m_{total} = \frac{U_0}{u} \cdot m_{fuel} \quad (EC4.5)$$

Y derivando esta expresión EC4.5 y reemplazando  $u$  con su expresión EC4.3, se obtiene la expresión del proceso de mezcla para un elemento de combustible en la dirección axial:

$$\frac{dm_{total}}{dt} = 2 \cdot K^{-2} \cdot m_{fuel} \cdot C_{fuel} \cdot U_0 \cdot \phi_0^{-1} \cdot \left( \frac{\rho_{fuel}}{\rho_{aire}} \right)^{-1/2} \quad (EC4.6)$$

También, se puede obtener la expresión de la concentración másica de combustible inyectada,  $C_{fuel}$ , y la expresión del dosado relativo,  $Fr$ :

$$C_{fuel} = \frac{m_{fuel}}{m_{total}} = \frac{1}{2} \cdot K^2 \cdot \phi_0 \cdot \left( \frac{\rho_{fuel}}{\rho_{aire}} \right)^{1/2} \cdot x^{-1} \quad (EC4.7)$$

$$Fr = 3.33 \cdot \frac{m_{fuel}}{m_{O_2}} = 3.33 \cdot \frac{C_{fuel}}{(1 - C_{fuel}) \cdot YO_{2\_cil}} \quad (EC4.8)$$

el valor 3.33 representa el ratio entre la masa de combustible  $m_{fuel}$  y la masa de oxígeno  $m_{O_2}$  en condiciones estequiométricas.  $YO_{2\_cil}$  es la concentración másica de oxígeno presente en el cilindro.

Como ya se ha comentado anteriormente, en la región inicial, la velocidad del chorro en el eje se mantiene constante e igual a la velocidad de salida del inyector  $U_0$ . Sin embargo en la región principal, la velocidad del chorro en el eje ya no es constante y va disminuyendo proporcionalmente a la inversa de la distancia recogida en el eje del chorro [Correas 1998] (Figura4.7). La

concentración másica de combustible del chorro en el eje también es inversamente proporcional a la distancia al inyector, teniendo exactamente la misma tendencia que la de la velocidad [Correas 1998].

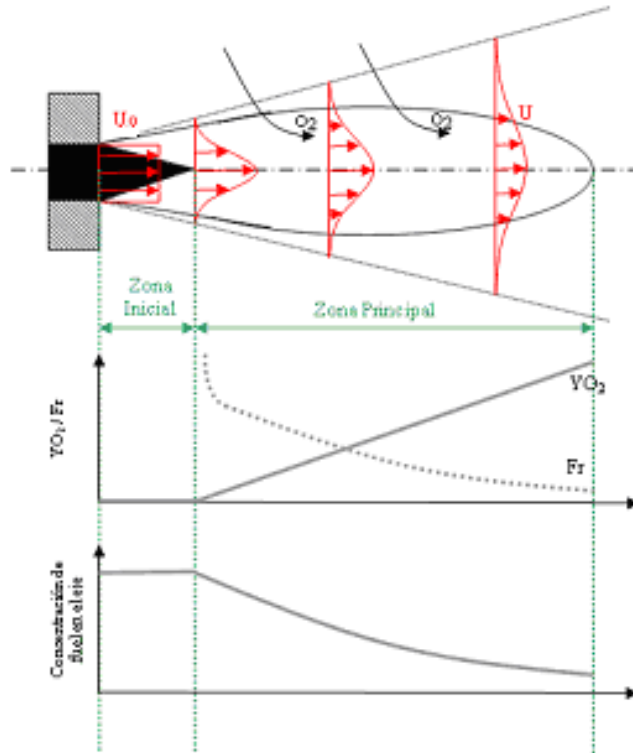


Figura4.7: Representación de un chorro gaseoso estacionario y sus perfiles adimensionales en el eje.

### 4.2.2. CHORRO DIESEL

Al considerar un chorro diesel ya no se considera un gas inyectado a través de un orificio en un ambiente con un gas en reposo (aire), sino que se trata de un líquido inyectado a través de un orificio en un ambiente con aire.

El chorro diesel se puede dividir en tres regiones (Figura4.8):

1-región inicial: esta región es la misma que para el chorro gaseoso estacionario. Se extiende desde la salida del inyector hasta el final de la longitud intacta, pero se compone exclusivamente de combustible líquido.

2-región de evaporación: en esta región el combustible inyectado se rompe en una multitud de gotitas que van calentándose bajo el efecto de la temperatura, lo que provoca su evaporación. La longitud líquida de evaporación es la longitud en la cual todas las gotas de combustible se han evaporado.

3- región principal: una vez que las gotas de combustible líquidas se han evaporado, el chorro se compone de dos gases: el combustible evaporado y el aire. Esa configuración es idéntica a la de los chorros gaseosos.

El comportamiento del chorro diesel en la zona principal es el mismo que el comportamiento de un chorro gaseoso estacionario, por lo tanto se pueden aplicar las mismas ecuaciones de mezcla.

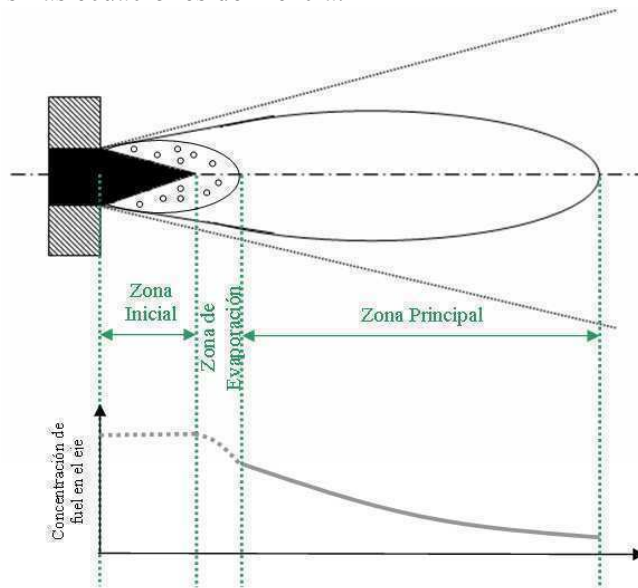


Figura4.8: Representación de un chorro diesel y su perfil adimensional en el eje.

#### 4.2.2.1. CHORRO DIESEL REACTIVO VIRTUAL ISOTERMO

El chorro diesel presentado en ese apartado es reactivo así que la mezcla se hace con reacciones químicas y se considera la combustión. Sin embargo, en este

apartado, se hará un estudio totalmente virtual en el cual no hay liberación de calor. Se trata de una reacción isoterma: tanto los reactivos como los productos están a la misma temperatura. El resultado de esa reacción es simplemente la transformación de las sustancias existentes.

El chorro diesel reactivo ya no se compone únicamente de especie combustible y aire, sino que se debe considerar combustible, aire (compuesto por una especie oxidante, oxígeno, y otra inerte, nitrógeno) y productos de la reacción (dióxido de carbono  $\text{CO}_2$  y agua  $\text{H}_2\text{O}$ ).

El proceso de combustión por difusión se produce en condiciones estequiométricas en términos de oxígeno y combustible [Faeth 1983, William 1976]. En la zona del chorro encerrada por este frente de llama únicamente habrá combustible, productos de reacción y especie inerte, y en el exterior de la misma habrá productos de la combustión, oxígeno y especie inerte. Hay que insistir en el hecho de que, en esa configuración, **no hay oxígeno dentro del chorro** (en este modelo simplificado).

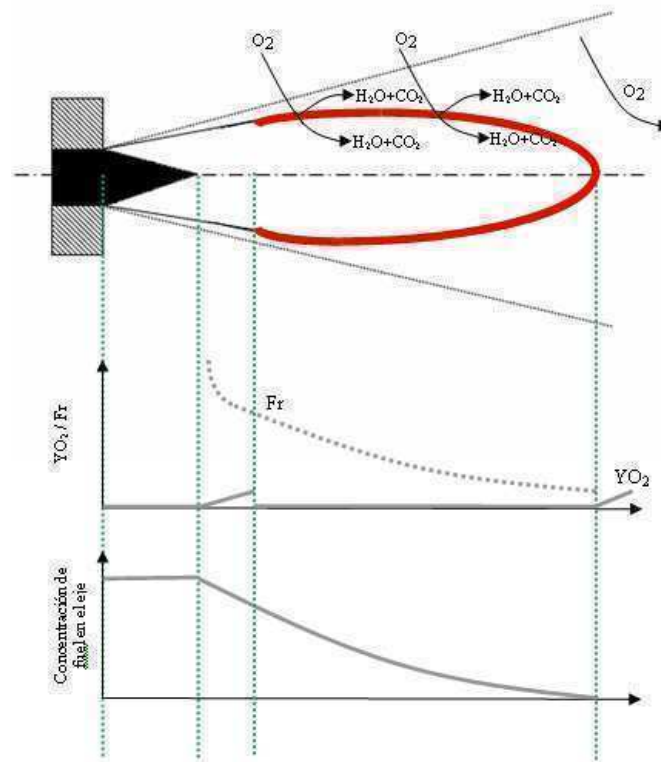


Figura4.9: Representación de un chorro diesel reactivo virtual isoterma y sus perfiles adimensionales en el eje.



Además, debido a los fenómenos de difusión, la concentración de combustible  $Y_{fuel}$  será nula al alcanzar el frente de llama (Figura 4.9). La concentración  $Y_{fuel}$  real es diferente de la concentración de combustible  $C_{fuel}$  del chorro no reactivo. En efecto, el combustible va a sufrir ese fenómeno de difusión y se va a quemar poco a poco a lo largo del recorrido en la llama. El combustible se inyecta con una concentración inicial; cuando el paquete ha englobado una cantidad de aire suficiente para que una parte pueda alcanzar las condiciones estequiométricas, se quema la masa de fuel correspondiente. Así pues, cuando llegue al frente de llama, casi no quedará combustible que quemar.

La nueva expresión para la concentración de combustible es la siguiente:

$$Y_{fuel} = C_{fuel} \cdot \left(1 - \frac{1}{Fr}\right) \quad (EC4.9)$$

#### 4.2.2.2. CHORRO DIESEL REACTIVO REAL NO ISOTERMO

En [Arrègle 2006] se puede encontrar una expresión para el proceso de mezcla en un chorro reactivo no isoterma muy similar a la expresión EC4.6:

$$\frac{dm_{total}}{dt} = \frac{K_{mix}}{K_{tray}} \cdot m_{fuel} \cdot C_{fuel} \cdot U_0 \cdot \phi_0^{-1} \cdot \left(\frac{\rho_{fuel}}{\rho_{aire}}\right)^{-1/2} \cdot YO_{2\_cil}^{-3/2} \quad (EC4.10)$$

Comparando las ecuaciones EC4.10 y EC4.6, se deduce que:

$$K = \sqrt{2 \cdot \frac{K_{tray}}{K_{mix}} \cdot YO_{2\_cil}^{3/2}} \quad (EC4.11)$$

### **Introducción del término $K_{trav}$**

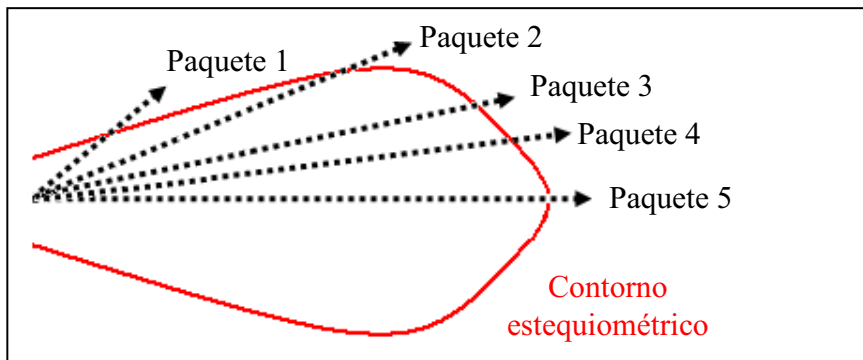
En la ecuación del proceso de mezcla, se consideran elementos de combustible, lo que permite tener una buena precisión en la descripción del proceso de mezcla; la masa total de fuel inyectada se compone de varias partes que tienen el mismo incremento de tiempo pero una masa diferente.

Además cada elemento de combustible se ha dividido en 5 paquetes (o sub-elementos) con diferentes trayectorias, representadas en la Figura 4.10.

En su trabajo, García [García 2004] determinó que cada elemento sigue una trayectoria diferente antes de llegar a la superficie estequiométrica. Los elementos de combustible salen por el orificio y algunos llegan a la iso-superficie estequiométrica mucho más cerca del origen del chorro que otros. Todos siguen trayectorias prácticamente rectilíneas, con evolución química y tiempos para alcanzar la superficie estequiométrica diferentes según su trayectoria.

Discretizar los elementos de combustible en diferentes trayectorias permite seguir “la historia” de cada uno en cuanto a su composición local y así hacer un seguimiento de la especie combustible.

Así pues, se introduce en la expresión del proceso de mezcla una corrección introduciendo el término de paquete teniendo en cuenta el término  $K_{trav}$ . Los valores para cada trayectoria están anotados en la Tabla 4.1.



*Figura 4.10: Representación de las 5 trayectorias de un elemento de combustible inyectado en un instante  $i$ .*

<b>K<sub>tray1</sub></b>	<b>0.319</b>
<b>K<sub>tray2</sub></b>	<b>0.668</b>
<b>K<sub>tray3</sub></b>	<b>1.000</b>
<b>K<sub>tray4</sub></b>	<b>1.397</b>
<b>K<sub>tray5</sub></b>	<b>2.070</b>

Tabla4.1: Tabla recapitulativa de los valores del coeficiente  $K_{tray}$  [Arrègle 2006].

### Introducción del término $K_{mix}$

Según el trabajo de Arrègle et al. [Arrègle 2006], para ajustar correctamente el proceso de mezcla, hay que tener en cuenta el coeficiente  $K_{mix}$ , constante del proceso de mezcla. Cuando más grande es el coeficiente  $K_{mix}$ , mejor se mezclan el combustible y el aire. Este coeficiente está relacionado con las características de la tobera y de la cámara de combustión, y tiene que ser adaptado cuando se modifica la configuración del motor.

En condiciones cuasi-estacionarias, una manera de cuantificar la constante  $K_{mix}$  es conocer la longitud de la llama. Se calcula a partir de las expresiones EC4.7 y EC4.11 y así se puede caracterizar el proceso de mezcla en condiciones reactivas reales no isotermas.

### Introducción del termino $YO_2$

Al considerar un chorro diesel reactivo no isoterma, las condiciones de temperatura cambian: la temperatura del aire aumenta, su densidad disminuye y la llama se modifica. Este fenómeno de reacción no isoterma va a provocar la dilatación del chorro (Figura4.11).

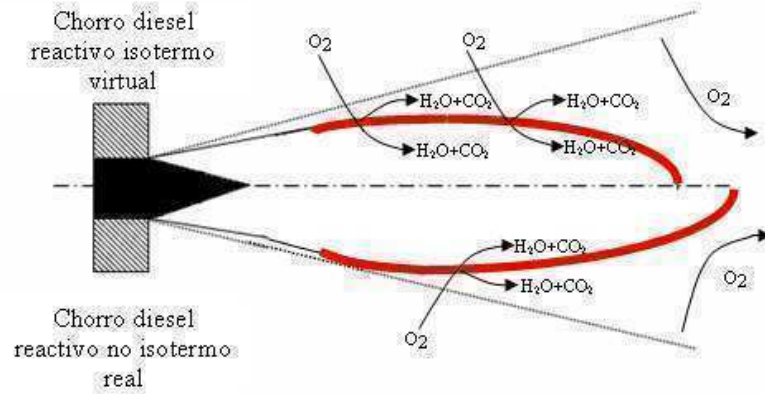


Figura 4.11: Representación de un chorro diesel reactivo no isotermo.

En efecto, experimentos [Ricou 1961, Arrègle 2003] demuestran que hay un efecto de reducción del aire englobado debido a efectos térmicos o a la liberación de calor. Ese efecto de reducción del aire englobado es proporcional al ratio entre la temperatura de los gases sin quemar y la temperatura de los gases quemados [Arrègle 2006]. Asumiendo que la temperatura de los gases quemados es una función directa de la concentración de oxígeno, el efecto de reducción del englobamiento del aire se puede observar con el término  $YO_{2\_cil}^{-3/2}$  [Fenolosa 2003, Arrègle 2006].

A partir de la expresión de K (EC4.11), a continuación se expresan los parámetros necesarios a la realización de este estudio:

Expresión de la posición de un elemento de combustible:

$$x = \sqrt{2 \cdot \frac{K_{tray}}{K_{mix}} \cdot YO_{2\_cil}^{3/2} \cdot \phi_0^{1/2} \cdot \left( \frac{\rho_{fuel}}{\rho_{aire}} \right)^{1/4}} \cdot U_0^{1/2} \cdot t^{1/2} \quad (EC4.12)$$

Expresión de la velocidad de un elemento de combustible:

$$u = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{K_{tray}}{K_{mix}} \cdot YO_{2\_cil}^{3/2} \cdot \phi_0^{1/2} \cdot \left( \frac{\rho_{fuel}}{\rho_{aire}} \right)^{1/4}} \cdot U_0^{1/2} \cdot t^{-1/2} \quad (EC4.13)$$

Expresión de la fracción másica de combustible:

$$C_{fuel} = \left[ \frac{K_{tray} \cdot YO_{2\_cil}^{3/2}}{K_{mix}} \right] \cdot \phi_0 \cdot \left( \frac{\rho_{fuel}}{\rho_{aire}} \right)^{1/2} \cdot x^{-1} \quad (EC4.14)$$

Expresión del tiempo de residencia:

$$t_{res} = \frac{L_{llama}^2}{2 \cdot \frac{K_{tray} \cdot YO_{2\_cil}^{3/2}}{K_{mix}} \cdot \phi_0 \cdot \left( \frac{\rho_{fuel}}{\rho_{aire}} \right)^{1/2} \cdot U_0} - \frac{LOL^2}{2 \cdot \frac{K_{tray} \cdot YO_{2\_cil}^{3/2}}{K_{mix}} \cdot \phi_0 \cdot \left( \frac{\rho_{fuel}}{\rho_{aire}} \right)^{1/2} \cdot U_0} \quad (EC4.15)$$

Expresión del dosado en el lift-off:

$$FrLO = 3.33 \cdot \frac{\frac{K_{tray} \cdot YO_{2\_cil}^{1/2}}{K_{mix}} \cdot \phi_0 \cdot \left( \frac{\rho_{fuel}}{\rho_{aire}} \right)^{1/2} \cdot LOL^{-1}}{\left( 1 - \frac{K_{tray} \cdot YO_{2\_cil}^{3/2}}{K_{mix}} \cdot \phi_0 \cdot \left( \frac{\rho_{fuel}}{\rho_{aire}} \right)^{1/2} \cdot LOL^{-1} \right)} \quad (EC4.16)$$

Se puede observar que el dosado en el lift-off depende del sub-elemento (ya que depende de  $K_{tray}$ ); en efecto no es uniforme. Algunos sub-elementos llegan a la iso-superficie estequiométrica más cerca del origen del chorro que otros. Los que se queman antes tendrán un dosado más pequeño. Así por ejemplo  $FrLO1 < FrLO5$  (siendo  $FrLO1$  el dosado en el lift-off del sub-elemento 1 y siendo  $FrLO5$  el dosado en el lift-off del sub-elemento 5).

Así por ejemplo, la expresión de estos 2 términos es la siguiente:

$$FrLO_1 = 3.33 \cdot \frac{\frac{K_{tray1} \cdot YO_{2\_cil}^{1/2} \cdot \phi_0 \cdot \left(\frac{\rho_{fuel}}{\rho_{aire}}\right)^{1/2} \cdot LOL^{-1}}{K_{mix}}}{\left(1 - \frac{K_{tray1} \cdot YO_{2\_cil}^{3/2} \cdot \phi_0 \cdot \left(\frac{\rho_{fuel}}{\rho_{aire}}\right)^{1/2} \cdot LOL^{-1}}{K_{mix}}\right)} \quad (EC4.17)$$

y

$$FrLO_5 = 3.33 \cdot \frac{\frac{K_{tray5} \cdot YO_{2\_cil}^{1/2} \cdot \phi_0 \cdot \left(\frac{\rho_{fuel}}{\rho_{aire}}\right)^{1/2} \cdot LOL^{-1}}{K_{mix}}}{\left(1 - \frac{K_{tray5} \cdot YO_{2\_cil}^{3/2} \cdot \phi_0 \cdot \left(\frac{\rho_{fuel}}{\rho_{aire}}\right)^{1/2} \cdot LOL^{-1}}{K_{mix}}\right)} \quad (EC4.18)$$

### **4.3. DEFINICIÓN DEL PARÁMETRO $F_{SOOT}$**

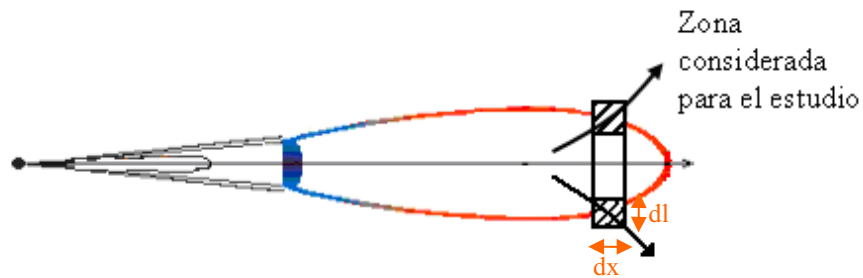
El factor KL es un parámetro muy común para definir la concentración de hollín presente en la llama. Pero para describir mejor el proceso de formación de hollín sería interesante definir un parámetro que relacione el hollín formado con la cantidad de combustible disponible para generar ese hollín. Con este objetivo se ha definido un nuevo parámetro llamado  $F_{SOOT}$ .  $F_{SOOT}$  es un parámetro que va a tener en cuenta cuánto hollín está presente respecto a cuánto fuel no quemado está presente. Se puede definir de la manera siguiente:

$$F_{soot} = \frac{m_{hollin}}{m_{fuel}} \quad (EC4.19)$$

Para deducir  $F_{SOOT}$  hace falta determinar la masa de combustible no quemado,  $m_{fuel}$ , y la masa de hollín,  $m_{hollin}$ , presente en la llama. Por lo tanto es necesario definir una sección de llama (en un momento dado) para poder calcular esos dos parámetros:

1/ dado que la mayor parte del hollín se encuentra en la periferia de la llama, la zona considerada para el estudio se va a situar en el contorno estequiométrico de la llama de difusión.

Así se va a definir una sección de llama de ancho  $dx$  y de espesor  $dl$ . Se pueden visualizar esos dos parámetros en la Figura 4.12.



*Figura 4.12: Representación de la sección considerada en la llama de difusión para el estudio realizado.*

2/ sólo se puede relacionar la masa de combustible no quemado del paquete 5 con la formación de hollín, una vez que se han quemado completamente los otros 4 paquetes.

En efecto, debido al fuerte proceso de difusión de un chorro reactivo, todos los paquetes queman de manera simultánea (Figura 4.13). El más rápido en acabar de quemar es el paquete más exterior, el que tiene el dosado en el lift-off más pequeño. El último en quemar es el paquete axial, el que tiene el dosado en el lift-off más grande. En zonas de la llama donde varios paquetes queman a la vez, el hollín presente viene de estos diferentes paquetes. Por lo tanto, ese hollín se ha formado a partir de precursores formados con diferentes dosados. Esto complica sobremanera el análisis y la correlación del dosado en el lift-off y la formación de hollín.

En la zona final de la llama, donde solamente queda fuel no quemado del paquete axial (el paquete 5) se puede relacionar el dosado en el lift-off y el hollín formado (Figura 4.14).

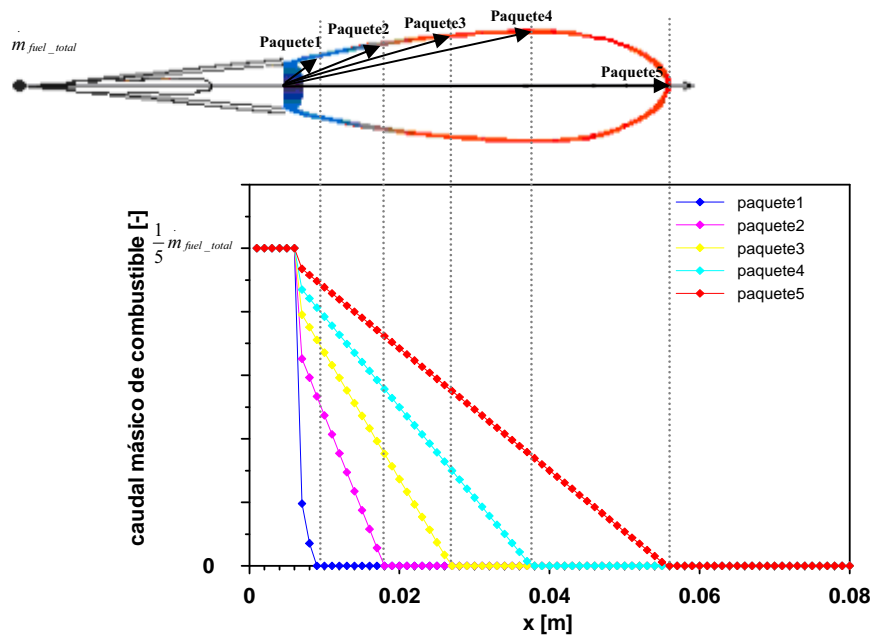


Figura4.13: En la parte superior están representadas las diferentes trayectorias de los elementos de combustible. En la parte inferior está representado el perfil del caudal másico de fuel para cada paquete. El caudal másico total es  $\dot{m}_{fuel\_total}$  y el caudal másico de cada paquete es  $\frac{1}{5} \dot{m}_{fuel\_total}$ . Las rectas que se observan son consecuencia de la expresión EC4.10 (Se expresa EC4.10 en función de la posición  $x$ -y no del tiempo  $t$ - y se destaca  $\dot{m}_{fuel}$ ).



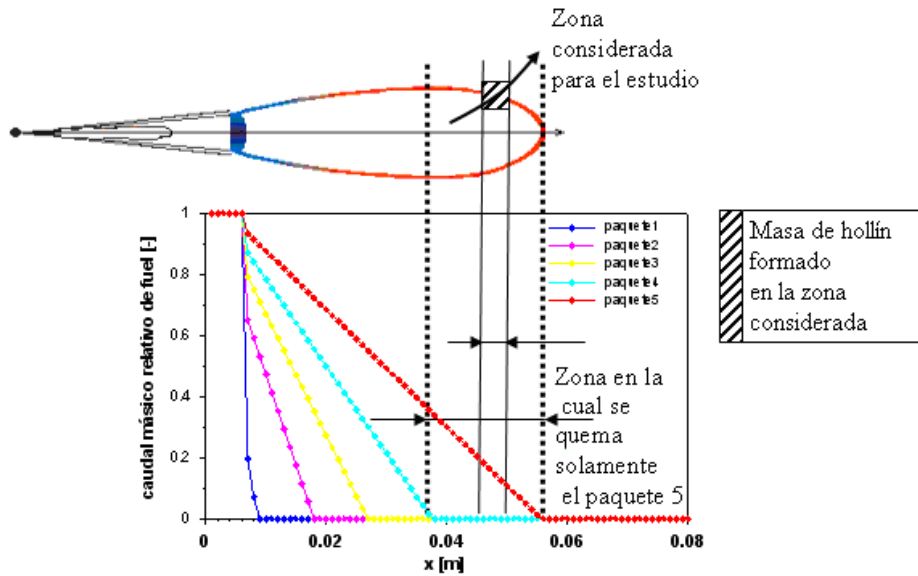


Figura 4.14 : Representación de la zona de estudio y del caudal másico relativo de combustible en esta zona.

