



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

Curso Académico:

RESUMEN

El presente documento recoge los datos obtenidos, las comparativas realizadas y las conclusiones alcanzadas para comprender el efecto que tienen diferentes estrategias de inyección múltiple de combustible Diesel, a partir de un conjunto de 7 estrategias de inyección (6 múltiples y una simple); así como el presupuesto de este estudio.

Los datos obtenidos incluyen parámetros como la longitud líquida, el retraso a la ignición de cada inyección, la tasa de liberación de calor, la luminosidad, la masa de hollín en llama y los campos de temperatura y fracción volumétrica de hollín en el interior de la llama.

Los datos han sido sintetizados en gráficas para facilitar su comparativa directa y facilitar la extracción de las conclusiones, que han sido:

- El retraso a la ignición de la segunda inyección se reduce en, aproximadamente, un 50% respecto a la primera para todas las estrategias ensayadas.
- La longitud líquida de ambas inyecciones es la misma, de modo que no parece haber efecto alguno de la combustión de la primera inyección en la longitud líquida de la segunda.
- El tiempo que transcurre entre el comienzo de la luminosidad del hollín hasta que este alcanza su máxima luminosidad no varía de forma sustancial de una estrategia de inyección múltiple a otra.
- El valor máximo de la tasa de liberación de calor de la segunda inyección ocurre después de que el hollín gane luminosidad pero antes de que alcance la máxima, para todas las estrategias de inyección múltiple.
- La luminosidad máxima del hollín desciende al aumentar el tiempo entre inyecciones.
- La masa de hollín en llama varía ampliamente de una estrategia a otra, siendo su nivel mínimo ligeramente inferior al obtenido con la inyección simple.

Palabras clave: Motor, combustión, interna, alternativo, MCIA, Diesel, Gasóleo, Gasoil, inyección, múltiple, hollín, llama, deconvolución, tasa, calor, luminosidad.

ÍNDICE

CONTENIDOS DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER:

- Memoria
- Presupuesto

ÍNDICE DEL TRABAJO

MEMORIA.....	7
1. Introducción	9
1.1. La situación actual	9
1.2. Objetivo del Trabajo	10
1.3. Marco de trabajo.....	10
1.4. Estructura del documento.....	11
2. Contextualización.....	13
2.1. Evolución de la inyección en los motores Diesel.....	13
3. Equipo experimental y mediciones	16
3.1. Introducción	16
3.2. Técnicas ópticas. Principio de medida	17
3.3. Montaje óptico	22
4. Metodología de análisis	25
4.1. Longitud líquida (DBI).....	25
4.2. Señal de presión. Tasa de liberación de calor (RoHR) y retraso a la ignición.....	26
4.3. Masa de hollín	30
4.4. Radiación del hollín (2C).....	34
4.5. Deconvolución KL y fracción volumétrica	36
4.6. Deconvolución del campo de temperaturas	43
5. Análisis de resultados.....	46
5.1. Matriz de ensayos	46
5.2. Resultados de longitud líquida	47
5.3. Resultados de tasa de liberación de calor y presión en el cilindro.	50
5.4. Resultados de masa de hollín.....	54

5.5.	Resultados de radiación de hollín	57
5.6.	Resultados de deconvolución KL y fracción volumétrica	59
5.7.	Resultados de deconvolución del campo de temperaturas	66
5.8.	Comparativa de parámetros – Barrido en tiempo de pausa	71
5.9.	Comparativa de parámetros – Barrido en duración de la primera inyección	73
6.	Conclusiones y trabajos futuros	76
7.	Bibliografía.....	78
PRESUPUESTO		79
PR1.	Introducción	81
PR2.	Costes unitarios.....	81
PR2.1	Coste de mano de obra: tratamiento y análisis de datos	81
PR2.2	Coste de amortización de los equipos utilizados	82
PR2.3	Coste de materiales o elementos no amortizables.....	83
PR3.	Suma de costes parciales	83
PR4.	Coste final del Trabajo.....	84

MEMORIA

1. INTRODUCCIÓN

En este Trabajo Final de Máster se desarrolla el procesado de datos y el análisis de una serie de ensayos relacionados con una estrategia de inyecciones múltiples de gasóleo, en un motor maqueta de dos tiempos con acceso óptico.

En esta breve introducción se presentará la legislación actual y las causas que provocan que, cada vez más, la industria en general y los fabricantes en particular demanden este tipo de información a centros de investigación; así como el objetivo del presente Trabajo y sus antecedentes.

Para ello, este apartado se divide en tres subapartados:

- La situación actual.
- Objetivo del Trabajo.
- Antecedentes.

1.1. LA SITUACIÓN ACTUAL

La creciente preocupación por el impacto ambiental de las emisiones contaminantes de los motores de combustión interna alternativos (MCIA de aquí en adelante), ha provocado el desarrollo y la continua actualización de un marco legislativo por parte de las autoridades, que restringe cada vez más y más el límite de estas emisiones.

Este marco legislativo se conoce como *normativa europea sobre emisiones* o simplemente *norma Euro*, y regula el nivel de contaminantes (monóxido de carbono, hidrocarburos, óxidos de nitrógeno, masa de material particulado y número de partículas emitidas) que los fabricantes de vehículos deben acatar para poder comercializar sus productos en la Unión Europea.

Hoy en día se utiliza un ciclo de homologación conocido como el *New European Driving Cycle* (más comúnmente conocido por sus siglas, NEDC) para medir de forma objetiva, repetible e igualitaria las emisiones de los modelos a homologar. Sin embargo, este ciclo de homologación será sustituido en pocos años por el *Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedures* (conocido como WLTP), debido a que, hoy en día, el consumo y las emisiones de los modelos en el ciclo NEDC difieren sensiblemente de aquello que el usuario final es capaz de alcanzar, y por tanto, no representa con fidelidad el modo en el que el vehículo va a ser operado. Se espera que esta capacidad de representación mejore con el WLTP.

Por otro lado, debido a las sucesivas reducciones en emisiones impuestas por la norma Euro, los fabricantes han dado con avances técnicos y teóricos que han permitido alcanzar estos objetivos. Estos avances incluyen aspectos como la posibilidad de mecanizados con tolerancias cada vez más y más estrechas, el aumento en la presión de inyección, nuevas herramientas para el diseño y análisis de motores, sobrealimentaciones con rendimientos progresivamente más elevados o la aparición de nuevos conceptos de combustión.

Esto ha desembocado en un aumento desorbitado de los parámetros que se disponen para optimizar los procesos de un MCIA, y acompañado con nuevas técnicas de medición, se ha llegado a la situación en la que los fabricantes demandan estudios o investigaciones a centros especializados en busca de resultados para mejorar este complejo diseño.

Este Trabajo se enmarca en un proyecto de investigación orientado a la obtención de medidas detalladas acerca de la evolución del chorro Diesel en la cámara de combustión de un motor, pretendiendo comprender mejor estos procesos y obtener medidas que permitan validar herramientas de cálculo.

1.2. OBJETIVO DEL TRABAJO

El objetivo del presente Trabajo es el tratamiento de los datos obtenidos en varios ensayos, con una estrategia de inyección múltiple, y su análisis para obtener información de los distintos parámetros de una combustión por difusión, tales como la longitud líquida, el retraso a la ignición, la tasa de liberación de calor y sus parámetros, la luminosidad y masa de hollín o el campo de temperatura en una sección de la llama.

Con una estrategia de inyecciones múltiples adecuada, se podrán establecer comparativas para estos parámetros y ver cómo afecta el cambio en algún aspecto de la estrategia de inyección en los parámetros de la combustión.

1.3. MARCO DE TRABAJO

Este Trabajo Final de Máster se desarrolla en el Instituto de Investigación CMT (Motores Térmicos), de la Universidad Politécnica de Valencia. En este instituto existen cinco líneas de investigación y tres de líneas de apoyo, que son:

1.3.1. INYECCIÓN/COMBUSTIÓN

El objetivo de esta línea es el de modelar y diagnosticar los sistemas de combustión en los MCIAs. Su desarrollo es muy importante para conocer cómo influye la combustión y la inyección en las emisiones contaminantes y en las prestaciones del motor.

1.3.2. MANTENIMIENTO

En esta línea se realizan los planes de mantenimiento de grandes flotas de transporte como pueden ser la EMT, RENFE, etc. Se utilizan sistemas para diagnosticar averías de motores con el objetivo de poder determinar cuándo debe cesar la utilización de una máquina por obsolescencia o pérdida de rendimiento.

1.3.3. GESTIÓN DE RUIDO

Esta línea se encarga de optimizar las emisiones de ruido del sistema de admisión y de escape. Este criterio está adquiriendo más y más importancia en el diseño de los MCIAs, pues es una forma de agresión ambiental extendida y se estudia su reducción en esta línea del CMT.

1.3.4. GESTIÓN DE AIRE

En la línea de gestión de aire se desarrollan y estudian las emisiones contaminantes y las prestaciones del motor a partir de la optimización de todos aquellos elementos y sistemas que estén relacionados con la renovación de la carga en un motor.

1.3.5. GESTIÓN TÉRMICA

Los objetivos de la gestión térmica en el CMT son el diagnóstico y la predicción del flujo de calor en los MCIA, el desarrollo de técnicas de medida para caracterizar la transmisión de calor y el uso de los conocimientos adquiridos para menguar los problemas que están asociados con el arranque en frío de los MCIA.

1.3.6. LÍNEAS DE APOYO

En el campo de investigación del departamento se encuentran:

- Informática.
- Técnicas experimentales.
- CFD (*Computational Fluid Dynamics*).

Este Trabajo Fin de Máster se incluye en la línea de investigación de inyección/combustión, y se apoya en las líneas de informática y técnicas experimentales.

1.4. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

El presente Trabajo se estructura en una memoria con siete apartados y un presupuesto en el que se detalla el coste del mismo. Los apartados de la memoria son:

- Introducción: Primer apartado de la memoria en el que se presenta el Trabajo, su objetivo y su justificación, además de describirse brevemente las instalaciones en las que se ha llevado a cabo.
- Contextualización: Segundo apartado de la memoria, en el que se muestra un resumen de la evolución que ha experimentado la inyección directa Diesel y de los procesos fundamentales que tienen lugar.
- Equipo experimental y mediciones: Tercer apartado de la memoria, donde se muestran los fenómenos ópticos en los que se basan los montajes realizados, y una breve descripción esquematizada de estos.
- Metodología de análisis: Cuarto apartado de la memoria. En este apartado se muestran los distintos métodos que han sido utilizados para analizar las imágenes obtenidas en los ensayos, atendiendo a técnicas utilizadas: longitud líquida, señal de presión, masa de hollín y deconvoluciones.
- Análisis de resultados: Quinto apartado de la memoria, donde se interpretan los datos obtenidos mediante los métodos descritos en el cuarto apartado y se comparan para extraer conclusiones.
- Conclusiones y trabajos futuros: Sexto apartado de la memoria, en el que se sintetiza el Trabajo realizado y se muestran posibles líneas de nuevas investigaciones.

- Bibliografía: Séptimo y último apartado de la memoria, donde se recogen los documentos que han sido consultados para la realización de este Trabajo.

Asimismo, los apartados del presupuesto son:

- Introducción: Primer apartado del presupuesto, donde se expone de forma general su estructura y cálculo.
- Costes unitarios: Segundo apartado del presupuesto, en el que se calcula el coste por hora de la mano de obra, la amortización de los equipos utilizados, y el coste de los elementos fungibles.
- Suma de costes parciales: Tercer apartado del presupuesto, donde se calcula la suma de los costes de mano de obra, amortización y elementos fungibles.
- Coste final del Trabajo: Cuarto y último apartado del presupuesto, en el que se calcula el coste total del Trabajo para la empresa utilizando los dos apartados anteriores.

2. CONTEXTUALIZACIÓN

2.1. EVOLUCIÓN DE LA INYECCIÓN EN LOS MOTORES DIESEL

El proceso de inyección en un motor Diesel es sin duda uno de los más importantes dentro del funcionamiento del mismo, debido a que la atomización, mezcla aire/combustible y la combustión dependen en alto grado de este proceso. Esto es así debido al tipo de combustión que se da en el motor Diesel convencional (combustión por difusión), donde el combustible se quema según se inyecta en lugar de haber sido premezclado y homogeneizado con el aire fresco tal y como ocurre con el motor de gasolina o ciclo Otto (combustión premezclada).

La importancia del sistema de inyección en un motor Diesel es tal, que ha sido uno de los subsistemas que más ha evolucionado, junto con el subsistema de sobrealimentación y el diseño de la cámara de combustión.

2.1.1. MOTORES DIESEL DE INYECCIÓN DIRECTA

La evolución de los inyectores Diesel y el aumento de la presión de inyección permitieron el avance hacia la tecnología de inyección directa (DI *Direct Injection* en inglés). En estos motores se inyecta directamente en el cilindro, sin ayuda de la precámara para crear turbulencia y facilitar la inyección y la mezcla que se utilizaba en motores de inyección indirecta (IDI *InDirect Injection* en inglés). Es por este motivo (la falta de turbulencia), que la legislación debía permitir unos índices de contaminación más elevados para permitir la construcción de estos motores, ya que la mezcla aire/combustible no era tan buena y apareció el problema de las emisiones de hollín y óxidos de nitrógeno en cantidades mucho mayores que en un motor IDI.

Al no haber tanta turbulencia en un motor DI, la mezcla operaba con el mecanismo opuesto al que se utilizaba en motores IDI: baja velocidad del aire y alta velocidad del combustible. Por tanto, las características del inyector como la presión de inyección, el ángulo del chorro o la dirección del inyector se convirtieron en parámetros de una importancia extrema en los motores DI, pues estos marcaban la mezcla aire/combustible y, en última instancia, el rendimiento del motor y sus emisiones contaminantes.

Los primeros motores DI eran motores más bruscos y toscos que los ya evolucionados IDI. Eran más ruidosos, complejos, costosos y delicados que los IDI contemporáneos, pero tenían una mayor eficiencia térmica. Este cambio de tecnología, y el paulatino abandono de los motores IDI, permitió que nuevos constructores pudiesen iniciar su desarrollo de motores Diesel, aumentando la competencia y provocando un desarrollo muy rápido de la tecnología DI.

Gran parte de este desarrollo se ha debido al aumento continuo de la presión de inyección, permitiendo velocidades del combustible más altas, y a la sobrealimentación, permitiendo conseguir mejores mezclas aire/combustible por la mayor densidad del aire durante la inyección y, en general, mayores potencias al haber más aire disponible con el que quemar el combustible. Además, cambios en la geometría del pistón también han permitido mejorar el movimiento del aire y con ello la mezcla.

Pero uno de los avances más notorios en los motores Diesel DI ha sido la posibilidad de realizar múltiples inyecciones de combustible en lugar de inyectar únicamente una vez (con la aparición del sistema de raíl común o *Common Rail* en inglés). Como en esta tecnología el mecanismo de la mezcla aire/combustible es la alta velocidad del combustible, realizando varias inyecciones se controla la mezcla y la turbulencia, y por tanto, la potencia, rendimiento y emisiones contaminantes del motor.

2.1.2. CARACTERÍSTICAS DE LA INYECCIÓN ÚNICA EN MOTORES DI

Los primeros sistemas utilizados para la inyección directa de combustible en los motores Diesel eran capaces de inyectar un único chorro en el punto muerto superior del pistón (PMS de aquí en adelante) y sus cercanías. Esta limitación imponía ciertas desventajas relativas al proceso de combustión por difusión que ocurre en los motores Diesel.

En una combustión por difusión aparecen tres etapas diferenciadas:

- Primera fase: Tiempo de retraso.

En la primera fase, justo al comienzo de la inyección, el combustible líquido atomizado se mezcla con el aire sin que haya liberación de calor.

- Segunda fase: Combustión premezclada (detonación).

Cuando hay suficiente combustible mezclado correctamente con el aire y se dan las condiciones de temperatura necesarias, el combustible ya mezclado detona de forma espontánea y muy rápida.

- Tercera fase: Combustión por difusión.

Al haber ocurrido la combustión premezclada, la temperatura aumenta y el combustible que es inyectado únicamente debe encontrar aire en la proporción adecuada para quemarse. Así, se da la tercera fase, en la que el combustible se quema según es inyectado y mezclado.

En los primeros motores Diesel DI, al ser posible únicamente un chorro por combustión, se inyectaba una gran cantidad de combustible rápidamente y esto provocaba que se mezclase una gran cantidad de gasóleo con aire. Cuando ocurría la combustión premezclada, toda esta masa de combustible premezclado detonaba de forma muy brusca, causando ruido y vibraciones violentas.

Una vez ocurría esta fase premezclada, debido al aumento de temperatura por esta primera combustión, el combustible que se inyectaba se quemaba al encontrar aire en la proporción correcta (estequiométrica). Durante esta fase (combustión por difusión), en el interior de la llama se forma hollín, pero es oxidado cuando atraviesa la capa externa de la llama, donde el combustible y el aire están mezclados de forma estequiométrica.

No obstante, según el final de la combustión se acerca y deja de inyectarse combustible, el gasóleo que queda fresco y agrupado en el cilindro no encuentra con facilidad aire para quemarse (recordemos que la combustión en DI se basa en mucha velocidad del combustible por la inyección y baja velocidad del aire), y se forma hollín que no es capaz de oxidarse, dejando hollín sin quemar.

Estas tres etapas se reflejaban en dos características de los primeros Diesel DI como eran el nivel de ruido del motor y la cantidad de hollín y material particulado presente en los gases de escape.

2.1.3. CARACTERÍSTICAS DE LA INYECCIÓN MÚLTIPLE EN MOTORES DI

Estas dos características negativas de los primeros motores DI se paliaron en cierta medida con la aparición de los sistemas de raíl común y la mejora de los inyectores Diesel, pudiendo realizar varias inyecciones para una misma combustión.

Las estrategias de inyección múltiple buscan disminuir la cantidad de combustible quemado en fase de premezcla y llevar al mínimo el nivel de hollín sin oxidar en los gases de escape. Estos dos objetivos se alcanzan de la siguiente forma:

- Disminución de la cantidad de combustible quemado en fase de premezcla:

Se realiza una pre-inyección durante la carrera de compresión del pistón, de muy corta duración, para conseguir una combustión premezclada de muy poco combustible, consiguiendo así un menor nivel de ruido y de vibraciones para el motor.

- Minimización del nivel de hollín sin oxidar en los gases de escape:

Después de realizar la inyección principal sobre los gases quemados de la fase premezclada, y haber quemado la mayoría del combustible inyectado, queda combustible sin quemar en el interior del cilindro porque al haber terminado la inyección, no hay suficiente turbulencia para conseguir que este combustible encuentre aire fresco. Se realiza entonces una post-inyección de muy corta duración cuyo objetivo no es quemar lo inyectado, sino generar turbulencia que ayude a que el combustible sin quemar encuentre aire y el hollín formado se oxide.

Esta estrategia está ampliamente implantada en rasgos generales en todos los fabricantes de MCI para poder alcanzar los estándares de potencia y nivel de ruido que los usuarios demandan, y en el nivel de emisiones que exige la normativa europea.

No obstante, los efectos de inyecciones múltiples durante la fase de combustión por difusión todavía no están comprendidos y explicados, aunque la industria los utiliza con buen resultado de potencia, rendimiento y emisiones. Es por ello que comprender completamente los fenómenos que ocurren en las inyecciones múltiples es un paso que puede ser de gran ayuda a la industria y a la sociedad en general, para alcanzar motores cada vez más potentes, eficientes y menos contaminantes; facilitando el post-tratamiento de los gases de escape que pueden restar rendimiento al motor y encarecer el precio del vehículo.

3. EQUIPO EXPERIMENTAL Y MEDICIONES

3.1. INTRODUCCIÓN

Para poder comprender y caracterizar correctamente los fenómenos que ocurren durante la inyección y combustión, se precisa del equipo necesario para poder visualizar la cámara de combustión con una resolución temporal y espacial lo suficientemente alta como para poder distinguir los fenómenos. Además del equipo óptico (cámaras rápidas, lentes, fuentes de luz, filtros, etc.), también es muy útil la utilización de uno o varios sensores de presión, pues el tratamiento en paralelo de esta señal junto con los resultados ópticos permiten explicar y relacionar los distintos fenómenos que ocurren en la cámara de combustión.

Las técnicas ópticas que han sido utilizadas se explican en el apartado 3.2 de esta memoria, y el detalle de la instalación en el apartado 3.3.

El equipo utilizado para realizar los ensayos es propiedad del instituto CMT de la UPV y las mediciones se han realizado en las mismas instalaciones. El equipo consiste en:

- Motor de dos tiempos de ciclo Diésel con cuatro accesos laterales dispuestos ortogonalmente (tres utilizados como accesos ópticos) y uno superior. Se trata de un motor de un único cilindro con una cilindrada de 3 litros y diámetro de 45 mm, utilizándose el acceso superior para colocar el inyector de combustible. De los cuatro accesos laterales, uno se ha utilizado para colocar el sensor de presión y los otros tres disponen de ventanas ópticas de dimensiones 88 mm (longitud) x 37 mm (anchura) x 28 mm (espesor). Un esquema del motor se muestra en la Figura 3.1 (Jose V. Pastor, 2015).

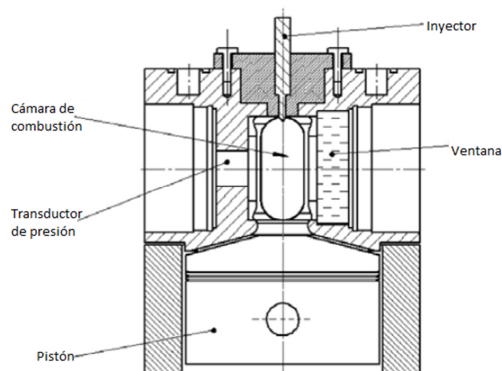


Figura 3.1: Esquema de la disposición de elementos en el motor maqueta de dos tiempos.

- Sensor de presión.
- Lámpara de xenón, 300 Wattios.
- LED (longitud de onda de 450 nm).
- Difusores ópticos, lentes, filtros y espejos parabólicos.
- Cámaras de alta velocidad (35 KHz).
- Cámara ICCD.
- Software para la operación de las cámaras.

3.2. TÉCNICAS ÓPTICAS. PRINCIPIO DE MEDIDA

Los ensayos ópticos realizados en el motor maqueta de dos tiempos han sido los necesarios para poder visualizar los productos calientes de la combustión, la fase líquida de la inyección, el hollín presente en la llama y la luminosidad propia de la llama.

Los fenómenos en los que se basan las técnicas ópticas utilizadas serán presentados y explicados brevemente, pues el objeto del presente Trabajo es el tratamiento de la información recogida mediante estas técnicas.

3.2.1. EFECTO SCHLIEREN

Para la visualización de los productos calientes de la combustión se ha aprovechado el efecto Schlieren. Este efecto se basa en la variación en el índice de refracción de un gas con la variación de densidad, y por tanto de temperatura, y es posible observarlo en la vida cotidiana si hay una superficie caliente que aumente la temperatura del aire que lo rodea y un fondo con una geometría conocida. Se aprecia entonces una agitación suave del fondo, distorsionándolo. El esquema de esta situación es como el indicado en la Figura 3.2:

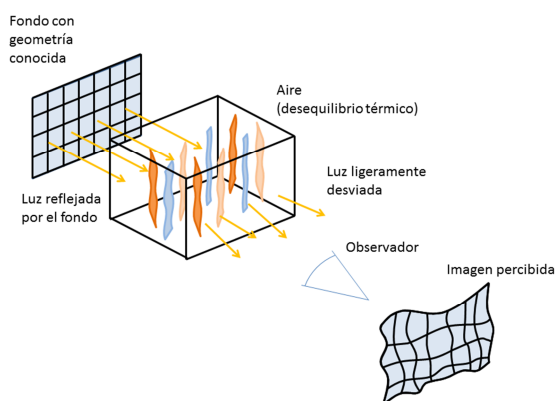


Figura 3.2: Diagrama básico del efecto Schlieren.

Este diagrama, que puede darse en situaciones cotidianas, muestra el efecto Schlieren conceptualmente: La luz proveniente del fondo atraviesa el aire con desequilibrio térmico, y por tanto, con variaciones de densidad y de índices de refracción. Debido a esta diferencia de índices de refracción, los rayos de luz se desvían ligeramente y la imagen percibida por el observador está distorsionada con respecto a la original.

Si en lugar de existir aire en desequilibrio térmico y desordenado (aire frío y caliente existen en distintas zonas del volumen), se encuentra agrupado (como en una cámara de combustión, donde el aire se encuentra relativamente frío y la llama caliente), se tiene el esquema representado en la Figura 3.3:

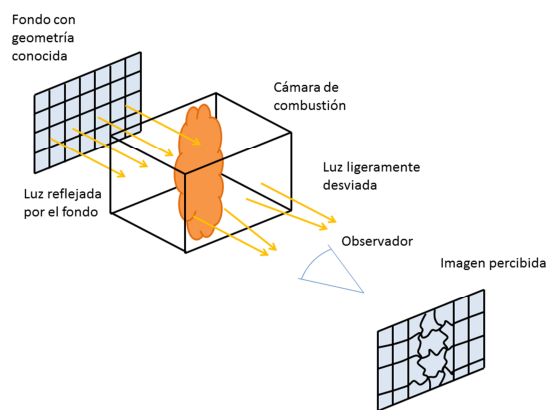


Figura 3.3: Diagrama del efecto Schlieren con aire caliente agrupado.

El aire caliente agrupado en la cámara de combustión actúa como una lente y provoca que los rayos de luz que lo atraviesan diverjan. Esto provoca que el fondo se distorsione únicamente en la zona cuya trayectoria hasta el fondo atravesase el aire caliente, mientras que el resto permanece inalterado.

Para poder percibir más detalles de la forma del aire caliente en el interior del aire frío, se sustituye el fondo y su luz reflejada por una fuente de luz. El efecto es el mismo que en la Figura 3.3, pero al haber mayor intensidad lumínica en este caso, la imagen aparece sobreexpuesta (demasiado blanca), y se dificulta la diferenciación del contorno del aire caliente.

Para evitar esta sobreexposición, se utiliza una lente convergente justo antes y después de la cámara de combustión y una cuchilla para tapar la luz directa de la fuente, tal y como se muestra en la Figura 3.4:

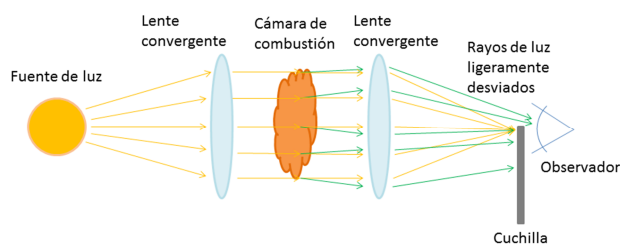


Figura 3.4: Esquema conceptual básico del montaje Schlieren.