#### Cálculo de la masa de hollín $m_{\text{hollín}}$

Para el cálculo del parámetro  $F_{\text{SOOT}}$ , hace falta primero conocer la masa de hollín  $m_{\text{hollín}}$  presente en la sección considerada.

La masa se puede definir como el producto entre la densidad y el volumen (considerando partículas de hollín esféricas haría falta conocer el diámetro). Sin embargo, hoy en día, esos parámetros no son conocidos. En efecto, las partículas de hollín que se visualizan en la llama de difusión son “aglomerados” y hasta ahora no se han podido definir ni su densidad ni su tamaño (apartado 1.2.3.).

El parámetro que se conoce es el factor KL, factor que se suele emplear como variable para definir la cantidad de hollín. Este factor está definido para cualquier posición a lo largo del eje para el paquete 5 (Figura 4.15). Si se considera una sección de ancho  $dx$  y de espesor  $dl$ , se podría considerar que la masa de combustible que pasa en esta sección de la llama es proporcional al factor KL multiplicado por el ancho de la llama y el espesor de la llama.

También se supone que el espesor de la llama varía a lo largo del contorno estequiométrico. Es pequeño al principio de la llama, y va aumentando poco a poco, hasta alcanzar su máximo en el final de la llama. Así se puede suponer que  $dl$  es proporcional a  $x$ . Así se obtiene que la masa de hollín  $m_{\text{hollín}}$  es proporcional a  $KL \cdot x \cdot dx$ .

Además se ha hecho otra hipótesis, esta vez más arbitraria, considerando  $m_{\text{hollín}} \propto KL_{\text{max}} \cdot x \cdot dx$ . Esa presunción se hizo solamente para simplificar los cálculos y que se pueda trabajar de manera más sencilla. El hecho de considerar el parámetro  $KL_{\text{max}}$  y no el factor  $KL$  no es una aproximación desmesurada y no debería engendrar un error considerable. Se ha representado ese razonamiento en la Figura 4.15.

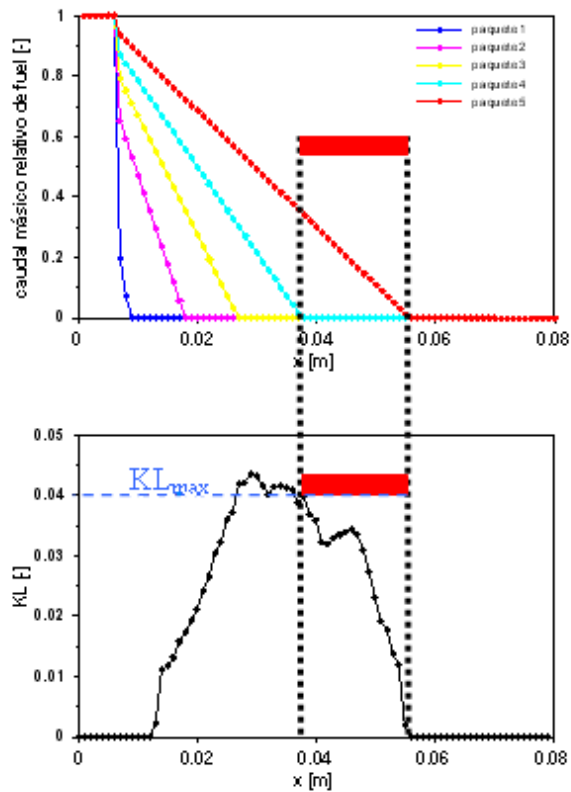


Figura 4.15: Representación del perfil del factor  $KL$  y del caudal másico relativo de fuel. Se asocia el  $KL_{\text{max}}$  a la zona de estudio del paquete 5.

Cálculo de la masa de combustible  $m_{fuel}$ 

Para el cálculo del parámetro  $F_{SOOT}$ , hace también falta conocer la masa de combustible  $m_{fuel}$  presente en la sección considerada. Se puede definir de la manera siguiente:

$$m_{fuel} = \frac{dm_{fuel}}{dx} \cdot \Delta t \cdot dx \quad (EC4.20)$$

con  $\frac{dm_{fuel}}{dx}$  (en  $kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$ ) caudal másico de combustible que atraviesa una sección considerada, y  $\Delta t$  (en s) el tiempo que tarda un paquete de combustible en atravesar la sección  $dx$ .

Considerando la Figura 4.14, se puede observar que **el caudal másico de combustible en una sección  $dx$**  puede definirse como la pendiente de la recta que representa el caudal de combustible en función de la distancia considerada a lo largo del eje de la llama. Como sólo se considera el paquete 5, el caudal de fuel se representara por la pendiente de la recta roja que se puede definir de la manera siguiente:

$$\frac{dm_{fuel}}{dx} = \frac{1}{5} \frac{\dot{m}_{fuel\_total}}{L_{llama}} \quad (EC4.21)$$

(Los 5 paquetes tienen un caudal de combustible idéntico, cada uno igual a un quinto del caudal total de combustible  $\dot{m}_{fuel\_total}$  )

con

$$\dot{m}_{fuel\_total} = C_d \cdot A_0 \cdot U_0 \cdot \rho_{fuel} \quad (EC4.22)$$

y

$$A_0 = \frac{\pi \cdot \phi^2}{4} \alpha \phi^2 \quad (EC4.23)$$

siendo  $C_d$  el coeficiente de descarga de la tobera y  $A_0$  la superficie del orificio de la tobera (en  $m^2$ ).

Considerando  $\rho_{\text{fuel}}$  y  $C_d$  como constantes, se obtiene:

$$\dot{m}_{\text{fuel\_total}} \propto \phi^2 \cdot U_0 \quad (\text{EC4.24})$$

y

$$\frac{d\dot{m}_{\text{fuel}}}{dx} \propto \frac{\phi^2 \cdot U_0}{L_{\text{llama}}} \quad (\text{EC4.25})$$

\* Además, **el tiempo**  $\Delta t$  que tarda un paquete de combustible en atravesar la sección, se puede definir de la manera siguiente:

$$\Delta t = \frac{dl}{u} \quad (\text{EC4.26})$$

con  $dl$ : espesor de la sección considerada y  $u$ : velocidad del paquete considerado

Con el fin de determinar  $\Delta t$ , se han planteado simultaneamente dos hipótesis:

❖ Hipótesis 1 :

El espesor de la llama varía a lo largo del contorno estequiométrico. Es pequeña al principio de la llama, y va aumentando poco a poco, hasta alcanzar su máximo en el final de la llama. Así se puede suponer que  $dl \propto x$ .

❖ Hipótesis 2 :

En el contorno estequiométrico, la velocidad  $u$  y la concentración de combustible  $C_{\text{fuel}}$  son constantes. Además los perfiles de  $C_{\text{fuel}}$  y  $u$  son idénticos.

Así se puede escribir:

$$u \propto U_0 \cdot C_{Fr1} \propto U_0 \cdot \left( 1 + \frac{3.33}{YO_{2\_cil}} \right)^{-1} \quad (\text{EC4.27})$$

Y :

$$\Delta t = \frac{dL}{u} \alpha \frac{x}{U_0 \cdot \left(1 + \frac{3.33}{YO_{2\_cil}}\right)^{-1}} \quad (\text{EC4.28})$$

La expresión del caudal másico, una vez insertados los términos obtenidos en EC4.21 y EC4.28, es la siguiente:

$$m_{fuel} = \frac{dm_{fuel}}{dx} \cdot \Delta t = \frac{\phi^2 \cdot U_0 \cdot x \cdot \left(1 + \frac{3.33}{YO_{2\_cil}}\right)}{L_{llama} U_0} \cdot dx \quad (\text{EC4.29})$$

Y finalmente

$$F_{SOOT} = \frac{m_{hollin}}{m_{fuel}} \alpha \frac{KL_{max} \cdot x \cdot L_{llama}}{\phi^2 \cdot x \cdot \left(1 + \frac{3.33}{YO_{2\_cil}}\right)} \quad (\text{EC4.30})$$

$$F_{SOOT} \alpha \frac{KL_{max} \cdot L_{llama}}{\phi^2 \cdot \left(1 + \frac{3.33}{YO_{2\_cil}}\right)} \quad (\text{EC4.31})$$

El parámetro  $F_{SOOT}$  está definido de tal manera que es representativo de la proporción de combustible no quemado presente en forma de hollín.



# CAPÍTULO 5

## HERRAMIENTAS EXPERIMENTALES Y TRATAMIENTO DE DATOS

### Contenido

---

5.1. Instalación experimental.....	131
5.1.1. Toberas.....	131
5.1.2. Motor óptico experimental.....	132
5.1.2.1. Características del motor óptico.....	133
5.1.2.2. Características de la culata.....	134
5.1.2.3. Sistema de inyección.....	135
5.1.2.4. Modo de funcionamiento.....	136
5.1.2.5. Captadores.....	139
5.1.3. Descripción de la instalación óptica.....	144
5.1.4. Problemas encontrados.....	148
5.1.4.1. Toberas.....	148
5.1.4.2. Ventanas.....	152
5.1.4.3. Ley de inyección.....	153
5.2. Tratamiento de los datos.....	153
5.2.1. Cálculo de las condiciones termodinámicas.....	154
5.2.2. Tratamiento de las imágenes.....	158
5.2.2.1. Segmentación y conectividad.....	159
5.2.2.2. Calibración.....	160
5.2.2.3. Obtención de los perfiles.....	161
5.3. Plan de trabajo.....	165

---





## **5.1. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL**

### **5.1.1. TOBERAS**

La elección del diámetro de la tobera viene directamente condicionada por uno de los objetivos de la tesis: en efecto, lo que nos interesa en este estudio es averiguar si, y a partir de cuando, se obtienen condiciones “cero-hollín”.

En varios estudios, investigadores [Pickett 2002, Siebers 2002a, Siebers 2004] demostraron que al bajar el diámetro de la tobera, la concentración de hollín disminuye. Lo justifican explicando que no es la longitud del lift-off que depende del diámetro de la tobera sino la longitud de mezcla. En efecto, al disminuir el diámetro de la tobera, el dosado en el lift-off disminuye, lo que conduce a una disminución de la cantidad de hollín formado.

Así que si se quieren alcanzar condiciones “cero-hollín”, lo mejor es utilizar diámetros de toberas pequeños.

Además, para poder caracterizar el proceso de formación de hollín de manera fiable, es necesario que no haya interacciones entre los chorros. Es un proceso que tendría seguramente lugar en el caso de considerar toberas multi-orificio. Así que el empleo de una tobera mono-orificio es aconsejable para obtener resultados más fiables, aislando el chorro considerado.

Igualmente, con el fin de no tener influencias debidas al proceso de cavitación es mejor utilizar una tobera cónica (una tobera cilíndrica provocaría cavitación). En efecto se supone que la cavitación tiene una influencia en el proceso de mezcla [Nurick 1976], permitiendo que se haga mejor, y por consecuencia debería también influir en el proceso de formación de hollín.

Así que las toberas utilizadas en ese estudio son **toberas cónicas, mono-orificio, de diámetro 70 y 90  $\mu\text{m}$** . Para las necesidades del estudio se utilizaron dos toberas de cada diámetro.

Además, se puede hacer el comentario siguiente e insistir en el hecho de que la utilización de esos diámetros pequeños tiene una ventaja considerable. En efecto,

como se ha comentado en el apartado anterior, con el fin de caracterizar el proceso de mezcla, es muy útil conocer la longitud de la llama.

El hecho de emplear diámetros pequeños va a permitir la visualización de la llama en su totalidad, ya que la longitud de la llama y el diámetro de la tobera son directamente proporcionales.

### 5.1.2. MOTOR ÓPTICO EXPERIMENTAL

Durante el estudio bibliográfico se presentaron 4 instalaciones experimentales principales que permiten efectuar un estudio de visualización de la concentración de hollín en la llama diesel:

- el motor con pistón transparente,
- la máquina de compresión rápida,
- el motor con culata transparente,
- y la cámara de combustión con volumen constante.

Para la elección de una instalación experimental adecuada para el presente estudio, hay que tener presente las limitaciones y exigencias que existen: primero se empleará a lo largo de este trabajo toberas mono-orificio. Segundo, como ya se ha comentado en los apartados anteriores, hace falta visualizar la longitud de llama para la caracterización del proceso de mezcla. Eso impone que el motor experimental que se va a utilizar tenga una(s) ventana(s) de visualización bastante grande(s) y larga(s) para distinguir completamente la llama de difusión. Y tercero, para visualizar y analizar la formación de hollín, no debe haber interacciones con las paredes.

Así que si se analizan las limitaciones impuestas y las instalaciones experimentales que se podrían emplear, se puede afirmar que el motor con pistón transparente no es adecuado para este estudio. En efecto, con el motor con pistón transparente, sólo se puede visualizar una porción de la llama, y además su uso no es apropiado con toberas mono-orificio.

Sin embargo, las otras 3 instalaciones experimentales cumplen con los requisitos. Cualquiera de las 3 sería adecuada para el estudio que se quiere realizar.

No obstante, en el centro de investigación CMT – Motores Térmicos, lugar donde se realiza este trabajo, se dispone solamente del motor con culata transparente. Así que dadas las circunstancias, se eligió **el motor con culata transparente** para la realización del presente trabajo.

Así pues, el motor empleado en este trabajo es un motor mono-cilíndrico de gran cilindrada, de 2 tiempos, cuya culata ha sido modificada con el fin de proporcionar amplios accesos ópticos.

Este motor, que a partir de aquí denominaremos “motor maqueta”, ha sido desarrollado por AVL y permite simular condiciones termodinámicas de presión, temperatura y densidad similares a las que se alcanzan en el interior de la cámara de combustión de un motor diesel en el punto muerto superior.

Su potencial reside en la obtención de información del chorro y de la llama en un entorno controlado, en el que la evolución del mismo no viene muy influenciada por aspectos como el movimiento del aire o la interacción temprana con la pared del bowl de la cámara de combustión.

También, la instalación experimental ha sido desarrollada en el centro de Motores Térmicos [Martínez 2003] y está pensada para poder aplicar las técnicas ópticas de una forma muy eficiente, de forma que el eje del chorro queda siempre perpendicular a la dirección de visualización.

Además, con el fin de limitar los movimientos y vibraciones del motor con los equipos de visualización, el motor está montado en un sistema-soporte antisismos (sistema apoyado en 4 muelles de acero).

### 5.1.2.1. CARACTERÍSTICAS DEL MOTOR ÓPTICO

El motor maqueta es un motor mono-cilíndrico de 2 tiempos y de 3000 cm<sup>3</sup> de cilindrada.

Con el fin de trabajar en condiciones cuasi-estacionarias, el motor tiene una velocidad de giro constante de 500 rpm. De esta manera, se consiguen condiciones de presión, temperatura y densidad casi constantes con un movimiento del aire reducido durante el proceso de inyección-combustión estudiado. Esta velocidad de giro es un valor óptimo teniendo en cuenta las vibraciones del motor y la necesidad de un régimen de giro mínimo para mantener la lubricación del motor. También, hay que tener en cuenta que con esa velocidad de giro tan baja, las pérdidas de calor a las paredes son importantes.

Las características del motor se han anotado en la Tabla 5.1 siguiente:

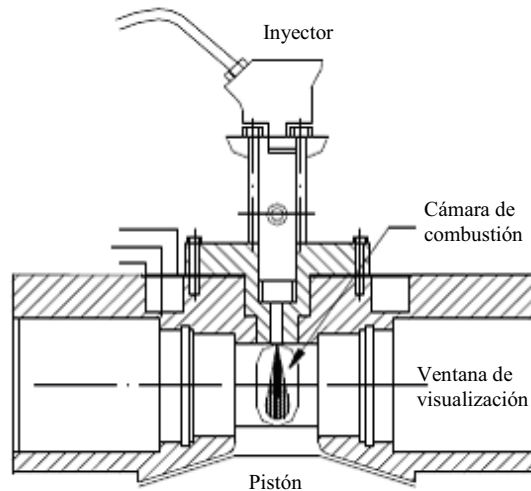
PARÁMETROS	UNIDADES	VALOR
<b>Diámetro del Pistón</b>	[mm]	150
<b>Carrera</b>	[mm]	170
<b>Carrera Efectiva</b>	[mm]	108
<b>Cilindrada total</b>	[cm <sup>3</sup> ]	3000
<b>Relación de compresión efectiva</b>	[-]	14.35

*Tabla 5.1: Características del motor maqueta.*

El motor no desarrolla un trabajo neto positivo en un ciclo, puesto que las cantidades de combustible inyectadas son insuficientes. Por eso, se emplea un motor eléctrico tanto para acelerar desde el reposo hasta un régimen de funcionamiento como para mantener el motor maqueta en las condiciones de giro requeridas.

### 5.1.2.2. CARACTERÍSTICAS DE LA CULATA

Las Figuras 5.1 y 5.2 muestran la culata del motor, que acoge una cámara de combustión con un diámetro de 45 mm y una altura de 90 mm. La cámara de combustión tiene un acceso superior para el inyector, y cuatro laterales ortogonales. Uno de ellos se usa para situar el captador de medida de la presión en el cilindro mientras que los otros 3 acogen las ventanas de visualización. Las ventanas están hechas de zafiro, de sección 88\*37 mm<sup>2</sup> y de 28 mm de espesor.



*Figura 5.1: Sección vertical de la culata del motor maqueta.*



*Figura5.2: Foto de la culata del motor maqueta.*

### 5.1.2.3. SISTEMA DE INYECCIÓN

La inyección de combustible se lleva a cabo mediante un sistema Common-Rail Bosch capaz de trabajar con una presión de inyección desde 200 hasta 1800 bares.

Con el fin de asegurar y mantener una presión constante en el rail, así como de minimizar las variaciones de presión que genera la bomba, un segundo rail de gran capacidad sigue al primero. Además se utiliza una línea de inyección muy corta (longitud de 120 mm y de 3 mm de diámetro) para amortiguar más rápidamente las fluctuaciones de presión debidas a la apertura del inyector.

El sistema de inyección permite controlar, además de la presión, el inicio y la duración del proceso de inyección. Lo que se pretende hacer es conseguir condiciones de presión casi-constantes durante una inyección larga para acercarse a las condiciones cuasi-estacionarias.

También, con el objetivo de minimizar el ensuciamiento de las ventanas el sistema permite realizar una única inyección cada cierto número de ciclos de motor predefinido.

En el presente estudio, se realizará inicialmente 1 inyección cada 20 ciclos. Luego esta estrategia de inyección se modificará y será adaptada por las necesidades del estudio (apartado 5.1.4.3).

#### 5.1.2.4. MODO DE FUNCIONAMIENTO

El motor maqueta, en su configuración inicial, y como se ha presentado en el estudio bibliográfico, puede trabajar con 2 modos de funcionamiento diferentes: en condiciones atmosféricas de reacción (21% de oxígeno en volumen), o en condiciones atmosféricas inertes (0% de oxígeno).

Sin embargo, lo que se quiere realizar en este estudio, son barridos de concentración de oxígeno, más o menos desde 21% hasta 13%. Así que hace falta pensar en cómo modificar la instalación experimental para que el motor maqueta funcione en esas condiciones.

Se había pensado en varios modos de funcionamiento para crear gases de recirculación de escape (EGR) que se hubieran introducido en la admisión del motor maqueta:

- EGR sintético,
- dilución del aire de admisión con nitrógeno,
- conexión del circuito del motor maqueta al tubo de escape de otro motor,
- recirculación de los propios gases del motor maqueta en circuito cerrado.

Con el primer modo, es decir el EGR sintético, se puede a priori reconstruir la composición de gases de escape deseada. Se introduce cada especie proveniente de diferentes bombonas en la proporción deseada. El inconveniente de este modo es que es caro si se aplica durante un tiempo largo y es lo que va a ocurrir durante este trabajo. Así que ese modo de funcionamiento no es muy aconsejado para este estudio.

El inconveniente con el segundo modo de funcionamiento, la dilución del aire introducido con nitrógeno, es que la composición del gas de admisión no es la misma que se obtendría en configuración real. No se simula ni el H<sub>2</sub>O ni el CO<sub>2</sub>, especies para las cuales se ha mostrado que su efecto combinado tenía un efecto sobre el hollín [Pickett 2004a].

Además, por ejemplo tampoco habría la proporción de contaminantes que se obtienen durante la recirculación real de los gases de escape. Así que el proceso de combustión sería un poco diferente y la formación de contaminantes (y por supuesto la del hollín) también. Esas condiciones no nos interesan ya que no se puede estudiar exactamente lo que ocurre en una configuración de motor diesel con recirculación de gases de escape.

El tercer modo es una configuración que hemos intentado aplicar. El sistema de admisión del motor maqueta estaba directamente vinculado con el sistema de escape de un motor de gasolina equipado con un catalizador. Se regulaba la concentración de oxígeno mediante la admisión del aire fresca y la adaptación del régimen del motor de gasolina: si se quería poco oxígeno se aceleraba mucho el régimen del motor de gasolina mientras que si se deseaba una concentración de oxígeno alta el motor casi estaba al ralenti.

El problema con esa configuración es que la presión de escape del motor de gasolina no podía superar 1.5 bars por culpa del catalizador mientras que se necesita 3 bars en la admisión del motor maqueta para poder alcanzar las condiciones de combustión deseadas en la cámara de combustión. Así que se abandonó esa configuración.

Al final se eligió la cuarta solución: recirculación de los propios gases del motor maqueta en circuito cerrado. Esta configuración está descrita, junto a la explicación del funcionamiento en condiciones atmosféricas de reacción (21% de oxígeno en volumen), en el apartado siguiente.

El primer modo de funcionamiento se denominará “circuito abierto”. En esta configuración los ensayos se realizan con aire atmosférico (concentración molar de oxígeno de 23.2%). El segundo modo de funcionamiento se denominará “circuito cerrado”. En esta configuración los gases de escape del propio motor se dirigen a la admisión. Eso permite disminuir poco a poco la concentración de oxígeno en la admisión del motor maqueta y simular barridos de EGR.

### **CIRCUITO ABIERTO (FIGURA 5.3)**

El aire atmosférico es empujado por un compresor A a través de un sistema de intercambiadores (un intercambiador térmico permite precalentar el aire proveniente del compresor y las resistencias eléctricas permiten obtener la temperatura deseada) con el fin de obtener la temperatura de consigna que se ha impuesto para realizar el ensayo. Luego el aire es almacenado en el remanso de admisión hasta que el pistón descubre las lumbreras de admisión del motor maqueta.

Una vez que el aire ha entrado en el cilindro y que el proceso de combustión ha tenido lugar, los gases pasan al remanso de escape. Más adelante atraviesan otro remanso, el de expansión, y finalmente son expulsados a la atmósfera.

La electro-válvula situada en el escape permite regular la presión de escape. Esa presión se mantiene siempre 0.1bar por debajo de la presión de admisión para permitir el intercambio de flujo entre las lumbreras de escape y admisión y así vaciar el cilindro.

#### **CIRCUITO CERRADO (FIGURA 5.4)**

El compresor Roots empuja el aire a través del sistema de intercambiadores. El aire se acumula en el remanso de admisión y luego en el cilindro penetra.

Una vez que la combustión ha tenido lugar, se expulsan los gases fuera del cilindro hasta el remanso de escape. Después se filtran esos gases: primero con un sistema centrífugo que filtra cualquiera partícula que tenga una densidad superior a la densidad del aire como eventuales gotas de combustible o de aceite, hollín, partículas que provienen de los elementos del circuito o del propio motor. Segundo, con otro filtro, compuesto de una membrana de papel o de un tamiz, que permite retener partículas que se hubieran “escapado” del filtro anterior.

Luego los gases de escape se introducen de nuevo en los conductos de admisión mediante el compresor Roots.

Antes de entrar en el compresor Roots, los gases deben enfriarse para no superar la temperatura máxima que puede soportar el compresor.

Además, las posibles fugas se controlan midiendo la presión en el circuito y se compensan rellenando el circuito con la válvula A. La apertura de esta válvula se controla automáticamente con un PID y un captador de presión instantánea P. Esta válvula también permite rellenar el circuito al principio de los ensayos y alcanzar la presión deseada.

Al recircular los gases de escape en el circuito cerrado, la concentración de oxígeno disminuye. Una vez que se alcanza el valor mínimo, se crea una fuga (manual) con la ayuda de la válvula B para evacuar los gases de escape del circuito. Para realizar nuevos ensayos, se rellena de nuevo el circuito con aire atmosférico que se introduce mediante la válvula A.

A continuación se presenta la Figura 5.5 que ilustra como va disminuyendo la concentración de oxígeno en función del tiempo para una tobera de 70 y 90  $\mu\text{m}$  y una presión de inyección de 500 y 1500 bar.

Para disminuir la concentración de oxígeno, por supuesto el motor funciona en circuito cerrado. Se inyecta cada 20 ciclos una cantidad de combustible durante 4000  $\mu\text{s}$  y durante los 19 ciclos restantes se inyecta una cantidad de combustible durante 500  $\mu\text{s}$  (esta estrategia se expone en los párrafos 5.1.4.1 y 5.1.4.3).



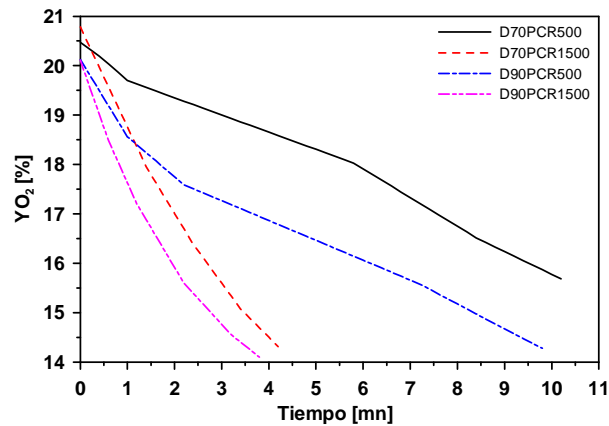


Figura 5.5: Esquema representativo de la evolución de la concentración de oxígeno en función del tiempo para una tobera de 70 y 90  $\mu\text{m}$  y una presión de inyección de 500 y 1500 bar.

Se puede observar que hace falta más o menos el doble de tiempo para pasar de 21% a 15% si se inyecta con una presión de inyección de 500 bar y no de 1500 bar.

El desarrollo de un ensayo es el siguiente:

- con la cámara intensificada lenta, se toma 1 foto por ciclo que se graba enseguida,
- con la cámara rápida, se toma una película de 250 fotos por ciclo que se graba solamente al final de la toma.

Así que, por ejemplo, para el caso del diámetro de 70  $\mu\text{m}$  y de 500 bars de presión de inyección, para obtener el barrido de la concentración de oxígeno de 21 hasta 16%, hacen falta 10 minutos. Con la cámara lenta intensificada no hay ningún problema, cada foto se graba poco a poco. Sin embargo, el tiempo de almacenamiento de la cámara rápida es limitado y no se puede grabar tanta información.

Así que se han tomado 15 ciclos durante un tiempo de 36 segundos; de esta manera se podía grabar toda la información con una concentración de oxígeno casi constante.

### 5.1.2.5. CAPTADORES

En un primer tiempo, la información adquirida con los captadores permite regular y vigilar los parámetros de cada ensayo para asegurar la precisión y repetitividad de los ensayos experimentales realizados.

En un segundo tiempo, esas medidas, después de tratarlas, nos darán una información complementaria sobre las condiciones termodinámicas en el cilindro.