Esta cuchilla bloquea la luz directa pero permite que la luz que ha sido ligeramente desviada llegue a la cámara, mostrando en detalle el contorno del aire caliente dentro de la cámara de combustión. El montaje para el ensayo es algo más complejo pero se basa en el mismo principio que el representado en la Figura 3.4, como más adelante se verá en el apartado 3.3 de esta memoria.

3.2.2. DISPERSIÓN MIE

El siguiente fenómeno óptico es la dispersión Mie. Es similar a la dispersión de Rayleigh, y permite observar la fase líquida de la inyección.

Para comprender más fácilmente la dispersión Mie, se explicará primero la dispersión Rayleigh y se ejemplificará con situaciones cotidianas. La dispersión de Rayleigh se da con ondas electromagnéticas (incluido el espectro de luz visible) que interfieren con partículas del orden de una décima parte de la longitud de onda considerada. Además, la intensidad de luz dispersada es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda. Esto implica que la luz azul (luz visible con la longitud de onda más corta) será dispersada en mayor medida que una luz roja (luz visible con la longitud de onda más larga). Esto se representa en la Figura 3.5:

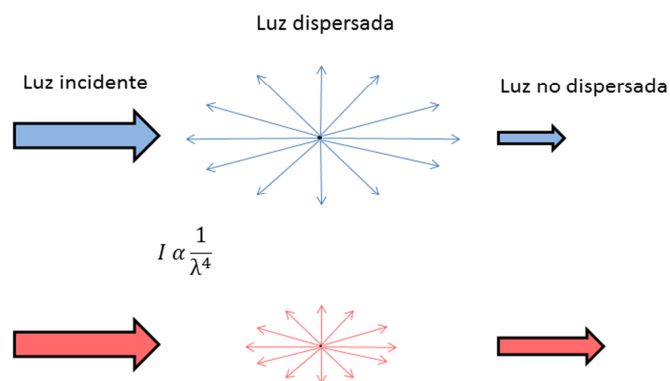


Figura 3.5: Esquema de la dispersión de Rayleigh.

Este fenómeno es el que causa que el cielo sea azul cian durante el día, ya que la luz blanca proveniente del sol, suma de luz roja, verde y azul, no se dispersa por igual. Se da mucha dispersión de luz azul (longitud de onda corta), un poco de luz verde (longitud de onda entre la luz azul y la roja) y muy poca roja (longitud de onda larga). La suma de esta dispersión en gran cantidad de luz azul e intermedia de luz verde provoca que veamos el cielo de color azul cian. Asimismo, esto también explica que el sol en los atardeceres se perciba de color rojizo, pues es el color que menos se dispersa en la atmósfera hasta llegar al observador. Como el sol se encuentra más bajo, el camino óptico que la luz recorre a través de la atmósfera es mayor, y el color azul se dispersa casi por completo, el verde en una gran parte y el rojo en una cantidad pequeña. La mezcla de una gran cantidad de luz roja no dispersada y un poco de verde da lugar al color anaranjado de los atardeceres.

La dispersión Mie es parecida a la de Rayleigh, pero la dependencia con la longitud de onda no es tan elevada, y se da con partículas mayores a una décima parte de la longitud de onda incidente. Un esquema de dispersión Mie aparece en la Figura 3.6:

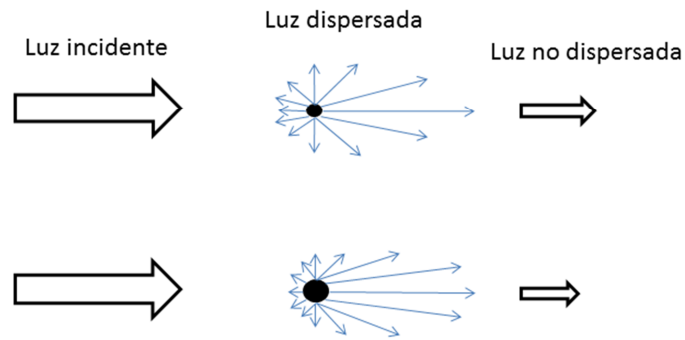


Figura 3.6: Esquema de la dispersión Mie.

En la Figura 3.6 se aprecia que a mayor tamaño de partícula (mitad inferior de la figura 3.6), menor es la intensidad fuera de la línea de la luz incidente (la dispersión está más focalizada hacia la parte posterior de la partícula). Como la dependencia con la longitud de onda no es tan fuerte como en la dispersión de Rayleigh, los tres componentes de la luz blanca (rojo, verde y azul) se dispersan de forma muy parecida.

La dispersión Mie es la causante de que las nubes, la niebla y la bruma se perciban de color blanco (las partículas de agua en estos casos son mucho mayores que una décima parte de la longitud de onda).

Aun a pesar de la dirección dominante en la dispersión Mie, es posible percibir esta dispersión desde cualquier otro ángulo, pero no de forma tan intensa.

Esta técnica se puede utilizar dentro de la cámara de combustión para detectar la longitud líquida de la inyección (aquella longitud donde el combustible aún es líquido y se está atomizando), pues el tamaño de las partículas es el adecuado para que este efecto tenga lugar. Se percibe un fondo negro con la fase líquida iluminada.

3.2.3. ILUMINACIÓN TRASERA DIFUSA (DBI)

La iluminación trasera difusa (de aquí en adelante DBI, por sus siglas en inglés) es una técnica óptica que hace uso de la absorción o refracción de los rayos de luz para detectar el contorno de medios con partículas absorbentes. El esquema en la Figura 3.7 muestra una instalación simplificada que hace uso de esta técnica:

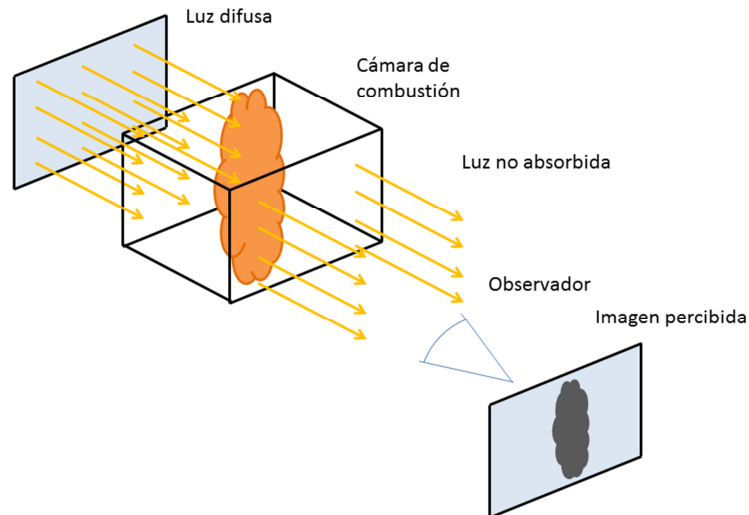


Figura 3.7: Esquema de un montaje DBI.

En esta técnica, a diferencia de las anteriores, se utiliza luz difusa en lugar de luz colimada de la fuente debido a que la primera no es tan susceptible de ser desviada como la segunda. Aun así, aparece un ligero efecto de desviación, conocido como *beam steering* en inglés, por el efecto Schlieren, pero no tan marcado al utilizar luz difusa.

La luz difusa atraviesa la cámara de combustión y es absorbida por aquellas partículas que tienen capacidad para hacerlo (mayoritariamente hollín). La luz que no ha sido absorbida continúa su camino hasta la cámara, donde es detectada. Así, aparece un fondo iluminado con el contorno de la zona absorbente ennegrecido o completamente negro, según haya sido el nivel de absorción.

En el caso de la fase líquida, no se da la absorción de la luz difusa incidente, sino que esta incide en las partículas y se difunde, no llegando a la cámara debido a la desviación (aparece, por tanto, una zona negra en la fase líquida sobre el fondo iluminado, lo que permite su distinción).

3.2.4. MÉTODO DE LOS DOS COLORES

La técnica de dos colores tiene como fundamento la radiación emitida por el hollín cuando es incidido por un rayo de luz. Esta relación está determinada por la siguiente expresión (Jose V. Pastor, 2015):

$$I_{\text{hollín}} = [1 - \exp(-KL)] \cdot \left(\frac{c_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} \right) \quad (1)$$

Donde $I_{\text{hollín}}$ es la radiación emitida por el hollín, K es el coeficiente de extinción dimensional, L es la longitud que el rayo de luz recorre a través de la nube de hollín, λ es la longitud de onda considerada, T es la temperatura del hollín, y c_1 y c_2 son constantes definidas.

Al iluminar la nube de hollín, sus partículas emiten radiación en un espectro relativamente amplio de longitud de onda. Dos de estas longitudes de onda son seleccionadas mediante filtros justo antes de las cámaras (son necesarias dos, una para cada longitud de onda). Con la longitud de onda determinada en ambos casos y la radiación emitida por el hollín a esa longitud de onda, quedan como incógnitas el factor KL (representa la opacidad de la nube de hollín) y la temperatura de sus partículas T . Con dos cámaras es posible capturar la radiación emitida a dos longitudes de onda diferentes, y resolver el sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas.

Este método no presenta prácticamente desviación en los rayos de luz emitidos por el hollín, por lo que la forma de la nube de partículas sólidas queda representada con fidelidad. No obstante, presenta el problema de la auto-absorción, que consiste en que la radiación emitida por las partículas que están más alejadas del observador es absorbida por las más cercanas. Esto hace necesario un tratamiento mucho más cuidadoso de los datos obtenidos por este método para compensar este fenómeno, como más adelante se verá en el apartado 4 de esta memoria.

3.3. MONTAJE ÓPTICO

Se realizaron dos montajes para ensayar los cuatro métodos descritos en el apartado anterior:

En el primero de ellos se realizaron los ensayos de dispersión Mie y del efecto Schlieren, mientras que en el segundo se realizaron los de DBI y 2 Colores. Hay que indicar que los estudios realizados permitieron caracterizar el chorro en condiciones inertes y reactivas. En el segundo caso el gas presente en la cámara es aire, mezcla de oxígeno y nitrógeno, con lo que el combustible experimenta la reacción de combustión. En el primer caso, el motor aspira únicamente nitrógeno, con lo que el combustible no encuentra oxígeno en la cámara de combustión, y la reacción de combustión no se produce. El montaje de Schlieren-Mie se usó para estudios de chorro inerte y reactivo, mientras que con el montaje de DBI-2C se analizaron únicamente casos reactivos.

3.3.1. MONTAJE SCHLIEREN - MIE

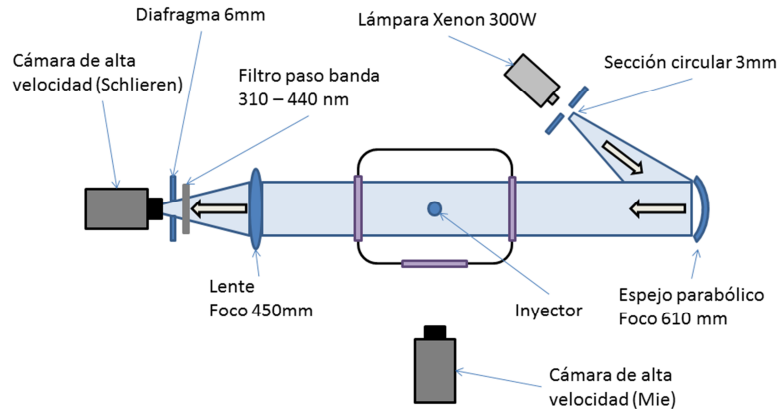


Figura 3.8: Esquema del montaje Schlieren – Mie.

El esquema del primer montaje es el que aparece en la Figura 3.8. Tal y como se observa en el esquema, se ha utilizado una lámpara de Xenon de 300W como fuente de luz y se ha utilizado un diafragma de 3mm de diámetro para conseguir una fuente de luz puntual. Esta fuente de luz se coloca en el foco del espejo parabólico donde se refleja, y de ese modo se consigue un haz de luz con rayos perfectamente paralelos. Este haz de luz se hace pasar por dos accesos ópticos del motor, atravesando la cámara de combustión donde se encuentra el inyector, orientado en dirección perpendicular al plano del esquema. Debido a la diferencias de temperatura y de índice de refracción en la cámara de combustión, algunos rayos de luz se desvían y pierden el paralelismo con el haz de luz. Son estos rayos los que, atravesando la lente convergente y el filtro paso banda, pasan el diafragma que tapa la luz directa de la fuente de luz y se reciben en la cámara de la izquierda en el esquema.

Al mismo tiempo, algunos rayos de luz se dispersan según la teoría Mie en la fase líquida de la inyección, dentro de la cámara de combustión. Como se dispersan en todas direcciones, al colocar una cámara adicional en la ventana óptica restante se aprecia la fase líquida de la inyección iluminada (cámara inferior en el esquema).

3.3.2. MONTAJE DBI - 2C

El segundo montaje instalado ha sido el representado en la Figura 3.9:

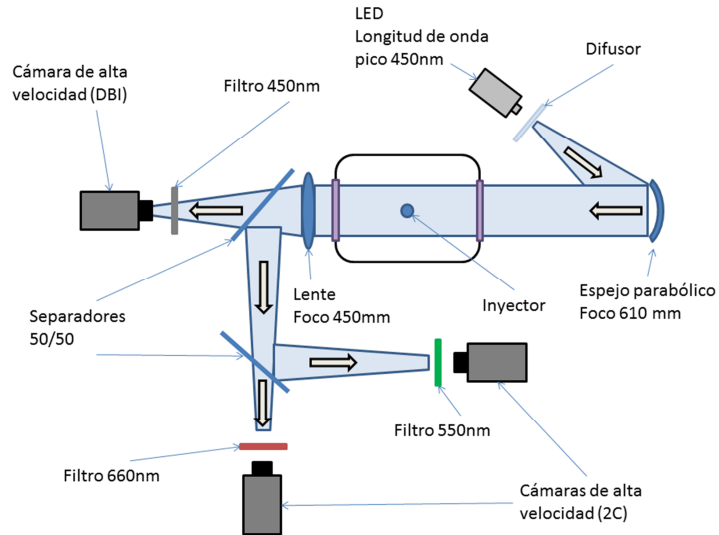


Figura 3.9: Esquema del montaje DBI – 2C.

La fuente de luz utilizada ha sido un LED con una longitud de onda pico de 450nm. Después se hace pasar el haz de luz por un difusor (para evitar lo máximo posible las desviaciones por efecto Schlieren). El haz se refleja en un espejo parabólico idéntico al utilizado en el primer montaje, y de esta forma se consigue tener un haz de luz difusa. Se hace pasar por el interior de la cámara de combustión donde es absorbido por el hollín (y desviado por la fase líquida de la inyección), y el haz resultante se hace pasar por una lente convergente. Inmediatamente después, el haz encuentra un separador 50/50 (la mitad de la intensidad lumínica se refleja y la otra mitad sigue sin desviarse). En un lado del separador se coloca la cámara rápida para observar la atenuación por el hollín, filtrado a 450nm (misma longitud de onda que el LED), y en el otro, un separador 50/50 más que se dirige a otras dos cámaras, con filtros a 550 y 660nm, para observar la radiación del hollín a esas longitudes de onda.

4. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

Este apartado de la memoria muestra y describe el método utilizado para procesar las imágenes obtenidas en los dos montajes. El procesado ha sido llevado a cabo utilizando Matlab para el tratamiento de las imágenes obtenidas y la realización de las gráficas, Excel para la síntesis de los resultados de forma ordenada y Grapher 10 para realizar las comparativas finales.

Ambos montajes han hecho uso del sensor de presión, colocado en el cuarto acceso del motor.

Los ensayos realizados con el primer montaje (Schlieren - Mie) se han centrado en obtener la longitud líquida de la inyección haciendo uso de las imágenes Mie, y el retraso a la ignición haciendo uso de las lecturas del sensor de presión y las imágenes Schlieren. Los realizados con el segundo montaje (DBI – 2C) han permitido estudiar la radiación del hollín, su opacidad y su masa, además del campo de temperatura y hollín en el interior de la llama (deconvolución).

4.1. LONGITUD LÍQUIDA (DBI)

Se ha calculado la longitud líquida a partir de las imágenes DBI, aún a pesar de que la fase líquida de la inyección no absorbe la intensidad lumínica, sino que la desvía y provoca que no llegue a la cámara, aun tratándose de luz difusa, mucho menos propensa a los desvíos por el efecto Schlieren.

Un ejemplo de imágenes DBI son las que aparecen en la Figura 4.1:

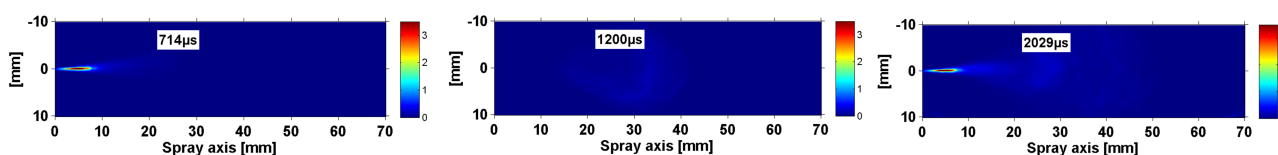


Figura 4.1: Ejemplo de imágenes DBI (F750D500S1000, 750 μ s de energizado, 500 μ s de pausa, 1000 μ s de energizado).

Como puede observarse en la Figura 4.1, es posible apreciar la fase líquida de la inyección a pesar de que en lugar de absorberse la luz incidente en ella, es desviada.

El procesado de estas imágenes para obtener la longitud líquida se ha realizado según estos pasos:

1. Se recopila la información del eje horizontal del spray, donde se encuentra el inyector, tomando una zona de 7 píxeles (0.908 mm, debido a que la relación pixel/mm de las imágenes DBI es de 7.71). Es decir, se considera un rectángulo de 70mm de longitud (longitud total de las imágenes) y de los 7 píxeles centrales de anchura.
2. Se promedian los valores de estos 7 píxeles, y se obtiene un valor promedio para cada píxel de longitud, tal y como muestra la Figura 4.2:

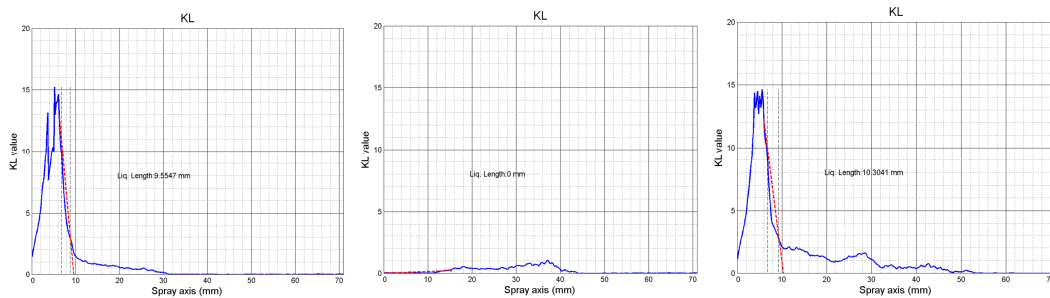


Figura 4.2: Ejemplo de tres instantes al realizar el promediado (curva azul) (F750D500S1000).

3. Se toman los últimos puntos de la curva azul que están más a la derecha del máximo, y sean mayores al 65% y el 20% del máximo (dos líneas punteadas negras en la Figura 4.2).
4. Se interpola de forma lineal ambos puntos, y se considera como longitud líquida el corte con el eje X (línea roja en la Figura 4.2). Esta interpolación lineal es necesaria para poder definir claramente la longitud líquida, pues aparece una cola en la curva azul debida a la desviación que experimentan los rayos de luz al atravesar la fase líquida y que puede falsear el resultado.

La longitud líquida en todos los instantes captados por la cámara se guardan en un archivo Excel, y se representa la curva que muestra su evolución temporal, como muestra la Figura 4.3:

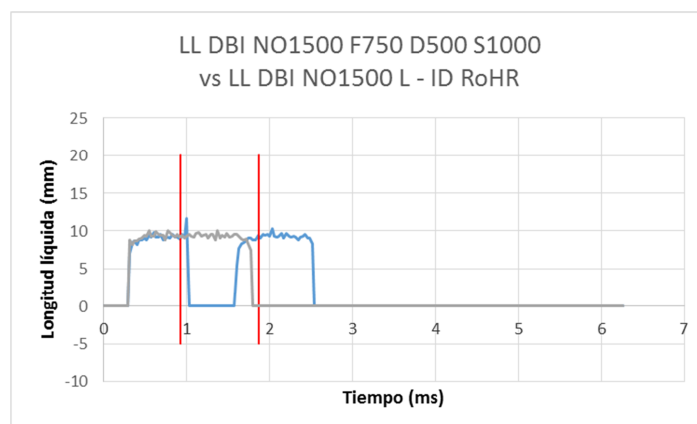


Figura 4.3: Imagen mostrando la evolución temporal de la estrategia F750D500S1000 en azul, L en gris (1500 μ s de energizado sin pausa) y la ignición de ambas inyecciones en rojo.

4.2. SEÑAL DE PRESIÓN. TASA DE LIBERACIÓN DE CALOR (ROHR) Y RETRASO A LA IGNICIÓN.

El retraso a la ignición se define como el tiempo que transcurre entre la inyección de combustible y la aparición de combustión. Durante este tiempo de retraso se producen los fenómenos encargados de la mezcla de aire y combustible completamente fresco, y en última instancia determina la cantidad de combustible premezclado que se autoencenderá. Cuanto más bajo sea el retraso a la ignición, el autoencendido tendrá una menor intensidad, provocando un menor nivel de ruido y vibraciones en el motor.

Por otro lado, la tasa de liberación de calor (RoHR por sus siglas en inglés de aquí en adelante) se obtiene a partir de la medida del sensor de presión con la expresión que sigue (Francisco Payri González, 2011):

$$\frac{dQ}{dt} = \left(\frac{1}{\gamma - 1}\right) \left[V \left(\frac{dP}{dt}\right) + \gamma P \left(\frac{dV}{dt}\right) \right] \quad ; \quad \gamma = 1.34 \quad (2)$$

Los ensayos se han realizado con una velocidad de giro del cigüeñal de 500 rpm. Conociendo el diámetro del cilindro, la carrera del pistón y el volumen de la cámara de combustión, se conoce el volumen encerrado por el pistón en todo momento. Como esta función es continua y senoidal, es derivable y por tanto su derivada también es conocida. Con γ , V y $\frac{dV}{dt}$ determinados, únicamente resta por conocer el término $\frac{dP}{dt}$. Para ello se hace uso de la lectura del sensor de presión, y se deriva respecto al tiempo.

No obstante, como un MCIA está diseñado para operar en una variedad de regímenes de giro, a priori no parece adecuado expresar la RoHR en función del tiempo. Para poder comparar dos RoHR a diferente velocidad de giro, es más adecuado utilizar no la variable temporal, sino el ángulo girado por el cigüeñal. No queda más que sustituir el término dt en la ecuación anterior por dCA (*Crankshaft Angle* en inglés), con la conversión adecuada, para expresar la RoHR en función del parámetro interno del motor (Francisco Payri González, 2011):

$$\frac{dQ}{dCA} = \left(\frac{1}{\gamma - 1}\right) \left[V \left(\frac{dP}{dCA}\right) + \gamma P \left(\frac{dV}{dCA}\right) \right] \quad ; \quad \gamma = 1.34 \quad (3)$$

El procedimiento para obtener la RoHR a partir de la lectura del sensor de presión ya estaba disponible en el CMT, de modo que no ha sido necesario desarrollar un método para ello. Se obtiene una tabla Excel con los valores del ángulo del cigüeñal, 30 repeticiones de la misma inyección, la media de las 30 inyecciones y su desviación típica.

Si se representa la columna con la media de las mediciones y el giro del cigüeñal, se obtiene la gráfica mostrada en la Figura 4.4:

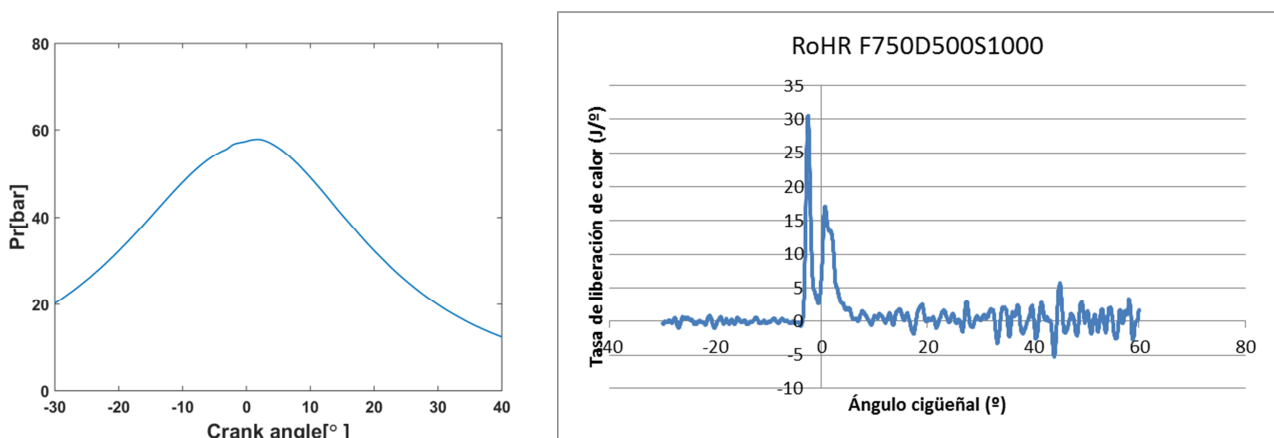


Figura 4.4: Ejemplo de señal de presión y tasa de liberación de calor (F750D500S1000).

Donde el eje horizontal representa el ángulo del cigüeñal y el vertical la tasa, en J/°CA (Julios por ángulo de cigüeñal girado).

Aunque es recomendable la utilización del ángulo del cigüeñal como comparación entre distintos regímenes de giro (por esta razón los datos se obtienen en bruto con esta unidad), es más habitual la utilización del tiempo en el eje horizontal para la comparación entre distintos retrasos a la ignición.

Por otro lado, es necesario conocer el momento exacto de la inyección para tomar ese instante como referencia y así poder obtener el retraso a la ignición. Para ello se recurre a las imágenes Schlieren y a datos ya obtenidos con anterioridad en el CMT. Para el caso de la primera inyección, el CMT ya obtuvo el instante preciso en el que la inyección tomaba lugar. Utilizando las imágenes Schlieren y sabiendo el tiempo que transcurre entre cada imagen, es posible obtener el tiempo desde el principio de la grabación (es decir, el comienzo del energizado del inyector) hasta el comienzo de la inyección (visto en las imágenes Schlieren). Este tiempo es el tiempo de retraso de la primera inyección. Para la segunda inyección se recurrió a las imágenes Schlieren. El video obtenido por la cámara de alta velocidad es tratado imagen a imagen y se decide el instante de la inyección tal y como se muestra en la Figura 4.5:

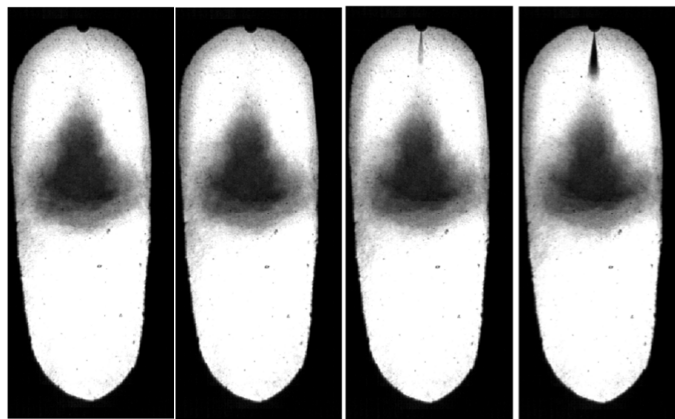


Figura 4.5: Momento de la segunda inyección (F750D500S1000).

Como se conoce la velocidad a la que la cámara toma cada imagen (30.000 imágenes por segundo) y el tiempo en el que la grabación comienza (energizado del inyector para la primera inyección), el tiempo en cada una de las imágenes es conocido y así lo es también el instante de la inyección. En particular, para el caso mostrado en la Figura 4.5 en la que se muestran las imágenes de la 47 a la 50 recogidas por la cámara, el tiempo con respecto al primer energizado del inyector es:

$$Tiempo\ iny\ (s) = \frac{n^{\circ}\ imagen - 1}{velocidad\ cámara\ \left(\frac{1}{s}\right)} = \frac{48.5 - 1}{30000} = 1.5833 \dots\ ms \quad (4)$$

Es necesario restar una imagen para obtener correctamente el tiempo debido a que la primera imagen tomada por la cámara se produce en el instante 0. Con esta metodología es posible obtener el momento preciso de la inyección para cada uno de los 7 casos.

Una vez obtenido el momento exacto de la primera y segunda inyección, se hace uso del RoHR para determinar el momento en el que tiene lugar la liberación de calor. La información extraída se muestra en la Figura 4.6:

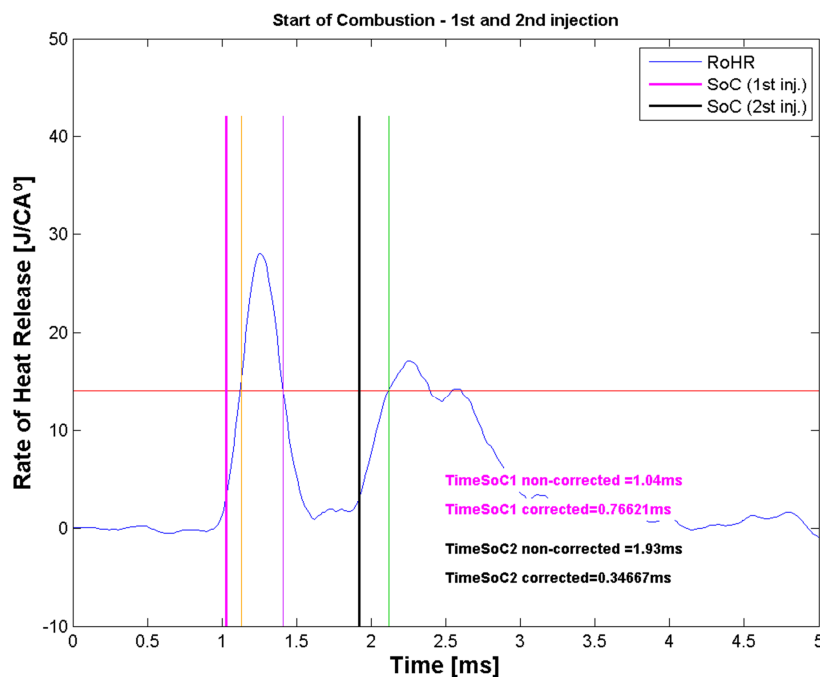


Figura 4.6: RoHR con la información temporal extraída (F750D500S1000).

El algoritmo para extraer la información temporal consta de los siguientes pasos:

1. Se traza una línea horizontal cuyo valor sea la mitad del valor máximo de la RoHR, de este modo se obtiene la línea roja horizontal de la Figura 4.6.
2. Se marcan los puntos donde la curva horizontal corta a la RoHR y se identifican con líneas verticales finas. Así se obtienen las líneas verticales amarilla, púrpura y verde. Esto permite conocer si la curva de RoHR se encuentra por encima o por debajo de la línea horizontal: Desde el principio hasta la línea amarilla, la RoHR se encuentra por debajo de la línea horizontal; Entre la línea amarilla y la púrpura, por encima; Entre la púrpura y la verde por debajo; Y a partir de la verde hay una zona que queda por encima.
3. El algoritmo toma el valor mínimo del RoHR entre el principio y la línea amarilla, y el valor máximo entre las líneas amarilla y púrpura.
4. Se define un umbral como el 85% de la diferencia entre el máximo y el mínimo.
5. A continuación, se define el tiempo de retraso de la primera inyección como el transcurrido hasta que la RoHR supera este umbral en el primer intervalo.
6. Se repiten los pasos de forma análoga para la segunda inyección, en el intervalo entre las líneas finas púrpura y verde.

Con ello se obtiene el tiempo entre el energizado del inyector y el principio de la ignición. Calculando la diferencia entre este valor, y el obtenido del comienzo de la inyección, se obtiene el retraso a la ignición tanto de la primera como de la segunda inyección (texto en la Figura 4.6).

4.3. MASA DE HOLLÍN

El siguiente análisis trata acerca de la masa de hollín en cada instante para cada condición. Para realizar el cálculo de la masa de hollín se hace uso de las imágenes DBI y 2C, y primero es recomendable introducir el concepto de la fracción volumétrica de hollín y su cálculo (Jose V. Pastor, 2015):

$$f_v = \frac{K \cdot \lambda}{k_e} \quad (5)$$

Donde K es el coeficiente dimensional de absorción del hollín (m^{-1}), λ es la longitud de onda de la luz emitida por el hollín y k_e es el coeficiente de extinción adimensional del hollín, que varía, entre otros factores, con la longitud de onda (λ).

La cámara encargada de captar las imágenes DBI recibe luz cuya longitud de onda es de 450 nm, y hay dos fuentes de luz a esta frecuencia: La primera es la propia fuente de luz LED, y la segunda es la contribución del hollín a esa longitud de onda, ya que el hollín emite la energía absorbida en un rango amplio de longitudes de onda. Si se quiere medir la atenuación que experimenta la luz emitida por el LED al atravesar la nube, hay que tener en cuenta la luz emitida por el hollín para descontarla y no falsear la medida. Es decir (Jose V. Pastor, 2015):

$$I_{\text{cámara,LED ON (450nm)}} = I_{\text{LED(450 nm)}} + I_{\text{hollín(450 nm)}} \quad (6)$$

No hay forma de conocer a priori la intensidad que el hollín emitirá a 450 nm, por lo que se recurre a la siguiente aproximación experimental, consistente en encender y apagar la fuente LED muy rápidamente de modo que cuando el LED está encendido, la ecuación 6 es cierta, y cuando está apagado, la única intensidad que recibe la cámara es la procedente del hollín (Jose V. Pastor, 2015):

$$I_{\text{cámara,LED OFF (450nm)}} = I_{\text{hollín(450 nm)}} \quad (7)$$

Si se alterna el LED entre encendido y apagado rápidamente, puede aproximarse con un error pequeño que la intensidad de la llama en dos estados consecutivos del LED es la misma, es decir, la intensidad de la llama con el LED encendido y apagado es aproximadamente la misma. La sincronización del LED y la cámara es la que se muestra en la Figura 4.7 (Jose V. Pastor, 2015):

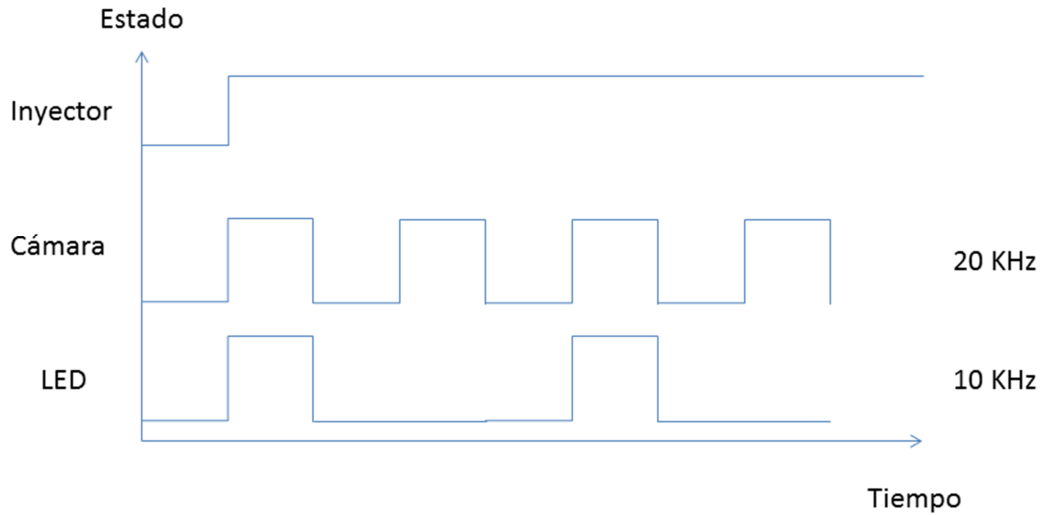


Figura 4.7: Sincronización entre inyector, cámara y fuente de luz LED.

Haciendo uso de la ley Beer-Lambert, puede obtenerse el coeficiente de absorción adimensional KL del hollín.

$$\frac{I_{\text{fuente a través de la nube de hollín}}}{I_{\text{total fuente}}} = \frac{I_{\text{cámara,LED ON}} - I_{\text{cámara,LED OFF}}}{I_{\text{fuente LED}}} = \exp(-KL) \quad (8)$$

De esta forma es posible obtener una aproximación válida del coeficiente KL para el montaje de DBI. Una vez conocida la trayectoria de los rayos de la fuente de luz a través de la nube de hollín (L), se puede hallar el coeficiente dimensional de absorción (K) para el montaje DBI. De esta forma es factible obtener la fracción volumétrica de hollín (ecuación 5).

La fracción volumétrica de hollín es constante, se observe a través de las imágenes DBI o 2C, por lo que (Jose V. Pastor, 2015):

$$f_v = \frac{K_{DBI} \cdot \lambda_{DBI}}{k_{e\ DBI}} = \frac{K_{2C} \cdot \lambda_{2C}}{k_{e\ 2C}} \quad (9)$$

$$K_{2C} = \frac{K_{DBI} \cdot \lambda_{DBI}}{k_{e\ DBI}} \cdot \frac{k_{e\ 2C}}{\lambda_{2C}} = 0.7954 \cdot K_{DBI} \quad (10)$$

Y de esta forma se obtiene el factor que relaciona K_{2C} y K_{DBI} . Además de este factor que será utilizado en el apartado de la deconvolución, según datos existentes en el CMT para este mismo montaje, existe otra relación para los coeficientes KL_{2C} y KL_{DBI} , que es la que sigue (Jose V. Pastor, 2015):

$$KL_{DBI} = 3.034 KL_{2C}$$

Con esta última relación es posible comparar el coeficiente KL obtenido a partir de DBI con el obtenido con 2C.

Tras multiplicar este factor KL de 2C para poder compararlo con DBI, se obtuvo la Figura 4.8:

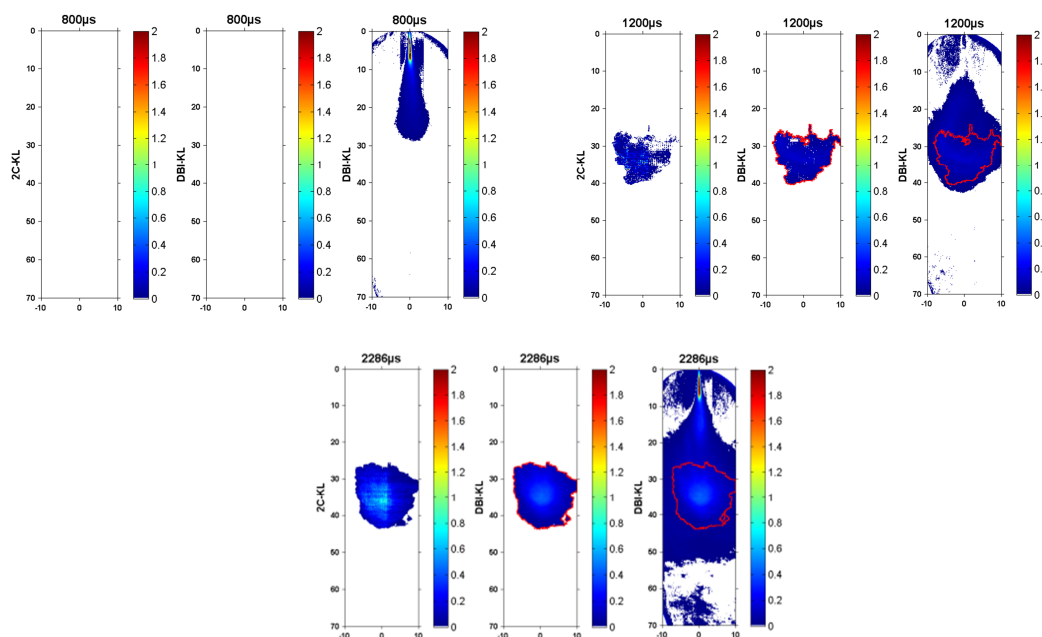


Figura 4.8: Comparativa en tres instantes diferentes del coeficiente de absorción adimensional KL del montaje 2C (izquierda), DBI (derecha), y DBI recortado con el perfil de 2C (centro). El contorno rojo muestra el perfil de 2C y el recorte en la imagen DBI. (F750D500S1000).

Se ha estimado oportuno utilizar el valor de KL proveniente de DBI pero solamente para aquellos pixeles coincidentes con los de la llama en la imagen de 2C por el siguiente motivo: El método de 2C proporciona un valor de KL , pero ligeramente falseado por el fenómeno de la auto-absorción en el hollín (la intensidad lumínica emitida por las capas traseras de hollín se ven apantalladas por las capas frontales), mientras que DBI se basa en la atenuación de la fuente de luz LED cuando atraviesa el spray para dar el valor de KL . La desventaja de DBI radica en que no sólo el hollín absorbe intensidad lumínica, sino también los productos quemados, y además aunque se utilice luz difusa existe *beam steering*, y por tanto el contorno del hollín no se distingue con claridad, mientras que en 2C sí, al emitir radiación únicamente el hollín.

Por tanto, lo más adecuado consiste en utilizar el perfil de 2C como un buen indicador de la localización del hollín, pero con el KL de DBI para evitar la auto-absorción. Este resultado es el conseguido por la imagen central en la Figura 4.8.

De todas formas, se ha calculado la masa de hollín con el valor de KL tanto de 2C como de DBI para validar los resultados, con la siguiente fórmula:

$$\begin{aligned}
m_{\text{hollín}} &= \int_V f_v \cdot \rho_{\text{hollín}} \cdot dV = \\
&= \int_V \frac{\rho_{\text{hollín}} \left(\frac{Kg}{m^3}\right) \cdot K(m^{-1}) \cdot \lambda(m)}{k_e(-)} \cdot dV = \int_S \frac{\rho_{\text{hollín}} \left(\frac{Kg}{m^3}\right) \cdot KL(-) \cdot \lambda(m)}{k_e(-)} \cdot dS \\
&\quad ; \rho_{\text{hollín}} = 1.8 \frac{g}{cm^3} \quad k_e = 7.6121 \quad \lambda = 450 \text{ nm}
\end{aligned}
\tag{12}$$

Esta integral de superficie se ha aproximado mediante el sumatorio de todos los elementos en las imágenes 2C y DBI, es decir, del valor de la masa de cada uno de los píxeles en todas las imágenes de los dos métodos. Este resultado se ha representado como muestra la Figura 4.9:

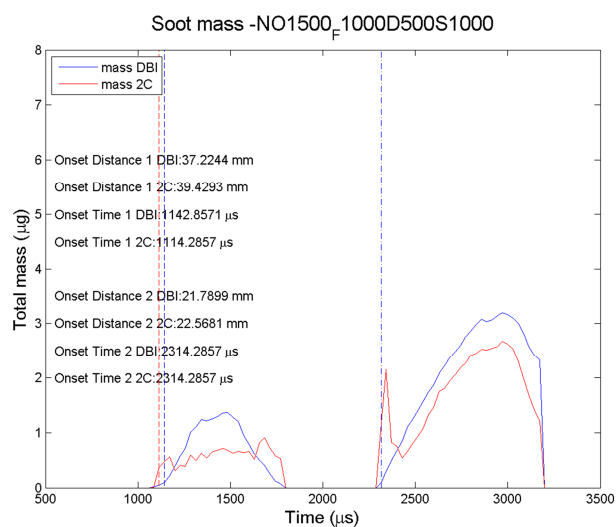


Figura 4.9: Comparativa de masa total entre los dos métodos (DBI en azul, 2C en rojo) (F1000D500S1000, 1000 µs de energizado, 500 µs de pausa, 1000 µs de energizado).

En general se obtiene que la masa con DBI es ligeramente superior a la de 2C, precisamente por el efecto de la auto-absorción del hollín.

En la comparativa se han incluido líneas a puntos azules y rojas, representando el momento en el que aparece la masa de hollín en la primera y segunda inyección de cada método, y texto con esta misma información además de la distancia del inyector a la que ocurre esta primera aparición.

Otro parámetro derivado de las imágenes de hollín, en concreto la distancia a la que ocurre la primera aparición, se calculó sumando la masa de cada píxel en la misma línea horizontal. Se obtiene así la relación masa de hollín por píxel, que se transformó a masa de hollín por mm y se representó en gráficas similares a las recogidas en la figura 4.10:

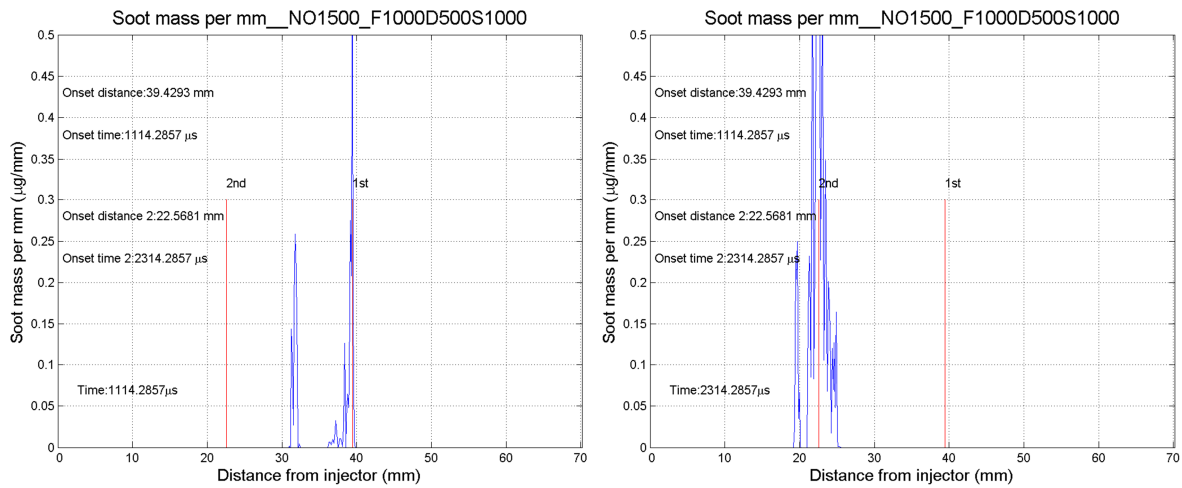


Figura 4.10: Distribución de la masa de hollín según la distancia al inyector en dos instantes distintos: primera aparición de masa de hollín en la primera inyección (izquierda) y en la segunda (derecha) con el montaje de 2C (F1000D500S1000).

Por último, se calculó la distribución espacial de la masa de hollín acumulando todo el hollín que hay en una sección perpendicular al eje del chorro. El resultado se aprecia en la Figura 4.11:

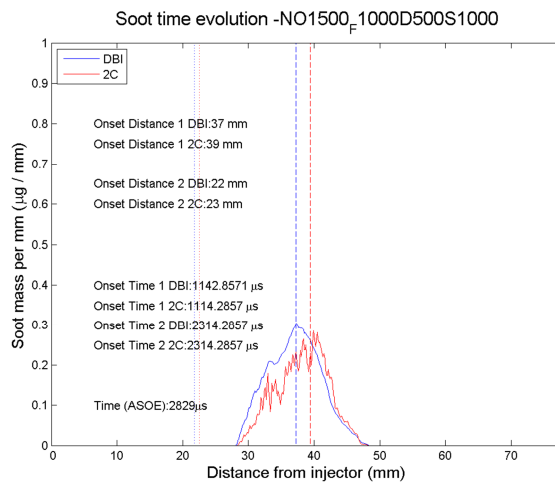


Figura 4.11: Comparativa de la distribución de masa de hollín según la distancia al inyector. DBI en azul, 2C en rojo (F1000D500S1000).

Se observa que también en general, la masa calculada a partir de DBI es ligeramente mayor que en 2C por el fenómeno de la auto-absorción.

4.4. RADIACIÓN DEL HOLLÍN (2C)

Otro análisis realizado trata la radiación del hollín en cada una de las condiciones. Los datos de partida son los recogidos en el montaje de 2C (recordemos que DBI mide la opacidad del spray, mientras que 2C mide la radiación emitida por el hollín).

Un ejemplo de imágenes 2C es el que aparece en la Figura 4.12:

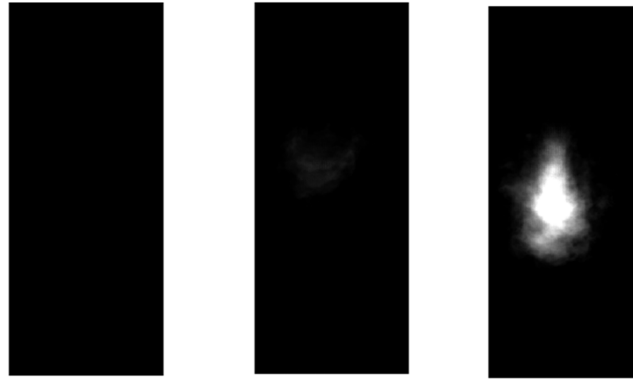


Figura 4.12: Tres imágenes 2C: Izquierda, antes de la formación de hollín de la primera inyección (750 μ s). Centro, hollín de la primera inyección (1320 μ s). Derecha, hollín de la segunda inyección (2880 μ s). (F750D500S1000).

Para el cálculo de la luminosidad del hollín se han procesado todas las imágenes tomadas por la cámara para cada condición de inyección, sumando el valor de cada píxel (imágenes en blanco y negro con píxeles de 16 bits de resolución, es decir, 65536 colores distintos). El resultado de esta suma se ha ordenado en un vector en Matlab, cuya representación es la que muestra la Figura 4.13.

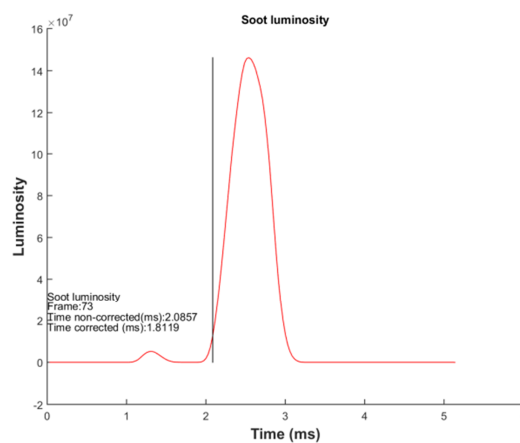


Figura 4.13: Representación temporal de la luminosidad del hollín. (F750D500S1000).

En la Figura 4.13 también se muestra el instante calculado en el que la luminosidad del hollín es el 15% de la luminosidad máxima. Valores como la luminosidad pico, el tiempo para el cual la luminosidad es máxima y el tiempo en el que el hollín comienza a iluminar se han guardado para su posterior análisis.

4.5. DECONVOLUCIÓN KL Y FRACCIÓN VOLUMÉTRICA

La última parte del análisis de este Trabajo consiste en la deconvolución del campo bidimensional del coeficiente KL para obtener el campo local (tridimensional) del coeficiente dimensional de absorción K (m^{-1}) y de la temperatura. La Figura 4.14 muestra este concepto:

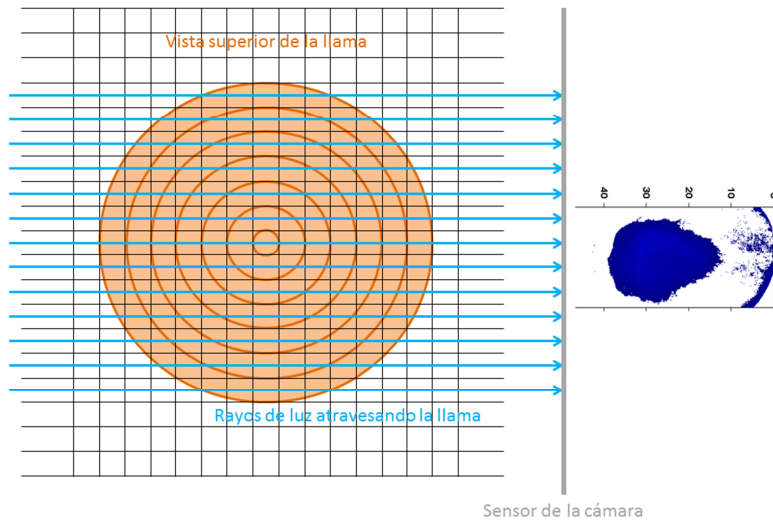


Figura 4.14: Esquema del concepto de la deconvolución.

La Figura 4.14 muestra en color naranja una sección de la llama desde la vista superior. Se supone una llama cuyas secciones transversales son de forma circular a todas las alturas (distancias del inyector). Se divide la sección circular exterior en anillos de un píxel de espesor, aprovechando la "rejilla" creada de forma natural por la cámara.

En la Figura 4.15 se muestra la aproximación para calcular el valor de absorción local K :

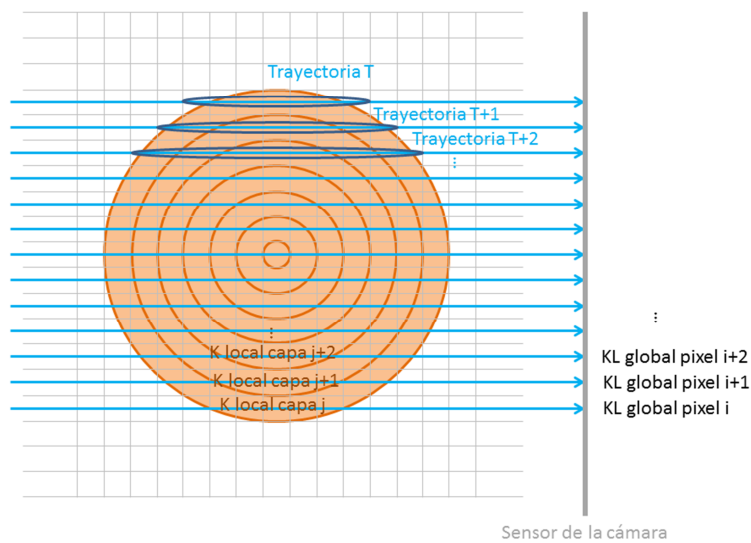


Figura 4.15: Aproximación para la deconvolución del valor de absorción local K .