Los diferentes captadores se enumeran en la Tabla 5.2. Algunos se han representado en los esquemas anteriores de los circuitos abierto y cerrado (Figuras 5.3 y 5.4).

Se describe a continuación, muy brevemente, algunos de los captadores utilizados (la descripción detallada se puede hallar en [Martínez 2003]):

**Temperatura y presión media de admisión:** La regulación de esos parámetros es necesaria para el control de la densidad del gas de admisión, ya que variaciones de esta densidad provocan cambios sustanciales en el proceso de combustión.

**Concentración de O<sub>2</sub>:** Para la medida de la concentración de oxígeno, se dispone de un medidor (HORIBA tipo MEXA 7170 DEGR) que toma una muestra del gas en el remanso de admisión.

Existe un desfase de esta medida ya que la muestra se toma en el remanso de admisión y está llevado al Horiba a través de una manguera de 18 metros de largo hasta su análisis. El desfase en tiempo es del orden de 2.4s.

A partir de la Figura 5.5, se puede deducir que en 2.4s, la variación máxima en cuanto a la concentración de oxígeno es de 0.06% (para una tobera de 90  $\mu\text{m}$  y una presión de inyección de 1500bar). Así que el error que se comete no es demasiado elevado.

**Presión media de los gases de escape:** La presión de escape se mide con un captador situado en el colector de escape.

**Temperatura de los gases de escape:** Esta variable se mide con un termopar situado en el colector de escape. Es importante verificar la temperatura de escape principalmente cuando la instalación funciona en circuito cerrado, ya que la temperatura máxima de ciertos elementos (como por ejemplo el filtro de partículas o el compresor roots) está limitada.

**Temperatura del combustible:** El control de esta temperatura es necesario para fijar una determinada temperatura de inyección del combustible.

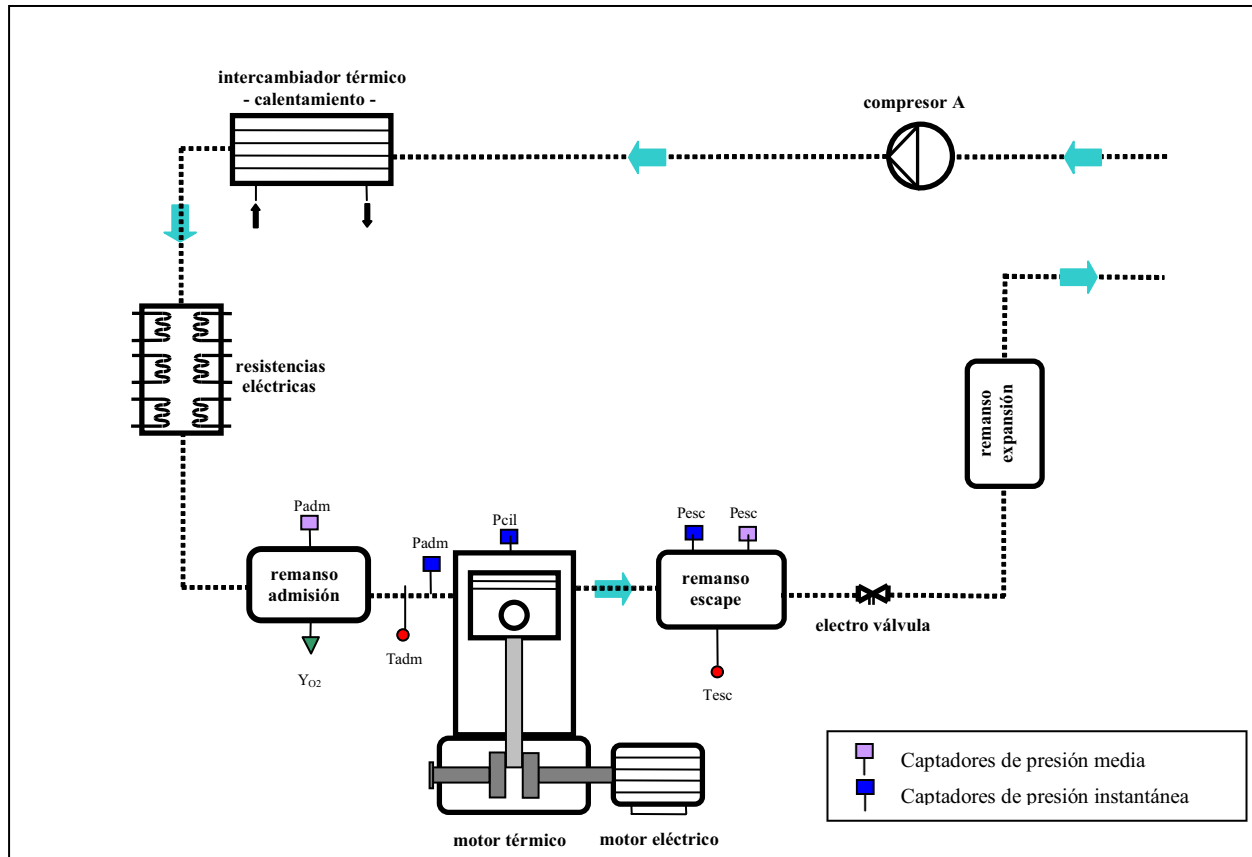


Figura 5.3: Esquema de la configuración "circuito abierto" del motor manucha.

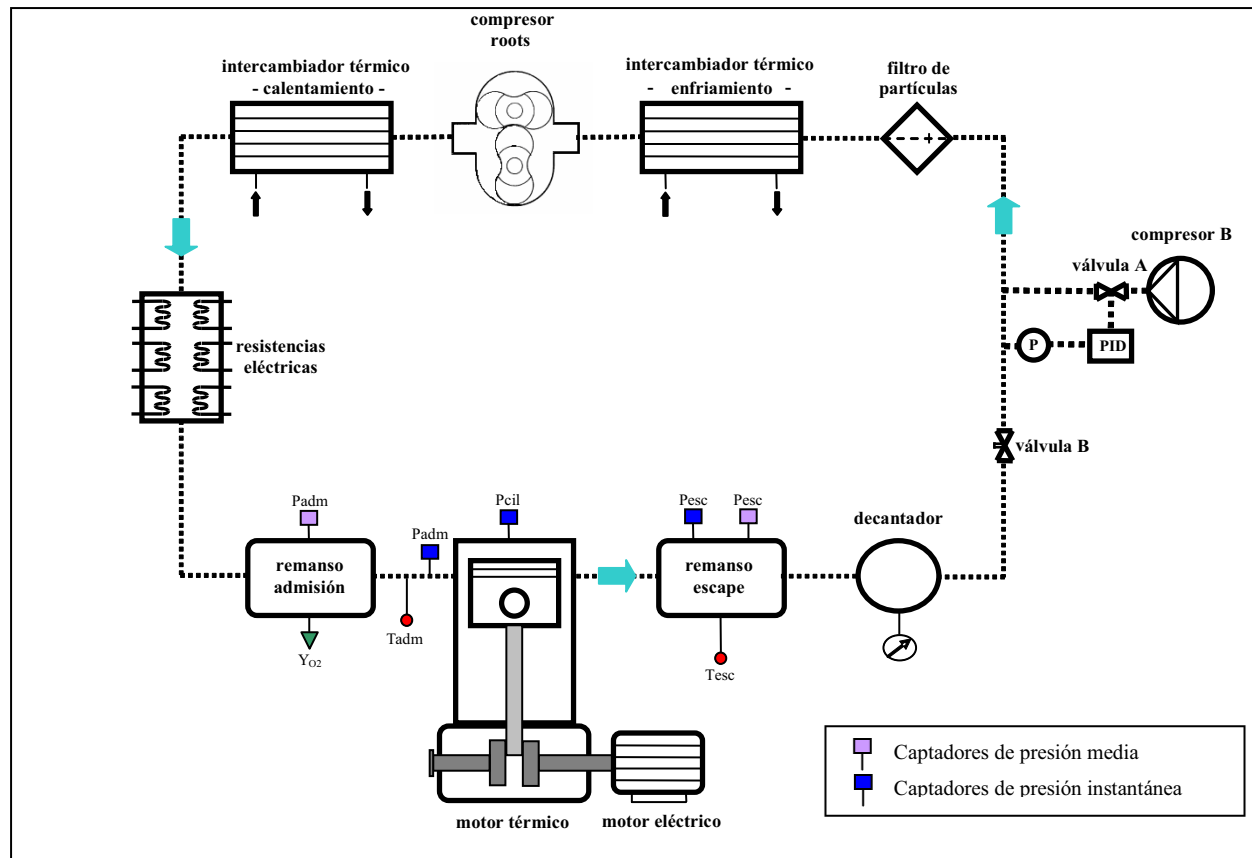


Figura 5.4: Esquema de la configuración "circuito cerrado" del motor muqueta.

SISTEMAS	PARÁMETROS MEDIDOS	TIPO DE SEÑAL
Admisión	Presión	Instantáneo
		Medio
	Temperatura	Medio
Motor Térmico	Concentración O <sub>2</sub>	Medio
	Régimen de giro	Medio
	Presión en el cilindro	Instantáneo
Escape	Presión	Instantáneo
		Medio
	Temperatura	Medio
Inyección	Temperatura del Combustible	Medio
	Presión	Instantáneo
	Posición del pulso	Instantáneo
	Duración del pulso	Instantáneo

Tabla 5.2: Enumeración de los diferentes captadores utilizados durante los ensayos.

**Régimen de giro:** El motor maqueta trabaja siempre con un régimen de giro constante de 500 rpm. Se emplea un motor eléctrico de arrastre tanto para acelerar desde el reposo hasta el régimen de funcionamiento como para mantenerlo en las condiciones de giro requeridas. Actuando con un variador de frecuencia se alcanzan esas condiciones de giro. Luego se regula automáticamente.

**Ángulo de giro del cigüeñal:** La medida de esta variable sirve como referencia angular para todas las “variables instantáneas”. El elemento encargado de medir este parámetro es el codificador angular. Este elemento tiene dos funciones, una es la de generar un pulso de sincronismo que le indicará a la cadena de medida cuándo debe empezar a medir (señal de 1 × vuelta), y la otra es generar una serie de pulsos por cada ciclo de motor que determinan cada uno de los valores de ángulo donde se van a medir valores de cada variable (señal de 3600 × vuelta en nuestro caso).

**Presión en la cámara de combustión:** La medida de la presión instantánea se realiza en la cámara de combustión mediante un captador piezoeléctrico de la firma Kistler (rango de operación de 0 a 250 bar y de -50 a 350°C), con acondicionador de señal y enfriado por recirculación externa de agua. Se eligió este tipo de transductor por la precisión y el rango útil de medida, la única

desventaja que presenta este modelo, es la necesidad de una señal externa de referencia (presión de referencia absoluta) ya que sólo mide presiones relativas.

**Presión de admisión y escape instantánea:** Las medidas y comparación de esas presiones permiten verificar que no hay ningún problema en la cámara de combustión al abrir y cerrar las lumbreras. También permiten referenciar la señal de presión cilindro.

**Presión de inyección:** Un transductor de presión piezoeléctrico instalado en la línea que une el rail con el inyector recoge la señal de presión instantánea.

**Posición del pulso de mando del inyector:** El valor de este parámetro define el instante en el que se introduce el combustible en el interior de la cámara de combustión.

**Duración del pulso de mando del inyector:** El valor de este parámetro define la masa de combustible que se introduce en el interior de la cámara de combustión.

### 5.1.3. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACION ÓPTICA

Para cumplir con los objetivos determinados, se han empleado y aplicado alrededor del motor maqueta diferentes técnicas de visualización.

La primera de estas técnicas es la visualización de la quimioluminiscencia del radical OH para determinar la longitud del lift-off.

La segunda es la visualización de la intensidad luminosa de la radiación de la llama para la determinación de la concentración de hollín y la longitud de la llama.

Una tercera técnica se ha empleado y ha permitido proporcionar una información cualitativa sobre la evolución de la combustión en cada ciclo permitiendo verificar el buen desarrollo de los ensayos.

Los sistemas ópticos que permiten aplicar las diferentes técnicas de visualización se montan simultáneamente en unos perfiles de posicionamiento que se pueden desplazar en cualquier posición x-y-z (Figura5.6). El banco de posicionamiento permite ubicar de manera muy precisa las cámaras.

Para realizar los ensayos se utilizaron 2 cámaras: una primera cámara llamada “cámara rápida” y otra, intensificada, denominada “cámara lenta”.

La cámara rápida se ha empleado exclusivamente para obtener una información cualitativa sobre la evolución de la combustión. Esa cámara permite tomar una secuencia de varias fotos por ciclo. Un filtro rojo se dispone delante. Este filtro tiene una longitud de onda de 650 nm y pertenece al rango del visible: con la cámara rápida se visualiza una secuencia de varias fotos representativas del hollín.

Esa cámara tiene una resolución de 512 x 256 píxeles. La configuración de utilización durante los ensayos ha permitido tomar 250 fotos por ciclo, cada una espaciada 80  $\mu$ s (es decir que se toman 12500 fotos/s).

Sus características técnicas están anotadas en la Tabla5.3.

La cámara lenta está acoplada con un estereoscopio que permite a la vez la visualización de la concentración de hollín y de la longitud del lift-off. En efecto, el estereoscopio es un aparato que permite la adquisición de 2 imágenes a la vez procediendo de la misma llama. En la Figura5.7, se puede observar que los rayos luminosos de la llama se filtran por un lado con un filtro OH y por otro lado con un filtro del rango del visible que permite la visualización del hollín. Luego esas 2 imágenes son dirigidas por la cámara mediante 2 espejos y un prisma.

CÁMARA RÁPIDA				OBJETIVO	CONFIGURACIÓN PARA LOS ENSAYOS	
Tipo de cámara	Tipo de captador de imágenes	Rango dinámico máximo	Número de fotos máximo por segundo		Resolución	Tiempo de exposición
Photron FastCam APX	CMOS	10 bits	32000 fotos/s	Ultra violeta	512 x 256 píxeles	80 $\mu$ s

Tabla5.3: Características técnicas de la cámara rápida.

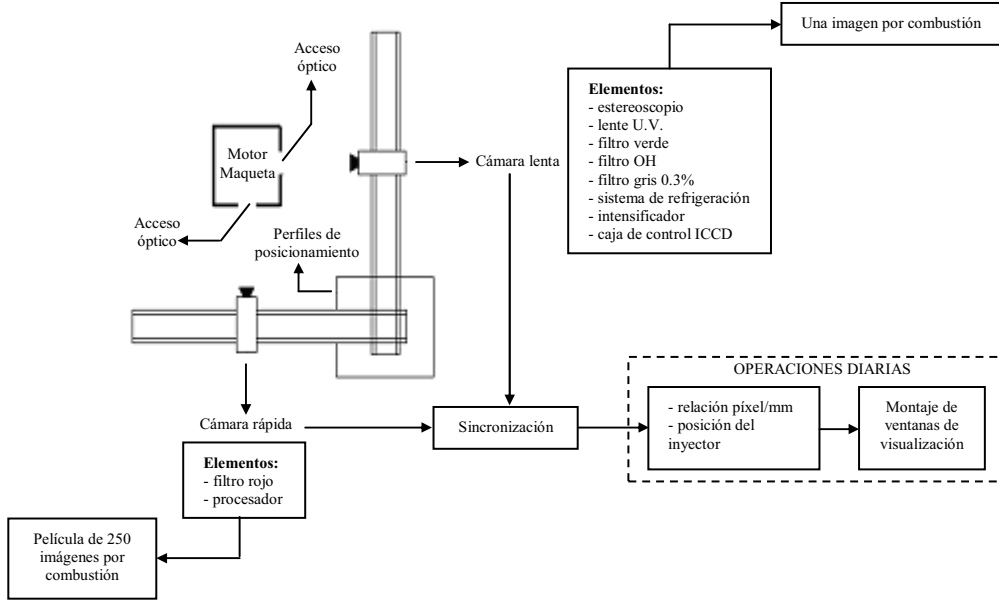


Figura5.6: Esquema del montaje general.

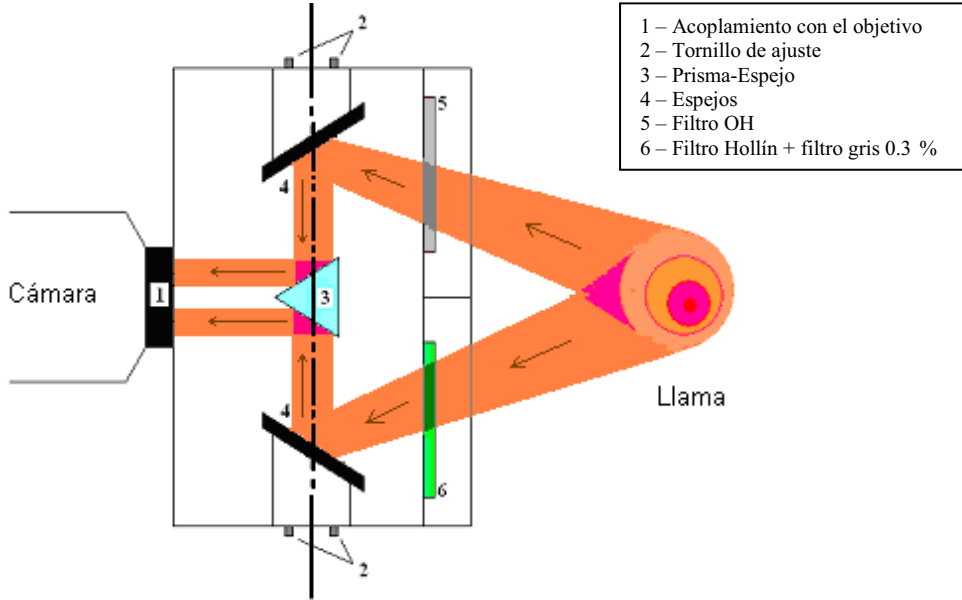


Figura5.7: Esquema del estereoscopio.



El filtro que permite la cuantificación de la radiación del hollín con la cámara lenta se ha elegido para tener una longitud de onda cercana a la del OH que es de 310 nm pero en el rango del visible. Así que se eligió un filtro verde de 550 nm. Sin embargo, para no saturar una de las 2 imágenes (OH/soot), se ha debido aplicar un filtro gris delante del filtro verde que dejaba pasar solamente 0.3% de la luz. (Se utilizaron un filtro verde para la visualización del hollín con la cámara lenta y un filtro rojo para visualizar el hollín con la cámara rápida porque sólo se disponía de esos dos filtros y que se necesitaba un uso simultáneo. Sin embargo, la longitud de onda del filtro no tiene importancia sobre la visualización del hollín a partir del momento en que está en el rango visible.)

La cámara lenta ICCD (Intensified Charge Coupled Device) permite tomar una sola foto por ciclo con una resolución de 512 x 512 píxeles. Lleva incorporado un intensificador que permite distinguir luminosidades muy bajas, necesario para visualizar la especie OH, adaptando la ganancia de la cámara. Además un sistema de refrigeración permite mantener la cámara lenta en condiciones de temperatura aceptable para su funcionamiento.

Sus características técnicas están anotadas en la Tabla 5.4.

Debido a las exigencias de la cámara lenta, se ha tomado una sola foto por ciclo para el análisis de la longitud del lift-off y de la concentración de hollín. Así que se ha tomado una foto en el momento en el cual se pensaba que la llama estaba en condición de combustión por difusión cuasi-estacionaria.

Este momento se especifica en el apartado 5.1.4.3.

CÁMARA LENTA INTENSIFICADA				INTENSIFICADOR		
Modelo de cámara	Modelo CDD	Rango dinámico máximo	Número de fotos máximo por segundo	Tipo	Photocathode	Phospor
Lavision Dynamight	TH7895M	16 bits	1.3 fotos/s	2. Gen. 18mm	S20	P43

OBJETIVO	CONFIGURACIÓN PARA LOS ENSAYOS	
	Resolución	Tiempo de exposición
60 mm de focal	512 * 512 píxeles	200 $\mu$ s

Tabla 5.4: Características técnicas de la cámara lenta.

## 5.1.4. PROBLEMAS ENCONTRADOS

### 5.1.4.1. TOBERAS

Dos problemas aparecieron en cuanto a las toberas:

1/ Las toberas no habían sufrido proceso de hidro-erosión. Es un proceso durante el cual se hace pasar por los orificios de la tobera un fluido abrasivo que desgasta las esquinas que restringen el paso del flujo en su entrada al orificio. Si el proceso de hidro-erosión no ha tenido lugar, puede ser que una especie de hidro-erosión natural ocurra al circular el combustible con alta presión en la tobera. Así pues, durante las primeras horas de ensayos se produce una deriva del gasto másico de combustible.

Para asegurarse de que la ausencia del proceso de hidro-erosión no afectaría el comportamiento de la tobera, se efectuó un rodaje para cada tobera. El rodaje consiste en inyectar durante mucho tiempo una cierta cantidad de combustible con una presión y contra-presión determinadas y averiguar si se nota algún cambio, si aparece una tendencia o una deriva a lo largo del tiempo. En el caso de este estudio, se realizó un rodaje aproximadamente de 12 horas para cada tobera.

Finalmente se pudo concluir que no había ninguna tendencia particular en el comportamiento de las toberas: la masa inyectada ha permanecido constante a lo largo del tiempo.

Así que la ausencia de hidro-erosión no tiene importancia, en este caso, en el comportamiento de las toberas.

2/ Se ha notado una degradación de las toberas una vez finalizada una primera serie de ensayos en combustión.

Esta degradación se ha notado comparando la cantidad de combustible inyectada antes y después de los ensayos de combustión. En efecto, para cada tobera se realizaron ensayos de tasa de inyección y de cantidad de movimiento antes y después de los ensayos de combustión con presiones de inyección PCR similares a las de los ensayos en el motor maqueta (apartado 5.3.), es decir: 500, 1000, 1500 y 1800 bars.

Los valores de los resultados se han anotado en las Tablas 5.5 y 5.6.

	CASO A: CAUDAL FUEL TOBERA 70 $\mu\text{m}$ ANTES COMB.	CASO B: CAUDAL FUEL TOBERA 70 $\mu\text{m}$ DESPUÉS COMB.	CAUDAL CASO B / CAUDAL CASO A
	[g/s]	[g/s]	[-]
PCR=500 bars	0.89	0.62	0.71
PCR=1000 bars	1.04	0.86	0.82
PCR=1500 bars	1.48	1.04	0.7
PCR=1800 bars	1.65	1.13	0.68
Promedio			0.7
	CASO C: CAUDAL FUEL TOBERA 90 $\mu\text{m}$ ANTES COMB.	CASO D: CAUDAL FUEL TOBERA 90 $\mu\text{m}$ DESPUÉS COMB.	CAUDAL CASO D / CAUDAL CASO C
	[g/s]	[g/s]	[-]
PCR=500 bars	1.53	0.88	0.58
PCR=1000 bars	2.02	1.25	0.63
PCR=1500 bars	2.4	1.5	0.62
PCR=1800 bars	2.66	1.7	0.64
Promedio			0.63

Tabla5.5: Datos representativos de los ensayos de tasa de inyección antes y después de la combustión.

En la Tabla5.5, los valores escritos en gris se consideran como errores de medidas ya que esos valores son bastante diferentes de los otros. No se van a considerar para el resto del estudio.

	CASO E: CdM FUEL TOBERA 70 $\mu\text{m}$ ANTES COMB.	CASO F: CdM FUEL TOBERA 70 $\mu\text{m}$ DESPUÉS COMB.	CdM CASO F / CdM CASO E
	[kg·m/s <sup>2</sup> ]	[kg·m/s <sup>2</sup> ]	[-]
PCR=500 bars	0.25	0.18	0.72
PCR=1000 bars	0.55	0.4	0.74
PCR=1500 bars	0.86	0.62	0.71
PCR=1800 bars	1.04	0.75	0.72
Promedio			0.72
	CASO G: CdM FUEL TOBERA 90 $\mu\text{m}$ ANTES COMB.	CASO H: CdM FUEL TOBERA 90 $\mu\text{m}$ DESPUÉS COMB.	CdM CASO H / CdM CASO G
	[kg·m/s <sup>2</sup> ]	[kg·m/s <sup>2</sup> ]	[-]
PCR=500 bars	0.37	0.24	0.64
PCR=1000 bars	0.81	0.53	0.65
PCR=1500 bars	1.25	0.82	0.65
PCR=1800 bars	1.5	0.99	0.66
Promedio			0.65

Tabla5.6: Datos representativos de los ensayos de cantidad de movimiento CdM antes y después de la combustión.

En la Figura 5.8 se representaron los valores medios de los ensayos de cantidad de movimiento y los de tasa de inyección y se puede distinguir la degradación que han sufrido las toberas antes y después de la combustión. Para que la comparación de los datos sea más fácil, se han representado valores relativos: se eligieron los valores de tasa de inyección y de cantidad de movimiento antes de la combustión como referencia.

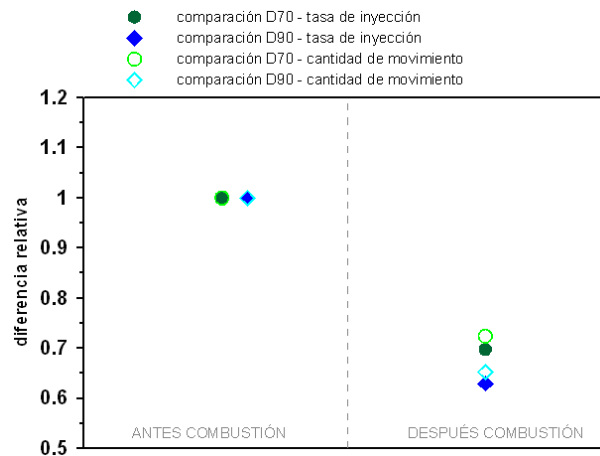


Figura 5.8: Comparación de las diferencias relativas de las tasas de inyección y las cantidades de movimiento para cada tobera antes y después de la combustión.

Se puede ver que la degradación es casi constante, es decir que es prácticamente idéntica para los ensayos de tasa de inyección y los de cantidad de movimiento para cada diámetro. Sin embargo la degradación es más importante para la tobera de diámetro 90 μm, con aproximadamente 35% de degradación, mientras que para la tobera de diámetro 70 μm la degradación es más o menos de 30%.

El hecho de que la degradación sea casi constante para los ensayos de tasa de inyección y los de cantidad de movimiento conduce a concluir que el problema no es debido al sistema de inyección. En efecto, el coeficiente de velocidad  $C_v$ , coeficiente que traduce las pérdidas debidas al sistema de inyección, depende únicamente del caudal de combustible  $\dot{m}_{fuel}$  y de la cantidad de movimiento  $\dot{M}_{fuel}$ . Resultando que las caídas de  $\dot{m}_{fuel}$  y  $\dot{M}_{fuel}$  son semejantes, ya se sabe que  $C_v$  se va a mantener constante y que por lo tanto el problema no proviene de este parámetro.

Así que el problema solamente puede provenir de una reducción de la sección de paso del orificio. Esa afirmación se puede verificar en la Figura 5.9, en la cual se ha representado el coeficiente  $C_a$  para ensayos realizados antes y después de la combustión. El parámetro  $C_a$  es el coeficiente de área, parámetro que traduce las pérdidas debidas a una reducción en el diámetro del orificio de la tobera.