En la Figura 4.15 se muestra la idea general para la deconvolución y la obtención del valor K local de cada anillo, que se considera constante. Así, el valor KL global recogido en la cámara es la suma del producto de la K local y la longitud de la trayectoria de cada rayo por cada capa T . En notación matricial se tiene la siguiente expresión:

$$\begin{bmatrix} T_{1,1} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ T_{2,1} & T_{2,2} & 0 & \dots & 0 \\ T_{3,1} & T_{3,2} & T_{3,3} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & T_{n,m} & \vdots \\ T_{n,1} & T_{n,2} & T_{n,3} & \dots & T_{n,n} \end{bmatrix} x \begin{Bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ \vdots \\ K_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} KL_1 \\ KL_2 \\ KL_3 \\ \vdots \\ KL_n \end{Bmatrix} \quad (13)$$

La matriz de la izquierda, denominada matriz T , tiene la información de la longitud de cada rayo de luz en cada anillo. Así, $T_{1,1}$ denomina la longitud del rayo 1 en el anillo 1 (los más externos); $T_{2,1}$ denomina la longitud del rayo 2 en el anillo 1; $T_{2,2}$ hace referencia a la longitud del rayo 2 en el anillo 2, etc. En general, $T_{n,m}$ se referirá a la longitud del rayo “ n ” en el anillo “ m ”.

El primer vector, denominado “ K ” es el vector incógnita que contiene el valor de absorción local K de cada uno de los anillos.

El segundo vector, “ KL ” es el vector que contiene los valores KL globales, que son conocidos a partir de las imágenes de DBI (cada fila horizontal de píxeles de la Figura 4.15 es un vector KL global).

Para obtener el valor de cada uno de los elementos de la matriz “ T ”, se utiliza la fórmula que describe la geometría de un canal parcialmente lleno. En efecto, si se imagina un canal de radio R (radio del círculo externo) parcialmente lleno hasta la mitad del anillo (justo en la línea de la trayectoria del rayo de luz), la longitud de esta trayectoria es la misma que la superficie libre que resulta en el canal parcialmente lleno imaginado, tal y como se observa en la Figura 4.16:

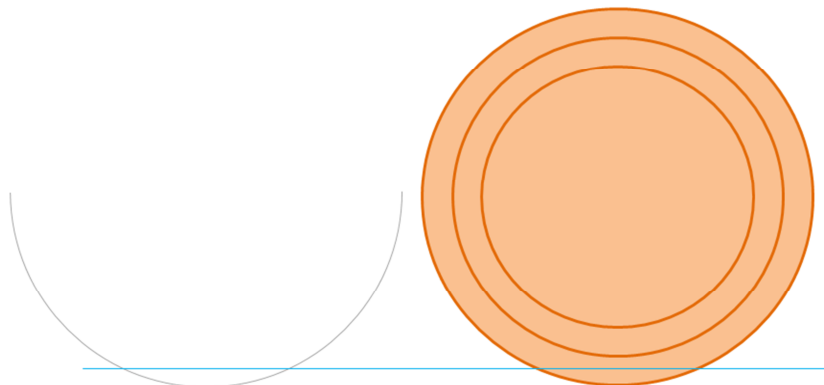


Figura 4.16: Analogía de un canal parcialmente lleno con la longitud de la trayectoria en la deconvolución.

La fórmula que proporciona la longitud de la capa libre de agua en el canal es la siguiente:

$$L = 2\sqrt{y(2R - y)} \quad (14)$$

Donde “y” es la máxima profundidad del canal y “R” es el radio del canal. Esto se traduce para el primer anillo en:

$$T_{1,1} = 2\sqrt{0.5 \text{ pix} (2R - 0.5 \text{ pix})} \quad (15)$$

En este caso “y” se ha sustituido por 0.5 píxeles (la trayectoria del rayo de luz está centrada entre las dos circunferencias), y “R” se ha dejado indicado, pero también es conocido (es el radio del círculo externo, mostrado en la Figura 4.16).

Para obtener $T_{2,1}$ y $T_{2,2}$ se hace uso de un esquema muy similar para dar con la expresión matemática, que se muestra en la Figura 4.17:

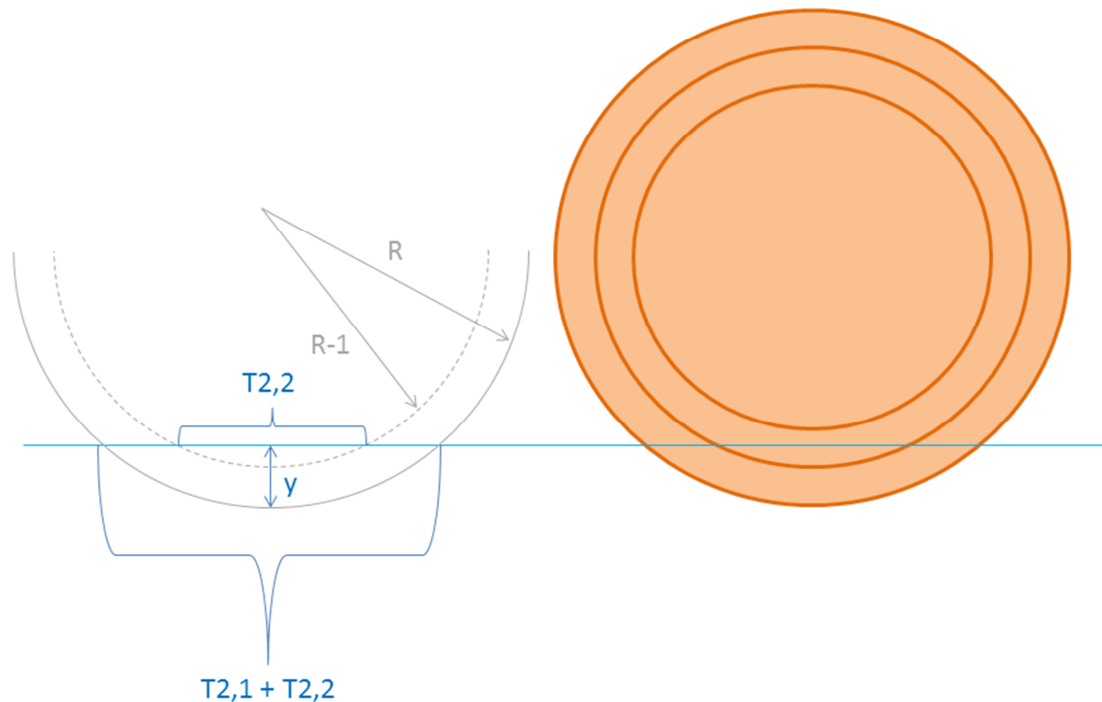


Figura 4.17: Esquema para hallar las longitudes $T_{2,1}$ y $T_{2,2}$.

Utilizando la ecuación (14) se obtiene:

$$T_{2,2} = 2\sqrt{0.5 \text{ pix} (2(R - 1) - 0.5 \text{ pix})}; \quad T_{2,1} = 2\sqrt{1.5 \text{ pix} (2R - 1.5 \text{ pix})} - T_{2,1} \quad (16)$$

Siguiendo el mismo esquema para el tercer rayo de luz se tiene:

$$\begin{aligned}
T_{3,3} &= 2\sqrt{0.5 \text{ pix } (2(R - 2) - 0.5 \text{ pix})} ; \\
T_{3,2} &= 2\sqrt{1.5 \text{ pix } (2(R - 1) - 1.5 \text{ pix})} - T_{3,3} ; \\
T_{3,1} &= 2\sqrt{2.5 \text{ pix } (2R - 2.5 \text{ pix})} - T_{3,3} - T_{3,2}
\end{aligned} \tag{17}$$

Generalizando para el elemento “ $T_{n,m}$ ” se tiene:

$$T_{n,m} = 2\sqrt{(n - m + 0.5) \cdot (2(R - m + 1) - (n - m + 0.5))} - T_{n,m+1} - T_{n,m+2} - \dots - T_{n,n} \tag{18}$$

Con esto se tienen definidos todos los elementos de la matriz “ T ”, y puede despejarse el vector incógnita “ K ” para todas las capas a diferentes distancias del inyector. Así se obtiene la representación de la Figura 4.18:

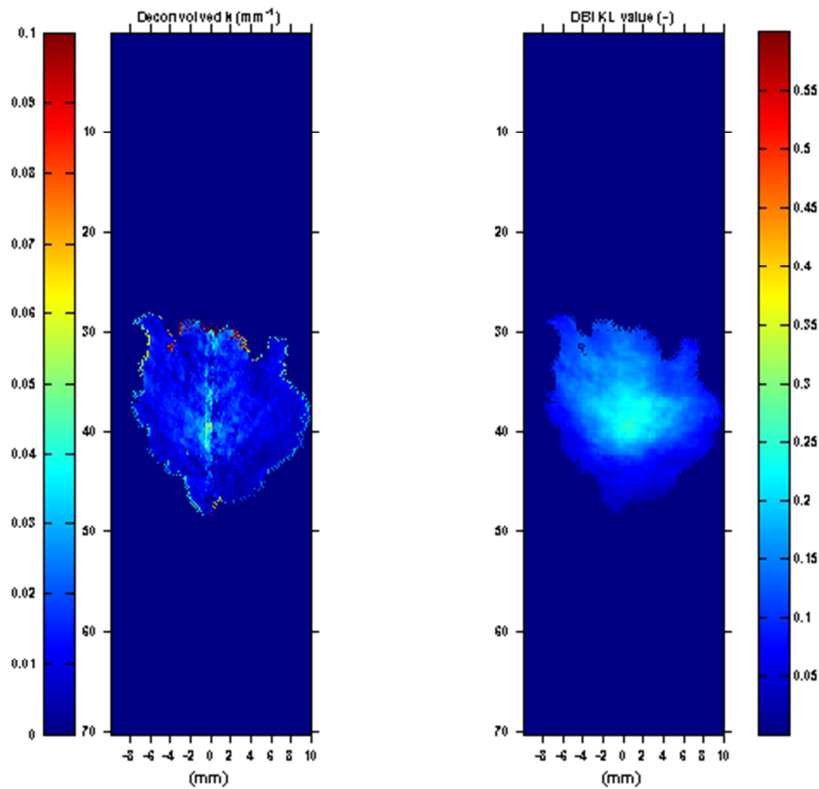


Figura 4.18: Resultado del valor deconvolucionado (“ K ”, izquierda) y sin deconvolucionar (“ KL ”, derecha) (2829 μs) (F1000D500S1000).

Este desarrollo del método de deconvolución realizado por el autor se basa en el método conocido como *Onion Peeling* en inglés (Emil O. Akesson, 2008) (debido a la división de la llama en capas delgadas, y el cálculo desde las capas más externas hacia las más internas).

La representación del valor deconvolucionado en la izquierda de la Figura 4.18 sería la vista de un corte transversal por la mitad de la llama. En efecto, es la vista del interior de la llama con el valor “K” en las capas más externas y más internas, mientras que en la representación de la derecha de la misma Figura 4.18, se tiene el valor “KL” proveniente del DBI ya mostrado anteriormente, donde la parte exterior del contorno únicamente cuenta con la aportación de las capas externas, mientras que el interior del contorno es la aportación de las capas internas más las externas.

Sin embargo, se aprecian artefactos en el eje de la llama y en el borde de la misma. Los artefactos en el eje de la llama son debidos a la asimetría de la llama respecto al eje vertical (la deconvolución exige que se cumpla la hipótesis de simetría de revolución) y en el borde de la llama debido al recorte con el contorno de 2C.

Es por ello por lo que se ha optado también por promediar ambos lados de la llama para hacerla simétrica, y el resultado obtenido es el que se muestra en la Figura 4.19:

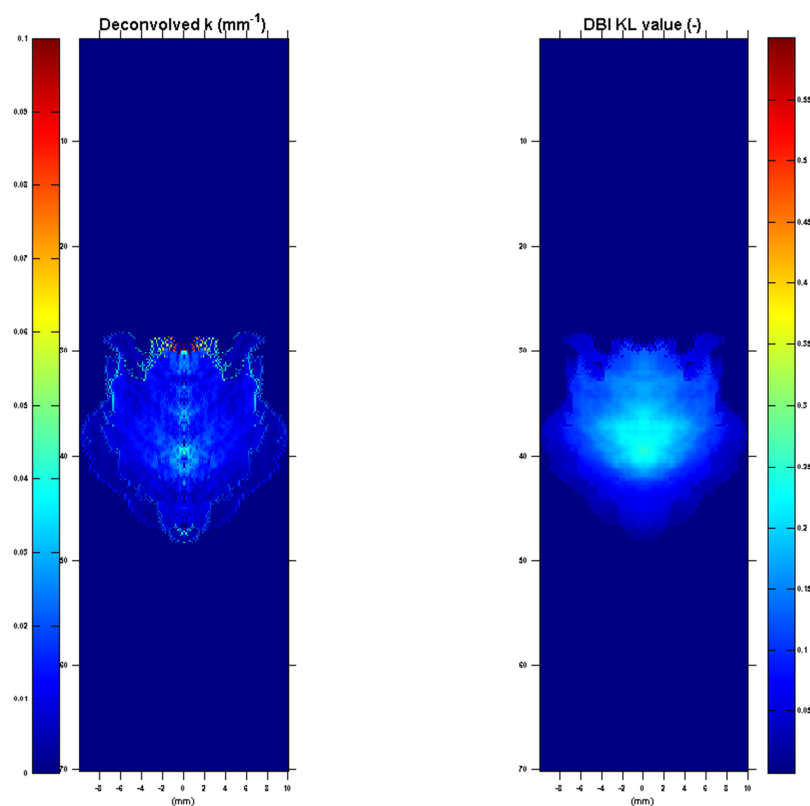


Figura 4.19: Deconvolución con ambos lados de la llama promediados y simétrica (2829 μ s) (F1000D500S1000).

Donde los valores elevados en la frontera de la llama desaparecen y los valores en el eje de simetría mejoran, pero aparecen dos zonas diferenciadas, una donde únicamente se encuentra un lado promediado (con su intensidad dividida entre 2), y otra donde se encuentran los dos lados promediados y con un valor en la deconvolución más adecuado.

Además de realizar la deconvolución con el método explicado anteriormente, se han probado otros dos métodos conocidos como “deconvolución Abel de 3 puntos” y “deconvolución Radon”. El

método de Abel de 3 puntos ya estaba disponible en el CMT, y el método Radon está implementado en una función de Matlab, por lo que su aplicación ha sido mucho más inmediata. Los resultados de la deconvolución con estos métodos han sido los mostrados en la Figura 4.20:

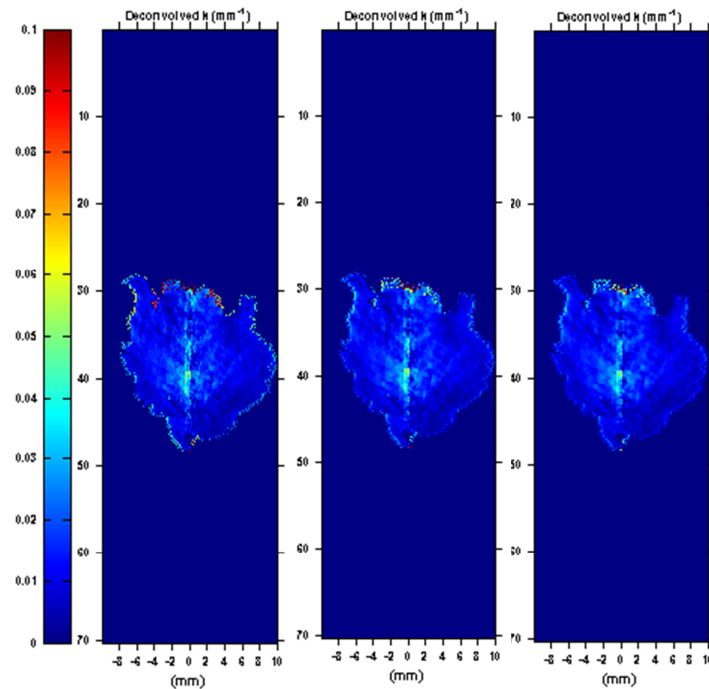


Figura 4.20: Comparación de los distintos métodos de deconvolución. 1ª imagen, método del autor; 2ª imagen, Abel de 3 puntos; 3ª imagen, Radon.

En la Figura 4.20 se observa que las diferencias entre los métodos no son exageradas, pero sí se aprecia una disminución de ruido entre la imagen de la izquierda y la derecha. Para una mejor comparativa entre los métodos se ha realizado la imagen que se muestra en la Figura 4.21:

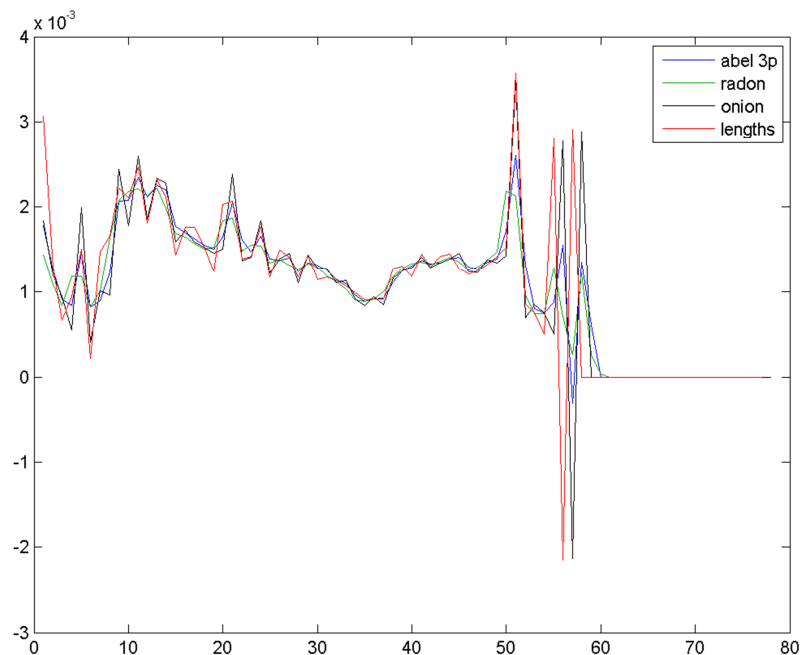


Figura 4.21: Comparativa entre los distintos métodos de deconvolución (perfil radial): Abel 3 puntos, Radon, *Onion Peeling* y el método del autor mostrado en la leyenda como *Lengths*.

En la Figura 4.21 se observa que los métodos del autor y *Onion Peeling* son aquellos que más ruido presentan,seguido por Abel 3 puntos y por Radon, siendo este último el que menos ruido presenta.

El método de deconvolución que proporciona los resultados más suaves sin perder detalle ha demostrado ser Radon, aunque también es el método con más coste computacional, con alrededor de 12 segundos por imagen. El segundo más suave es Abel de 3 puntos, con un coste computacional significativamente menor, alrededor de 4 segundos por imagen, y el menos suave de todos ha sido el método desarrollado por el autor, pero es el que cuenta con el menor coste computacional, alrededor de 1 segundo por imagen.

El hecho de realizar estos montajes y ensayos en el motor maqueta de 2 tiempos provoca que la llama no sea simétrica y la deconvolución sea complicada. Si en lugar de ello se utiliza una cámara de presión constante la llama es mucho más simétrica y se obtienen valores de “K” mucho más uniformes y acercados a la realidad.

Con el valor de “K” local es posible obtener la fracción volumétrica de hollín local, con la ecuación (9), obteniendo las imágenes mostradas en la Figura 4.22:

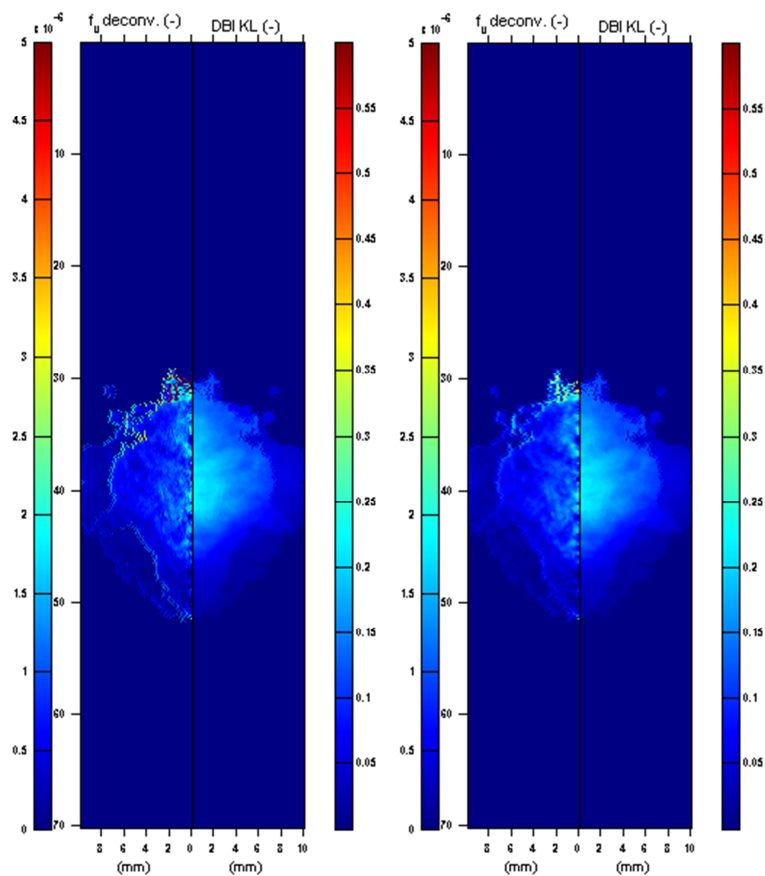


Figura 4.22: Imágenes mostrando el cálculo de la fracción volumétrica de hollín local utilizando el valor “K” de dos métodos distintos: “K” obtenida por el método del autor (izquierda) y “K” obtenida por Radon (derecha). Las dos mitades de la llama han sido promediadas y la llama es simétrica. (F1000D500S1000).

4.6. DECONVOLUCIÓN DEL CAMPO DE TEMPERATURAS

Por último, se ha realizado el procesado de datos para obtener la temperatura local de la llama. Para ello ha sido obligatorio el uso de las imágenes 2C, debido a que son las únicas que captan la radiación emitida por el hollín, siendo esta función de la temperatura local de la llama. Para ello, ha sido necesario tener en cuenta el fenómeno de la auto-absorción en la radiación emitida por el hollín e incorporarlo a la formulación matricial. El procedimiento es similar al desarrollado para obtener el valor “K”, pero con una mayor complejidad. Se ha utilizado bibliografía disponible en el CMT para comprender esta transformación (Guillaume Legros, 2015), pero la formulación ha sido realizada por el autor de este Trabajo, siendo en definitiva:

$$\begin{bmatrix} C_{1,1} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ C_{2,1} & C_{2,2} & 0 & \dots & 0 \\ C_{3,1} & C_{3,2} & C_{3,3} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & C_{n,m} & \vdots \\ C_{n,1} & C_{n,2} & C_{n,3} & \dots & C_{n,n} \end{bmatrix} x \begin{Bmatrix} K_1 B_1 \\ K_2 B_2 \\ K_3 B_3 \\ \vdots \\ K_n B_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \vdots \\ d_n \end{Bmatrix} \quad (19)$$

Con “C_{n,m}” siendo:

$$C_{n,m} = \frac{T_{n,m}}{2} \left[e^{-\left(\sum_{i=1}^{m-1} \frac{T_{m,i}}{2} K_i\right)} + e^{-\left(\sum_{i=1}^n \frac{T_{n,i}}{2} K_i\right)} \cdot e^{-\left(\sum_{i=m-1}^n \frac{T_{n,i}}{2} K_i\right)} \right] \quad (20)$$

Y las incógnitas “B_n”:

$$B_n = \frac{1}{\lambda^5} \frac{cte_1}{\left[\exp\left(\frac{cte_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} \quad (21)$$

De donde es posible despejar la temperatura ya que las constantes son conocidas:

$$cte_1 = 1.1910439 \cdot 10^{-16} \frac{Wm^2}{sr} \quad ; \quad cte_2 = 1.4388 \cdot 10^{-2} m K \quad (22)$$

Con todo ello, se obtiene el campo de temperaturas local de la llama, que se ha representado en la Figura 4.23:

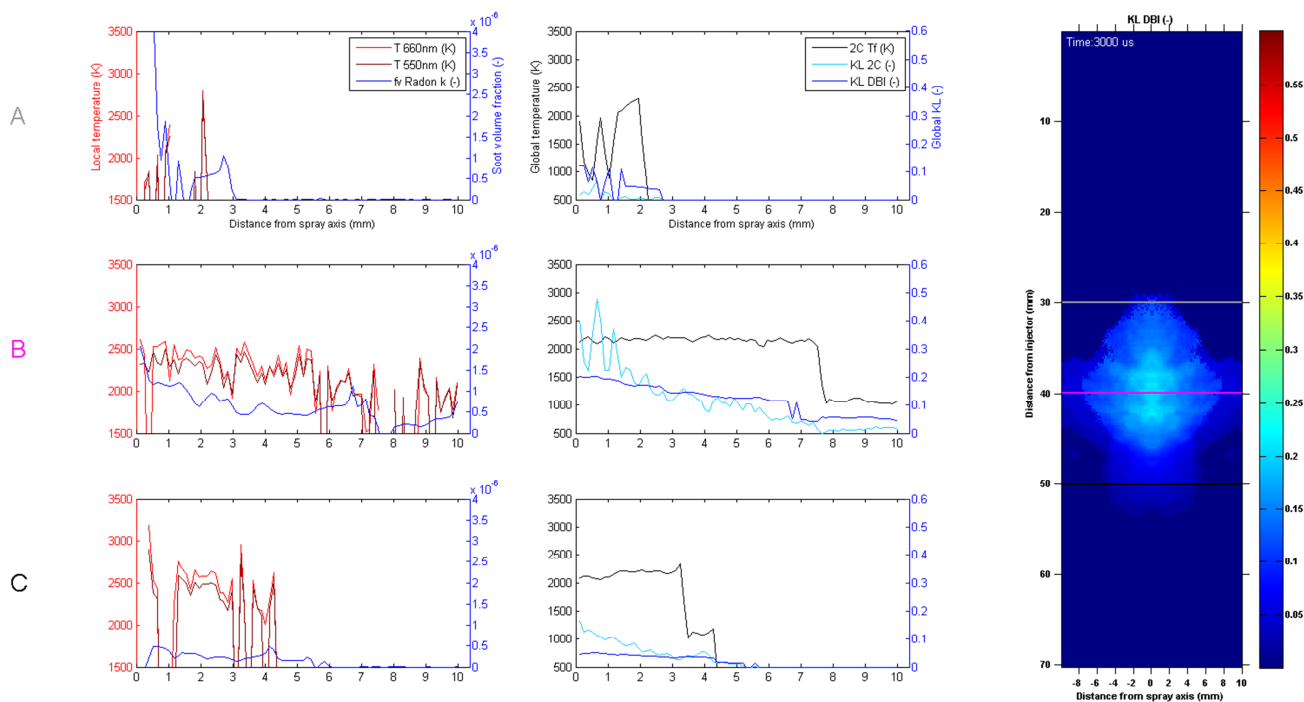


Figura 4.23: Gráficas e imagen mostrando información sobre la deconvolución. Gráficas de la izquierda: Rojo, temperatura local a 660nm; Marrón, temperatura local a 550nm; Azul, fracción volumétrica del hollín. Gráficas de la derecha: Negro, temperatura global 2C; Azul, KL de DBI; Cian, KL de 2C. La imagen de la derecha muestra el campo de KL global de DBI.