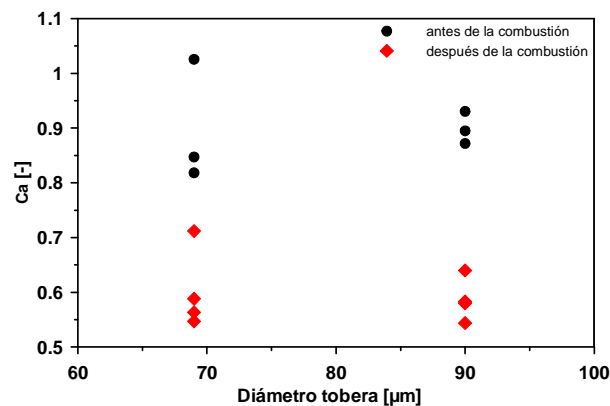


Figura 5.9: Representación del coeficiente de área  $C_a$  en función del diámetro de la tobera, antes y después de la combustión.

Considerando esa Figura 5.9, se puede observar que el coeficiente  $C_a$  es casi constante: aproximadamente igual a 0.9 para las toberas de 70 y 90  $\mu\text{m}$  antes de la combustión y más o menos igual a 0.6 para cada diámetro después de la combustión. Se puede notar que hay una gran diferencia en el coeficiente de área entre los ensayos que han sido realizados antes o después de la combustión. Eso confirma el hecho de que la degradación de las toberas es debido a una obstrucción del diámetro del orificio durante los ensayos en combustión.

Hemos hecho la suposición de que el ensuciamiento provenía de la estrategia de inyección que se había aplicado durante los ensayos de combustión. En efecto, con el fin de que el motor maqueta no sufra demasiadas cargas y que no se ensucien muy rápidamente las ventanas, se inyectaba solamente 1 vez cada 20 ciclos. Sin embargo, al quedarse en reposo el inyector con altas temperaturas, es probable que el combustible se descomponga y que algunas partículas sólidas provenientes del fuel descompuesto se peguen contra las paredes internas del orificio de la tobera.

Así pues se ha pensado en otra metodología de inyección: se inyecta 1 vez cada 20 ciclos la cantidad de combustible necesaria para la realización del ensayo y las otras 19 veces se inyecta una cantidad de combustible pequeña. Así no ocurre, o por lo menos se limita, el fenómeno de ensuciamiento de la tobera.

Así que se ha realizado otra tanda de ensayos en combustión (realizados con unas toberas nuevas) inyectando cada ciclo. Comparando los resultados obtenidos con la metodología 1 (1 iny./20 ciclos) y los obtenidos con la metodología 2 (1 iny./ciclo), se ha podido comprobar que la metodología 2 ha funcionado con éxito.

#### 5.1.4.2. VENTANAS

Dos problemas aparecieron en cuanto a las ventanas:

1/ El primer problema es común cuando se utilizan ventanas de visualización de la combustión: es su ensuciamiento. En efecto, durante los ensayos de combustión, partículas de hollín se acumulan y se pegan sobre las ventanas de visualización reduciendo la transmitancia.

Así que durante los ensayos, hay que vigilar si las ventanas se ensucian. Con las pequeñas cantidades de combustible que se inyectaban durante los ensayos del presente trabajo, no se ensuciaban demasiado las ventanas. Se podía ensayar durante por lo menos 2 horas antes de deber parar el motor maqueta para proceder a la limpieza de las ventanas de visualización.

2/ El segundo problema fue más grave ya que no conseguimos arreglarlo. Durante el procedimiento de montaje, antes de montar las ventanas, se dispone una gran junta de goma. Esa junta permite hacer la estanqueidad entre la ventana y la cámara de combustión. Sin embargo, esa junta estaba puesta justo al lado de la cámara de combustión y las altas temperaturas alcanzadas durante el ciclo la dañaban (se fundían ya que la temperatura máxima que pueden soportar es de 150°C y que las temperaturas que se alcanzan en la cámara de combustión son muchísimo más altas). Así que muy a menudo no se aseguraba la estanqueidad y aparecían fugas. La sola solución para arreglar este problema era parar el motor y cambiar la junta. No se ha podido resolver ese problema porque hubiera sido necesario proteger la junta expuesta a la llama y sólo se podía conseguir diseñando otra culata. Así que se realizó la serie de ensayos con ese inconveniente. Pero ha sido muy problemático: varias veces al día se debía parar el motor, esperar que se enfriara, desmontar y montar las ventanas con las juntas y las piezas necesarias a su estabilidad, y esperar de nuevo que se caliente el motor. Ese procedimiento ha sido muy largo y fastidioso, pero por lo menos, se ha aprovechado el tiempo para limpiar las ventanas de visualización.

### 5.1.4.3. LEY DE INYECCIÓN

La estrategia para la elección de la ley de inyección ha sido la siguiente: primero se quería obtener condiciones óptimas para reducir la dispersión cíclica del auto-encendido, y segundo se quería garantizar que en el punto muerto superior PMS estábamos en condiciones cuasi-estacionarias.

Con ese fin, se han realizado varias pruebas de inyección: inyecciones principal o inyecciones piloto + principal con duraciones y avances diferentes.

La ley de inyección que corresponde mejor a las condiciones deseadas es una inyección principal larga de 4000  $\mu\text{s}$ , inyectada 11 grados antes del PMS; como se ha representado en la Figura 5.10.

Así se obtienen condiciones cuasi-estacionarias en el PMS, momento durante el cual se toma una foto.

Sin embargo, hay que notar, que incluso si esta configuración es la más adecuada, queda mucha dispersión entre cada ciclo.

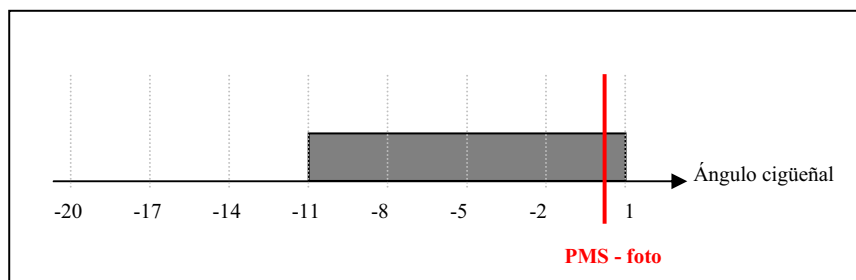


Figura 5.10: Representación del pulso de inyección utilizado durante el estudio.

## 5.2. TRATAMIENTO DE LOS DATOS

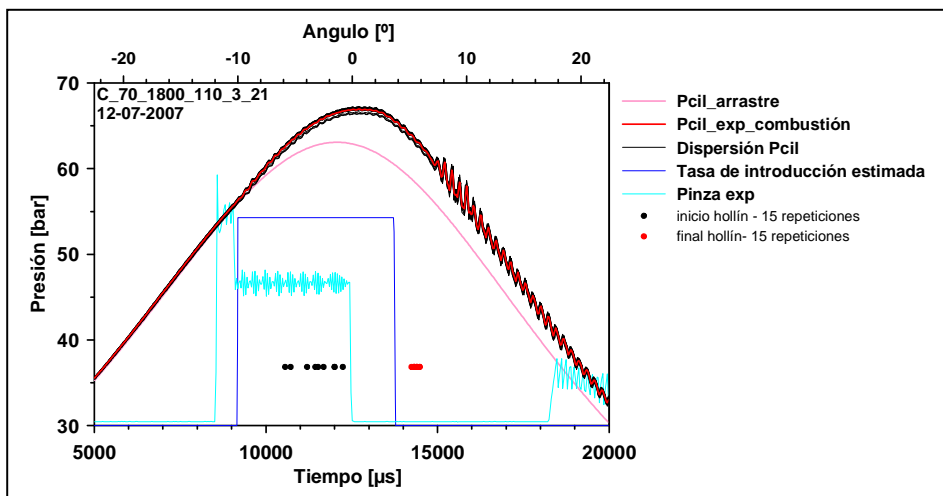
A continuación se presenta el procedimiento para obtener primero las condiciones termodinámicas necesarias al estudio, y luego el tratamiento de las imágenes.

A lo largo de este apartado, se presenta un ensayo de referencia (ver 5.3) para ilustrar el razonamiento seguido. Es un ensayo que se ha realizado a una temperatura en cámara de 815 K, con una densidad de 27.3  $\text{kg/m}^3$  y con 23.2 % de concentración másica de oxígeno. La presión de inyección es de 1800 bar y el diámetro de la tobera es de 70  $\mu\text{m}$ .

### 5.2.1. CÁLCULO DE LAS CONDICIONES TERMODINÁMICAS

Para cada ensayo realizado, los datos experimentales y termodinámicos han sido calculados y representados.

Se puede observar una ilustración de esos datos en las Figuras 5.11 y 5.12.



*Figura 5.11: Representación de las diferentes presiones en el cilindro, de la tasa de inyección, de la señal de la pinza, del inicio y final de aparición del hollín.*

Hay que tener claro que esta información, para verificar que no hay ningún problema durante los ensayos y para tener una idea global del proceso, se representa en función del tiempo. Sin embargo, luego, para el análisis de los resultados, sólo se considera las condiciones en el punto muerto superior.

En la primera gráfica, se representa:

- las curvas negras representativas de varias repeticiones de la señal de presión en el cilindro de un mismo ensayo. Así se puede verificar si hay mucha dispersión. En este caso hay poca.



- la curva roja representativa de la media de esas señales de presión. Es esta señal la que se utilizará para los cálculos.
- la curva rosa representa la presión en el cilindro de un ensayo en arrastre para las mismas condiciones de temperatura y presión de admisión que el ensayo de combustión.
- la curva azul claro es el pulso eléctrico de inyección. Se obtiene gracias a una pinza amperimétrica que permite ver la corriente que circula por el inyector.
- la curva azul oscuro es la tasa de combustible inyectado. Se obtiene mediante simulación.
- puntos negros y rojos que representan respectivamente el principio y el final de aparición del hollín de cada repetición. Esa información se obtiene mediante la cámara rápida.

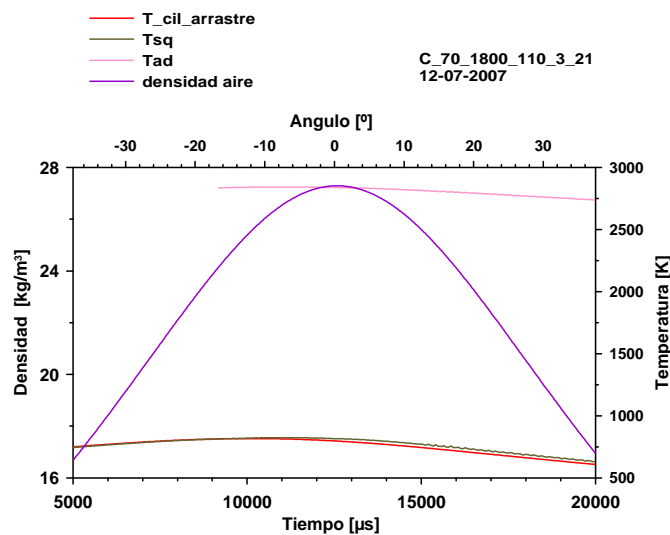


Figura5.12: Representación de las temperaturas en el cilindro y de la densidad.

En la segunda gráfica son representadas:

- **la temperatura ambiente en el cilindro, temperatura de arrastre.**  
La temperatura de arrastre dentro del cilindro a lo largo del ciclo se calcula de manera clásica a partir de la medida de la presión en arrastre en el cilindro [Payri 1997]. Para ese cálculo, se han supuesto nulas las deformaciones mecánicas nulas. También se ha supuesto un coeficiente de blowby de 5%.

Este coeficiente se ha estimado ya que en un motor de 2 tiempos es muy difícil de medir.

En un motor de 4 tiempos, las pérdidas de masa se hacen a través de los segmentos del pistón y se introducen en el cárter. El cárter es un volumen cerrado en el cual se puede fácilmente conectar una toma y medir el caudal de fuga. Comparando el caudal de fuga con el caudal de admisión se deduce el porcentaje de blowby. Y en un motor de 4 tiempos, este porcentaje es alrededor de 5%.

En un motor de 2 tiempos, las pérdidas de masa, de igual forma que para un motor de 4 tiempos, se hacen a través de los segmentos del pistón. Sin embargo, se dirigen a las lumbreras de admisión y de escape del motor, volumen abierto.

Para medir las pérdidas de masa en un motor de 2 tiempos, harían falta 2 caudalímetros, uno situado cerca de la lumbrera de admisión y el otro situado cerca de la lumbrera de escape. Esos caudalímetros tienen que ser muy precisos y medir de manera instantánea. Además, el caudalímetro de admisión tiene que medir el flujo en los dos sentidos. No se dispone de este tipo de material en el centro de CMT-Motores Térmicos.

Así que el coeficiente de blowby se ha calculado a partir del cálculo de la masa de aire al inicio y al final del ciclo cerrado. Para cada ensayo se disponía de la curva de presión en el cilindro y se ha calculado una masa de blowby. Haciendo un promedio para todos los ensayos, se ha estimado una masa de blowby de 5%.

- **la densidad del aire en el cilindro.**

La densidad instantánea del aire se obtiene a partir de los datos de volumen instantáneo y masa de aire instantánea y a partir de la ecuación de los gases perfectos.

El volumen instantáneo se calcula a partir de la geometría del cilindro considerando el volumen de la cámara de combustión y el volumen instantáneo desplazado por el mecanismo biela-manivela [Martín Díaz 2007].

La masa de aire instantánea se calcula a partir de la masa de aire admitido, la masa de los gases de escape, la masa de residuales y la de cortocircuito, la masa de blowby y la masa de combustible [Martín Díaz 2007].

- **la temperatura de los gases sin quemar.**

La temperatura de los gases sin quemar  $T_{SQ}$  se estima haciendo la hipótesis siguiente [Payri 1997, Arrègle 2008]: las pérdidas de calor desde la zona sin quemar hacia las paredes de la cámara de combustión están compensadas por

el aporte de calor desde la llama. La consecuencia es que se puede calcular la temperatura de los gases sin quemar considerando una compresión adiabática de los mismos desde el inicio de la combustión (SOC):

$$T_{SQ} = T_{cil_{SOC}} \cdot \left( \frac{P_{cil_{SOC}}}{P_{cil}} \right)^{\left( \frac{1-\gamma}{\gamma} \right)} \quad (\text{EC5.7})$$

- **la temperatura adiabática de llama.**

La temperatura adiabática de llama  $T_{ad}$  se estima a lo largo de toda la combustión por difusión con la expresión siguiente [Arrègle 2008]:

$$\boxed{T_{ad} = T_{SD} - \Delta T_{DISO}} \quad (\text{EC5.8})$$

$$T_{SD} = T_{SQ} + 37630.5 \cdot \frac{YO_{2\_cil}}{3.48} \quad (\text{EC5.9})$$

si  $T_{SD} < 2600 \text{ K}$

$$\Delta T_{DISO} = 1.554 \cdot 10^{-7} \cdot T_{SD}^{2.677} \quad (\text{EC5.10})$$

si  $T_{SD} > 2600 \text{ K}$

$$\Delta T_{DISO} = 7.136 \cdot 10^{-10} \cdot T_{SD}^{3.36} \quad (\text{EC5.11})$$

$YO_{2\_cil}$  es la concentración de oxígeno másica.  $T_{SD}$  representa la temperatura de los productos de la combustión si no hubiera disociaciones mientras que  $\Delta T_{DISO}$  es la pérdida de temperatura debido a las disociaciones.

### 5.2.2. TRATAMIENTO DE LAS IMÁGENES

El tratamiento de las imágenes tiene como objetivo cuantificar la longitud del lift-off, la longitud de la llama y obtener el factor KL a partir de la intensidad del hollín.

Previamente a la realización de los ensayos, se tiene que tomar 2 imágenes de referencia. Esas fotos van a permitir situar la llama con respecto al inyector y al final de la ventana de visualización, así como conocer la relación píxel/mm.

Primero, se toma una imagen con escala graduada (Figura5.13) en el interior de la cámara de combustión. Con esta imagen se calcula la resolución espacial y se obtiene la relación píxel/mm, parámetro básico para obtener las medidas reales de los parámetros geométricos del chorro.

Segundo, se toma una foto donde se visualiza la posición del inyector (Figura5.14). Este último sirve de punto de referencia para la totalidad del tratamiento.

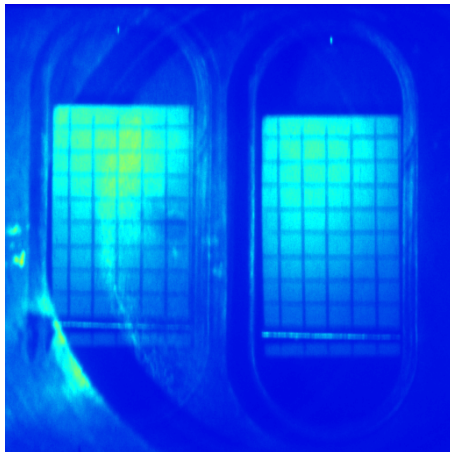


Figura5.13: Escala graduada.

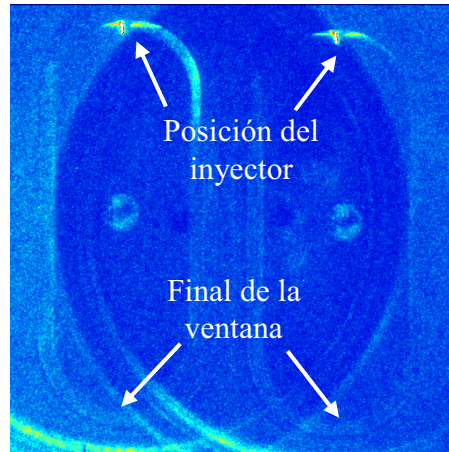


Figura5.14: Posición del inyector.

Luego las imágenes tomadas son procesadas con los pasos siguientes:

### 5.2.2.1. SEGMENTACIÓN Y CONECTIVIDAD

La segmentación consiste en obtener una imagen binaria para la cual se ha separado la llama del fondo. Es decir que se considera un nivel digital  $ND_{\text{umbral}}$  que distinga los píxeles del fondo de los que son la llama. El punto fundamental de esta operación es la elección de un criterio que permite definir para qué nivel digital se halla la frontera entre el fondo y la llama.

El nivel digital  $ND_{\text{umbral}}$  se obtiene como un porcentaje  $\beta_{\text{umbral}}$  de diferencia entre el nivel digital medio de los píxeles de fondo  $ND_{\text{fondo}}$ , obtenidos como el promedio de una zona de 20 píxeles en el origen del chorro, y los más luminosos de las imágenes  $ND_{\text{max}}$ :

$$ND_{\text{umbral}} = ND_{\text{fondo}} + \beta_{\text{umbral}} \cdot (ND_{\text{max}} - ND_{\text{fondo}})$$

El criterio que se emplea en el presente estudio es el mismo que ha utilizado, por ejemplo, García en su trabajo [García 2004]. Además criterios de este tipo ya han sido empleados frecuentemente para umbralizar imágenes, y presentan como único inconveniente el hecho de que el porcentaje  $\beta_{\text{umbral}}$  con el que se define el límite es arbitrario. Frente a ello, hay que decir que se ha intentado elegir ese límite de la manera más adecuada:

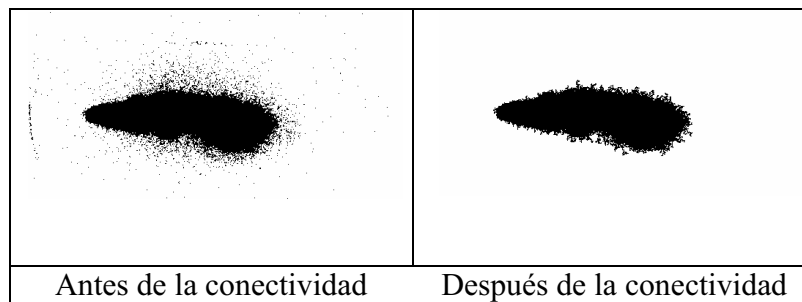
- el porcentaje  $\beta_{\text{umbral}}$  elegido y aplicado para las imágenes obtenidas con el método de visualización de la quimioluminiscencia del OH (determinación de la longitud del lift-off) para la mayoría de los ensayos es de 1%. Es un umbral pequeño que nos permite considerar la mayoría de los píxeles que tienen una intensidad de luz liberada por los radicales OH.

Si se aplica un porcentaje  $\beta_{\text{umbral}}$  de 0% es muy probable que algunos píxeles del fondo de la imagen se confundan con la llama. Y considerar un porcentaje  $\beta_{\text{umbral}}$  superior a 1% tampoco es muy aconsejable ya que se podría sobreestimar la longitud del lift-off.

- el porcentaje  $\beta_{\text{umbral}}$  escogido para las imágenes obtenidas con la visualización del hollín se ha elegido de manera diferente al del OH. En efecto se ha observado que la intensidad es casi constante en el perfil del hollín excepto en los bordes, donde es muy baja. Así que para que esos valores no influyan de manera demasiado significativa en la intensidad total del perfil se ha elegido un porcentaje  $\beta_{\text{umbral}}$  bastante elevado que permite la restricción de la llama considerada. Ese porcentaje  $\beta_{\text{umbral}}$  se obtiene de la manera siguiente: se aplica un primer porcentaje  $\beta_{\text{umbral}}$  arbitrario (aproximadamente de 8%). Luego comparando la imagen binaria con la imagen real (imagen bruta en color) se ajusta el umbral para que correspondan exactamente los bordes de la llama. Eso permite

delimitar de manera muy precisa el contorno de la llama y evitar considerar píxeles del fondo. Es a partir de ese perfil que se va a determinar la longitud de llama.

Además de aplicar un umbral a las imágenes, se realiza una operación de “conectividad”: cada píxel que no está vinculado con otro se elimina. La Figura 5.15 representa este proceso. Esta operación permite considerar exclusivamente los píxeles que pertenecen a la llama. También, con ese proceso, los reflejos se eliminan y se obtiene una mejor precisión.



*Figura 5.15: Imagen binaria de la llama.  
El inyector se halla a la izquierda y se inyecta el fuel de izquierda a derecha*

### 5.2.2.2. CALIBRACIÓN

La información obtenida a partir de la cámara lenta es una matriz de nivel digital. La calibración permite transformar esta intensidad digital en intensidad real. Esa operación sólo es necesaria para el perfil de intensidad del hollín ya que la utilización del OH solamente sirve para obtener la longitud del lift-off sin que sea necesario la intensidad real en este punto.

Los valores de intensidad para el hollín son, sin embargo, muy importantes ya que son indispensables para la determinación del factor KL.

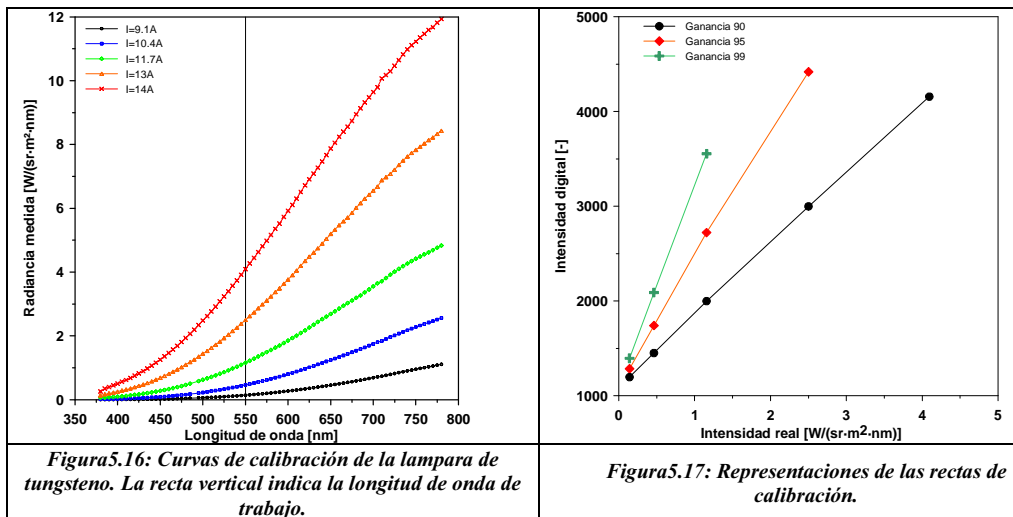
La calibración se realiza mediante una lámpara de tungsteno. Esta lámpara tiene que posicionarse de manera muy precisa: la distancia entre la lámpara y la cámara tiene que ser la misma que la distancia que existe entre la llama y el sistema óptico cuando se está efectuando la adquisición de imágenes durante el proceso de combustión. Además, el proceso de calibración de radiancia tiene que realizarse con el mismo sistema óptico con el que se obtienen las imágenes en el motor. Este procedimiento permite garantizar las mismas condiciones de

luminosidad entre el proceso de calibración y la configuración durante los ensayos.

La lámpara de tungsteno está alimentada por un sistema eléctrico: está colocada en serie con un generador de tensión y una resistencia variable. La intensidad de la instalación se puede controlar con la resistencia variable con una precisión de  $\pm 0.1A$ .

Se dispone de una calibración espectral de la lámpara en 5 puntos de funcionamiento (Figura5.16) definidos por las intensidades 9.1, 10.4, 11.7, 13 y 14A (dada por el fabricante).

Procediendo a la calibración, se obtiene la relación entre la intensidad digital y la intensidad real. La Figura5.17 muestra las curvas de calibración para la longitud de onda de 550 nm y para 3 ganancias de la cámara lenta.



### 5.2.2.3. OBTENCIÓN DE LOS PERFILES

A partir de la información obtenida del filtro de 310 nm se obtiene el perfil de intensidad del OH (Figura5.18). Y a partir de la información obtenida a partir del filtro de 550 nm se obtiene el perfil de intensidad del hollín (Figura5.19).

Estos perfiles se consiguen de la manera siguiente: en cada sección de la llama (una sección se define como la región perpendicular al eje del chorro en una posición  $x$  determinada) se realiza la media de la intensidad luminosa de los

píxeles que se consideran como llama. Ese procedimiento se puede hacer porque se ha observado que la intensidad es casi constante en el perfil.

De esta manera, no se pierden muchos datos y se obtiene una información mucho más utilizable. En efecto, la intensidad media se representa frente a la posición axial de la sección considerada; de esta manera se obtiene una visión 1D de la intensidad media de la llama.

Las figuras 5.18 y 5.19 representan la intensidad media de la sección de la llama frente a la posición axial del perfil OH y del hollín. El ejemplo representado es el de un chorro en un gas “ambiente” a una temperatura de 815K, una densidad de  $27.3\text{kg/m}^3$  y una concentración de oxígeno de 23.2% másico. La presión de inyección es de 1800 bar y el diámetro del orificio de la tobera es de  $70\ \mu\text{m}$ .

Para cada imagen, el combustible es inyectado por el orificio simbolizado de color rojo en la izquierda de la imagen. La inyección se efectúa de la izquierda hacia la derecha. El límite de la ventana está representado con una curva roja.

En la Figura 5.18 se ha representado el perfil de la intensidad digital del OH. Se puede observar la longitud del lift-off.

En la Figura 5.19 se ha representado el perfil de la intensidad del hollín. Se puede observar la longitud de la llama.

Para ambas imágenes, las líneas de color blanco ponen en relación el valor de la intensidad media (gráfica de abajo) con la sección considerada (foto de arriba).

Si se compara el inicio de aparición del OH y del hollín, se puede observar que el inicio del OH empieza antes. De esta forma se verifica que hace falta un tiempo entre la formación de los precursores y la aparición del hollín.

Si se compara el final de aparición del OH y del hollín, se puede observar que hay un pequeño desfase entre ambos y que el perfil del OH termina después del perfil del hollín. Eso se debe al umbral aplicado, ya que este último es más bajo para el OH y que se considera una porción de llama más importante. En cualquier caso, se considera la longitud de llama asociada al perfil de hollín.

A partir de esa intensidad real de hollín, de la temperatura adiabática y de la expresión (EC4.1), se puede obtener el perfil del factor KL representado en la Figura 5.20.



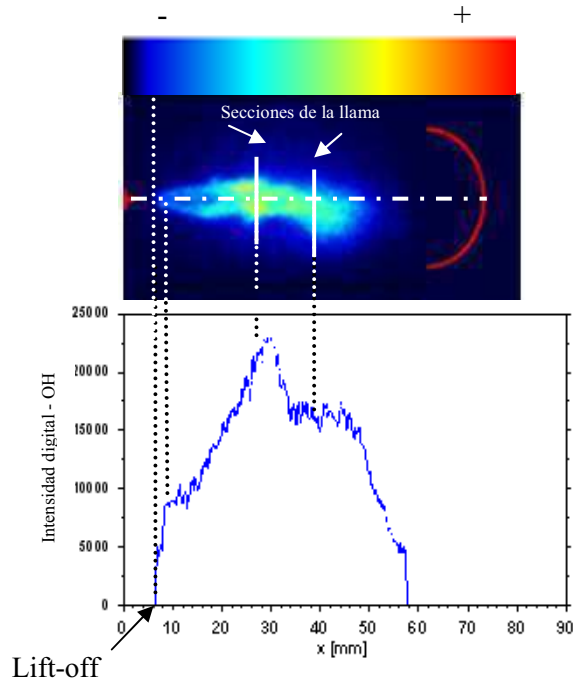


Figura 5.18: Perfil de intensidad del OH.

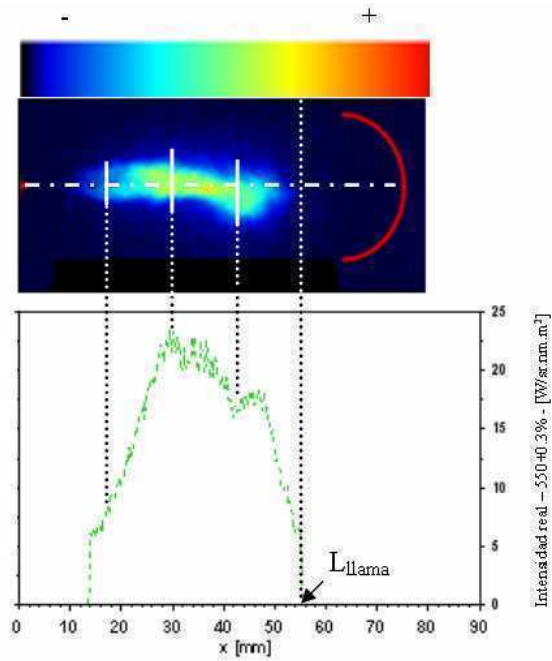


Figura 5.19: Perfil de intensidad del hollín.

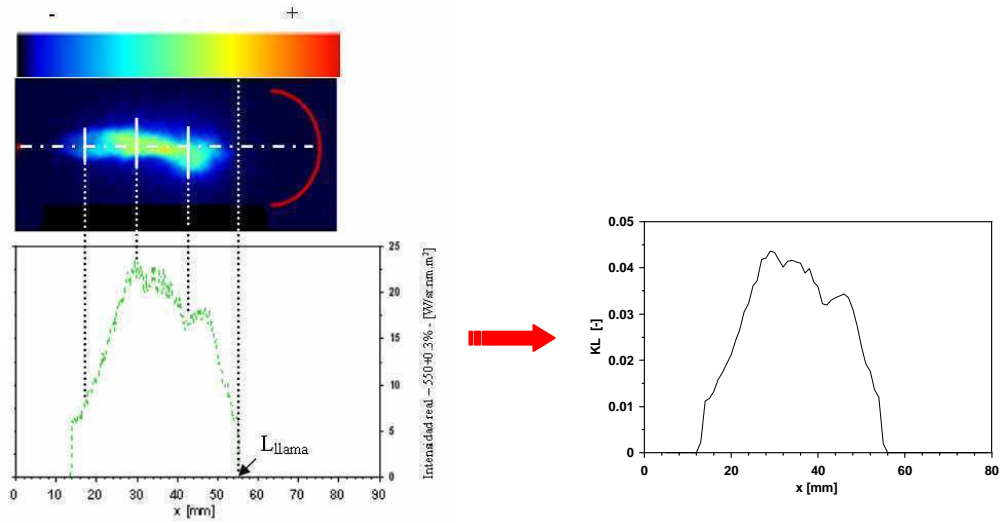


Figura 5.20: Ilustración de la obtención del perfil del factor KL.

### **5.3. PLAN DE TRABAJO**

Antes de introducir el plan de trabajo, se van a recordar los objetivos de este estudio y se va a hacer una síntesis de las limitaciones experimentales y de tratamiento.

El objetivo principal del trabajo es profundizar en la comprensión del proceso de formación de hollín en una llama de difusión diesel en condiciones de combustión de baja temperatura, con baja concentración de oxígeno.

Para lograr este objetivo principal, se han definido varios objetivos particulares: caracterizar el efecto de la concentración de oxígeno sobre el lift-off, caracterizar las consecuencias sobre el proceso de formación de hollín y cuantificar el impacto sobre los dos puntos anteriores del aumento de la presión de inyección y el uso de orificios de inyección extremadamente pequeños. Para ello, se ha desarrollado una metodología de medida simultánea del lift-off y de la concentración de hollín en la llama y, sobre todo, una metodología basada en el análisis del proceso de mezcla en el chorro de combustible que permita cuantificar los mecanismos físicos-químicos estudiados.

Para responder a estos objetivos, se van a realizar ensayos con un motor óptico con ventanas bastante largas para que se vea la llama en su totalidad. Este motor puede trabajar con 2 configuraciones diferentes lo que va a permitir alcanzar la concentración de oxígeno deseada que va a variar entre 23 y 15% másico.

Las toberas utilizadas tienen un diámetro de 70 y 90  $\mu\text{m}$  y la estrategia de inyección ha sido condicionada por 2 factores: el ensuciamiento de las toberas y la dispersión cíclica. Así que para cada 20 ciclos se inyecta una cantidad de fuel durante 4000  $\mu\text{s}$  para 1 ciclo y para los 19 ciclos restantes se inyecta el combustible durante 500  $\mu\text{s}$ .

Se emplean 2 cámaras de visualización: la primera es una cámara rápida que va a proporcionar una información sobre la evolución de la combustión. La segunda cámara es una cámara lenta intensificada que permite visualizar a la vez la intensidad del OH y del hollín. Con esta información se puede cuantificar la longitud de llama, la longitud del lift-off y se obtiene el perfil de intensidad del hollín y del KL.

Debido a las exigencias de la cámara lenta y de la estrategia de inyección, se va a tomar una sola foto por ciclo, cada 20 ciclos, en el punto muerto superior PMS donde las condiciones son óptimas para obtener una llama de difusión en condiciones cuasi-estacionarias.

Para cada ensayo se realizaron 15 repeticiones. De esas 15 repeticiones, generalmente, solo se han tratado 3 fotos, las que parecían más representativas. Tratarlas todas no hubiera sido conveniente debido a la carga enorme de trabajo que engendra el tratamiento.

Con el fin de reducir la dispersión cíclica del autoencendido, la presión y la temperatura de admisión elegidas son las máximas que se pueden alcanzar con el motor maqueta, condiciones que se pueden obtener en invierno como en verano. La presión y la temperatura de admisión son respectivamente de 3 bar y 110°C. Eso permite alcanzar una temperatura en el cilindro en el PMS de 815K con una densidad de 27.3 kg/m<sup>3</sup>.

Las toberas elegidas para la realización del estudio son toberas mono-orificio, cónicas, y de 70 y 90 μm de diámetro.

Para cada tobera se realizó el estudio paramétrico siguiente:

- variación de la concentración de oxígeno O<sub>2</sub> de 23 a 15 % másico,
- variación de la presión de inyección PCR de 500 a 1800 bar (4 puntos de 500, 1000, 1500 y 1800 bar).

Los ensayos que se han realizado se han presentado en la Figura5.21 y los valores exactos se han anotado a continuación en la Tabla5.7.

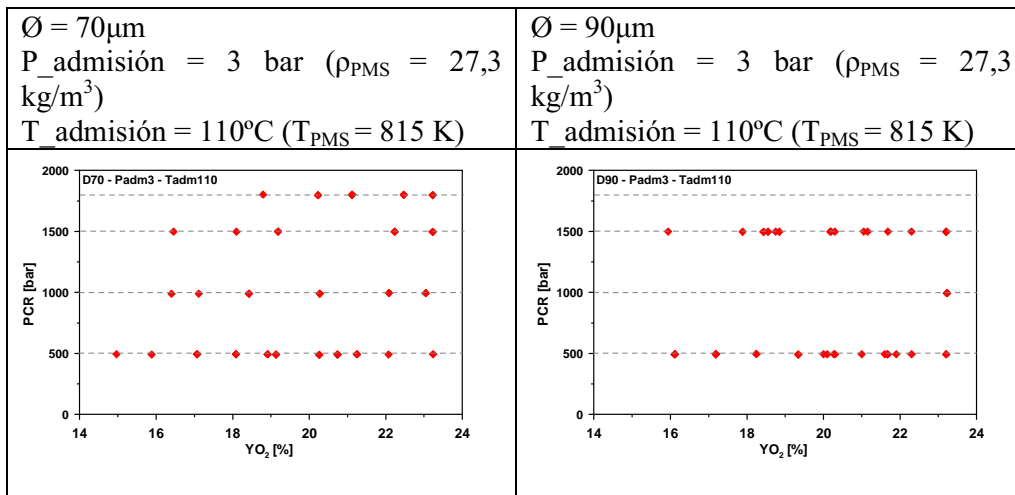


Figura5.21: Representaciones de los ensayos realizados.

<b>Diámetro tobera</b>	<b>PCR</b>	<b>YO<sub>2</sub>-másica</b>
<b>[μm]</b>	<b>[bars]</b>	<b>[%]</b>
70	500	23.2
70	500	22.1
70	500	21.2
70	500	20.7
70	500	20.2
70	500	19.1
70	500	18.9
70	500	18.1
70	500	17.1
70	500	15.9
70	500	15
70	1000	23
70	1000	22.1
70	1000	20.2
70	1000	18.3
70	1000	17.1
70	1000	16.3
70	1500	23.2
70	1500	22.2
70	1500	19.2
70	1500	18.1
70	1500	16.5
70	1800	23.2
70	1800	22.5
70	1800	21.1
70	1800	20.2
70	1800	18.8

<b>Diámetro tobera</b>	<b>PCR</b>	<b>YO<sub>2</sub>-másica</b>
<b>[μm]</b>	<b>[bars]</b>	<b>[%]</b>
90	500	23.2
90	500	22.3
90	500	21.9
90	500	21.7
90	500	21.6
90	500	21
90	500	20.3
90	500	20.1
90	500	20
90	500	19.3
90	500	18.2
90	500	17.2
90	500	16.1
90	1000	23.2
90	1500	23.2
90	1500	22.3
90	1500	21.7
90	1500	21.2
90	1500	21.1
90	1500	20.3
90	1500	20.2
90	1500	18.9
90	1500	18.7
90	1500	18.6
90	1500	18.4
90	1500	17.9
90	1500	16

*Tabla 5.7: Valores numéricos de los ensayos experimentales para el diámetro 70 y 90 μm.*



# CAPÍTULO 6

## RESULTADOS

### Contenido

---

6.1. Estudio de la longitud del lift-off.....	172
6.1.1. Tendencias.....	172
6.1.2. Cuantificación.....	174
6.1.3. Velocidad de frente de llama.....	183
6.2. Estudio de la longitud de llama – proceso de mezcla.....	188
6.3. Análisis del dosado en el lift-off.....	191
6.4. Consecuencia sobre $F_{SOOT}$ .....	193
6.5. Longitud de aparición de hollín.....	197
6.6. Condiciones “Cero-soot”.....	199

---





A continuación se van a presentar los resultados obtenidos aplicando la metodología y el tratamiento presentados en los capítulos anteriores.

Se va a analizar el efecto de la concentración de oxígeno, de la presión de inyección y del diámetro de la tobera. Se presentará el efecto de cada uno de esos parámetros de funcionamiento sobre:

- la longitud del lift-off,
- la longitud de la llama,
- el dosado en el lift-off del paquete 5,
- el parámetro  $F_{SOOT}$ , representativo de la concentración de hollín formado,
- y la longitud de aparición de las partículas de hollín.

Al final de cada párrafo se presentarán 2 Figuras que van a sostener el razonamiento seguido. La primera Figura representa el efecto de la presión de inyección y de la concentración de oxígeno para el diámetro de 70  $\mu\text{m}$  mientras que la segunda Figura representa el efecto de la presión de inyección y de la concentración de oxígeno para el diámetro de 90  $\mu\text{m}$ .

La nomenclatura de los ensayos presentados es la siguiente:

nomenclatura	Diámetro tobera	PCR	$T_{adm}$	$P_{adm}$	$T_{cil\_PMS}$	$\rho_{cil\_PMS}$
	[ $\mu\text{m}$ ]	[bar]	[ $^{\circ}\text{C}$ ]	[bar]	[K]	[ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
70-500-110-3	70	500	110	3	815	27.3
70-1000-110-3	70	1000	110	3	815	27.3
70-1500-110-3	70	1500	110	3	815	27.3
70-1800-110-3	70	1800	110	3	815	27.3
90-500-110-3	90	500	110	3	815	27.3
90-1500-110-3	90	1500	110	3	815	27.3

*Tabla 6.1: Nomenclatura de los ensayos presentados.*

Hay que recordar que, a pesar de haber elegido la estrategia de inyección más adecuada para limitar la dispersión, esta última queda omnipresente. La llama es muy poco repetitiva y eso se identifica claramente en las gráficas. Los resultados se ven muy afectados por esa dispersión y los análisis son limitados. Sin embargo aparecen tendencias generales claras que nos permiten sacar conclusiones.

## **6.1. ESTUDIO DE LA LONGITUD DEL LIFT-OFF**

### **6.1.1. TENDENCIAS**

Como se ha comentado en el estudio bibliográfico, el lift-off tiene un papel muy importante en la formación de hollín ya que es un indicador de la cantidad de aire englobada antes de la zona de combustión. Esa cantidad de oxígeno englobada va a determinar el dosado en el lift-off, la cantidad de precursores de hollín que se van a formar y, por tanto, la cantidad de partículas de hollín que se van a desarrollar en la llama.

En las Figuras 6.1 y 6.2, se han representado la longitud del lift-off frente a la concentración de oxígeno.

Se puede observar, que para cualquier diámetro de tobera o cualquier presión de inyección, al disminuir la concentración de oxígeno, la longitud del lift-off aumenta. Esos resultados son idénticos a los de Siebers et al. [Siebers 2002] o de Idicheria y Pickett [Idicheria 2005].

Sin embargo, parece que ese aumento en la longitud del lift-off en función de la bajada de la concentración de oxígeno es distinto en función de la presión de inyección. En efecto, si la presión de inyección es baja, el efecto de la concentración de oxígeno es más débil que para presiones de inyección más altas.

En las Figuras 6.1 y 6.2, las diferentes presiones de inyección se pueden identificar con colores y motivos distintos.

La tendencia general es que al aumentar la presión de inyección, la longitud del lift-off aumenta también. Esos resultados son idénticos a los de Siebers y Higgins [Siebers 2000, Siebers 2001] o de García [García 2004].

Sin embargo, la tendencia debido a la influencia del diámetro de la tobera no se detecta tan fácilmente. Puede ser que no haya efecto del diámetro de la tobera, lo que estaría en adecuación con los resultados teóricos desarrollados por Peters [Peters 2000]. O también puede ser que la influencia del diámetro sea muy pequeña, lo que correspondería a resultados encontrados por ejemplo por García [García 2004], y que no se pueda notar simplemente mirando la gráfica.

A continuación se va a efectuar un análisis para cuantificar el efecto de cada parámetro.

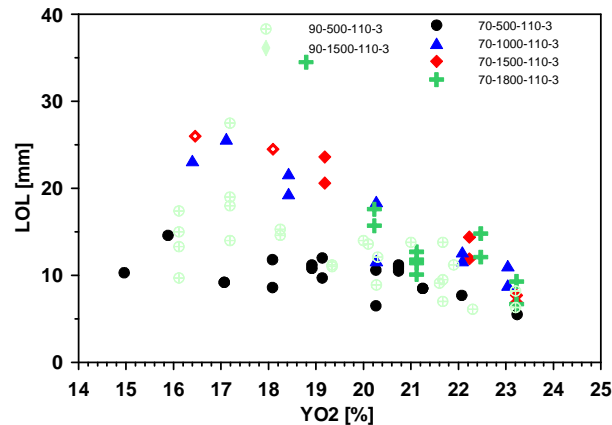


Figura6.1: Representación de la longitud del lift-off en función de la concentración de oxígeno para el diámetro de 70µm, PCR 500, 1000, 1500 y 1800 bar.

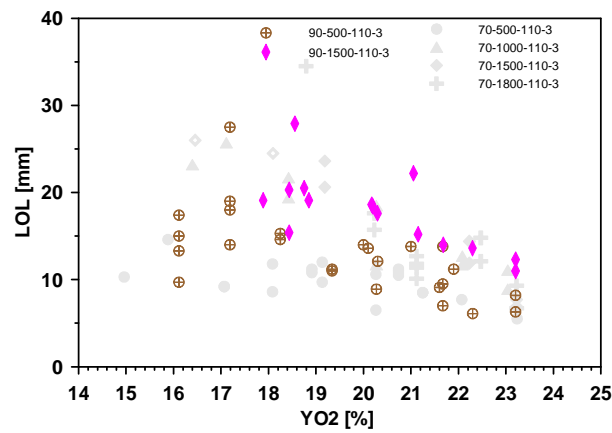


Figura6.2: Representación de la longitud del lift-off en función de la concentración de oxígeno para el diámetro de 90µm, PCR 500 y 1500 bar.

### 6.1.2. CUANTIFICACIÓN

A partir de los resultados obtenidos, se quiere realizar una cuantificación (por supuesto con sus límites debido a la gran dispersión) para analizar y comparar nuestros resultados con los presentados en la bibliografía.

Se propone cuantificar el efecto del diámetro de la tobera, de la presión de inyección y de la concentración de oxígeno sobre la longitud del lift-off, y expresar esas dependencias mediante una ecuación general similar a la presentada en el estudio bibliográfico:

$$LOL = k \cdot \phi^a \cdot U_0^b \cdot Y_{O_2}^e \quad (\text{EC6.1})$$

Así que a partir de los ensayos realizados, se ha procesado a un estudio estadístico (mediante el programa SPSS).

Los resultados se han anotado en la Tabla6.2:

	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>e</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
	(Ø)	(U <sub>0</sub> )	(Y <sub>O<sub>2</sub></sub> )	
<b>PRESENTE ESTUDIO</b>	0.153	0.918	-1.984	0.62

*Tabla6.2: Cuantificación de los diferentes parámetros sobre la longitud del lift-off. Datos obetnidos para este estudio.*

Los resultados obtenidos no son del todo buenos ( $R^2 = 0.62$ ), probablemente debido a la dispersión considerable que había durante los ensayos. Se han representado en la Figura6.3.

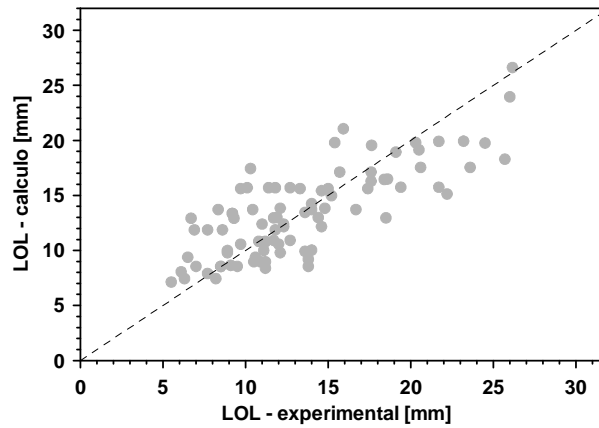


Figura6.3: Representación de la longitud del lift-off experimental y calculada. Ensayos del presente estudio.

En la Tabla6.3 siguiente, se comparan los resultados hallados con los presentados en el estudio bibliográfico:

		<b>a</b>	<b>b</b>	<b>e</b>
		( $\varnothing$ )	(Uo)	(YO <sub>2</sub> )
<b>PRESENTE ESTUDIO</b>		0.153	0.918	-1.984
<b>TEORICO</b>	[Peters 2000]	-	1	-
<b>SIEBERS Y HIGGINS</b>	[Siebers 2001, Siebers 2002]	0.34	1	-
<b>MUSCULUS</b>	[Musculus 2003]	-	-	-
<b>GARCÍA</b>	[García 2004]	0.12	0.5	-

Tabla6.3: Cuantificación de diferentes parámetros sobre la longitud del lift-off. Datos obtenidos durante el estudio de la presente tesis y también a partir de los resultados presentados en el estudio bibliográfico.

Se puede observar que al realizar la cuantificación, se nota un ligero efecto del diámetro de la tobera. Es muy similar al que encontró García y puede también ser causado por el efecto de la vaporización, explicado en el apartado 2.3.5. Sin embargo, también podría ser debido a la dispersión.

El efecto de la presión de inyección es casi idéntico a influencias encontradas por Siebers y Higgins y también resultados teóricos. La influencia que se identifica en este estudio parece razonable.

Como no se tenía a disposición una cuantificación del efecto de la concentración de oxígeno en la longitud del lift-off, se realizó un pequeño estudio a partir de

los resultados del centro de investigación de Sandia. Propone en su página web ([www.ca.sandia.gov/ECN/](http://www.ca.sandia.gov/ECN/)) una base de datos con numerosos resultados experimentales.

Para este estudio, sólo se han seleccionados algunos ensayos:

. primero se consideraron exclusivamente los ensayos de Sandia realizados en combustión (es decir  $YO_2 \neq 0$ ).

. segundo, se han considerado solamente los ensayos efectuados por Sandia con el combustible diesel #2 – D2. En efecto, los investigadores de Sandia realizaron ensayos con 7 combustibles diferentes (Tabla6.4), sin embargo ninguno de esos corresponden al combustible que hemos utilizado en este trabajo, referencia GO CEC RF-06-99. Así pues se ha elegido el combustible que tenía las características más cercanas a nuestro combustible, comparando la temperatura, densidad así como el ratio atómico H/C y el número de cetano.

	<b>fuel</b>	$\rho_{\text{fuel}}$	$T_{\text{fuel}}$	<b>Número de cetano</b>	<b>Ratio atómico H/C</b>
		[kg/m <sup>3</sup> ]	[K]	[-]	[-]
<b>SANDIA</b>	T70	808	373	-	2.84
	GE80	858	373	-	3.15
	BM88	907	373	-	2.49
	NHPT	613	373	56	2.29
	CET	373	436	100	2.13
	HMN	689	436	15	2.13
	CN80	724	373	80	2.13
		682	436	80	2.13
	<b>D2</b>	<b>767</b>	<b>373</b>	<b>46</b>	<b>1.8</b>
<b>712</b>		<b>436</b>	<b>46</b>	<b>1.8</b>	
<b>CMT</b>	<b>Referencia CMT GO CEC RF-06-99</b>	<b>830</b>	<b>313</b>	<b>51</b>	<b>1.7843</b>

Tabla6.4: Combustibles utilizados por el centro de investigación de Sandia

Hubiera sido preferible utilizar exclusivamente el combustible diesel #2 – D2 de Sandia con una densidad de 767 kg/m<sup>3</sup>, porque esta última es más cercana a la del combustible utilizado por el CMT – Motores Térmicos referencia GO CEC RF-06-99. Sin embargo habían muy pocos ensayos realizados con esta densidad

y los resultados no hubieran sido muy representativos así que se tienen en consideración todos los ensayos realizados con el combustible diesel #2 – D2.

Los rangos de la medidas para los ensayos considerados se han anotado en la Tabla6.5. Se examinaron un total de 172 ensayos.

<b>X<sub>o2</sub></b>	<b>densidad</b>	<b>PCR</b>	<b>diámetro</b>	<b>T<sub>fuel</sub></b>	<b>T<sub>adm</sub></b>
<b>[%]</b>	<b>[kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>[bar]</b>	<b>[μm]</b>	<b>[K]</b>	<b>[K]</b>
21 a 15	7.3	1380	180	373 a 436	950 a 1300
21 a 15	14.8	410 a 1860	180	373 a 436	800 a 1300
21 a 15	30	1380	180	373 a 436	800 a 1300
21 a 15	58.5	1380	180	373 a 436	800 a 1300
21	7.3	1380	246	436	950 a 1300
21	14.8	1380	246	436	800 a 1300
21	30	1380	246	436	800 a 1300
21	7.3	1380	363	436	1000
21	14.8	480 a 1860	363	436	800-1300
21	30	1380	363	436	1000
21 a 15	7.3	1380	100	436	800 a 1300
21 a 15	14.8	1380	100	436	800 a 1300
21 a 15	30	1380	100	436	800 a 1300
15	58.7	1380	100	436	1000

Tabla6.5: Ensayos de Sandia considerados.

A partir de esos ensayos se ha procesado a un estudio estadístico (mediante el programa SPSS) y se han obtenido las influencias siguientes:

	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>e</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
	(Ø)	(U <sub>o</sub> )	(XO <sub>2</sub> )	
<b>RESULTADOS SANDIA</b>	0.127	-0.631	-0.935	0.97

Tabla6.6: Cuantificación de los diferentes parámetros sobre la longitud del lift-off. Datos obtenidos por el centro de investigación de Sandia.

$$LOL \propto \phi^{0.127} \cdot U_0^{-0.631} \cdot Y_{O_2}^{-0.935} \quad (\text{EC } 6.2)$$

La buena adecuación de los ensayos experimentales y simulados se ha representado en la Figura 6.4.

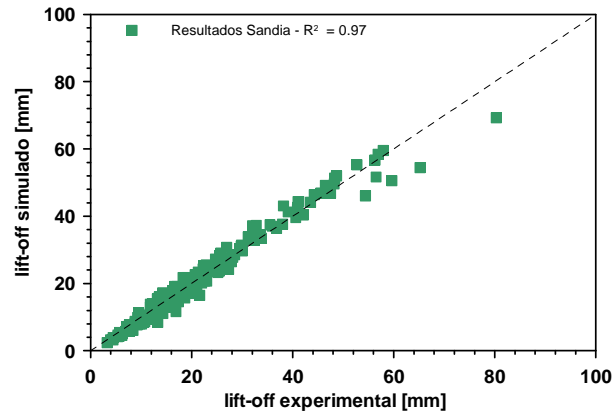


Figura 6.4: Representación de la longitud del lift-off experimental y calculada. Ensayos de Sandia.

La comparación de esos nuevos valores con los resultados de la bibliografía y los de la presente tesis, se encuentran en la Tabla 6.7 siguiente:

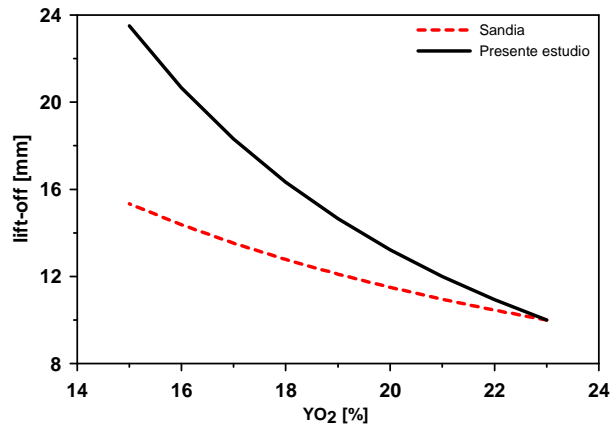
		<b>a</b>	<b>b</b>	<b>e</b>
		( $\emptyset$ )	( $U_0$ )	( $YO_2$ )
<b>PRESENTE ESTUDIO</b>		0.153	0.918	-1.984
<b>TEORICO</b>	[Peters 2000]	-	1	-
<b>SIEBERS Y HIGGINS</b>	[Siebers 2001, Siebers 2002]	0.34	1	-
<b>WEB SANDIA</b>	<a href="http://www.ca.sandia.gov/ECN/">www.ca.sandia.gov/ECN/</a>	0.127	0.631	-0.935
<b>MUSCULUS</b>	[Musculus 2003]	-	-	-
<b>GARCÍA</b>	[García 2004]	0.12	0.5	-

Tabla 6.7: Cuantificación de diferentes parámetros sobre la longitud del lift-off. Datos obtenidos durante el estudio de la presente tesis y también a partir de los resultados presentados en el estudio bibliográfico.