En la Figura 4.23 se observa que los campos de temperatura deconvolucionados no son suaves y la tendencia no es la correcta, ya que la parte más caliente de la llama debería estar cerca de la frontera y no en el interior. Esto ocurre por la asimetría de la llama original y la necesidad de promediar y hacer simétrica la llama. Se realizó un ensayo extra para comprobar la exactitud de este método, con una inyección sencilla en una cámara de volumen constante, donde el entorno de la llama es mucho más estable que en el motor maqueta de dos tiempos, y los resultados obtenidos fueron los mostrados en la Figura 4.24.

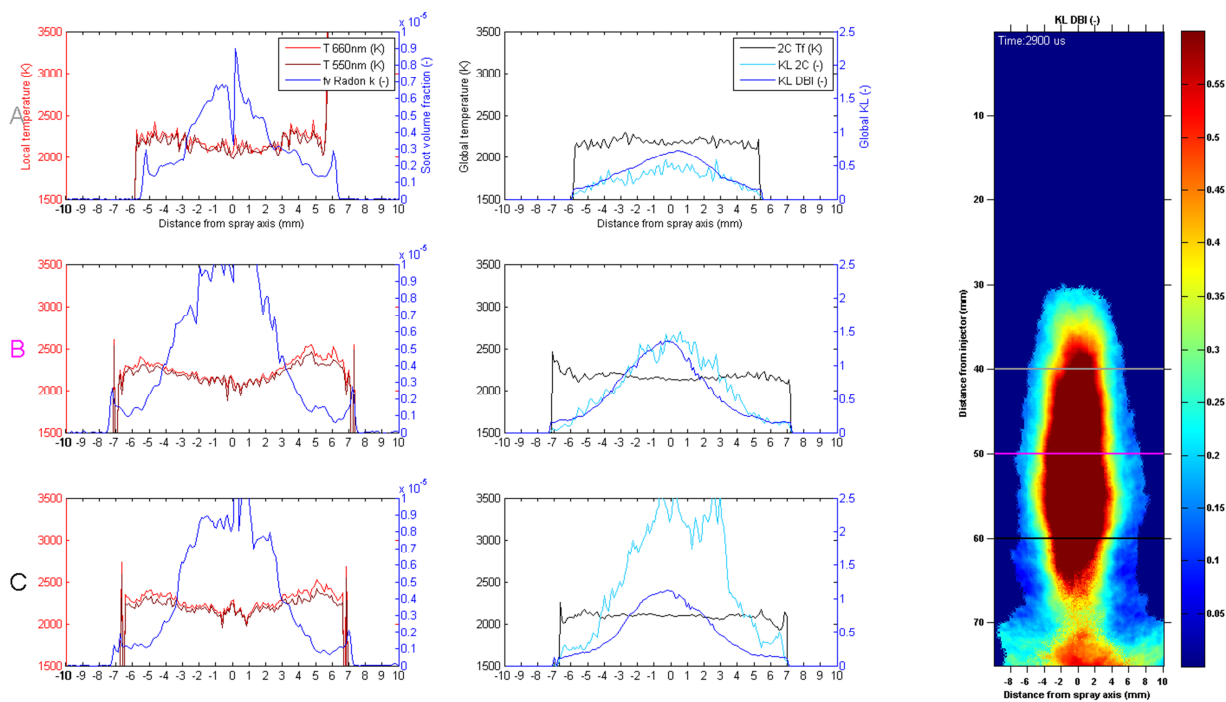


Figura 4.24: Resultados de temperatura y fracción volumétrica de hollín locales, campo de temperatura y KL globales e imagen de KL global de DBI.

En este caso sí hay una correspondencia entre los resultados experimentales y las directrices teóricas que la llama debe cumplir: El campo de temperatura local es mucho más suave que en el caso anterior y la temperatura máxima ocurre cerca de la frontera de la llama. La fracción volumétrica de hollín también tiene una mayor continuidad que en el caso anterior. Los campos globales de temperatura y KL no presentan ningún salto debido al promediado de la llama para hacerla simétrica, pues no ha sido necesario por la gran estabilidad del entorno experimental.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este apartado se analizarán las imágenes y lecturas obtenidas en el conjunto de ensayos que se recoge en el apartado siguiente (5.1) utilizando la metodología descrita en el apartado 4 de esta memoria.

Para llevar a cabo este análisis se mostrarán secuencias de imágenes que permitan observar las diferencias entre cada una de las estrategias de inyección que han sido ensayadas, así como gráficas comparativas de los parámetros identificados en el apartado 4 de esta memoria (incluyendo además la longitud líquida mediante imágenes Mie, ensayo realizado y analizado por separado en el CMT antes de la realización de este Trabajo).

5.1. MATRIZ DE ENSAYOS

Las inyecciones múltiples que han sido llevadas a cabo en el motor maqueta han seguido la estrategia que se muestra en la Tabla 1:

Nomenclatura	1ª iny. (us)	Pausa (us)	2ª iny. (us)	P. inyección (bar)	T. ambiente (K)	Densidad (Kg/m3)	O2 Vol. (%)
NO1500_F500D250S500	500	250	500	1500	870	22,8	21
NO1500_M	500	500	500				
NO1500_F500D750S500	500	750	500				
NO1500_F500D500S1000	500	500	1000				
NO1500_F750D500S1000	750	500	1000				
NO1500_F1000D500S1000	1000	500	1000				
NO1500_L	1500	0	0				

Tabla 1: Estrategia de inyección.

Se establecen por tanto dos barridos con las seis condiciones a ensayar: El primero de ellos mantiene constante la duración de la primera y segunda inyección, y varía el tiempo de pausa entre ellas. El segundo mantiene el tiempo de pausa y de la segunda inyección, y varía el tiempo de la primera inyección, tal y como se muestra en las Tablas 2 y 3.

Nomenclatura	1ª iny. (us)	Pausa (us)	2ª iny. (us)
NO1500_F500D250S500	500	250	500
NO1500_M	500	500	500
NO1500_F500D750S500	500	750	500

Tabla 2: Barrido en duración de la pausa entre inyecciones.

Nomenclatura	1ª iny. (us)	Pausa (us)	2ª iny. (us)
NO1500_F500D500S1000	500	500	1000
NO1500_F750D500S1000	750	500	1000
NO1500_F1000D500S1000	1000	500	1000

Tabla 3: Barrido en duración de la primera inyección.

Además, se ha estimado oportuno incluir una inyección simple con una duración de 1500 μ s para posibilitar la comparativa entre inyección múltiple y simple para los parámetros en los que sea viable.

5.2. RESULTADOS DE LONGITUD LÍQUIDA

5.2.1. LONGITUD LÍQUIDA Y TIEMPO DE RETRASO A LA IGNICIÓN

Los resultados de longitud líquida se muestran en la Figura 5.1:

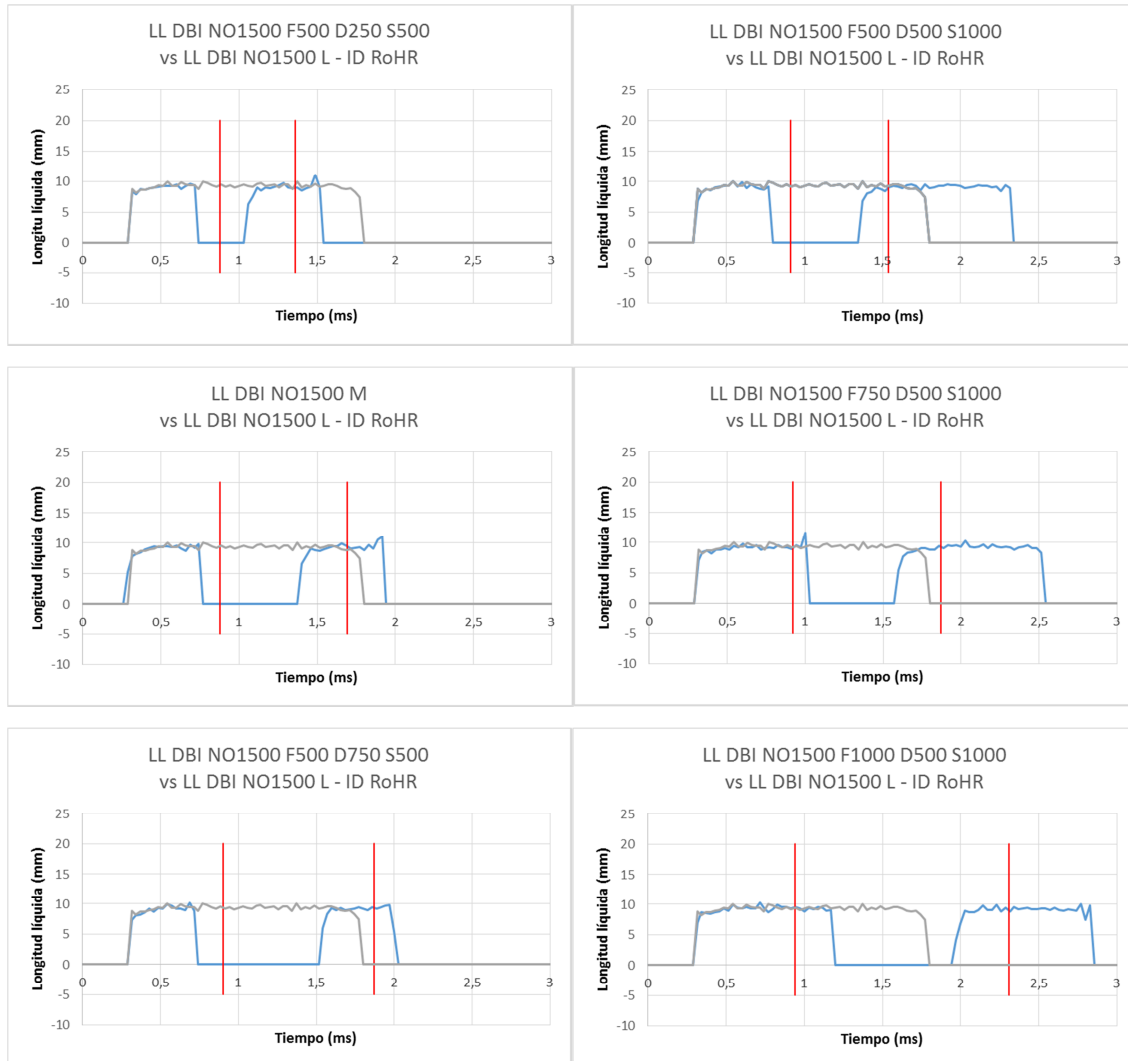


Figura 5.1: Resultados de longitud líquida (lado izquierdo, de arriba abajo: cambio en duración de la pausa entre inyecciones, ascendente. Lado derecho, de arriba abajo: cambio en duración de la primera inyección, ascendente).

Si se observa la primera columna de la Figura 5.1, el cambio es en la duración de la pausa entre inyecciones, manteniendo la duración de ambas inyecciones idéntica. Por tanto, no deberían aparecer cambios en la primera inyección. Esto se corrobora observando la duración de la primera inyección (curva azul), la longitud líquida y el retraso a la ignición representado por la primera línea roja vertical, pues son parámetros que son muy parecidos entre dichas gráficas.

Por el aumento de la duración de la pausa entre inyecciones, el comienzo de la segunda inyección se ve cada vez más desplazado hacia la derecha, así como su ignición. Sin embargo, se observa que para tiempos muy largos de espera (gráfica inferior), la ignición ocurre más tarde en

relación al comienzo de la inyección (la línea roja de la gráfica inferior está más descentrada respecto al “pulso” azul)

Además, la longitud líquida de la segunda inyección resulta muy semejante a la de la primera, por lo que no parece haber efecto de la combustión de la primera inyección sobre la longitud líquida de la segunda.

Observando la segunda columna en la Figura 5.1, el cambio es en la duración de la primera inyección, por lo que parece intuitivo que habrá un cambio significativo en el tiempo de retraso de la primera inyección. No obstante, el cambio, aunque existente, es pequeño, lo que indica una relación entre la duración de la primera inyección y el retraso a su ignición mucho más débil a lo imaginado en un principio. Por tanto, los fenómenos que producen la mezcla de aire y combustible son poco dependientes de la duración de la primera inyección.

También se observa que a mayor duración de la primera inyección, el tiempo entre la inyección y la ignición de la segunda aumenta (según se baja por las gráficas, la segunda línea roja vertical está más alejada del principio de la segunda inyección).

Por último, tal y como ocurría con la primera columna, la longitud líquida prácticamente no varía de una inyección a otra.

La curva gris representa la longitud líquida de la inyección simple, y su comparación arroja como conclusión que la longitud líquida se ve prácticamente inalterada se realicen inyecciones singulares o múltiples.

5.2.2. COMPARACIÓN DBI Y MIE

Como se ha enunciado en el apartado 4 de esta memoria, se llevaron a cabo ensayos mediante imágenes Mie y se procesaron antes del comienzo de este Trabajo. En este apartado se compararán ambas medidas para extraer una conclusión.

Los resultados de longitud líquida se promedian para cada inyección (es decir, valor medio de la primera inyección y, separadamente, valor medio de la segunda, para todas las estrategias ensayadas). Comparando estos valores con los análogos de Mie se tiene la Tabla 5.1:

<i>Nomenclatura</i>	<i>LL 1 DBI (mm)</i>	<i>LL 2 DBI (mm)</i>	<i>LL 1 Mie (mm)</i>	<i>LL 2 Mie (mm)</i>
NO1500_L	9,25995658	0	6,308500975	0
NO1500_F500D250S500	9,056059951	9,211701974	6,813775953	6,729744113
NO1500_M	9,184800884	9,272769852	6,694892358	6,632106926
NO1500_F500D750S500	9,09147057	9,213623481	6,675864741	6,702997768
NO1500_F500D500S1000	9,112444156	9,13496181	-	-
NO1500_F750D500S1000	9,088516701	9,18139176	-	-
NO1500_F1000D500S1000	9,265504155	9,168070526	-	-

Tabla 5.1: Valores promedio de la longitud líquida para imágenes DBI y Mie.

No se disponen de datos para las tres últimas condiciones. Una representación gráfica de la Tabla 5.1 es la que se muestra en la Figura 5.2:

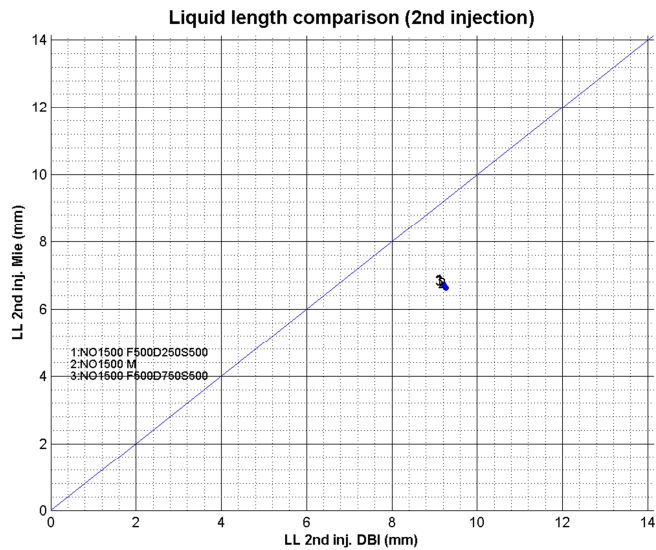


Figura 5.2: Comparativa visual de la longitud líquida DBI y Mie.

Como se observa en la Figura 5.2, hay una gran discrepancia entre un método y otro, posiblemente explicado por el hecho de que la longitud de llama sea más corta que la aparición de la llama. Tanto las medidas con DBI como con Mie son muy similares entre sí, por lo que es posible afirmar que la variación de la pausa entre inyecciones no modifica la longitud líquida.

5.3. RESULTADOS DE TASA DE LIBERACIÓN DE CALOR Y PRESIÓN EN EL CILINDRO.

La comparativa de las curvas de tasa de liberación de calor se recoge en la Figura 5.3:

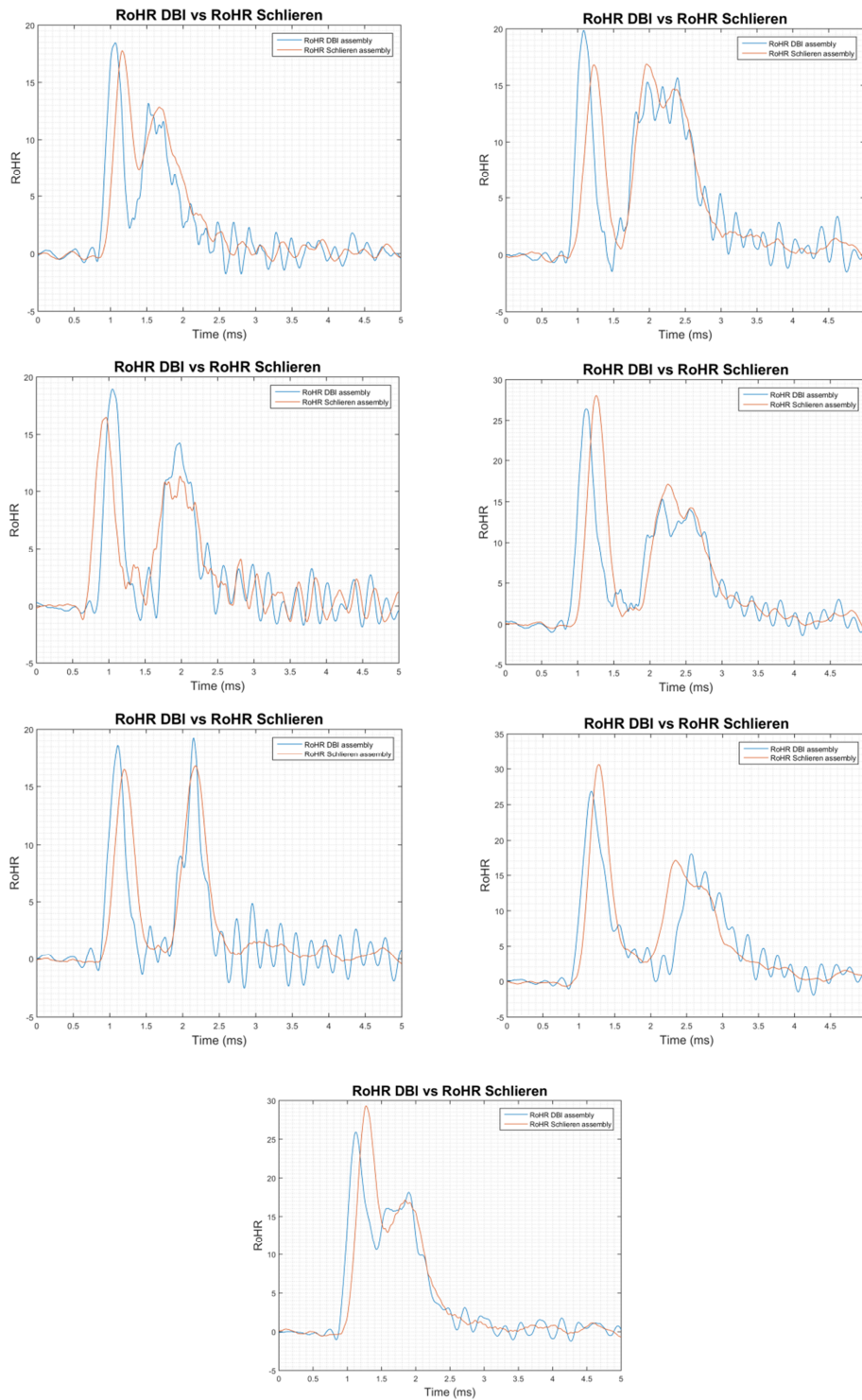


Figura 5.3: Tasa de liberación de calor de los dos montajes. Columna izquierda, de arriba abajo: aumento en el tiempo de pausa entre inyecciones. Columna derecha, de arriba abajo: aumento de la duración de la primera inyección. Centro abajo: inyección singular (Azul: DBI-2C, naranja: Sch.-Mie).

Para visualizar más claramente los resultados de la tasa de liberación de calor, se muestran en las Figuras 5.4 y 5.5 imágenes Schlieren correspondientes a la estrategia F1000D500S1000 mostrando instantes representativos de la tasa de liberación de calor. En ellas se observa un aumento de tamaño de la zona sombreada debido a la combustión, y al aumento de presión y la expansión localizada que esta provoca.

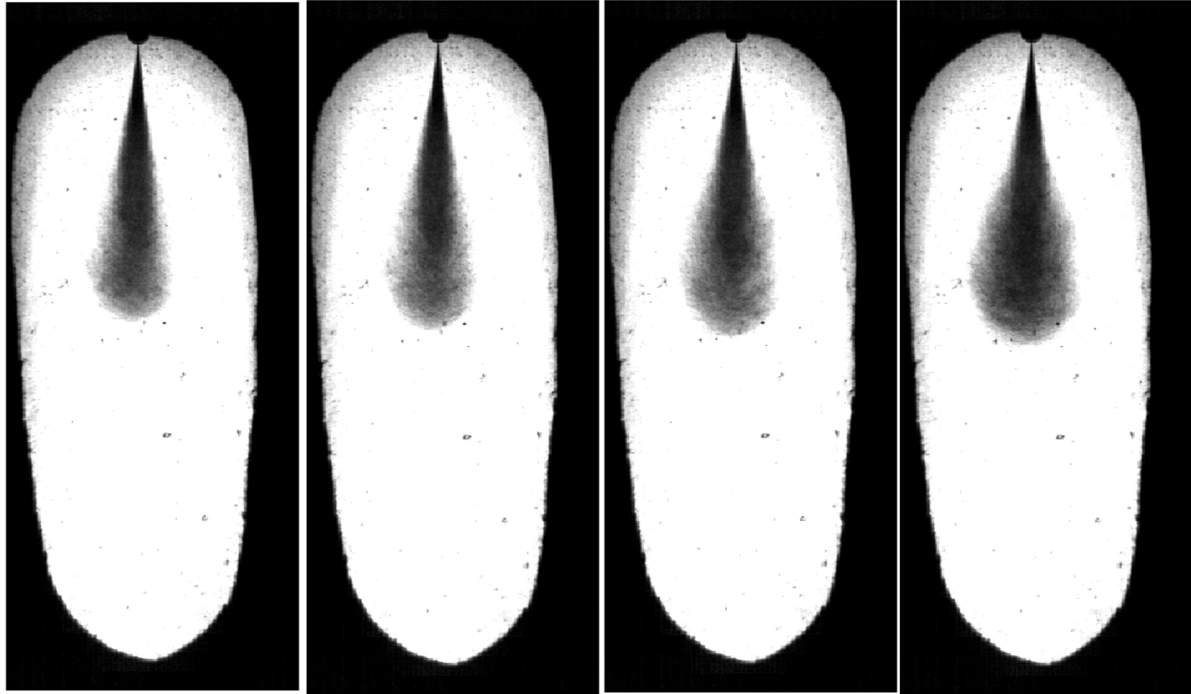


Figura 5.4: Imágenes Schlieren (F1000D500S1000) del momento en el que da comienzo la tasa de liberación de calor de la primera inyección (de izquierda a derecha, 0.966, 1.000, 1.033, 1.066 ms).

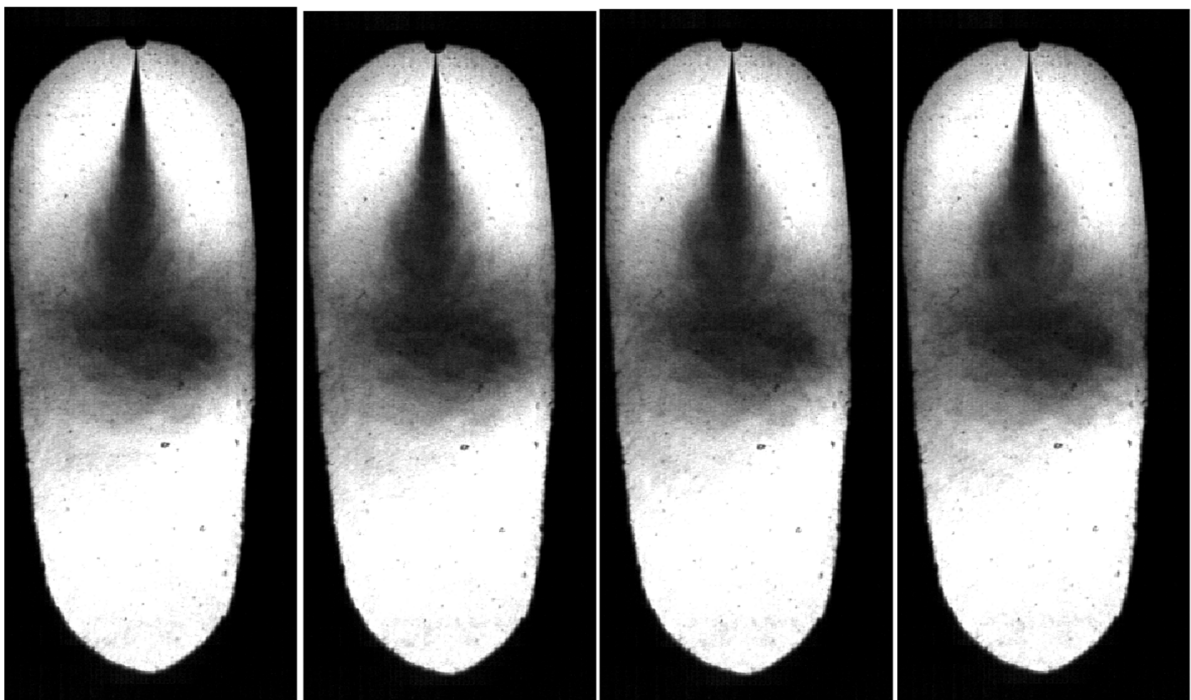


Figura 5.5: Imágenes Schlieren, análogas a la figura 5.4 pero mostrando el momento correspondiente a la segunda inyección (2.100, 2.133, 2.166, 2.200 ms).

Según muestra la Figura 5.3, se observa que las curvas de tasa de liberación de calor obtenidas en el montaje DBI-2C tienen, en general, un mayor nivel de ruido (excepto en la gráfica de la primera columna, centro) que puede afectar al funcionamiento del algoritmo en la detección de los retrasos a la ignición. Estos valores se recogen en la Tabla 5.2:

<i>Nomenclatura</i>	<i>ID 1 comb. (ms)</i>	<i>ID 2 comb. (ms)</i>	<i>ID 1 hollín (ms)</i>	<i>ID 2 hollín (ms)</i>
NO1500 L	0,783682125	0	0,651182125	0
NO1500_F500D250S500	0,671712346	0,39625	0,585462346	0,31
NO1500 M	0,428190815	0,159166667	0,571940815	0,306666667
NO1500_F500D750S500	0,663756604	0,365416667	0,616256604	0,349166667
NO1500_F500D500S1000	0,704274601	0,35875	0,629274601	0,28375
NO1500_F750D500S1000	0,762458828	0,354166667	0,632458828	0,265416667
NO1500_F1000D500S1000	0,752589578	0,385	0,657589578	0,57

Tabla 5.2: Retraso a la ignición para cada estrategia de inyección en los dos montajes (“comb.” reúne los ensayos del montaje Schlieren-Mie, y “hollín”, los de DBI-2C).

Donde se observa que, efectivamente, hay valores dispares entre ensayos debido al mayor nivel de ruido en uno que en otro. Sin embargo, en ambos montajes el retraso a la ignición de la segunda inyección es menor que el de la primera, aproximadamente un 50% menor.

Esta alta variabilidad también queda demostrada si se comparan las curvas de presión en cada uno de los montajes, tal y como muestra la Figura 5.6.

Además, también se observa el cambio en la apariencia de la tasa de liberación de calor en la Figura 5.3. En la primera columna se observa que según se van separando las dos inyecciones más y más, pasa de tenerse un perfil parecido a una inyección simple (combustión premezclada y por difusión) a uno en el que las dos combustiones se realizan de forma independiente (los dos picos de la tasa de liberación de calor en la primera gráfica aparecen juntos, siendo el segundo menor que el primero; y en la última gráfica los dos picos están separados y alcanzan valores similares), hecho que puede significar que con muy poco tiempo de pausa, la primera inyección combustiona de forma premezclada, y la segunda por difusión; mientras que con tiempos de pausa largos, se tienen dos combustiones premezcladas.

En lo relativo a la segunda columna de la misma Figura 5.3, según se aumenta la duración de la primera inyección, el valor del primer pico aumenta (16 J/CA en la primera gráfica, 28 J/CA en la segunda y 30 J/CA en la tercera), pues hay más combustible para la fase premezclada de la combustión. Además, la tasa de liberación de calor de la segunda inyección, en el caso de una primera inyección corta, tiene una forma similar a una combustión premezclada más una por difusión (se distinguen con claridad los dos picos presentes en la tasa de liberación de calor de la segunda inyección); mientras que con una primera inyección larga, estos dos picos son más disimulados y parece que la fase premezclada de la segunda inyección pierde protagonismo. Es decir, según se aumenta la duración de la primera inyección, hay más combustible que se quema de forma premezclada, pero la segunda inyección se asemeja más y más a la fase de combustión por difusión.

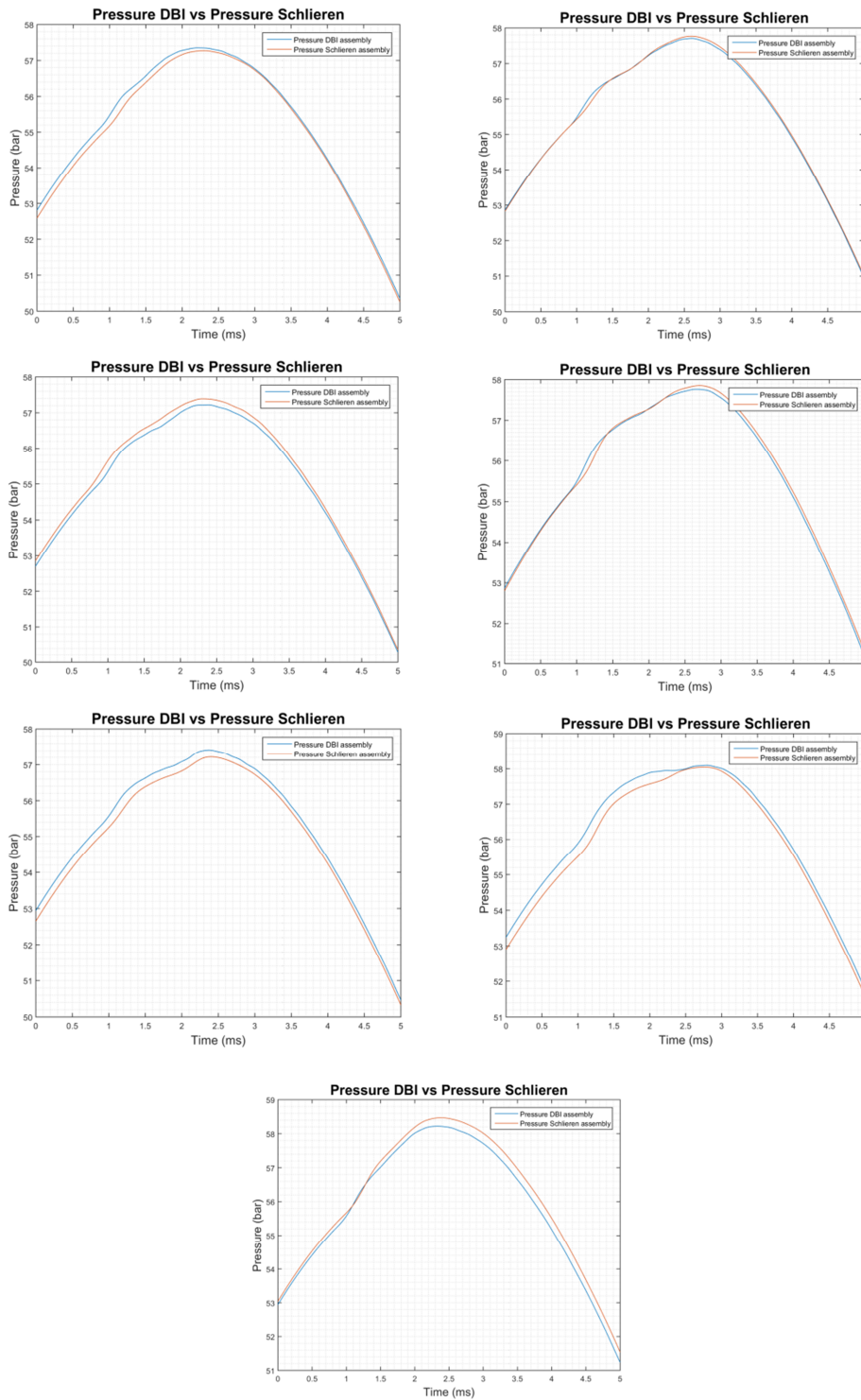


Figura 5.6: Curvas de presión de los dos montajes. Columna izquierda, de arriba abajo: aumento en el tiempo de pausa entre inyecciones. Columna derecha, de arriba abajo: aumento de la duración de la primera inyección. Centro abajo: inyección singular (Azul: DBI-2C, naranja: Sch.-Mie).

Como muestra la Figura 5.6, la variabilidad de las lecturas del sensor de presión es elevada (aun siendo la media de 30 repeticiones cada una de ellas), por lo que el distinto nivel de ruido de las curvas de tasa de liberación de calor queda justificado por estas desviaciones.

5.4. RESULTADOS DE MASA DE HOLLÍN

Los resultados de masa de hollín se muestran en la Figura 5.7:

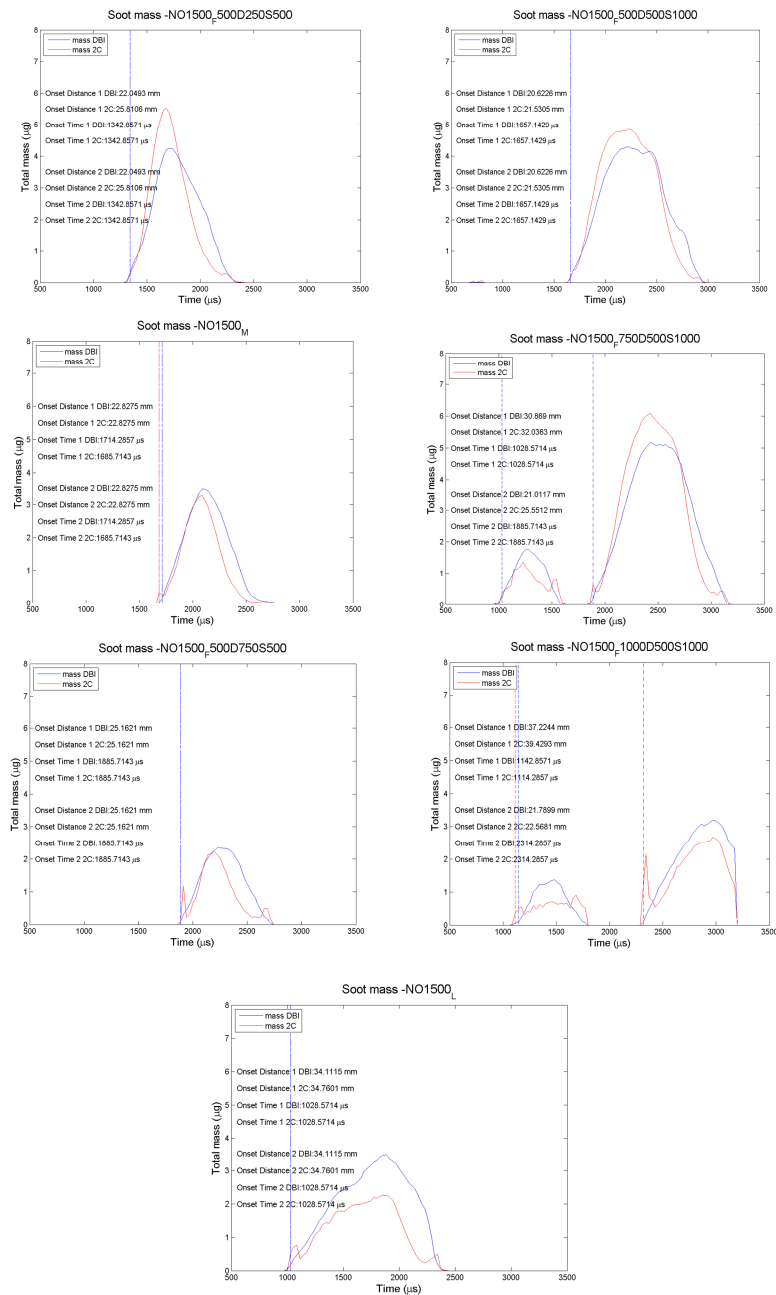


Figura 5.7: Masa total de hollín en la llama en función del tiempo (azul: DBI, rojo: 2C). Orden análogo a la Figura 5.6.

Los resultados de masa de hollín en la llama mostrados en la Figura 5.7 muestran diferencias que pueden estar relacionadas con las diferencias que también existen en las lecturas del sensor de presión y de tasa de liberación de calor. En teoría, la gráfica roja (2C) debería estar siempre por debajo de la azul (DBI) debido al auto-apantallamiento en el ensayo de 2C, pero en la Figura 5.7 se observa que los resultados obtenidos no siempre cumplen esta directriz.

Sin embargo, observando la columna de la izquierda en la Figura 5.7 se aprecia que según se aumenta la pausa entre inyecciones, la masa de hollín en la llama desciende. Observando la columna derecha se aprecia que con la duración de la primera inyección intermedia se genera la máxima cantidad de hollín, y que en la que tiene más duración el nivel es el mínimo. Con la primera inyección de una duración corta se genera una cantidad de hollín parecida a la situación intermedia, pero algo menor. Comparando esto con la gráfica central (inyección simple), se aprecia que los niveles de hollín con pausa entre inyecciones más larga y con mayor duración de la primera inyección son similares o ligeramente inferior a una inyección simple, sin pausa.

También se puede comparar la distribución de la masa de hollín en la llama en ciertos instantes entre las tres estrategias inferiores en la Figura 5.7 (pausa más larga, primera inyección más larga e inyección simple), como se muestra en la Figura 5.8.

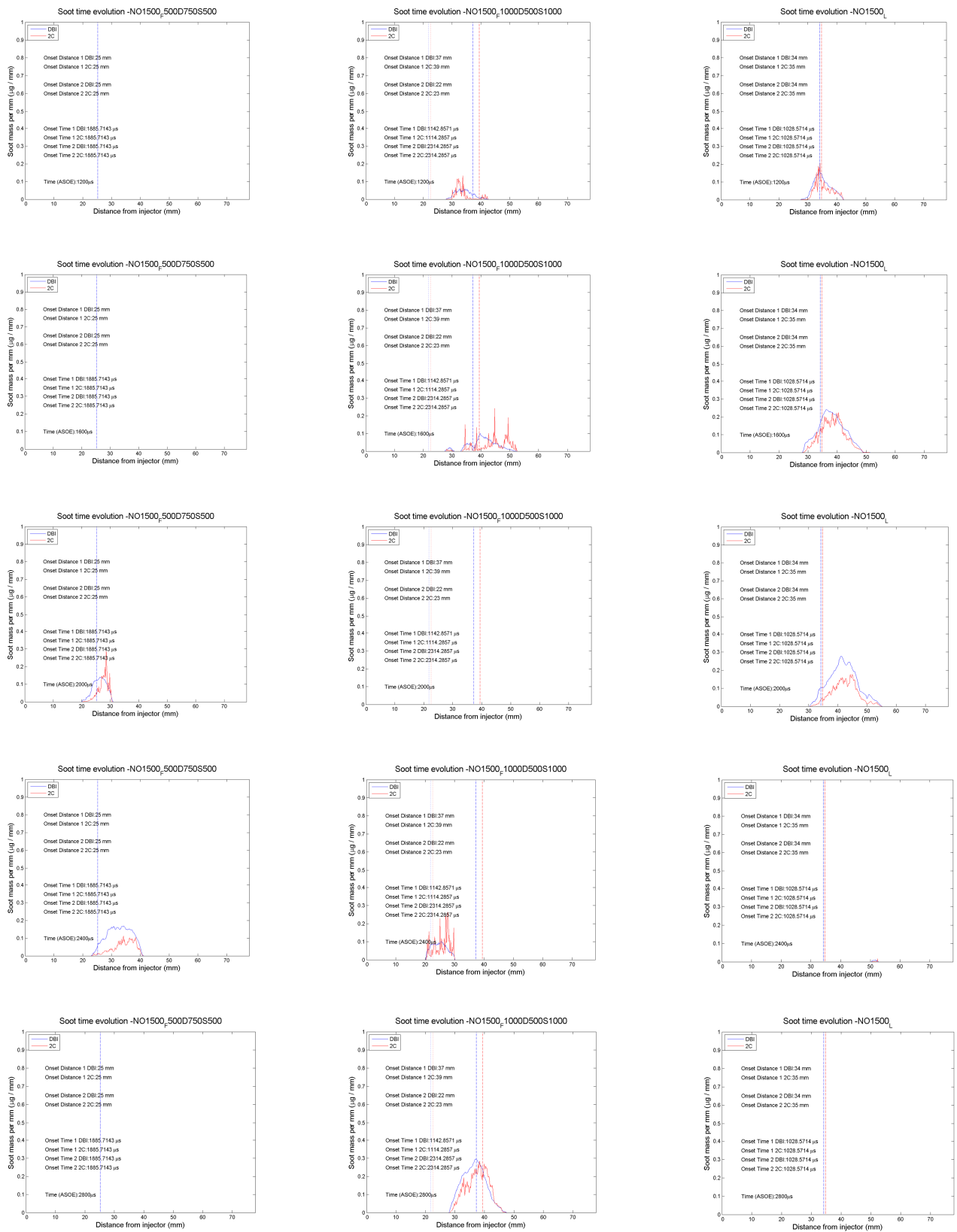


Figura 5.8: Comparativa entre pausa más larga (primera columna), primera inyección más duradera (columna central) e inyección simple (última columna) en distintos instantes de tiempo (de arriba a abajo: 1200, 1600, 2000, 2400, 2800 μs) (azul: DBI, rojo: 2C).

Como se aprecia en la figura 5.8, la cantidad de hollín mostrada en la primera columna es mucho menor que en la tercera (pausa más larga e inyección simple, respectivamente), y la cantidad de hollín mostrada en la columna central (primera inyección más duradera) es similar a la última columna.

Así pues, parece que una estrategia óptima consistiría en alargar la pausa entre inyecciones y también alargar la primera inyección para reducir al mínimo la cantidad de hollín en la llama.

5.5. RESULTADOS DE RADIACIÓN DE HOLLÍN

Las gráficas que recogen los resultados de radiación de hollín se muestran en la Figura 5.9:

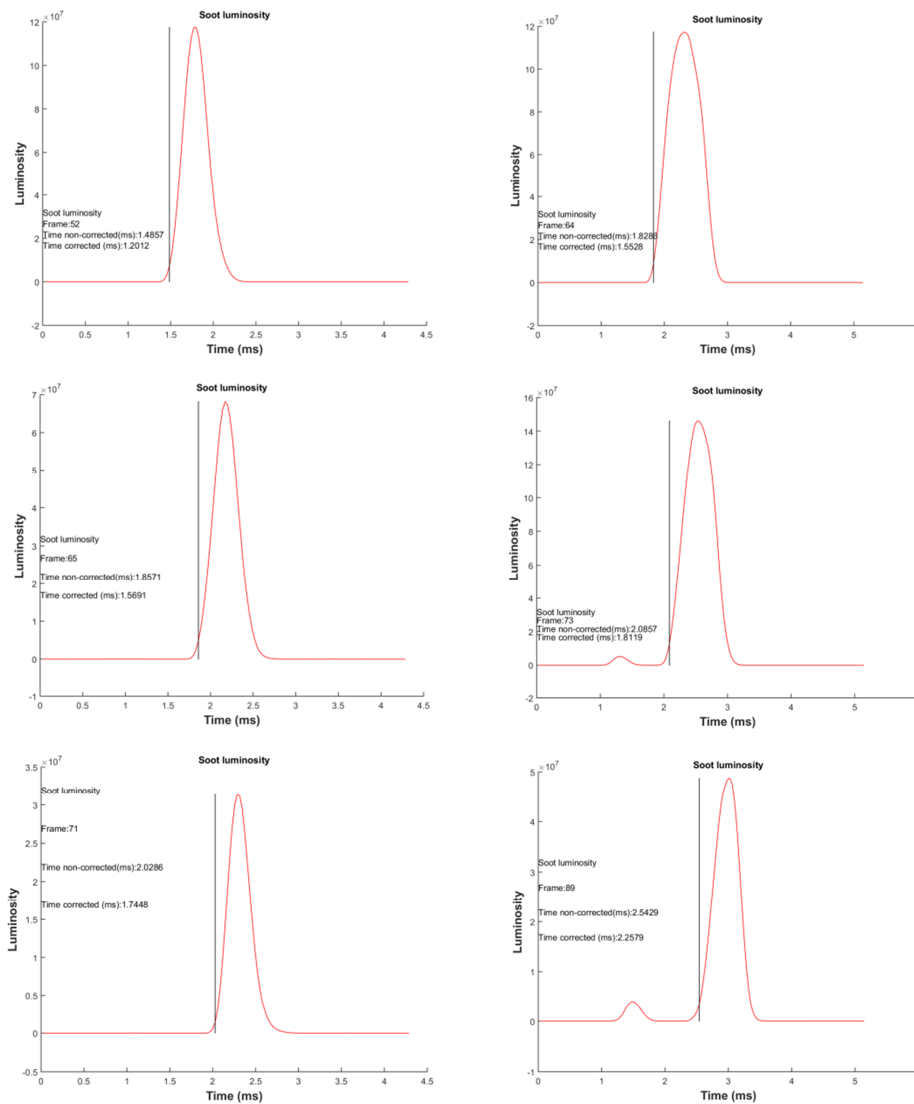


Figura 5.9: Luminosidad del hollín (primera columna, de arriba a abajo, aumento de la duración de la pausa entre inyecciones; segunda columna, de arriba a abajo, aumento de la duración de la primera inyección).

En la Figura 5.9 se pueden comparar, dentro de una misma columna, los tiempos en los que ocurren el comienzo de la luminosidad y su máximo, además de comprobar si el hollín de la primera inyección (si se genera) tiene luminosidad o no.

Al igual que ocurría con la masa de hollín, la tendencia es que al aumentar el tiempo de pausa entre inyecciones, el nivel de máxima luminosidad desciende (120 millones de unidades con la pausa más corta, 70 millones la intermedia y 35 millones la más larga).

Al igual que con la duración de la primera inyección (donde la duración corta presentaba un nivel intermedio de hollín, la duración intermedia presentaba el nivel de masa de hollín más elevado y la duración más larga presentaba la mínima masa de hollín de las tres estrategias), con la luminosidad del hollín también aparece la misma tendencia, con un nivel de luminosidad de 120, 150 y 50 millones de unidades respectivamente (se recuerda que la luminosidad del hollín se calcula como la suma de los valores de cada uno de los píxeles, con un tamaño de 16 bits, es decir, 0 es el valor mínimo, o más oscuro, y 65535 es el valor más alto o brillante para un píxel dado).

Por tanto, esta medición de luminosidad del hollín parece acorde a la de la masa de hollín en llama y las conclusiones a extraer son las mismas que en aquel caso, con la estrategia de inyección óptima siendo una primera inyección larga y un tiempo entre las inyecciones elevado para conseguir una luminosidad del hollín mínima.

Los resultados que se muestran en las figuras de este apartado (radiación de hollín), pueden ser visualizados también con las imágenes Schlieren, tal y como muestran las Figuras 5.10 y 5.11

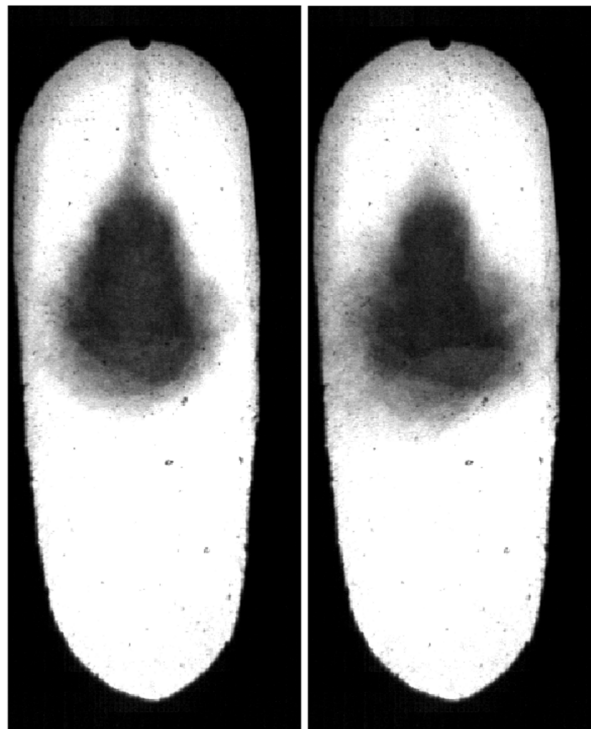


Figura 5.10: Final de la luminosidad del hollín formado en la primera inyección (F1000D500S1000) (1.366 y 1.566 ms). Nótese el desvanecimiento de la nube blanquecina central.

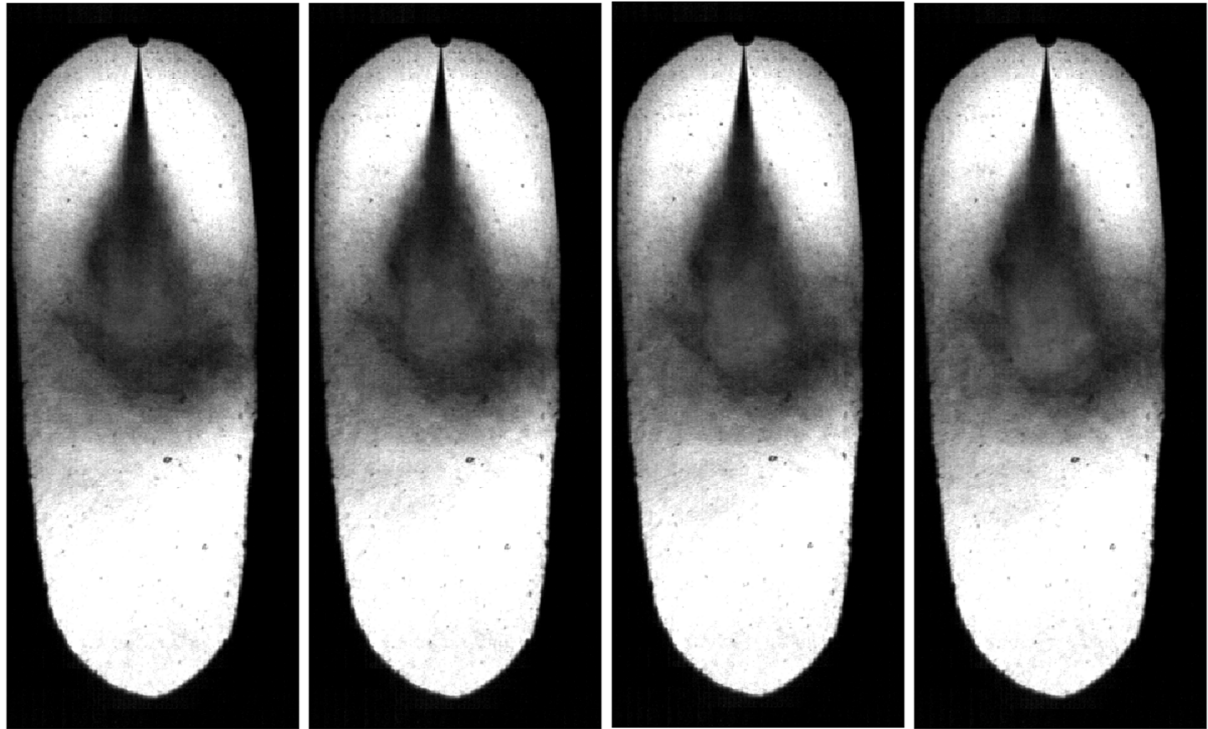


Figura 5.11: Evolución de la luminosidad del hollín formado en la segunda inyección (F1000D500S1000) (2.333, 2.366, 2.400 y 2.433 ms). Nótese el avance y aumento de tamaño de la nube blanquecina en el centro de las imágenes.