Se puede observar que existe una gran diferencia entre el coeficiente de -0.935 de Sandia y el que hemos encontrado para el presente estudio que es de -1.984.

En efecto, si se define una longitud del lift-off idéntica para 23% de concentración másica de oxígeno, al disminuir esa concentración, la longitud del lift-off no aumenta tan rápidamente para los ensayos de Sandia como para los ensayos del presente trabajo (Figura 6.5).





*Figura 6.5: Representación de la diferencia para los resultados de la cuantificación de la longitud del lift-off en función de la concentración de oxígeno para el presente estudio y el de Siebers et al [Siebers 2002]. Se definió un punto similar a 23% y se dedujo las tendencias para concentraciones de oxígeno más bajas.*

Esas diferencias se podrían explicar por varias razones:

1/ en el trabajo de Sandia, se considera una concentración de oxígeno volumétrica mientras que en el presente estudio se considera una concentración de oxígeno másica.

A partir de los ensayos de Sandia, se ha calculado la concentración de oxígeno másica y se ha realizado de nuevo el estudio estadístico. La nueva influencia considerando una concentración de oxígeno másica es de -0,959. Esa tendencia es similar a la engendrada por la concentración de oxígeno volumétrico (-0,935) y queda muy alejada de la del presente estudio.

2/ una diferencia en la instalación experimental: la composición química en el interior de la cámara de combustión no es exactamente la misma para una concentración de oxígeno determinada.

En efecto, en la cámara de volumen constante de Sandia, las especies presentes en el momento de la combustión son: H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> [Siebers 2002]. Esas condiciones se obtienen mediante un encendido provocado con una combustión premezclada muy pobre. Mientras que en el motor maqueta, al recircular los gases de escape, las especies presentes en el momento de la combustión son H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> y también NO<sub>x</sub>, CO, HC, y hollín.

El efecto que estas especies podrían tener en el lift-off no está muy claro así que no se sabe exactamente si la diferencia de tendencia engendrada por la concentración de oxígeno se debe a distintas concentraciones de especies provocada por las diferentes instalaciones experimentales.

3/ un problema de distinción de baja intensidad con la cámara lenta utilizada para el presente trabajo. Podría ser que la cámara utilizada no sea capaz de distinguir la luminosidad pequeña del radical OH. Se ha verificado si no habían problemas en el umbral aplicado o en el tratamiento.

Se ha puesto a continuación dos ejemplos que demuestran que el umbral aplicado no engendra el error que se identifica entre los ensayos de Sandia y los de la presente tesis.

El primer ejemplo permite sobre todo visualizar las imágenes y verificar que no hay ningún problema en el tratamiento. Se ha representado en la Figura 6.6.

La imagen escogida representa la llama filtrada con un filtro OH para un ensayo realizado con una tobera de 90  $\mu\text{m}$ , con una presión de inyección de 500 bar y una concentración volumétrica de 21% de oxígeno (ensayo denominado 90\_500\_110\_3\_21). Se puede observar a la izquierda la imagen bruta en color que se toma con la cámara lenta y a la derecha, la imagen en blanco y negro que se obtiene después del tratamiento en la cual se ha aplicado el umbral y la conectividad a la llama. Se nota que las dos llamas son muy parecidas y que empiezan y terminan en el mismo tiempo. Se ha repetido este proceso para la mayoría de los ensayos sin encontrar ningún problema significativo. Así que parece que el problema no es debido al tratamiento.

En una segunda parte, se quiere verificar que el umbral aplicado no engendra un error que se amplifica con una concentración de oxígeno baja. Para la mayoría de los casos se ha aplicado un umbral de 1% con el fin de considerar cada píxel que tiene una intensidad de luz liberada por los radicales OH.

Aplicar un umbral o realizar una operación de segmentación consiste en obtener una imagen binaria para la cual se ha separado la llama del fondo.

Si se aplica un umbral pequeño, se considera una parte importante de la llama, mientras que si el umbral es grande, la porción de llama considerada se reduce, ya que en la periferia de la llama los valores de intensidades son pequeños.

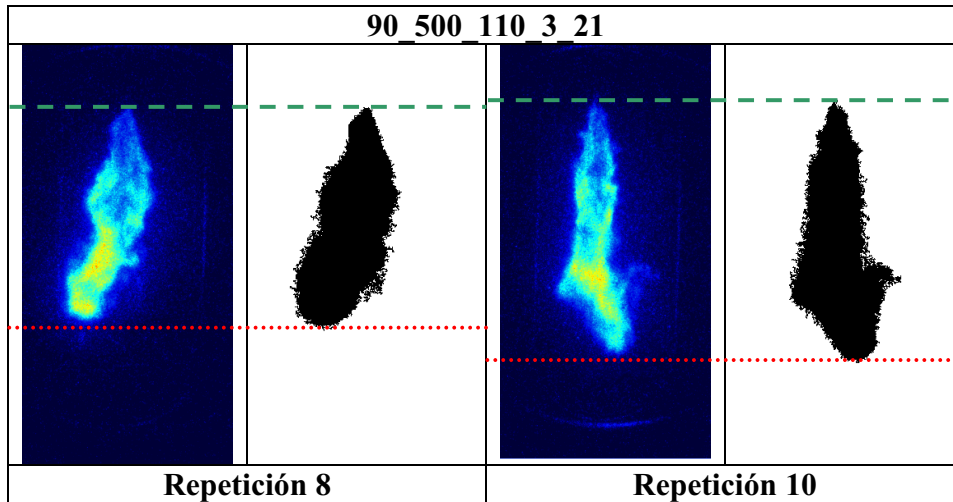


Figura6.6: Representación de dos repeticiones de un mismo ensayo. Se verifica la buena adecuación (para la longitud del lift-off y el hollín) de la llama “bruta” (izquierda) y la llama “tratada” (una vez aplicado la conectividad y el umbral – derecha).

En la Figura6.7 se ha querido representar el error introducido por un umbral de 1% o de 5% comparándolo con un valor medio obtenido a partir de un umbral de 0%.

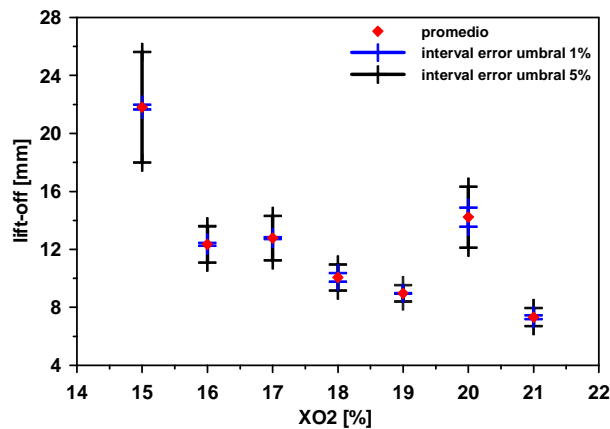


Figura6.7: Representación de los intervalos mini y maxi para los umbrales de 1% y 5% y del valor obtenido con un umbral de 0%. Se ha realizado un promedio para cada repetición de los diferentes ensayos representados.

Se eligieron ensayos realizados con un diámetro de tobera de 70  $\mu\text{m}$ , una presión de inyección de 500 bar, una temperatura de admisión de 110°C y una presión de

admisión de 3 bar. Para cada ensayo se consideraron una concentración de oxígeno entre 21 y 15% volumétrico.

Primero se eligió un umbral de 0% para tener un punto de referencia. Se hizo un promedio para cada repetición de los diferentes ensayos. Los valores se han representado con un símbolo rojo en la Figura 6.7.

Durante el tratamiento de los ensayos no se quiso elegir un umbral de 0%, ya que podría ser un valor “peligroso” que no permitiría diferenciar bien el fondo de la llama en algunos casos.

Después se trataron los mismos ensayos con un umbral de 1 y 5%. Se calculó el error engendrado por la diferencia de umbral y se aplicó ese error al punto de referencia. Los valores mini y maxi para cada ensayo se han representado en la misma Figura 6.7.

Así se puede observar que el error introducido por el umbral de 1% es muy pequeño (alrededor de 3,5%) y que no depende de la concentración de oxígeno. El error introducido por el umbral de 5% es mucho más grande, más o menos de 26%.

Así que la elección de un umbral de 1% no es mala consideración; el error engendrado es muy pequeño y no se modifica en función de la concentración de oxígeno. Además, si no se considera el ensayo con una concentración de oxígeno de 15% para el umbral de 5%, se puede afirmar que el error tampoco depende de la concentración de oxígeno.

De esta manera se verifica que el problema entre los datos de Sandia y los del presente trabajo no es debido a ese parámetro. Y así se ha demostrado que el problema no proviene del tratamiento de los datos.

Sin embargo, es imposible comparar las dos configuraciones distintas de cámaras (la de Sandia y la del presente estudio). No hay más manera de verificar si el problema proviene del sistema óptico.

Las posibles razones avanzadas para explicar la diferencia que hay entre los resultados obtenidos para el trabajo de Sandia y para el presente estudio no justifican el comportamiento obtenido.

Por lo menos la tendencia es idéntica en los dos casos, y se pueden sacar conclusiones sobre las tendencias.

### 6.1.3. VELOCIDAD DEL FRENTE DE LLAMA

La longitud del lift-off es un parámetro importante en la formación de hollín, ya que el dosado de un elemento de combustible en esta posición determina la cantidad de precursores de hollín que se van a formar en la llama. Así que se ha realizado un estudio más profundo sobre esa longitud del lift-off.

La hipótesis que se ha hecho, es que la longitud del lift-off es la posición axial donde hay un equilibrio entre la velocidad de convección aguas abajo generado por el proceso de inyección y la velocidad de frente de llama de combustión turbulenta que trata de remontar aguas arriba.

Así que parece interesante estudiar con más detalle esa velocidad de frente de llama y cuál es el efecto que podría tener en la longitud del lift-off. La velocidad del frente de llama puede depender de la concentración de oxígeno (cuanto más baja es esta concentración, más lenta es la velocidad de propagación), de la temperatura local de la llama (cuanto más alta es la temperatura, más alta será la velocidad) o de los efectos térmicos de la llama (turbulencia, longitud líquida...).

Según el estudio teórico desarrollado por Peters [Peters 2000], la velocidad del frente de llama  $u_{FF}$  en condiciones turbulentas se puede expresar de la manera siguiente:

$$u_{FF} = u_{FFlam} \left( 1 + \frac{u' \cdot l}{\nu} \right)^{1/2} \approx u_{FFlam} \left( \frac{u' \cdot l}{\nu} \right)^{1/2} \quad \text{car } 1 \ll \frac{u' \cdot l}{\nu} \quad (\text{EC6.2})$$

Con  $u_{FFlam}$ : velocidad del frente de llama en condiciones laminares.

$u' = K_1 \cdot u_{FR1}$ , intensidad turbulenta.

$u_{FR1}$ : velocidad en condiciones estequiométricas.

$K_1$ : constante.

$l = K_2 \cdot x$ , escala de turbulencia.

$x$ : posición axial.

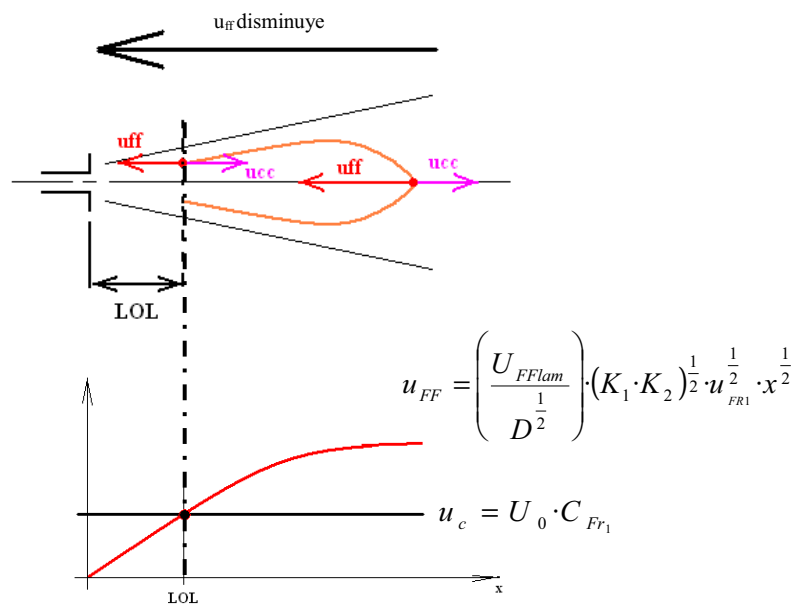
$K_2$ : constante.

Y  $\nu = D$ , la viscosidad  $\nu$  es igual a la difusividad térmica  $D$  para un número de Schmidt  $Sc$  igual a 1.

Después de aplicar las simplificaciones, se obtiene:

$$u_{FF} = \left( \frac{u_{FFlam}}{D^{\frac{1}{2}}} \right) \cdot (K_1 \cdot K_2)^{\frac{1}{2}} \cdot u_{FR1}^{\frac{1}{2}} \cdot x^{\frac{1}{2}} \quad (EC6.3)$$

La Figura6.10 permite una representación más concreta e ilustrada:



**Figura6.10:** Esquema de la llama con la velocidad de frente de llama y la de convección en función de la posición axial.

En esta Figura, se ha representado arriba la llama con la velocidad del frente de llama  $u_{FF}$  y la velocidad de convección  $u_c$ . En la parte de abajo, se puede identificar también esas dos velocidades en función de la posición axial de la llama. La velocidad de convección es constante sobre el contorno estequiométrico de la llama. El punto de intersección de esas dos velocidades se define como la longitud del lift-off (*la longitud del lift-off es la posición axial donde hay un equilibrio entre la velocidad de convección aguas abajo generado*

por el proceso de inyección y la velocidad de frente de llama de combustión turbulenta que trata de remontar aguas arriba.)

En este punto de intersección la velocidad del frente de llama se puede expresar de la manera siguiente:

$$u_{FF} = \left( \frac{u_{FFlam}}{D^{1/2}} \right) \cdot (K_1 \cdot K_2)^{1/2} \cdot u_c^{1/2} \cdot LOL^{1/2} \quad (EC6.4)$$

A partir de esta expresión, se pueden aislar los parámetros conocidos de los desconocidos:

$$\left( \frac{U_{FFlam}}{D^{1/2}} \right) \cdot (K_1 \cdot K_2)^{1/2} = \left( \frac{u_0 \cdot C_{Fr1}}{LOL} \right)^{1/2} \quad (EC6.5)$$

El término  $\left( \frac{U_{FFlam}}{D^{1/2}} \right) \cdot (K_1 \cdot K_2)^{1/2}$  es representativo de la pendiente de la curva de la velocidad de frente de llama, como se puede observar en la Figura 6.10. Además, en esa misma Figura, se puede observar que si el pendiente aumenta, la longitud del lift-off disminuye, mientras que si la pendiente disminuye, la longitud del lift-off se hace más larga.

Así que estudiar el efecto de los diferentes parámetros (concentración de oxígeno, presión de inyección y diámetro de la tobera) podrá ayudar a interpretar y analizar su influencia en la velocidad del frente de llama y en la longitud del lift-off.

Se elige el término  $\left( \frac{u_0 \cdot C_{Fr1}}{LOL} \right)^{1/2}$  para el cual cada parámetro es conocido y accesible.

Los resultados se han presentado en las Figuras 6.11 y 6.12. Se han obtenido a partir de los ensayos realizados con las 2 toberas y las 4 presiones de inyección.

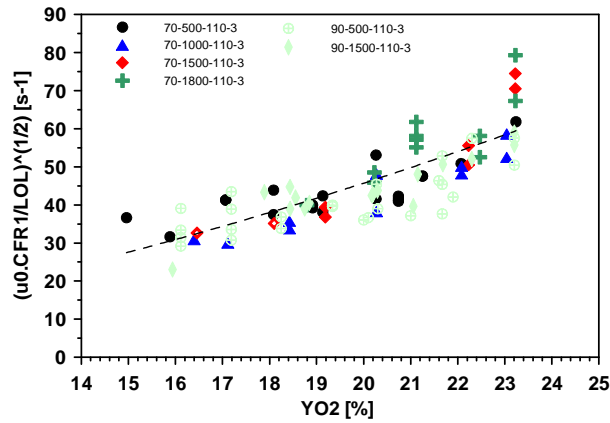


Figura 6.11: Representación del coeficiente de la pendiente de la velocidad del frente de llama en función de la concentración de oxígeno para el diámetro de 70 μm, PCR 500, 1000, 1500 y 1800 bar.

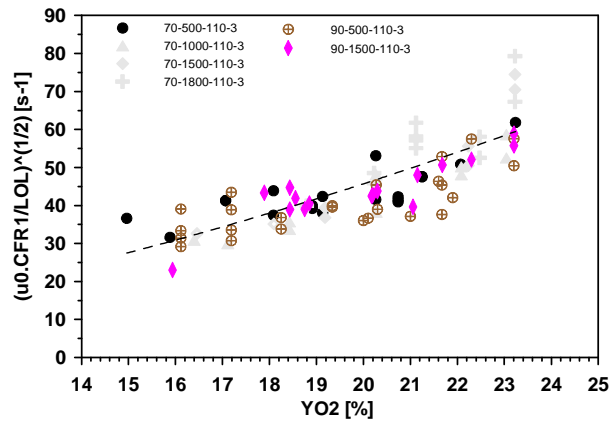


Figura 6.12: Representación del coeficiente de la pendiente de la velocidad del frente de llama en función de la concentración de oxígeno para el diámetro de 90 μm, PCR 500 y 1500 bar.

Se ve claramente el efecto de la concentración de oxígeno: al disminuir esa concentración, la velocidad del frente de llama disminuye casi linealmente. Eso implica que la longitud del lift-off aumenta.

Así que es posible encontrar una correlación entre  $u_{FF}$  (representado por  $\left(\frac{u_0 \cdot C_{Fr1}}{LOL}\right)^{1/2}$ ) y la concentración de oxígeno.

Esta deducción se ha representado en las Figuras 6.11 y 6.12 mediante una curva logarítmica que tiene la forma siguiente:



$$\ln\left(\left(\frac{u_0 \cdot C_{Fr1}}{LOL}\right)^{1/2}\right) = 1.75 \cdot \ln(YO_2) - 1.43 \quad (\text{EC6.6})$$

o escrito de otra manera

$$\left(\frac{u_0 \cdot C_{Fr1}}{LOL}\right)^{1/2} = 0.238 \cdot YO_2^{1.734} \quad (\text{EC6.7})$$

Para definir esa curva sólo se han considerado los ensayos realizados con el diámetro 70  $\mu\text{m}$ . Primero porque son más numerosos, y segundo porque hay menos dispersión; los resultados son satisfactorios. Si se hubieran considerado los resultados obtenidos con la tobera de 90  $\mu\text{m}$ , el resultado hubiera comportado menos precisión.

Un resultado complementario a este estudio es la expresión de la longitud del lift-off en función de los parámetros de funcionamiento:

$$LOL = \frac{u_0 \cdot C_{Fr1}}{\left(0.238 \cdot YO_2^{1.734}\right)^2} \quad (\text{EC6.8})$$

$$\text{con } C_{Fr1} = 1 + \frac{3.33}{YO_2} \quad (\text{EC6.9})$$

$$LOL = u_0 \cdot \frac{1 + \frac{3.33}{YO_2}}{\left(0.238 \cdot YO_2^{1.734}\right)^2} \quad (\text{EC6.10})$$

Los efectos de la presión de inyección y del diámetro de la tobera en la velocidad del frente de llama no son tan obvios como los que se han obtenido con la concentración de oxígeno. Se nota una estratificación debido a los dos parámetros, sin embargo puede proceder tanto del ruido como de la influencia de

los efectos térmicos engendrados por la longitud líquida. No ha sido posible aislar correctamente y representar estos efectos sin tener en cuenta la dispersión. Así que no se ha podido estudiar.

## **6.2. ESTUDIO DE LA LONGITUD DE LLAMA – PROCESO DE MEZCLA**

Se puede observar, en las Figuras 6.14 y 6.15, que para cualquier diámetro de tobera o presión de inyección, la longitud de llama es constante en función de la concentración de oxígeno.

Este resultado es bastante extraño ya que algunos autores, como Siebers et al. [Siebers 2002], habían visto que al disminuir la concentración de oxígeno, la llama se estiraba, es decir que la longitud de la llama se alargaba (Figura 2.29).

Los resultados del presente estudio son diferentes de los de Siebers et al., sin embargo son coherentes con la influencia que tiene la concentración de oxígeno sobre los tiempos característicos de combustión obtenidos por Arrègle et al. [Arrègle 2006] y representados en la Figura 6.13 por una línea discontinua (estimación ACT). En efecto, analizando los resultados de la caracterización del efecto térmico en un motor por Arrègle et al., se puede determinar que la longitud de llama es proporcional a la concentración de oxígeno de la manera siguiente:

$$L_{llama} \propto (Y_{O_2}^{3/2} + 3.33 \cdot Y_{O_2}^{1/2}) \quad (EC6.11)$$

Se ve en la Figura 6.13 que la longitud de llama disminuye un poco en función de la concentración de oxígeno con los resultados de Arrègle et al. pero a pesar de eso son similares a los encontrados en el presente estudio.

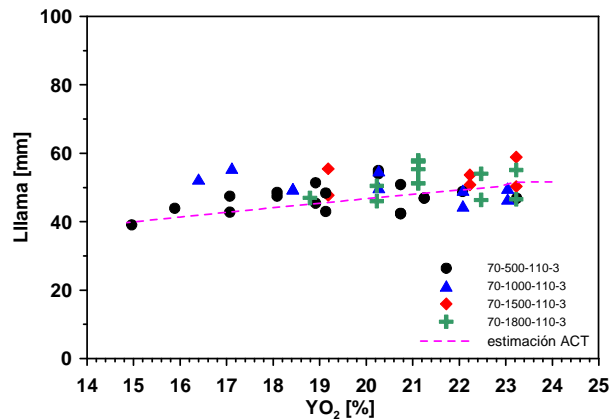


Figura 6.13: Representación de la longitud de llama en función de la concentración de oxígeno para el diámetro de 70 μm. Se ha representado en línea discontinua el efecto encontrado por Arrègle et al. [Arrègle 2006].

Se puede explicar el hecho de que la longitud de llama permanece constante en función de la concentración de oxígeno por la compensación de dos fenómenos:

- al disminuir la concentración de oxígeno, la temperatura en el cilindro baja y la densidad aumenta. Ese efecto térmico engendra una disminución de la longitud de la llama.
- al disminuir la concentración de oxígeno, hace falta más gas ambiental para completar la mezcla estequiométrica, con lo que la longitud de mezcla (y la de llama) tiende a aumentar.

Esos dos efectos físicos se compensan y provocan una constancia en la longitud de la llama en función de la concentración de oxígeno.

La longitud de llama es prácticamente constante al aumentar la presión de inyección. Este resultado está en adecuación con investigaciones anteriores realizadas por Kalghatgi [Kalghatgi 1984] en las cuales muestra que la longitud de la llama es independiente de la velocidad de inyección en condiciones turbulentas.

La longitud de la llama aumenta linealmente al aumentar el diámetro de la tobera (para sacar estas conclusiones no se ha tenido en cuenta los ensayos representativos del diámetro de la tobera 90 μm en condiciones de presión de inyección de 1500 bars).

Estos resultados también son coherentes con las investigaciones realizadas por Kalghatgi [Kalghatgi 1984] donde muestra que la longitud de la llama es directamente proporcional al diámetro de la tobera. Esta proporcionalidad, también se conserva en el presente estudio.

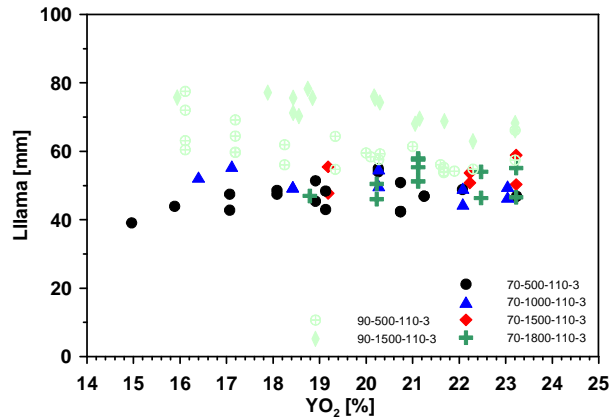


Figura6.14: Representación de la longitud de llama en función de la concentración de oxígeno para el diámetro de 70µm, PCR 500, 1000, 1500 y 1800 bar.

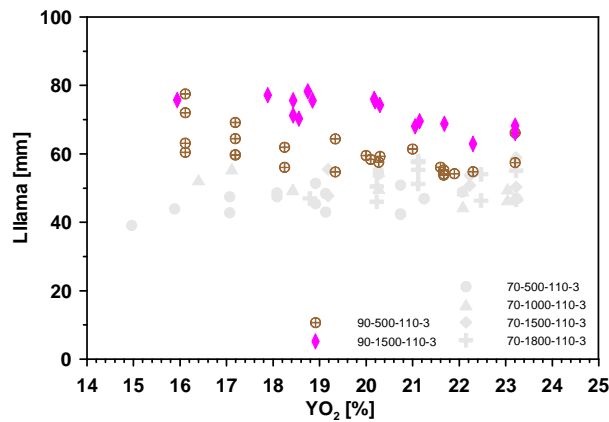


Figura6.15: Representación de la longitud de llama en función de la concentración de oxígeno para el diámetro de 90µm, PCR 500 y 1500 bar.

### **6.3. ANÁLISIS DEL DOSADO EN EL LIFT-OFF**

En esta sección hay que tener claro que se considera solamente el paquete de combustible 5 y que el análisis que se hace a continuación sólo tiene en cuenta este paquete.

Las conclusiones respecto a la influencia de los parámetros de funcionamiento sobre el dosado al lift-off del paquete 5 se pueden deducir directamente a partir de los resultados obtenidos para la longitud del lift-off y la longitud de la llama:

- al disminuir la concentración de oxígeno, la longitud del lift-off aumenta mientras que la longitud de la llama permanece constante.

El hecho de que la longitud de llama permanece constante al modificar la concentración de oxígeno significa que para cualquier concentración de oxígeno el perfil del dosado de un elemento de combustible permanece idéntico. Dicho de otra manera, al disminuir la concentración de oxígeno, el proceso de mezcla ocurre exactamente de la misma manera. Así que para diferentes concentraciones de oxígeno, si se analiza el dosado a la misma distancia axial, éste será idéntico. También este dosado será más grande al acercarse a la tobera de inyección y más pequeño al acercarse del final de la llama. Así que si la longitud del lift-off es grande, el dosado en el lift-off será pequeño mientras que si la longitud del lift-off es pequeña, el dosado en el lift-off será grande.