5.6. RESULTADOS DE DECONVOLUCIÓN KL Y FRACCIÓN VOLUMÉTRICA

Los resultados de deconvolución KL y fracción volumétrica se recogen en las Figuras 5.12 y 5.13.

Como se observa en ellas, los valores de KL global (mitad derecha de todas las imágenes) y el K deconvolucionado (mitad izquierda) concuerdan temporalmente con la masa de hollín y su luminosidad. En la Figura 5.12, donde aparecen las estrategias que varían la duración de la pausa entre inyecciones, la columna de la izquierda es la que tiene un valor de K deconvolucionado más alto, y la derecha el más bajo. En la Figura 5.13 se da la misma analogía, con la columna central siendo la que tiene el valor de K deconvolucionado más elevado, y la derecha el más bajo.

También se observa que las opacidades más elevadas se dan en el centro de la llama en aquellas condiciones en las que efectivamente las hay, lo que muestra que el hollín se forma en la parte más interna de la llama (tal y como se enunció en el apartado 2 de esta memoria, "Contextualización").

Los resultados de la fracción volumétrica deconvolucionada son semejantes a los de KL deconvolucionado, tal y como dicta la ecuación (5). Estos resultados se muestran en las Figuras 5.14 y 5.15.

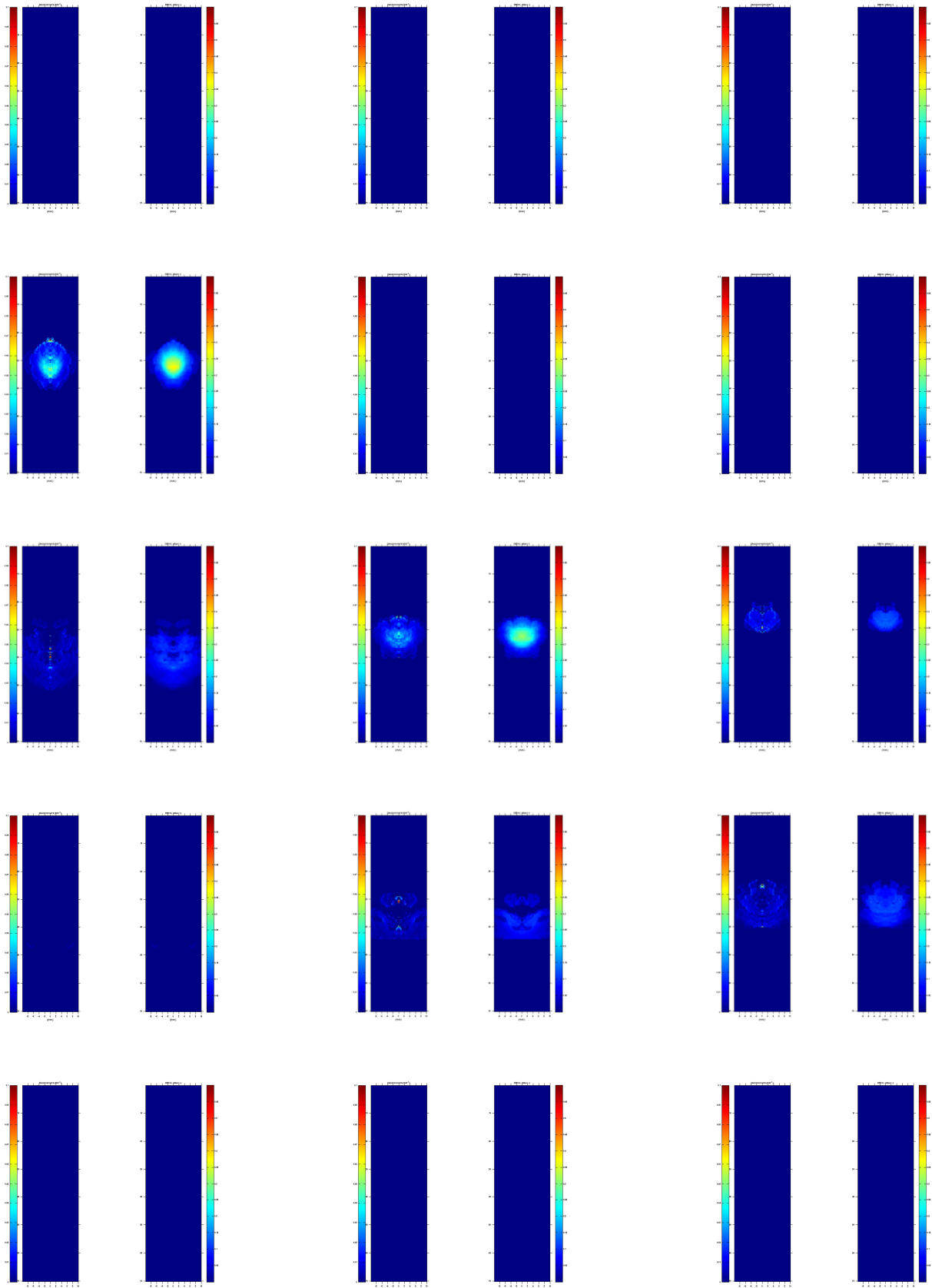


Figura 5.12: Análoga a la Figura 5.8 respecto a tiempos, método Radon con llama simétrica. Primera columna: F500D250S500. Segunda columna: F500D500S500. Tercera columna: F500D750S500.

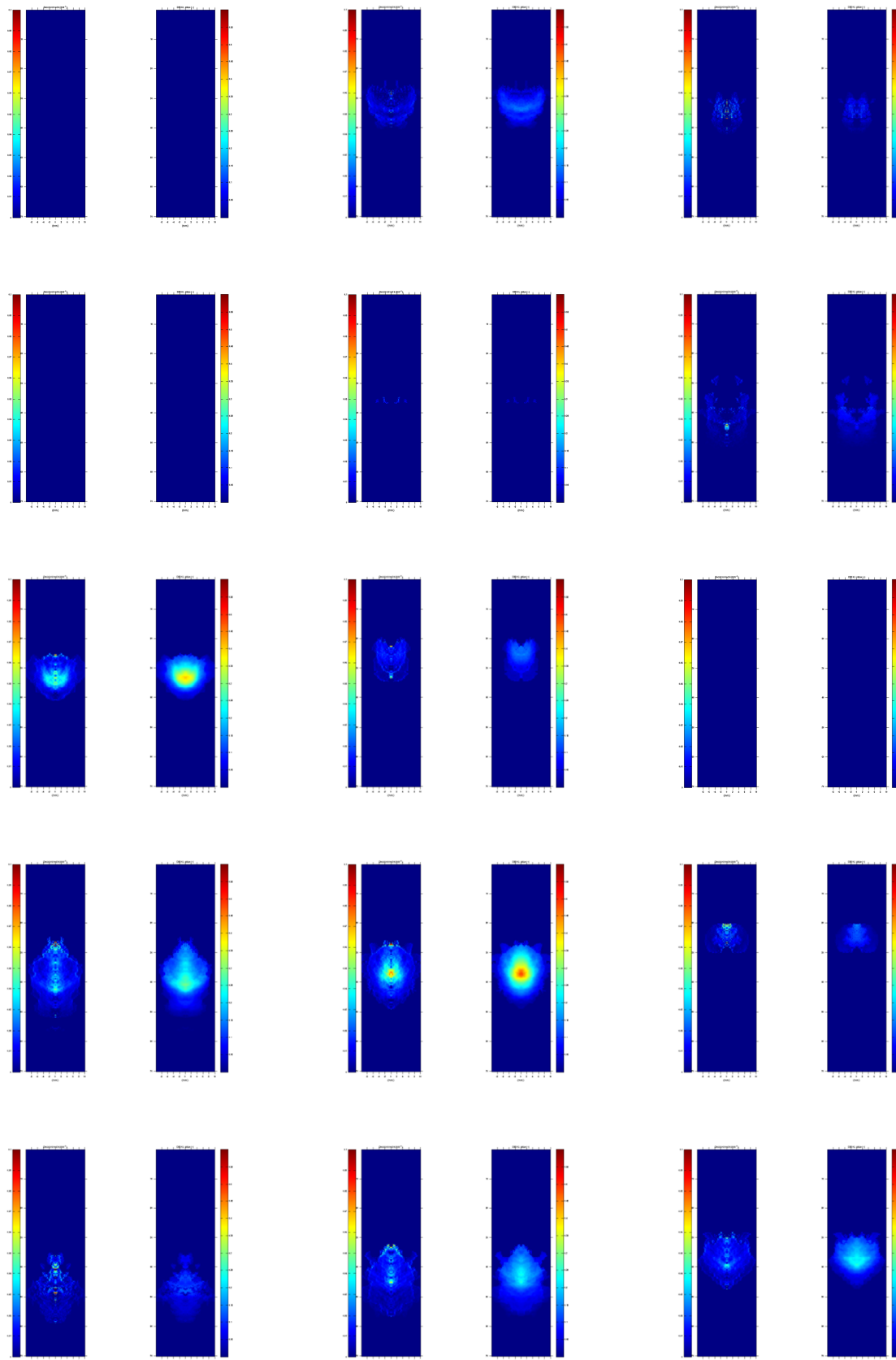


Figura 5.13: Análoga a la Figura 5.8 respecto a tiempos, método Radon con llama simétrica. Primera columna: F500D500S1000. Segunda columna: F750D500S1000. Tercera columna: F1000D500S1000.

Una última comparativa mostrando la fracción volumétrica de hollín para las condiciones de mayor tiempo de pausa entre inyecciones, mayor duración de la primera inyección e inyección simple se muestra en la Figura 5.16.

Las conclusiones que se pueden extraer de estos resultados son las mismas que en el caso de la masa de hollín y su radiación. Además, se ha comprobado que el hollín aparece en el interior de la llama, hecho que tiene sentido al no haber prácticamente oxígeno en esa parte de la llama para que se oxide, mientras que en la parte más externa de la llama, aun siendo rica en combustible y pobre en oxígeno, la concentración de hollín es mucho menor. Se obtienen por tanto resultados que parecen corroborar las ideas teóricas y, por tanto, correctos, dentro de las limitaciones que una llama asimétrica impone.

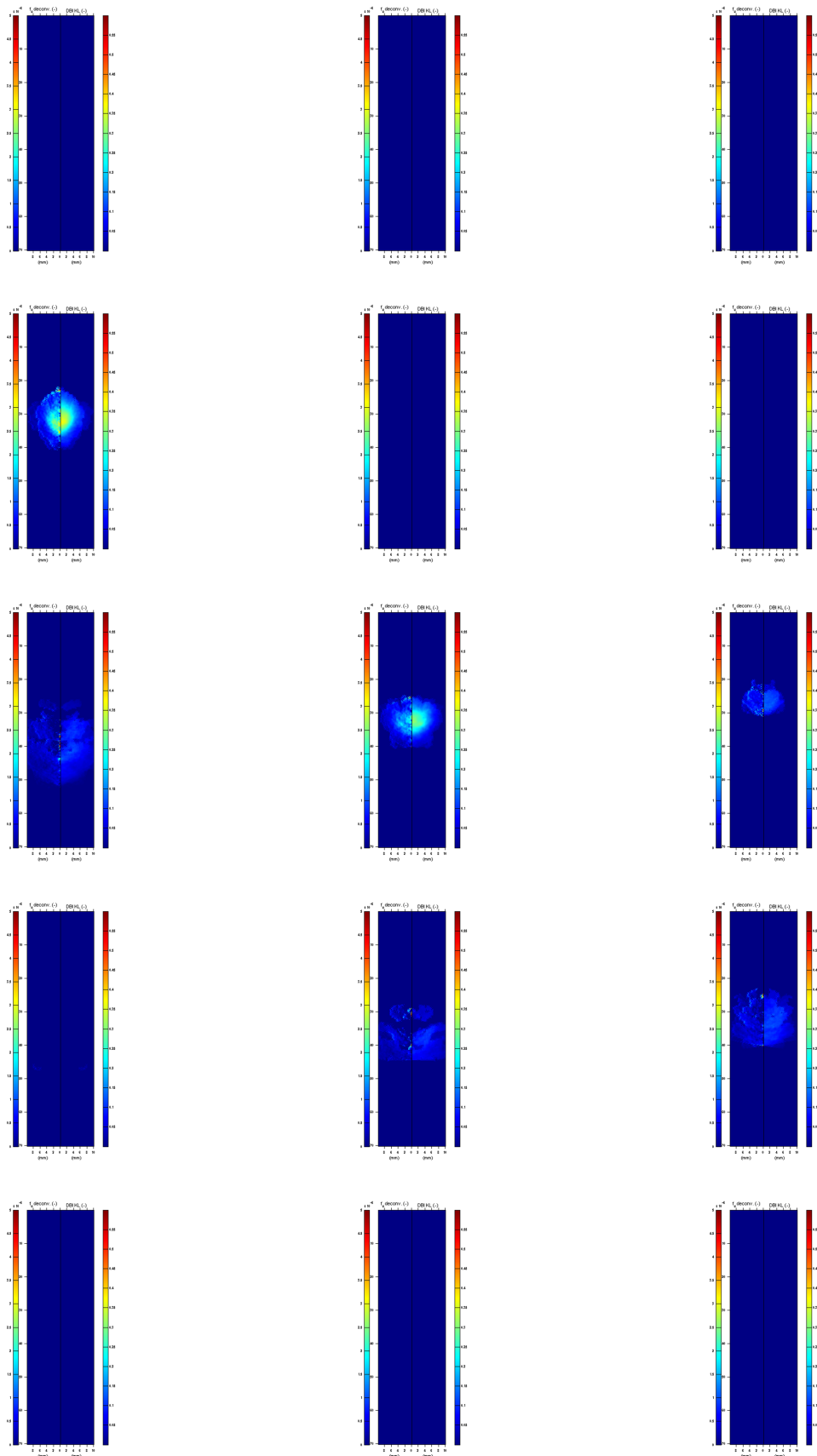


Figura 5.14: Valor de fracción volumétrica de hollín deconvolucionado. Disposición análoga a la Figura 5.8.

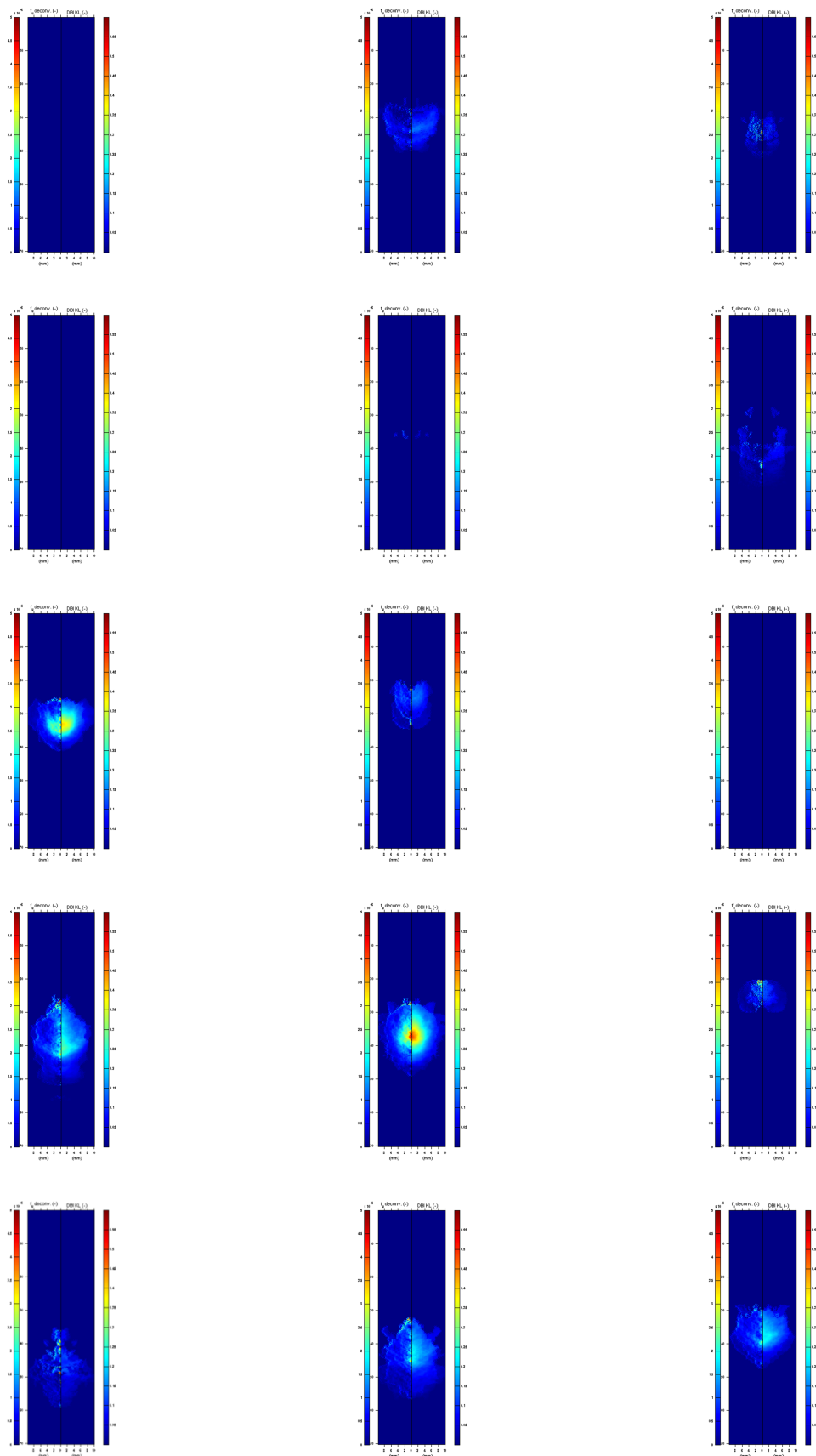


Figura 5.15: Valor de la fracción volumétrica de hollín deconvolucionado. Disposición análoga a la Figura 5.9.

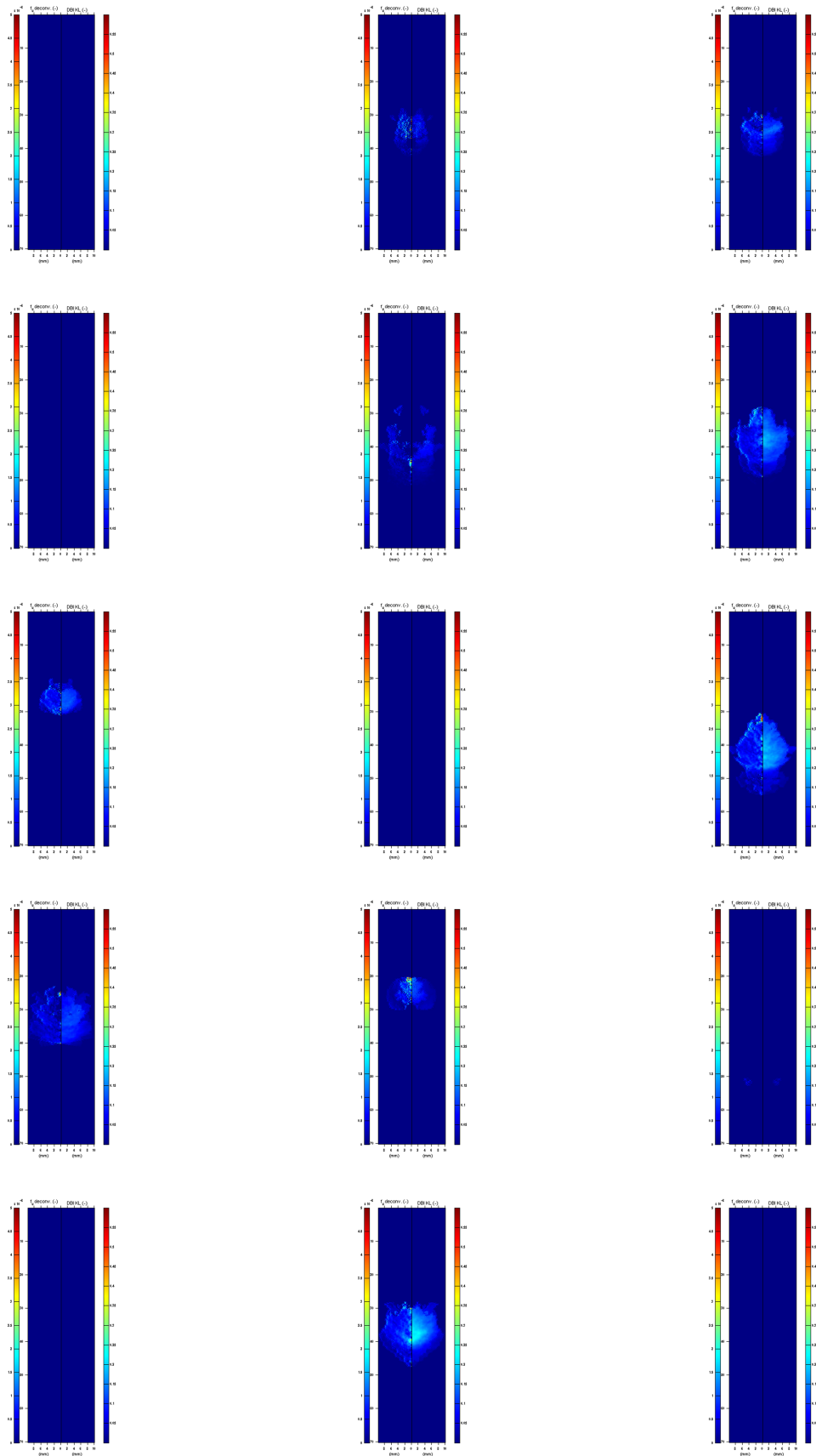


Figura 5.16: Comparativa de fracción volumétrica de hollín entre las condiciones de mayor tiempo de pausa entre inyecciones (columna izquierda), mayor duración de la primera inyección (columna central) e inyección simple (columna derecha). Los tiempos son análogos a los de la Figura 5.8.

5.7. RESULTADOS DE DECONVOLUCIÓN DEL CAMPO DE TEMPERATURAS

Estos resultados se recogen en las Figuras 5.18, 5.19 y 5.20, de forma análoga a las Figuras 5.14, 5.15 y 5.16.

Los gráficos mostrados en estas figuras tienen el formato de la Figura 5.17:

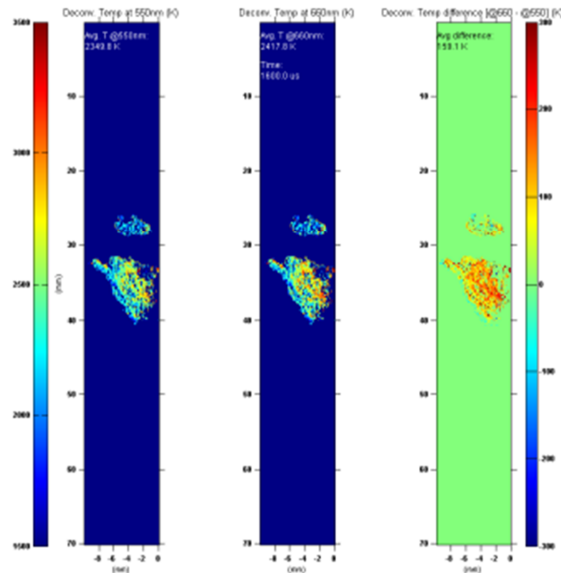


Figura 5.17: Ejemplo de deconvolución de temperatura. Columna izquierda: Temperatura inferida a partir de la radiación a 550 nm. Columna central: Temperatura inferida a partir de la radiación a 660 nm. Columna derecha: Diferencia entre ambas temperaturas (660 nm – 550 nm). En las columnas izquierda y central el color azul oscuro representa 1500K y el granate 3500K. En la columna de la derecha el verde indica que no hay diferencia de temperaturas, el granate que hay diferencia de 300K, y el azul oscuro de -300K. Las imágenes representan la mitad izquierda de la llama simétrica.

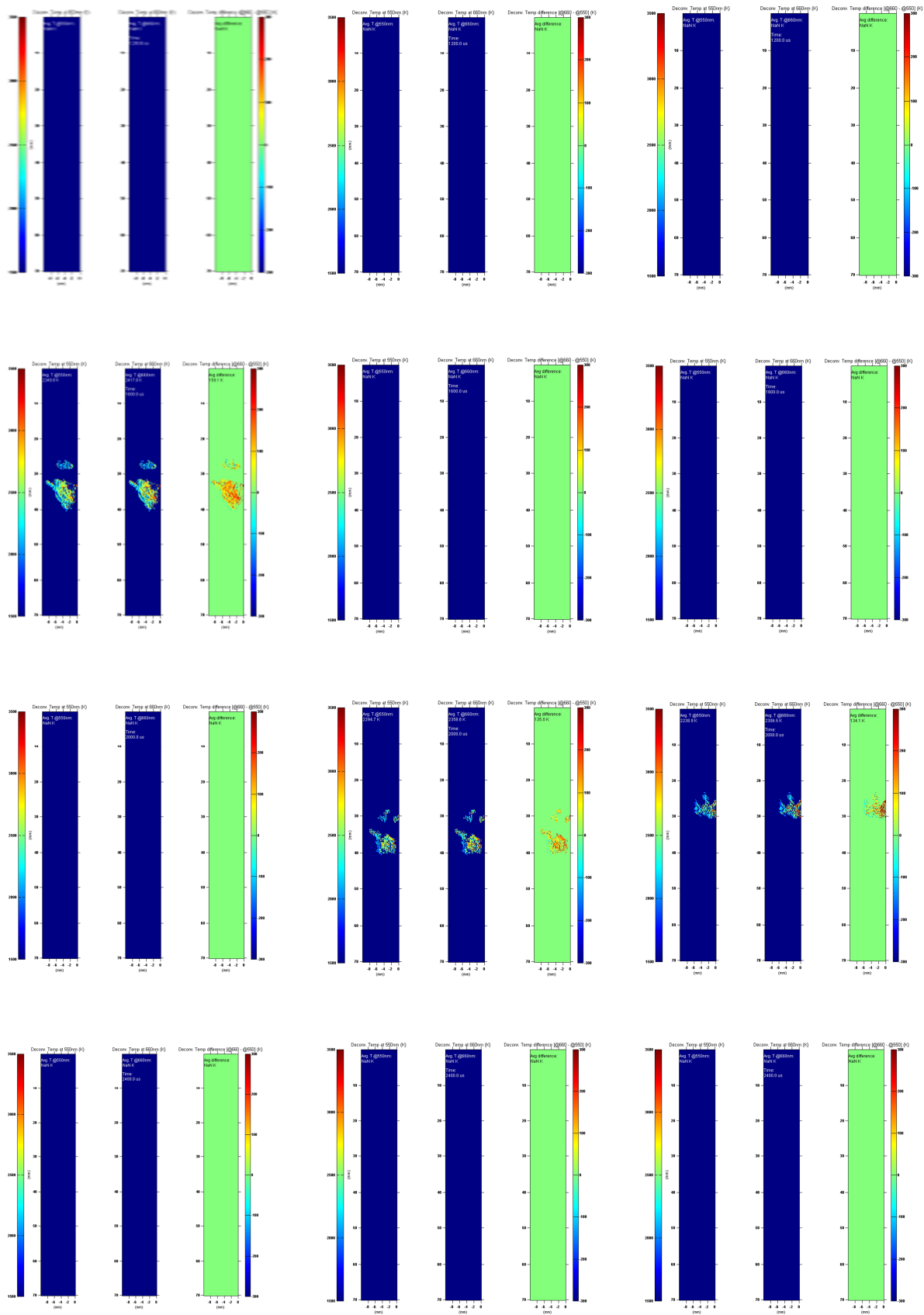


Figura 5.18: Deconvolución de temperaturas (Izq: F500D250S500, centro: F500D500S500, dcha: F500D750S500) (De arriba a abajo: 1200 μ s, 1600 μ s, 2000 μ s y 2400 μ s).