Así pues: al disminuir la concentración de oxígeno, la longitud del lift-off aumenta, la longitud de la llama queda constante y el dosado en el lift-off del paquete 5 disminuye. Es esa misma tendencia que se puede observar en las Figuras 6.16 y 6.17.

El hecho de que al disminuir la concentración de oxígeno el dosado en el lift-off disminuye es muy diferente de los resultados de Pickett y Idicheria [Pickett 2006] que muestran que al disminuir la concentración de oxígeno, el dosado queda constante. Sugieren que al disminuir la concentración de oxígeno la mezcla se hace de manera más lenta y que siempre alcanza el mismo dosado en el lift-off.

Esa diferencia en los resultados proviene del hecho de que Pickett y Idicheria, cuando calculan la cantidad de aire englobada antes del lift-off, no consideran efectos térmicos (efectos de la densidad o temperatura por ejemplo) [Pickett 2006]. Consideran que el dosado en el lift-off depende solamente del efecto de la concentración de oxígeno así que es normal que sean proporcional.

Sin embargo, en el presente trabajo se considera que toda la zona está influenciada por esos efectos así que el dosado en el lift-off varía según esos efectos.

Los dos casos, con efectos térmicos o sin ellos, son extremos: uno considera todo mientras que el otro no considera nada. Es muy poco probable que la zona del lift-off no este afectada por los efectos térmicos, no obstante es también poco probable que esos efectos afecten la zona cerca de la tobera si el lift-off es muy grande.

- al aumentar la presión de inyección, la longitud del lift-off aumenta mientras que la longitud de la llama permanece constante. El fenómeno que ocurre en cuanto al dosado en el lift-off del paquete 5 es exactamente el mismo que el explicado por la concentración de oxígeno y que conduce a una reducción del dosado en el lift-off del paquete 5 al aumentar la presión de inyección.

Esa tendencia también se nota en las Figuras 6.16 y 6.17.

- para el diámetro de la tobera el fenómeno es diferente ya que al aumentar el diámetro, la longitud del lift-off permanece constante mientras que la longitud de llama aumenta.

La modificación de la llama implica que el proceso de mezcla se hace de manera diferente según el diámetro considerado; es decir, por ejemplo, si la longitud de la llama es pequeña, el proceso de mezcla se hace más rápido que si la longitud de llama es grande, y el dosado en el lift-off del paquete 5 será menor.

Así que al disminuir el diámetro de la tobera, el dosado en el lift-off del paquete 5 disminuye.

También se podría explicar de otra manera considerando que al aumentar el diámetro de la tobera se inyecta una mayor cantidad de combustible. Así que, como la longitud del lift-off es constante en función del diámetro de la tobera, a esa distancia, el dosado al lift-off del paquete 5 será mayor para la tobera más grande.

Sin embargo, se puede observar en las Figuras 6.16 y 6.17, que esas tendencias no son muy claras para los diámetros de tobera de 70 y 90  $\mu\text{m}$  en condiciones de presión de inyección de 500 bars. Esa dificultad de distinguir las tendencias proviene probablemente de la alta dispersión.

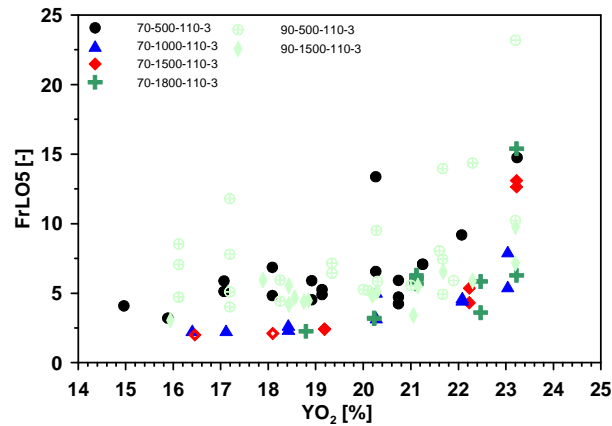


Figura 6.16: Representación del dosado en el lift-off del paquete 5 en función de la concentración de oxígeno para el diámetro de  $70\mu m$ , PCR 500, 1000, 1500 y 1800 bar.

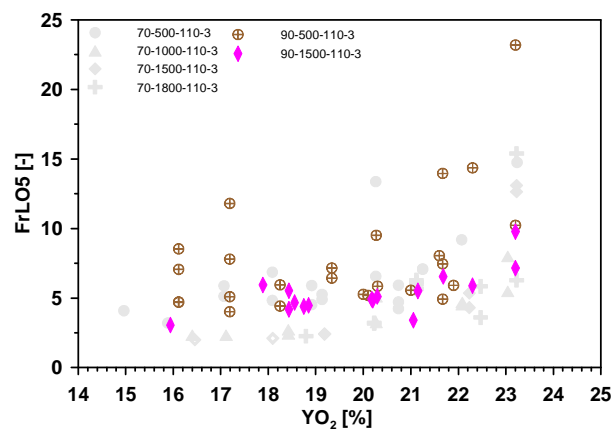


Figura 6.17: Representación del dosado en el lift-off del paquete 5 en función de la concentración de oxígeno para el diámetro de  $70\mu m$ , PCR 500 y 1500 bar.

#### 6.4. CONSECUENCIA SOBRE $F_{SOOT}$

Con el fin de presentar el efecto del dosado y de los precursores de hollín en la formación de partículas de hollín, las Figuras 6.18 y 6.19 representan el parámetro  $F_{SOOT}$  frente al inverso del dosado en el lift-off.

En primer lugar, se puede observar que al disminuir el dosado en el lift-off del paquete 5, la concentración de hollín disminuye. Este fenómeno está en adecuación con lo que se ha comentado en el estudio bibliográfico.

En segundo lugar parece como si hubieran tres tendencias distintas:

- si  $1 / Fr_{LO5} > 0.5$  (es decir si  $Fr_{LO5} < 2$ ), no hay formación de hollín.
- cuando  $0.25 < 1 / Fr_{LO5} < 0.5$  (es decir cuando  $2 < Fr_{LO5} < 4$ ), la formación de hollín es muy débil pero presente.
- si  $1 / Fr_{LO5} < 0.25$  (es decir si  $Fr_{LO5} > 4$ ), la formación de hollín es muchísimo más importante y puede alcanzar valores muy altos.

Este estudio es relevante ya que los límites o valores de dosado al lift-off son los que se encuentran en la literatura [Pickett 2002, Siebers 2002a, Pickett 2004a].

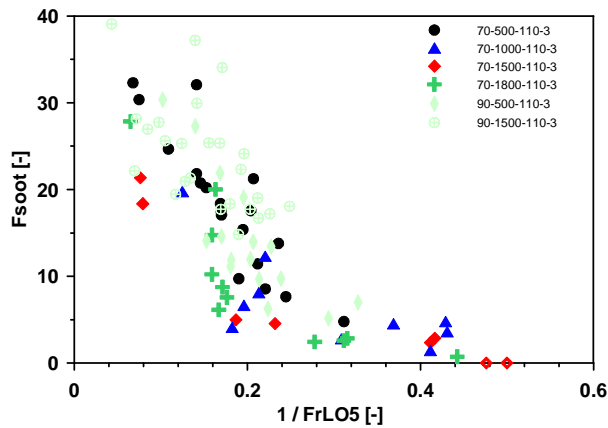


Figura 6.18: Representación  $F_{SOOT}$  en función de la inversa del dosado en el lift-off del paquete 5 para el diámetro de  $70\mu m$ , PCR 500, 1000, 1500 y 1800 bar.



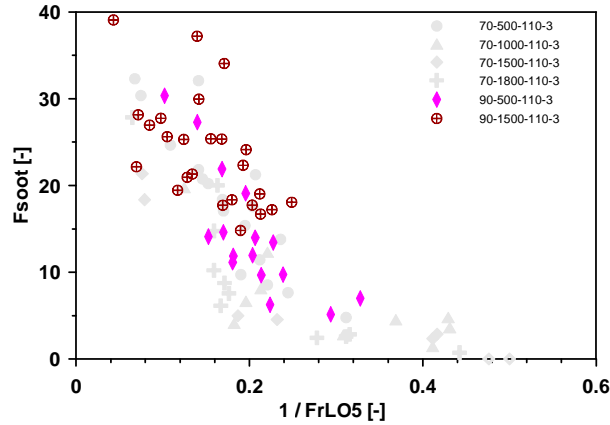


Figura 6.19: Representación de  $F_{soot}$  en función de la inversa del dosado en el lift-off del paquete 5 para el diámetro de  $70\mu m$ , PCR 500 y 1500 bar.

Visualizando las gráficas, se puede notar una estratificación del hollín. Eso demuestra que el dosado en el lift-off no es el único parámetro que tiene una influencia en la formación de partículas de hollín.

En el estudio bibliográfico, se habían mencionado también que dos parámetros más son importantes para la formación de partículas: la temperatura de la llama y el tiempo de residencia. Así que se realizó un pequeño estudio respecto a esos otros dos parámetros con el fin de ver qué influencia tienen y si eran la fuente de la estratificación que se nota en las gráficas.

Se intentó minimizar la estratificación cuantificando el efecto del dosado en el lift-off del paquete 5  $Fr_{LO5}$ , de la temperatura de la llama o temperatura adiabática,  $T_{ad}$ , y del tiempo de residencia,  $t_{resid}$ .

Los resultados son los siguientes:

$$F_{soot} = \left( coef(1) \cdot \frac{1}{Fr_{LO5}} + coef(2) \right) \cdot t_{resid}^{0.6} \cdot \exp\left(\frac{-2399}{T_{ad}}\right) \quad (EC6.12)$$

con:

$\frac{1}{Fr_{LO5}} < 0.25$		$\frac{1}{Fr_{LO5}} \geq 0.25$	
Coef(1)	-7,989	Coef(1)	-0,805
Coef(2)	2,293	Coef(2)	0,497

Se intentó minimizar de la mejor manera posible la estratificación, sin embargo debido a la alta dispersión que había durante los ensayos, los resultados no son muy satisfactorios.

Se han representado en las Figuras 6.20 y 6.21.

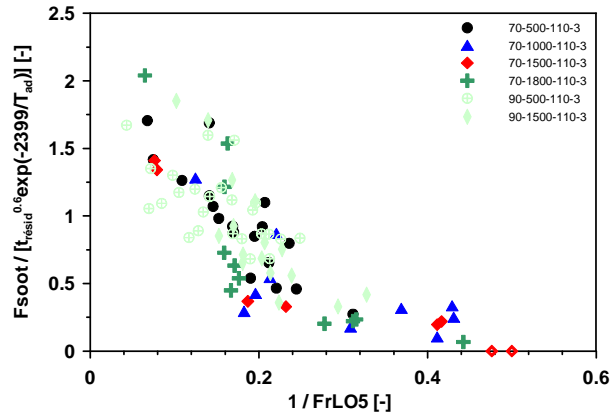


Figura6.20: Representación de la predicción de  $F_{soot}$  en función de la inversa del dosado en el lift-off del paquete 5 para el diámetro de  $70\mu m$ , PCR 500, 1000, 1500 y 1800 bar.

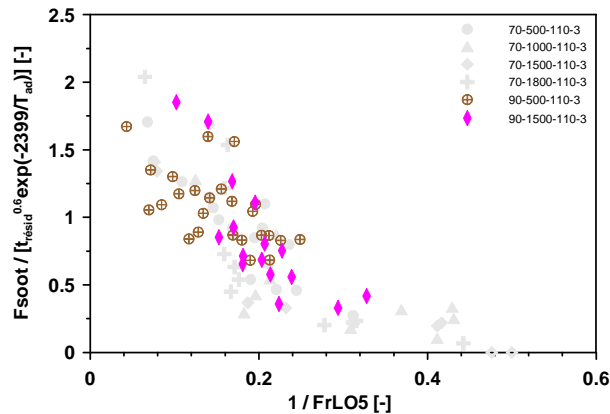


Figura6.21: Representación de la predicción de  $F_{soot}$  en función de la inversa del dosado en el lift-off del paquete 5 para el diámetro de  $70\mu m$ , PCR 500 y 1500 bar.

De acuerdo con la expresión encontrada, y considerando los órdenes de magnitud de los tres parámetros presentes en la ecuación, se puede notar que el parámetro que tiene la influencia más importante es el dosado en el lift-off del paquete 5.

**Eso significa que son los precursores de hollín son los que tienen el papel el más importante en la formación de hollín.**

## 6.5. LONGITUD DE APARICIÓN DEL HOLLÍN

A partir de los resultados obtenidos, se ha podido obtener una información sobre la longitud de aparición del hollín. La distancia (a partir del inyector) a partir de la cual aparecen las primeras partículas de hollín se han obtenido mediante los perfiles de intensidad de hollín. Para cada imagen obtenida, se ha recogido la longitud de aparición del hollín como el primer valor positivo de ese perfil. Los resultados obtenidos se han representado en las Figuras 6.22 y 6.23:

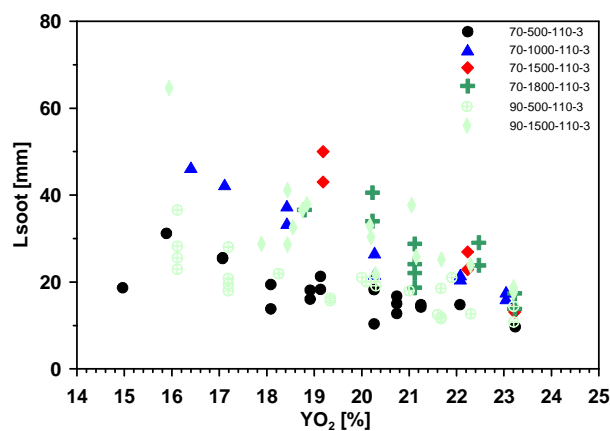


Figura 6.22: Representación de la longitud de aparición del hollín  $L_{SOOT}$  en función de la concentración de oxígeno para el diámetro de  $70\mu\text{m}$ , PCR 500, 1000, 1500 y 1800 bar.

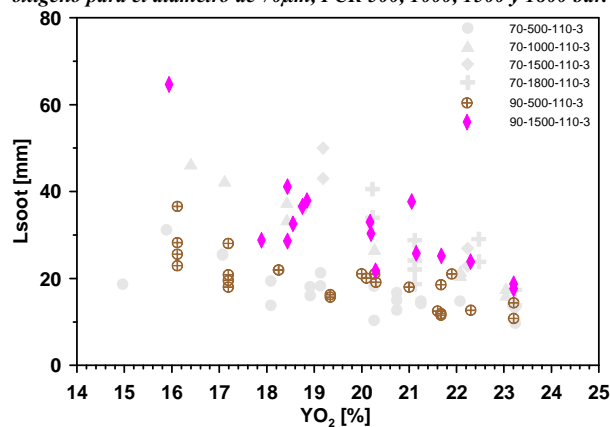


Figura 6.23: Representación de la longitud de aparición del hollín  $L_{SOOT}$  en función de la concentración de oxígeno para el diámetro de  $90\mu\text{m}$ , PCR 500 y 1500 bar.

Se puede notar que la longitud de aparición del hollín tiene la misma tendencia que la longitud del lift-off:

- al disminuir la concentración de oxígeno, la longitud de aparición del hollín aumenta.
- al aumentar la presión de inyección, la longitud de aparición del hollín aumenta también.
- al modificar el diámetro de la tobera, la tendencia no es muy clara; la tendencia parece constante para las condiciones de presión de inyección de 500 bars mientras que parece que la longitud de aparición de hollín es más pequeña para condiciones de inyección de 1500 bars y diámetro de tobera de 90  $\mu\text{m}$ .

Ya que la longitud del lift-off, LOL, y la longitud de aparición del hollín,  $L_{SOOT}$ , tienen una tendencia muy similar, en las Figuras 6.24 y 6.25, se han comparado esos dos parámetros para ver si existía un comportamiento particular.

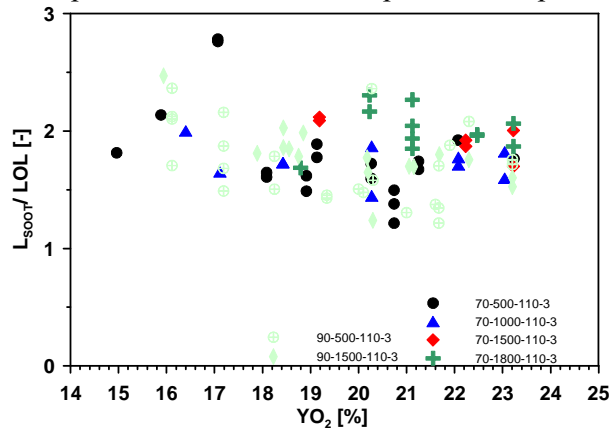


Figura6.24: Comparación de  $L_{SOOT}$  et LOL en función de la concentración de oxígeno para el diámetro de 70  $\mu\text{m}$ , PCR 500, 1000, 1500 y 1800 bar.

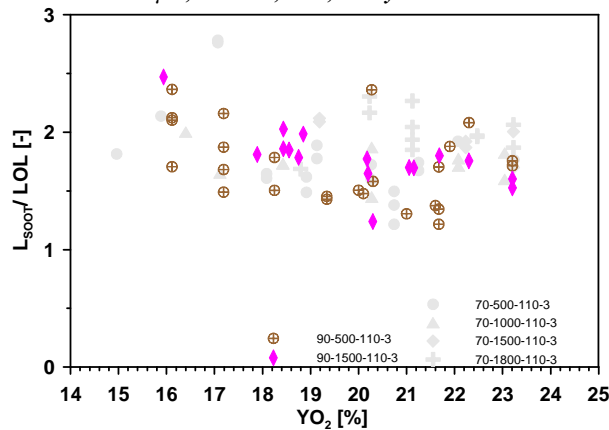


Figura6.25: Comparación de  $L_{SOOT}$  et LOL en función de la concentración de oxígeno para el diámetro de 90  $\mu\text{m}$ , PCR 500 y 1500 bar.

Y en efecto se puede observar que el ratio  $L_{SOOT}/LOL$  parece constante en función de la concentración de oxígeno con un valor aproximado de 2. Es decir que la distancia entre el inyector y la aparición del hollín es del doble de la distancia entre el inyector y el lift-off, ocurriendo eso cualquiera que sea la concentración de oxígeno. Además, a pesar de una dispersión muy importante, se puede considerar que este ratio se queda constante cualquiera que sean las condiciones de presión de inyección o el diámetro de tobera.

**Así que parece que la longitud de aparición del hollín es del orden del doble de la longitud del lift-off y que este resultado es independiente de la concentración de oxígeno, de la presión de inyección o del diámetro de la tobera.**

Sin embargo, sólo se pueden constatar esos resultados ya que no se saben explicar. En el estudio de Pickett y Idicheria [Pickett 2006], aparecen resultados idénticos (representados en la Figura4 de su artículo): hay un ratio de 2 entre la longitud del lift-off y la longitud de aparición de las partículas de hollín. Sin embargo, en el mismo artículo, Figura10, esa tendencia ya no es la misma cuando se modifican las condiciones de funcionamiento.

## **6.6. CONDICIONES “CERO-SOOT”**

Con el fin de observar si, y a partir de cuando, se alcanzan condiciones “cero-soot” en función de los parámetros de funcionamiento, se han representado a continuación 2 Figuras 6.26 y 6.27:

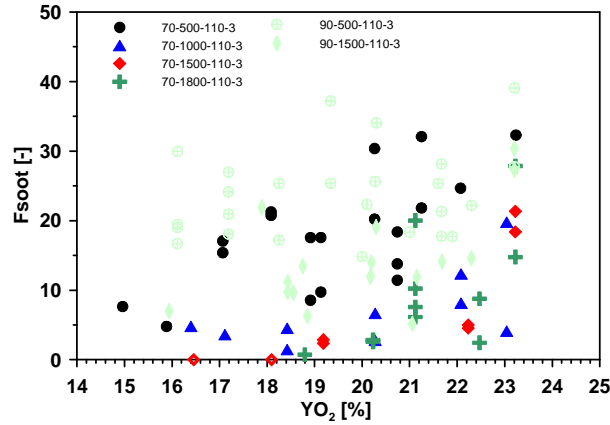


Figura 6.26: Comparación de  $F_{soot}$  en función de la concentración de oxígeno para el diámetro de 70  $\mu\text{m}$ , PCR 500, 1000, 1500 y 1800 bar.

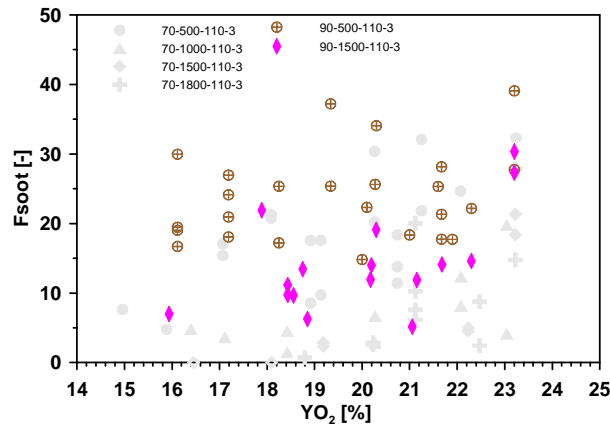


Figura 6.27: Comparación de  $F_{soot}$  en función de la concentración de oxígeno para el diámetro de 90  $\mu\text{m}$ , PCR 500 y 1500 bar.

A partir de las gráficas, se puede observar que se pueden definir 2 condiciones de “cero-soot” con certeza en función de los parámetros de funcionamiento y en condiciones de temperatura en el cilindro de 815 K y de 27.3  $\text{kg}/\text{m}^3$  de densidad.

Se alcanzan las condiciones “cero-soot”:

- para el diámetro de 70  $\mu\text{m}$  de diámetro y una presión de inyección de 1500 bars, al bajar la concentración másica de oxígeno más allá de 18.1 %.

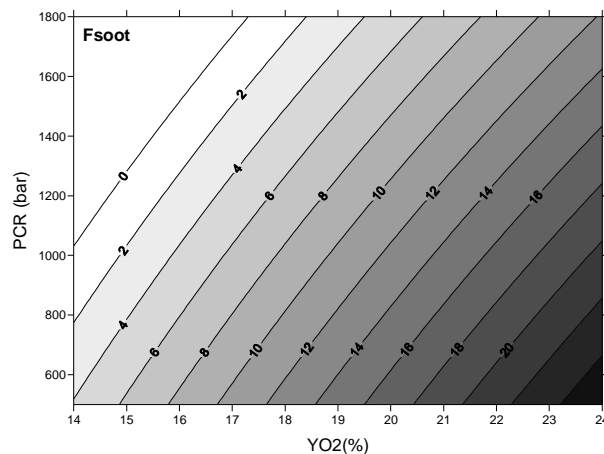
- para el diámetro de 70  $\mu\text{m}$  de diámetro y una presión de inyección de 1800 bars, al bajar la concentración másica de oxígeno más allá de 18.6 %.

**Se puede afirmar que en condiciones de temperatura en el cilindro de 815 K y de 27.3 kg/m<sup>3</sup> de densidad, se alcanzan condiciones “cero-soot” para una tobera de 70  $\mu\text{m}$  de diámetro y una presión de inyección superior a 1500 bar y una concentración másica de oxígeno inferior a 18.1%.**

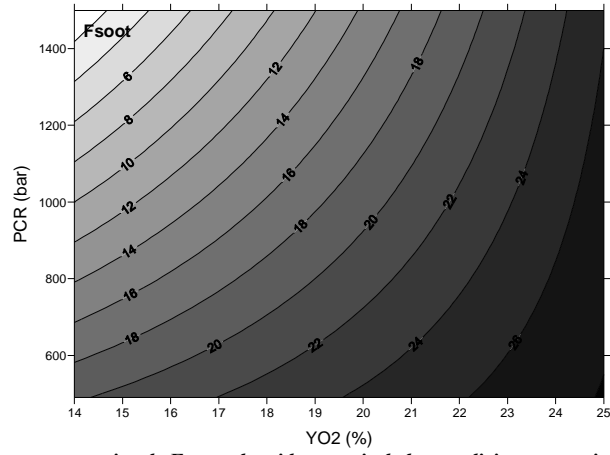
También, a partir de las gráficas, se pueden deducir condiciones de “cero-soot”:

- para el diámetro de 70  $\mu\text{m}$  de diámetro y una presión de inyección de 1000 bar, al bajar la concentración másica de oxígeno más allá de 16 %.
- para el diámetro de 70  $\mu\text{m}$  de diámetro y una presión de inyección de 500 bar, al bajar la concentración másica de oxígeno más allá de 14.4 %.
- para el diámetro de 90  $\mu\text{m}$  de diámetro y una presión de inyección de 1500 bar, al bajar la concentración másica de oxígeno más allá de 14.6 %.

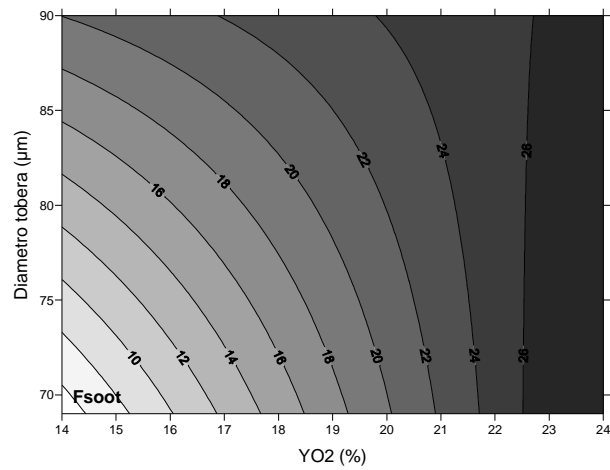
De manera muy simplificada y aproximada, las 4 Figuras siguientes permiten entender bien cuáles son los efectos de la concentración de oxígeno, de la presión de inyección, del diámetro de la tobera, y a partir de cuando se pueden alcanzar las condiciones “cero-soot”



**Figura 6.28:** Mapa representativo de  $F_{\text{soot}}$ , obtenido a partir de las condiciones experimentales siguientes:  
 $\varnothing = 70 \mu\text{m}$ , PCR de 500 a 1800 bar y  $O_2$  másico de 23.3 a 14%.

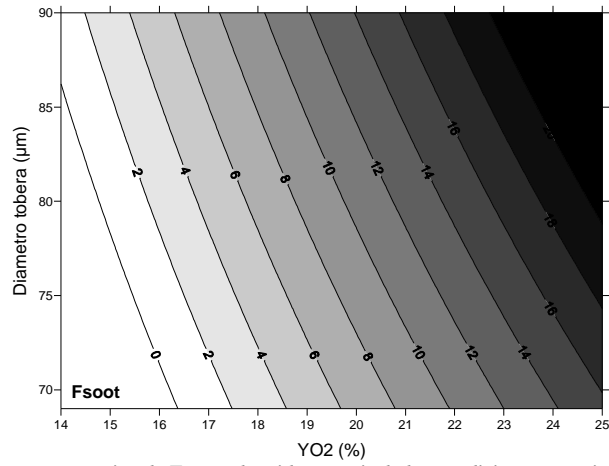


**Figura6.29:** Mapa representativo de  $F_{soot}$ , obtenido a partir de las condiciones experimentales siguientes:  
 $\varnothing = 90 \mu\text{m}$ , PCR de 500 a 1500 bar y  $O_2_{\text{másico}}$  de 23.3 a 14%.



**Figura6.30:** Mapa representativo de  $F_{soot}$ , obtenido a partir de las condiciones experimentales siguientes:  
 PCR = 500 bar,  $\varnothing = 70$  a  $90 \mu\text{m}$  y  $O_2_{\text{másico}}$  de 23.3 a 14%.





**Figura6.31:** Mapa representativo de Fsoot, obtenido a partir de las condiciones experimentales siguientes:  
PCR = 1500 bar,  $\varnothing$  = 70 a 90 µm y O2\_másico de 23.3 a 14%.



## **CONCLUSIÓN**



En esta tesis, el estudio se ha centrado en profundizar en el conocimiento y en la comprensión de la formación de hollín en una llama de difusión diesel cuasi-estacionaria con baja temperatura provocada por alta tasa de EGR.

Los trabajos realizados han sido enfocados según tres ejes principales:

- desarrollar una estrategia de análisis con un parámetro más adecuado para la descripción del proceso de formación de hollín.
- desarrollar una configuración de medida para la caracterización del hollín basada en la medida de la radiación de la llama de difusión.
- analizar la formación de hollín a baja temperatura con diámetros de tobera pequeños y presiones de inyección altas y averiguar si, y a partir de cuándo, se alcanzan las condiciones para las cuales se obtienen “cero-hollín”.

La parte experimental se ha realizado con un motor óptico mono-cilindrico de 2 tiempos que permite trabajar en condiciones cuasi-estacionarias. Además la instalación experimental tiene como principal característica el poder ser utilizada en circuito cerrado de aire con variación continua de concentración de oxígeno en la admisión durante los ensayos.

La cámara de filmación permite tomar una sola foto por ciclo, localizada en el punto muerto superior, y la estrategia de inyección ha sido optimizada para limitar los problemas de dispersión que pueden ocurrir durante los ensayos.

El primer resultado de estos trabajos ha sido el desarrollo de una nueva metodología de análisis para cuantificar el proceso de formación de hollín.

La principal originalidad reside en el uso de información sobre el proceso de mezcla y de combustión para completar el análisis de los resultados experimentales de visualización de llamas. La información así obtenida de las condiciones de dosado local, del tiempo característico de residencia y concentraciones locales de combustible no quemado ha permitido dos mejoras esenciales en comparación con los resultados hasta ahora publicados:

- la correlación entre las características de la llama y la cantidad de hollín formado no se hace de manera global. Al contrario, esa correlación se hace de manera local, permitiendo un análisis más directo entre las condiciones locales y la evolución de la “trayectoria” del combustible y la formación de hollín asociada.

- la cuantificación del hollín producido se realiza de manera local comparándolo con la concentración de combustible no quemado presente en la misma zona. Así, el parámetro  $F_{\text{soot}}$  representa la proporción de combustible no quemado presente en calidad de hollín y permite una cuantificación mucho más directa del proceso físico-químico de formación.

El segundo resultado se enfoca más particularmente en la metodología o estrategia de visualización. La configuración propuesta permite caracterizar a la vez la concentración de hollín presente en la llama de difusión y la longitud del lift-off, elemento esencial para un estudio pertinente sobre la formación de hollín. Además, el método de visualización utilizado tiene la ventaja de poder caracterizar esos dos parámetros a baja temperatura con fiabilidad. Se basa en el método de los 2 colores y el cálculo de la temperatura adiabática de llama.

Finalmente, los principales resultados son los siguientes:

- la doble influencia de la concentración de oxígeno en el proceso de mezcla ha sido cuantificado, y en particular para la longitud de llama. El aumento de esa longitud característica es casi exactamente compensado por el efecto térmico de la combustión. En efecto, se modifica la densidad de los gases quemados y eso afecta la velocidad de la mezcla. Así que la longitud de llama es casi independiente de la concentración de oxígeno.
- la influencia de la concentración de oxígeno en la velocidad del frente de llama laminar ha sido también cuantificada. A partir de este resultado y conociendo las características de mezcla en el chorro considerado, ha sido posible predecir la posición de la longitud del lift-off en la llama, parámetro esencial en la formación de hollín.
- además, se ha obtenido una relación entre las condiciones de dosado en el lift-off, el tiempo característico de residencia y la temperatura adiabática en función de  $F_{\text{soot}}$ . De esos tres parámetros principales en la formación de hollín, es el dosado en el lift-off el que tiene un papel preponderante. Igualmente, de la relación entre  $F_{\text{soot}}$  y los tres parámetros citados anteriormente, se identifican tres casos:
  - o si el dosado en el lift-off es inferior a 2, no se forma hollín,

- si se encuentra entre 2 y 4, la fracción de combustible transformado en hollín es débil,
  - pero para valores de dosado local en el lift-off superiores a 4,  $F_{\text{soot}}$  aumenta muy rápidamente.
- la longitud de aparición del hollín es del orden del doble de la longitud del lift-off y este resultado parece independiente de la concentración de oxígeno, del diámetro de la tobera y de la presión de inyección.

Con el fin de obtener una buena comprensión de la formación de hollín, se ha estimado necesario desarrollar tanto una nueva metodología de análisis de la formación de hollín, como un método de visualización más fiable. El uso de la información sobre el proceso de mezcla ha permitido obtener una visión detallada de los diferentes procesos que conducen a la formación de hollín en la llama diesel. Las condiciones “cero-soot” se han obtenido en condiciones de baja temperatura para el diámetro de 70  $\mu\text{m}$  con una presión de inyección superior a 1500 bar y una concentración de oxígeno inferior a 18.1%.

Para terminar, como trabajos futuros, y aprovechando el conjunto de metodologías desarrolladas en la presente tesis, se podrían proponer 3 vías de estudios:

- estudios de la formación de hollín en condiciones transitorias iniciales. Esas condiciones son más complejas para su análisis que las estudiadas en esta tesis, pero corresponden mejor a la realidad de los motores diesel. Hay que ser consciente de que si la fase de combustión premezclada es importante, va a ser difícil observar la longitud del lift-off en la parte transitoria inicial. Además, hasta que los gases quemados no se hayan evacuado de la base del chorro, reducen la cantidad de oxígeno englobado por el chorro y se modifican los mecanismos posteriores de formación de los precursores y del hollín.
- estudios de la formación de hollín con toberas multi-orificio. Se podría cuantificar cuál es el efecto de la interacción entre los diferentes chorros y el choque contra la pared sobre la formación de hollín. Esta configuración corresponde totalmente a la de un motor diesel. Sin embargo, en este caso será difícil identificar la longitud de llama y quizás complicado definir los contornos de las diferentes llamas.

También, al pegarse la llama contra la pared, los mecanismos de formación de hollín se pueden modificar.

- estudios de la formación de hollín con toberas cilíndricas.  
Esas toberas provocan cavitación. Se podría averiguar, siguiendo la misma metodología expuesta en la presente tesis, cual es la influencia de la cavitación en el proceso de mezcla y de combustión, y su consecuencia en el proceso de formación de hollín.



## **BIBLIOGRAFÍA**



Agnew W.G.

“Room in the piston top: Contributions of combustion science to engine design”  
Twentieth Symposium (International) on Combustion, pp. 1-17  
1984

Arrègle J., López J.J., García J.M. and Fenollosa C.

“Development of a zero-dimensional diesel combustion model. Part1: Analysis of the quasi-steady diffusion combustion phase”  
Applied Thermal Engineering 23  
2003

Arrègle J., López J.J., Martín J. and Mocholi E.M.

“Development of a mixing and combustion zero-dimensional model for diesel engines”  
SAE Paper 2006-01-1382  
2006

Arrègle J., López J.J., Guardiola C. and Monin C.

“Sensitivity study of a NOx estimation model for on-board applications”  
SAE Paper 2008-01-0640  
2008

Benajes J., Molina S. and García J.M.

“Influence of pre- and post-injection on the performance and pollutant emissions in a HD diesel engine”  
SAE Paper 2001-01-0526  
2001

Bengtsson P.E. and Alden M.

“Soot visualization strategies using laser techniques: laser-induced incandescence fluorescence in C2 from laser-vaporized soot and laser-induced soot incandescence”  
Applied Physics B 60, pp. 51-59  
1995

Bermúdez V., García J.M., Juliá E. and Martínez S.

“Engine with optically accessible cylinder head: a research tool for injection and combustion processes”  
SAE Paper 2003-01-1110  
2003

Chiu H.H., Kim H.Y. and Croke E.J.

“Internal group combustion of liquid droplets”

Nineteenth Symposium (International) on Combustion, pp. 971-980  
1982

Chiu W.S., Shaded S.M. and Lyn W.T.

“A transient spray mixing model for diesel combustion”

SAE Paper 760128  
1976

Choi M.Y., Hamins A., Mulholland G.W. and Kashiwagi T.

“Simultaneous optical measurement of soot volume fraction and temperature in premixed flame”

Combustion and Flame, vol. 99, pp. 174-186  
1994

Choi D., Iwamuro M., Shima Y., Senda J. and Fujimoto H.

“The effect of fuel-vapor concentration on the process of initial combustion and soot formation in a DI diesel engine using LII and LIEF”

SAE Paper 2001-01-1255  
2001

Corcione F.E., Costa M., Merola S.S. and Vaglieco B.M.

“In-cylinder analysis of pollutants formation in diesel combustion by spectral measurements and numerical simulations”

12<sup>th</sup> International Multidimensional Engine Modelling User’s Group Meeting,  
Detroit, Michigan  
2002

Correas Jiménez D.

Estudio teórico-experimental del chorro libre isoterma

Tesis Doctoral, Departamento de Maquinas y Motores Térmicos de la  
Universidad Politécnica de Valencia

1998

Dec J.E., Zur Loye A. and Siebers D.L.

“Soot distribution in a DI diesel engine using 2-D laser-induced incandescence imaging”

SAE Paper 910224  
1991

Dec J.E. and Espey C.

“Soot and fuel distributions in a DI diesel engine via 2-D imaging”

SAE Paper 922307

1992

Dec J.E. and Espey C.

“Ignition and early soot formation in a D.I. diesel engine using multiple 2-D imaging diagnostics”

SAE Paper 950456

1995

Dec J.E. and Coy E.B.

“OH radical imaging in a DI diesel engine and the structure of the early diffusion flame”

SAE Paper 960831

1996

Dec J.E.

“A conceptual model of DI diesel combustion based on laser-sheet imaging”

SAE Paper 970873

1997

Dec J.E. and Canaan R.E.

“PLIF imaging of NO Formation in a DI diesel engine”

SAE Paper 980147

1998

Dec J.E. and Tree D.R.

“Diffusion-flame / Wall interactions in a heavy-duty DI diesel engine”

SAE Paper 2001-01-1295

2001

Desantes J.M., Arrègle J., López J.J. and Cronhjort A.

“Scaling laws for free turbulent gas jets and diesel-like sprays”

Atomization and Sprays, vol. 16, pp. 443-473

2006

Desantes J.M., Arrègle J., López J.J. and García A.

“A comprehensive study of diesel combustion and emissions with post-injection”

SAE Paper 2007-01-0915

2007

Dronniou N., Lombard B., Colliou T., Tilagone R. and Réveillé B.

“Dual-mode engine for Euro VI heavy-duty applications: presentation of the concept”

Thiesel 2008 Conference on thermo- and fluid Dynamic Processes in Diesel Engines

2008

Epping K., Aceves S., Bechtold R. and Dec J.

“The potential of HCCI combustion for high efficiency and low emissions”

SAE Paper 2002-01-1923

2002

Faeth G.M.

“Current status of droplet and liquid combustion”

Progress in Energy and Combustion Science, vol. 3, pp. 191-224

1977

Faeth G.M.

“Evaporation and combustion of sprays”

Progress in Energy and Combustion Science, vol. 9, pp. 1-76,

1983

Fenollosa C.

Aportación a la descripción fenomenológica del proceso de combustión por difusión diesel

Tesis Doctoral, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia

2003

Fenimore C.P. and Jones G.W.

“Coagulation of soot to smoke in hydrocarbon flames”

Combustion and Flame, vol. 13, pp. 303-310

1969

Flynn P.F., Durrett R.P., Hunter G.L., Loye A.O., Akinyemi O.C., Dec J.E. and Westbrook C.K.

“Diesel combustion: an integrated view combining laser diagnostics, chemical kinetics, and empirical validation”

SAE Paper 1999-01-0509

1999

Frenklach M.

“Detailed mechanism and modelling of soot formation”

Conference on mechanism of non-uniform combustion, Extended abstracts, Tokio

1990

Fuentes López E.

“Caracterización de la influencia de las condiciones de operación de motor sobre la distribución de tamaños de las partículas diesel”

Tesis doctoral, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia

2006

García Oliver J.M.

Aportaciones al estudio del proceso de combustión turbulenta de chorros en motores diesel de inyección directa

Tesis Doctoral, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia

2004

Gaydon A.G.

The spectroscopy of flames

Chapman and Hall Ltd., London

1974

Hasegawa R. and Yanagihara H.

“HCCI combustion in DI diesel engine”

SAE Paper 2003-01-0745

2003

Haynes B.B. and Wagner H.G.

“Soot formation”

Progress in Energy and Combustion Science, vol. 7, pp. 229-273

1981

Heywood J.B.

Internal combustion engine fundamentals

McGraw-Hill, New York

1988

Higgins B.S. and Siebers D.L.

“Measurement of the flame lift-off location on a DI diesel sprays using OH chemiluminescence”

SAE paper 2001-01-0918

2001

Hottel H.C. y Broughton F.P.

“Determination of true temperature and total radiation from luminous gas flames”

Industrial and Engineering Chemistry, vol. 4, pp. 166-175,

1932

Idicheria C.A. and Pickett L.M.

“Soot formation in diesel combustion under high-EGR conditions”

SAE Paper 2005-01-3834

2005

Iida N.

“Surrounding gas effects on soot formation and extinction – Observation of diesel spray combustion using a rapid compression machine”

SAE Paper 930603

1993

Kalghatgi G.T.

“Lift-off heights and visible lengths of vertical turbulent jet diffusion flames in still air”

Combustion Science and Technology, vol. 41, pp. 17-29

1984



Kamimoto T. and Bae M.H.

“High temperature for the reduction of particulate in diesel engines”

SAE Paper 880423

1988

Kamimoto T. and Kobayashi H.

“Combustion processes in diesel engines”

Progress in Energy and Combustion Science, vol. 17 , pp. 163-189

1991

Kawano D., Suzuki H., Ishii H., Goto Y., Odaka M., Murata Y., Kusaka J. and Daisho Y.

“Ignition and combustion control of diesel HCCI”

SAE Paper 2005-01-2132

2005

Kitamura T., Ito T., Kitamura Y., Ueda M., Senda J. and Fujimoto H.

“Soot modeling and empirical validation on smokeless diesel combustion with oxygenated fuels”

SAE 2003-01-1789

2003

Kittelson D.B., Ambs J. L. and Hadjkacem H.

“Particulate emissions from diesel engines: influence of in-cylinder surface”

SAE Paper 900645

1990

Kittelson D.B., Arnold M. and Watts W.F.

“Review of diesel particulate matter sampling methods – final report”

University of Minnesota, Department of Mechanical Engineering

1999

Kohse-Höinghaus K. and Jeffries J.B.

Applied combustion diagnostics

Taylor & Francis, New York, ISBN 1-56032-938-6

2002

Kosaka H., Nishigaki T., Kamimoto T., Sano T., Matsutani A. and Harada S.  
“Simultaneous 2-D imaging of OH radicals and soot in a diesel flame by laser sheet techniques”  
SAE Paper 960834  
1996

Kuo K.K.  
Principles of combustion  
Wiley & Sons, New York, pp 589-594,  
1986

Ladommatos Z. and Zhao H.  
“A guide to measurement of flame temperature and soot concentration in diesel engines using the two-colour method. Part 1: principles”  
SAE Paper 941956  
1994

Lapuerta M., Armas O. and Gómez A.  
“Diesel particle size distribution estimation from digital image analysis”  
Aerosol Science and Technology, vol. 37, pp. 369-381  
2003

Larsson A.  
“Optical studies in a DI diesel engine”  
SAE Paper 1999-01-3650  
1999

Lee K. O., Cole R., Sekar R., Choi M. Y., Kang J. S., Bae C. S. and Shin H. D.  
“Morphological investigation of the microstructure, dimensions, and fractal geometry of diesel particulates”  
Proceedings of the Combustion Institute, pp. 647-653  
2002

Lu P., Xie X. and Lai M.  
“Spectral analysis and chemiluminescence imaging of hydrogen addition to HSDI diesel combustion under conventional and low-temperature conditions”  
SAE Paper 2004-01-2919  
2004

Martín Díaz Jaime

Aportación al diagnóstico de la combustión en motores diesel de inyección directa

Tesis doctoral, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia  
2007

Martínez Martínez S.

Desarrollo de una instalación experimental para el estudio de chorros diesel evaporados en atmósfera inerte y reactiva

Tesis doctoral, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia  
2003

Martos Ramos F.J.

“Caracterización morfológica de las partículas diesel”

Tesis doctoral, Universidad de Castilla la Mancha, Departamento de Mecánica Aplicada e Ingeniería de Proyectos, Escuela Técnica de Ingenieros Industriales  
2006

Matsui Y., Kamimoto T. and Matsuoka S.

“A study on the application of the two-color method to the measurement of flame temperature and soot concentration in diesel engines”

SAE Paper 800970  
1980

Melton L.A.

“Soot diagnostics based on laser heating”

Applied Optics 23, pp. 2201-2208  
1984

Miller J.A. and Melius C.F.

“Kinetic and thermodynamic issues in the formation of aromatic compounds in flames of aliphatic fuels”

Combustion and flame, vol. 91, pp. 21-39  
1992

Minato A., Tanaka T. and Nishimura T.

“Investigation of premixed lean diesel combustion with ultra high pressure injection”

SAE Paper 2005-01-0914

2005

Molina S.A.

Influencia de los parámetros de inyección y la recirculación de gases de escape sobre el proceso de combustión en un motor diesel

Tesis Doctoral, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia

2003

Moss J.B., Stewart C.D. and Young K.J.

“Modeling soot formation and burnout in a high temperature laminar diffusion flame burning under oxygen-enriched conditions”

Combustion and flame, vol. 101, pp. 491-200

1995

Musculus M.P.B.

“Effects of the in-cylinder environment on diffusion flame lift-off in a DI diesel engine”

SAE Paper 2003-01-0074

2003

Musculus M.P.B. and Pickett L.M.

“Diagnostics considerations for optical laser-extinction measurements of soot in high-pressure transient combustion environments”

Combustion and Flame 141, pp. 371-391

2005

Musculus M.P.B., Singh S. and Reitz R.D.

“Gradient effect on two-color soot optical pyrometry in a heavy-duty DI diesel engine”

Combustion and Flame 153, pp. 216-227

2008

- Nagle J. and Strickland-Constable R.F.  
“Oxidation of carbon between 1000 and 2000 C”  
Proceedings of the fifth conference on carbon, vol. 1, pp. 265-325  
1962
- Namazian M., Nelly J.T. and Schefer R.W.  
“Near-field instantaneous flame and fuel concentration structures”  
Twenty-Second Symposium (International) on Combustion, pp. 627-634, The  
Combustion Institute, Pittsburgh  
1988
- Nurick W.H.  
“Orifice cavitation and its effects on spray mixing”  
ASME Transactions, Series I, Journal of Fluid Engineering, vol. 98, pp. 681-687  
1976
- Pastor J.V., Buitrago J.E., Zapata D. y Fuentes E.  
“Visualización de la distribución de hollín en la llama diesel mediante la técnica  
de Incandescencia Inducida por Láser (LII)”  
Actas del XVI Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, pp. 1871-1878, León  
15 a 17 de diciembre de 2004  
2004
- Pastor J.V., García J.M., Pastor J.M., Buitrago J.E.  
“Analysis methodology of diesel combustion by using flame luminosity, two-  
colour method and Laser-Induced Incandescence”  
SAE Paper 2005-24-012  
2005
- Payri F., Armas O., Desantes R. and Leiva A.  
“Modelo termodinámico para el diagnóstico experimental del proceso de  
combustión en motores diesel de inyección directa (ID)”  
Proc. III Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, La Habana, Cuba  
1997
- Peters N.  
Turbulent Combustion  
Cambridge University Press, London  
2000

Pickett L.M. and Siebers D.L.

“An investigation of diesel soot formation processes using micro-orifices”

Proceedings of the Combustion Institute, vol. 29, pp. 655-662

2002

Pickett L.M. and Siebers D.L.

“Non-sooting, low flame temperature mixing controlled DI diesel combustion”

SAE Paper 2004-01-1399

2004

Pickett L.M. and Siebers D.L.

“Soot in diesel fuel jets: effects of ambient temperature, ambient density, and injection pressure”

Combustion and Flame, vol. 138, pp. 114-135

2004a

Pickett L.M. and Siebers D.L.

“Orifice diameter effects on diesel fuel jet flame structure”

Journal of engineering for gas turbines and power, vol. 127, pp. 187-196

2005

Pickett L.M. and Siebers D.L.

“Soot formation in diesel fuel jets near the lift-off length”

International Journal of Engine Research, vol. 7, pp. 103-130

2005a

Pickett L.M. and Idicheria C.A.

“Effects of ambient temperature and density on soot formation under high-EGR conditions”

Thiesel 2006 Conference on thermo- and fluid Dynamic Processes in Diesel Engines

2006

Ricou F.P. and Spalding D.B.

“Measurements of entrainment by axi-symmetrical turbulent jets”

Journal of Fluid, Mechanics 11 (1961) 21

1961

Schraml S., Will S. and Leipertz A.

“Simultaneous measurement of soot mass concentration and primary particle size in the exhaust of a DI diesel engine by time-resolved laser-induced incandescence (TIRE-LII)”

SAE Paper 1999-01-0146

1999

Schraml S., Heimgärtner C., Fettes C. and Leipertz A.

“Investigation of in-cylinder soot formation and oxidation by means of two dimensional laser-induced incandescence”

10<sup>th</sup> International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon

2000

Shaddix C.L. and Smyth K.L.

“Laser-induced incandescence measurement of soot production in steady and flickering methane, propane, and ethylene diffusion flames”

Combustion and Flame, vol. 107, pp. 418-452

1996

Shurupov S.Y.

“Some factors that govern particulate carbon formation during pyrolysis of hydrocarbons”

Proceedings of the Combustion Institute, vol. 28, pp. 2507-2514

2000

Siebers D.L. and Higgins B.S.

“Effects of injector conditions on the flame lift-off length of DI diesel sprays”

Thiesel 2000 Conference on thermo- and fluid Dynamic Processes in Diesel Engines

2000

Siebers D.L. and Higgins B.S.

“Flame lift-off on direct-injection diesel sprays under quiescent conditions”

SAE Paper 2001-01-0530

2001

Siebers D.L., Higgins B.S. and Pickett L.M.

“Flame lift-off on direct-injection diesel fuel jets: oxygen concentration effects”

SAE Paper 2002-01-0890

2002

Siebers D.L. and Pickett L.M.

“Injection pressure and orifice diameter effects on soot in DI diesel fuel jets”

Thiesel 2002 Conference on thermo- and fluid Dynamic Processes in Diesel

Engines

2002a

Siebers D.L. and Higgins B.S.

“Effects of injector conditions on the flame lift-off length of DI diesel spray”

Thermo- and fluid Dynamic Processes in Diesel Engines, pp. 253-277, Springer-Verlag, Heidelberg, Germany

2002b

Siebers D.L. and Pickett L.M.

“Aspects of soot formation in diesel fuel jets”

Thiesel 2004 Conference on thermo- and fluid Dynamic Processes in Diesel

Engines

2004

Singh S., Reitz R.D. and Musculus M.P.B.

“2-color thermometry experiments and high-speed imaging of multi-mode diesel engine combustion”

SAE Paper 2005-01-3842

2005

Smallwood G.J., Clavel D., Gareau D., Sawchuk R.A., Snelling D.R., Witze P.O., Axelsson B., Bachalo W.D. and Gülder Ö.L.

“Concurrent quantitative laser-induced incandescence and SMPS measurements of EGR effects on particulate emissions from a TDI diesel engine”

SAE Paper 2002-01-2715

2002

Smith G.W.

“Kinetic aspects of diesel soot coagulation”

SAE Paper 820466

1982



Smyth K.C. and Shaddix C.R.

“The elusive history of  $m=1.57-0.56i$  for the refractive index of soot”

Combustion and flame, vol. 107, pp. 314-320

1996

Spalding D.B.

“Combustion and mass transfer”

Pergamon Press, ISBN 0-08-022105-8

1979

Suhre B. and Foster D.

“In-cylinder soot deposition rates due to thermophoresis in a direct injection diesel engine”

SAE Paper 921629

1992

Surovikin V.F.

“Analytical description of the processes of nucleus-formation and growth of particles of carbon black in the thermal decomposition of aromatic hydrocarbons in the gas phase”

Khimiya Tverdogo Topliva, vol. 10, No. 1, pp. 111-122,

1976

Svensson K.I., Makrory A.J., Richards M.J. and Tree D.R.

“Calibration of an RGB, CCD Camera and interpretation of its two-colour images for KL and temperature”

SAE Paper 2005-01-0648

2005

Takeda Y., Keiichi N. and Keiichi N.

“Emission characteristics of premixed lean diesel combustion with extremely early staged fuel injection”

SAE Paper 961163

1996

Tree D.R. and Foster D.E.

“Optical measurements of soot particle size, number density, and temperature in a direct injection diesel engine as a function of speed and load”

SAE Paper 940270

1994

Tree D.R. and Dec J.E.

“Extinction measurements of in-cylinder soot deposition in a heavy-duty DI diesel engine”

SAE Paper 2001-01-1296

2001

Tree D.R. and Svensson K.I.

“Soot processes in compression ignition engines”

Progress in Energy and Combustion Science 33, pp. 272-309

2007

Wagner H.G.

“Soot formation – an overview”

Particulate carbon formation during combustion, pp. 1-29, D.C. Siegla and G.W. Smith editors, Plenum, Press, New York

1981

Wagner R.M., Green J.B., Dam T.Q., Dean Edwards K. and Storey J.M.

“Simultaneous low engine-out NO<sub>x</sub> and particulate matter with highly diluted diesel combustion”

SAE Paper 2003-01-0262

2003

Wang H. and Frenklach M.

“Calculations of rate coefficients for the chemically activated reactions of acetylene with vinylic and aromatic radical”

Journal Physical Chemistry, vol. 98, pp. 11465-11489

1994

Wiertalla A., Bäcker H. and Dürnholz M.

“Influence of injection system parameters on spray development combustion and soot formation by optical measurement techniques in a model combustion chamber”

SAE Paper 950233

1995

William A.

“Fundamentals of oil combustion”

Progress in Energy and Combustion Science, vol. 2, pp. 167-179,

1976

Winklhofer E.

“An experimental database for diesel spray combustion”

Twenty-Six Symposium (International) on Combustion, Nápoles, Italia  
1996

Yan J. and Borman G.L.

“Analysis and in-cylinder measurements of particulate radiant emissions and temperature in a direct injection diesel engine”

SAE Paper 881315  
1988

Zhao H. and Ladommatos N.

“Optical diagnostics for soot and temperature measurement in diesel engines”

Progress in Energy and Combustion Science, vol. 24, pp. 221-255  
1998

Zhao H. y Ladommatos N.

“Engine combustion instrumentation and diagnostics”

Society of Automotive Engineers, ISBN: 0-7680-0665-4  
2001

Zhu J., Choi M.Y., Mulholland G.W. and Gritzo L.A.

“Measurement of soot optical properties in the near-infrared spectrum”

International Journal Of Heat and Mass Transfer, vol. 43, pp. 3299-3303  
2000

Zhu J., Lee K.O., Sekar R. and Choi M.Y.

“Morphological study of the particulate matter from a light-duty diesel engine”

Proceedings of the third joint meeting of the U.S., Sections of the Combustion  
Institute  
2003