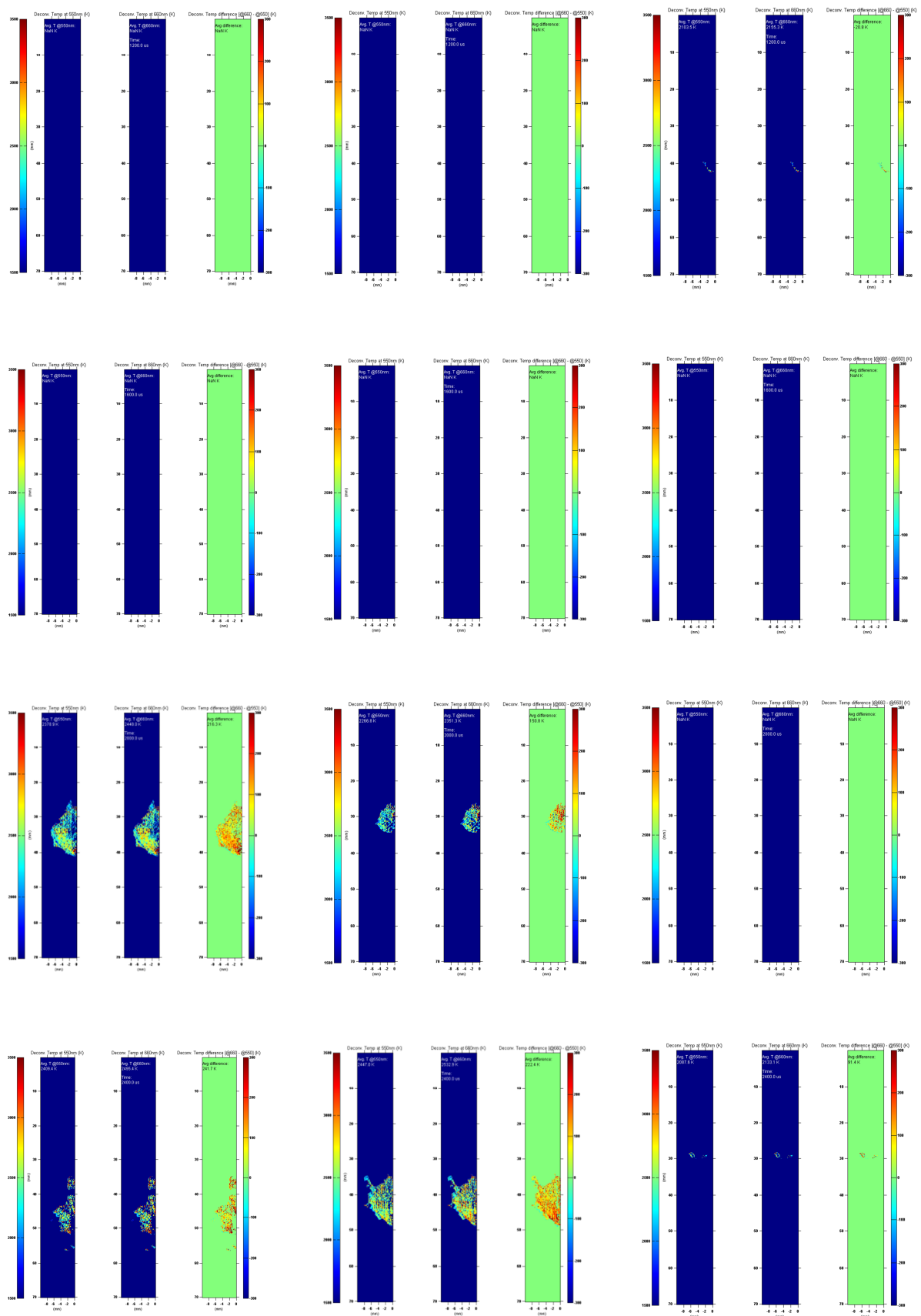


Figura 5.19: Deconvolución de temperaturas. Disposición de estrategias de inyección análoga a la Figura 5.18 (Izq: F500D500S1000, centro: F750D500S1000, dcha: F1000D500S1000).

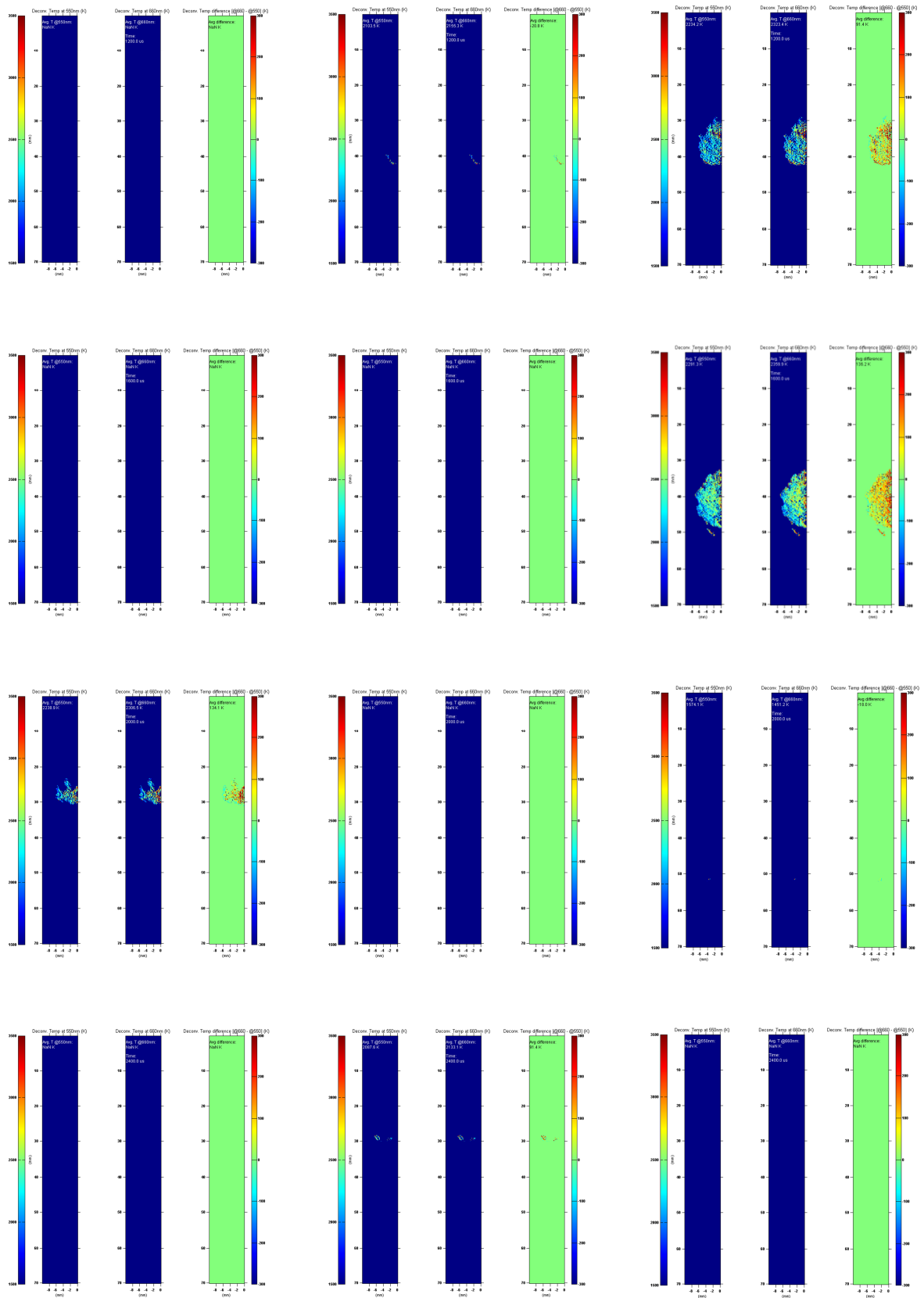


Figura 5.20: Deconvolución de temperaturas. Disposición de estrategias de inyección análoga a la Figura 5.18 (Izq: F500D7500S500, centro: F1000D500S1000, dcha: inyección simple).

Como muestra la Figura 5.20, las temperaturas del hollín con una pausa larga entre inyecciones y con una primera inyección duradera son mucho menores que las obtenidas en una inyección simple, lo que implica que la formación de óxidos de nitrógeno será mucho menor también en las primeras que en la última, hecho que tiene sentido teórico, ya que al realizar una inyección múltiple en lugar de una simple, por un momento deja de inyectarse combustible, y esto provoca que la liberación de calor no sea tan energética, consiguiendo así no aumentar tanto la temperatura (hecho que puede comprobarse en el apartado 5.3 de esta memoria: “Resultados de tasa de liberación de calor y presión en el cilindro”).

5.8. COMPARATIVA DE PARÁMETROS – BARRIDO EN TIEMPO DE PAUSA

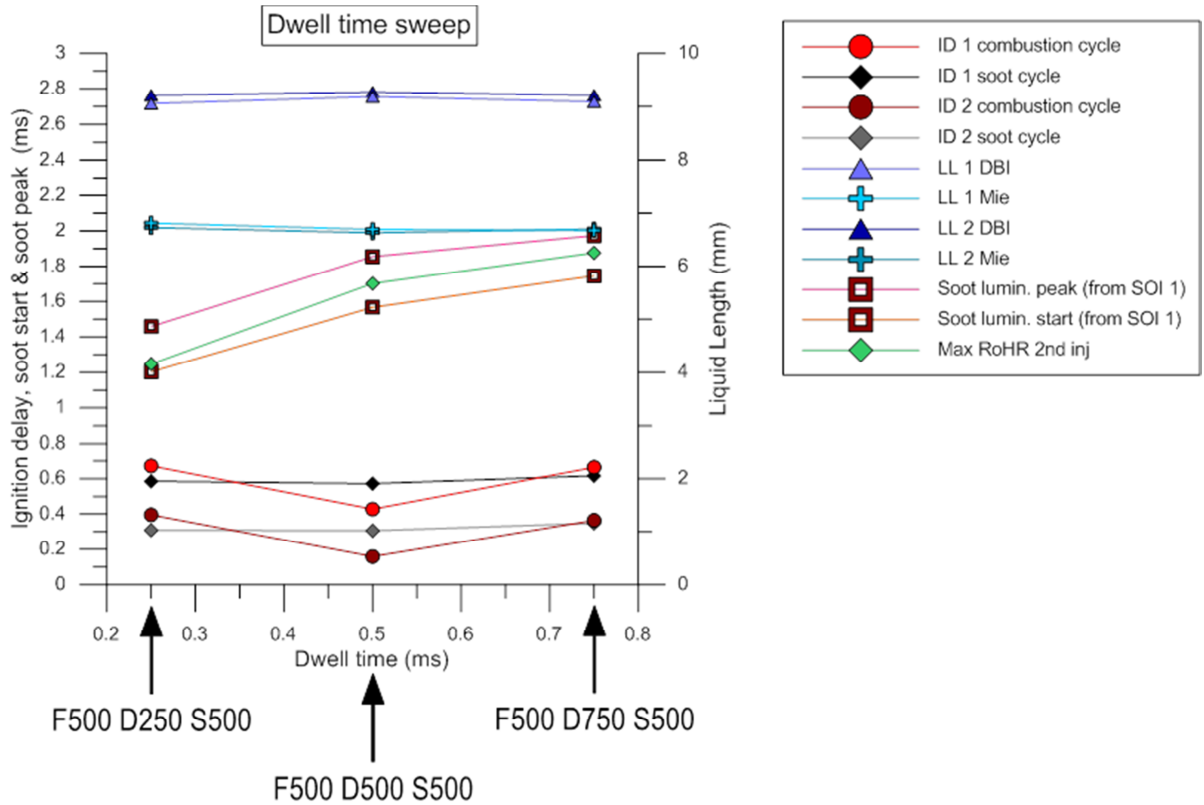


Figura 5.21: Comparativa general del barrido en tiempo de pausa entre inyecciones.

La figura 5.21 muestra los siguientes datos:

- Retraso a la ignición (ID) de la primera y segunda inyección en los montajes de Schlieren-Mie (“combustion” en la Figura 5.21) y DBI-2C (“soot”):

Se observa que en ambos montajes, los tiempos de retraso a la ignición son muy similares, con ciertas diferencias debido a las variaciones en la instalación experimental de un ensayo a otro. En ambos casos, el tiempo de retraso a la ignición de la segunda inyección es aproximadamente la mitad que el que se da en la primera inyección. Por tanto, no parece que esta variación en el tiempo de pausa entre inyecciones sea determinante en el tiempo de retraso a la ignición.

- Longitud líquida (LL) de la primera y segunda inyección obtenida con Mie y con DBI:

Obviando la diferencia sustancial, probablemente debida al hecho de que la longitud de llama sea más corta que la aparición de la llama, dentro de cada método la LL no varía entre la primera inyección y la segunda, cosa que indica que la combustión parece no afectar a la atomización y mezcla de la fase líquida con el aire del cilindro (al menos en la medida con DBI, pues Mie se realizó en condiciones inertes).

- Tiempo de comienzo de la luminosidad del hollín y su luminosidad pico:

Se observa un aumento del tiempo de aparición de luminosidad del hollín y de luminosidad pico respecto a la primera inyección según se aumenta la pausa entre inyecciones. Sin embargo, este tiempo no aumenta en 0.250ms según se avanza de una estrategia de inyección a otra (el aumento

del tiempo en la pausa). Del primer caso (F500D250S500) al segundo (F500D500S500) se aprecia un aumento del orden de 0.400ms (1.85-1.45 aproximadamente) en el retraso de luminosidad pico y del orden de 0.350ms (1.55-1.20 aproximadamente) en el retraso del comienzo de la luminosidad del hollín. Del segundo caso (F500D500S500) al tercero (F500D750S500) se aprecia un aumento de unos 0.100ms (1.95-1.85 aproximadamente) en el pico de luminosidad y unos 0.200ms (1.75-1.55 aproximadamente) en el comienzo de la luminosidad del hollín.

Estas mediciones corregidas con el aumento de tiempo de pausa entre inyecciones se traducen en 0.150 y 0.100ms de aumento en el retraso del pico de luminosidad y comienzo de luminosidad, respectivamente, de la primera estrategia a la segunda; y una disminución de 0.150 y 0.050ms entre la segunda y la tercera; entre la primera y la tercera hay un retraso de 0ms en el luminosidad pico (hay 0.500ms de diferencia pero también hay 0.500ms extra de pausa) y de 0.050ms en el comienzo de luminosidad (0.550ms de diferencia – 0.500ms extra de pausa).

Sin embargo, la diferencia entre comienzo de luminosidad y pico de luminosidad para una misma estrategia (distancia entre líneas rosa y naranja en la Figura 5.21) se mantiene aproximadamente constante, de modo que el calentamiento del hollín desde que se vuelve luminoso hasta su pico de luminosidad no varía con el aumento del tiempo de pausa entre inyecciones.

- Tiempo entre el comienzo de la primera inyección y el máximo en la tasa de liberación de calor de la segunda inyección (cuadrado relleno verde en la Figura 5.21):

La línea verde aparece entre la naranja y la rosa en la Figura 5.21 para las tres estrategias ensayadas, lo que indica que la mayor tasa de liberación de calor de la segunda inyección se da más tarde que el comienzo de luminosidad del hollín, pero antes que su máximo. O lo que es lo mismo, la máxima tasa de liberación de calor de la segunda inyección se da mientras el hollín gana luminosidad.

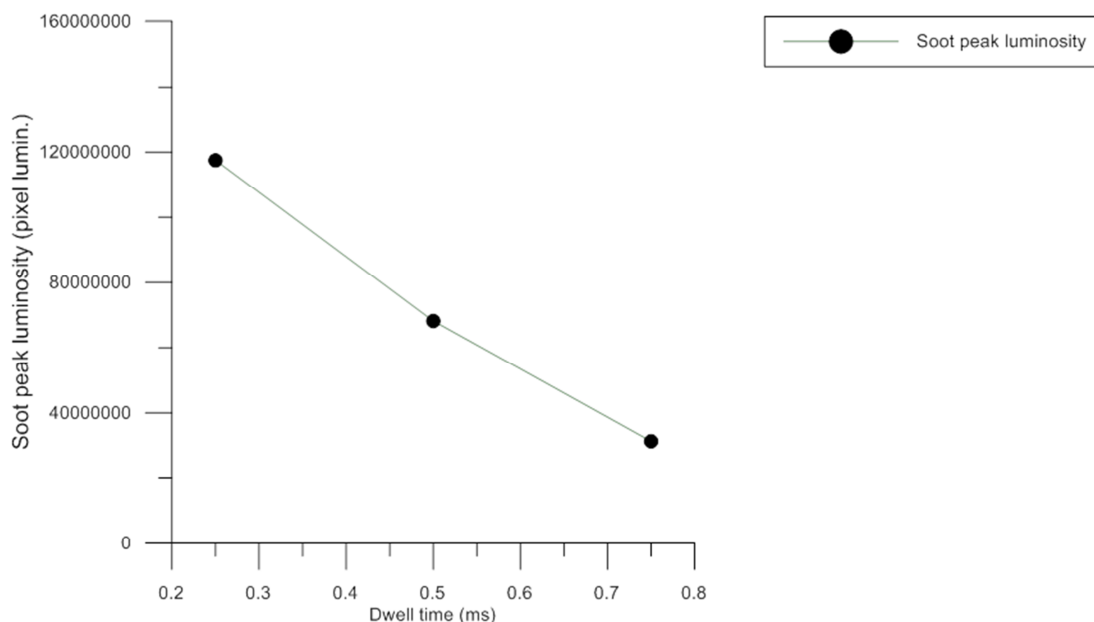


Figura 5.22: Comparación de la luminosidad del hollín entre las tres estrategias ensayadas (análogo a la figura 5.21).

En la figura 5.22 se aprecia que sí hay una relación entre el tiempo de pausa y la luminosidad del hollín: A mayor tiempo de pausa, menor es la luminosidad de esta, llegando a reducirse a una tercera parte con un incremento de la pausa entre inyecciones de 0.500ms.

5.9. COMPARATIVA DE PARÁMETROS – BARRIDO EN DURACIÓN DE LA PRIMERA INYECCIÓN

De forma análoga al apartado anterior se presentan las comparativas entre las 3 estrategias (F500D500S1000, F750D500S1000, F1000D500S1000) en la Figura 5.23.

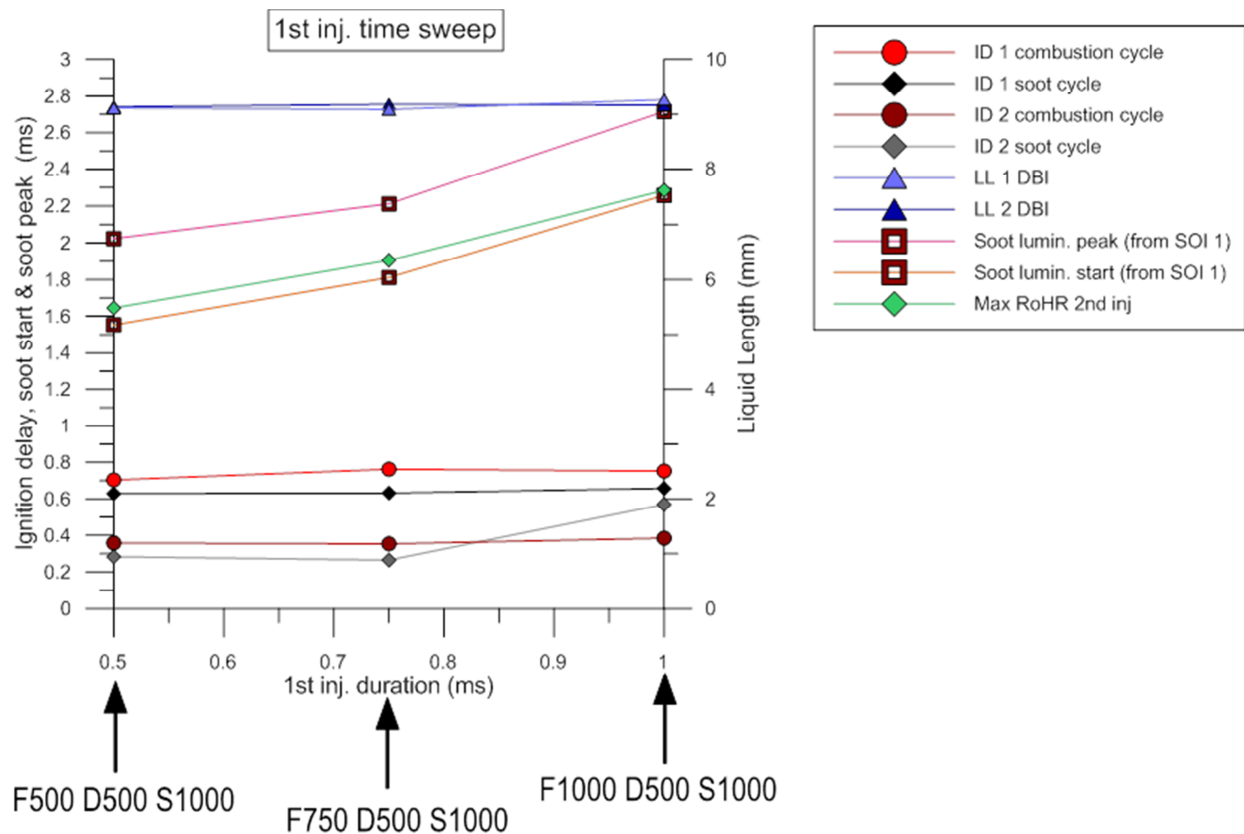


Figura 5.23: Comparativa general del barrido en duración de la primera inyección.

El código de colores y símbolos es análogo al apartado anterior, salvo que en este caso no existen datos de longitud líquida con Mie.

Las conclusiones a extraer de la Figura 5.23 son:

- Retraso a la ignición (ID) de la primera y segunda inyección en los ensayos de combustión y de hollín:

Salvo el tiempo de retraso a la ignición de la segunda inyección en la tercera estrategia (punto gris claro en la estrategia F1000D500S1000 en la figura 5.23), se obtienen valores similares a los de la figura 5.21 (0.4-0.7ms), siendo la distancia entre las líneas roja y marrón, y negra y gris constante, exceptuando el último punto. La desviación de este punto puede ser explicada con el mayor ruido presente en la señal obtenida de la tasa de liberación de calor en los ensayos de hollín,

comparándola con la obtenida en los ensayos de combustión. En efecto, comparando ambas curvas de tasa de liberación de calor en la Figura 5.24:

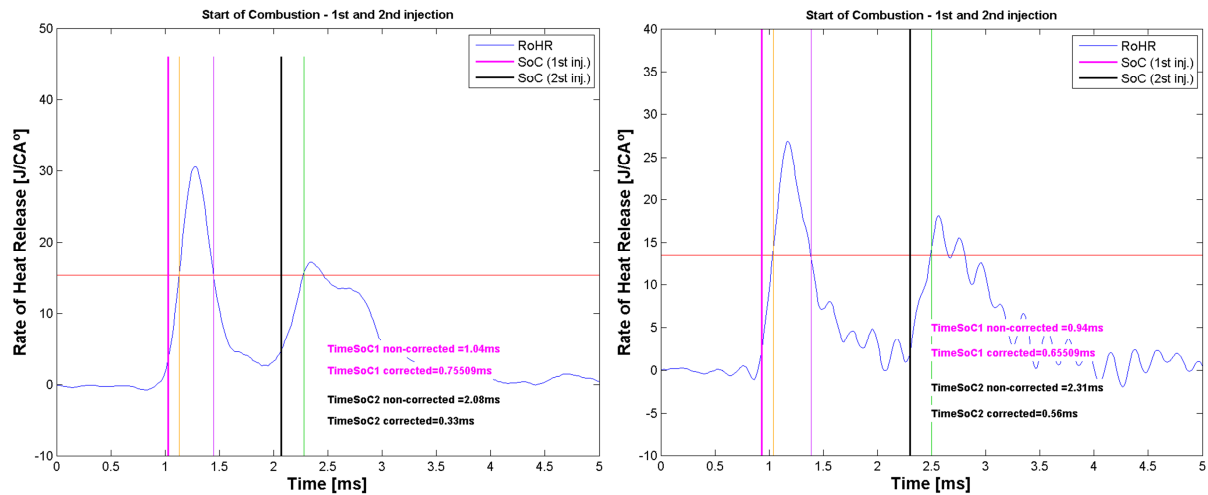


Figura 5.24: Comparación de las curvas de tasa de liberación de calor de la estrategia F1000D500S1000 en el montaje Schlieren-Mie (izquierda) y DBI-2C (derecha).

Se observa una mayor presencia de ruido en la gráfica de la derecha que en la de la izquierda, y este ruido ha provocado que el algoritmo de detección tome como tiempo de retraso a la ignición uno más elevado que el que tomaría sin ruido.

- Longitud líquida (LL) de la primera y segunda inyección obtenida con DBI:

En la Figura 5.23 se puede ver que ambas longitudes líquidas son muy similares también en los ensayos de hollín, y si comparamos la distancia obtenida entre los dos montajes, obtenemos que no hay diferencia alguna (9 mm aproximadamente en las Figuras 5.21 y 5.23).

- Tiempo de comienzo de la luminosidad del hollín y su luminosidad pico:

Al igual que en la Figura 5.21, la distancia entre las líneas naranja y rosa de la Figura 5.23 se mantiene aproximadamente constante, por lo que el tiempo que transcurre desde que el hollín comienza a tener luminosidad, hasta que alcanza el pico de luminosidad es aproximadamente constante, sin importar la duración de la primera inyección. No obstante, sí que afecta la duración de la segunda inyección, ya que la distancia entre las líneas naranja y rosa de la Figura 5.23 es mayor que en la Figura 5.21 (0.5 ms y 0.25 ms, aproximadamente).

- Tiempo entre el comienzo de la primera inyección y el máximo en la tasa de liberación de calor de la segunda inyección (cuadrado relleno verde en la Figura 5.23):

La línea verde en la Figura 5.23 también se encuentra entre las líneas rosa y naranja, por lo que el pico de la tasa de liberación de calor de la segunda inyección ocurre más tarde de que el hollín gane luminosidad y antes de que el hollín alcance su pico en luminosidad.

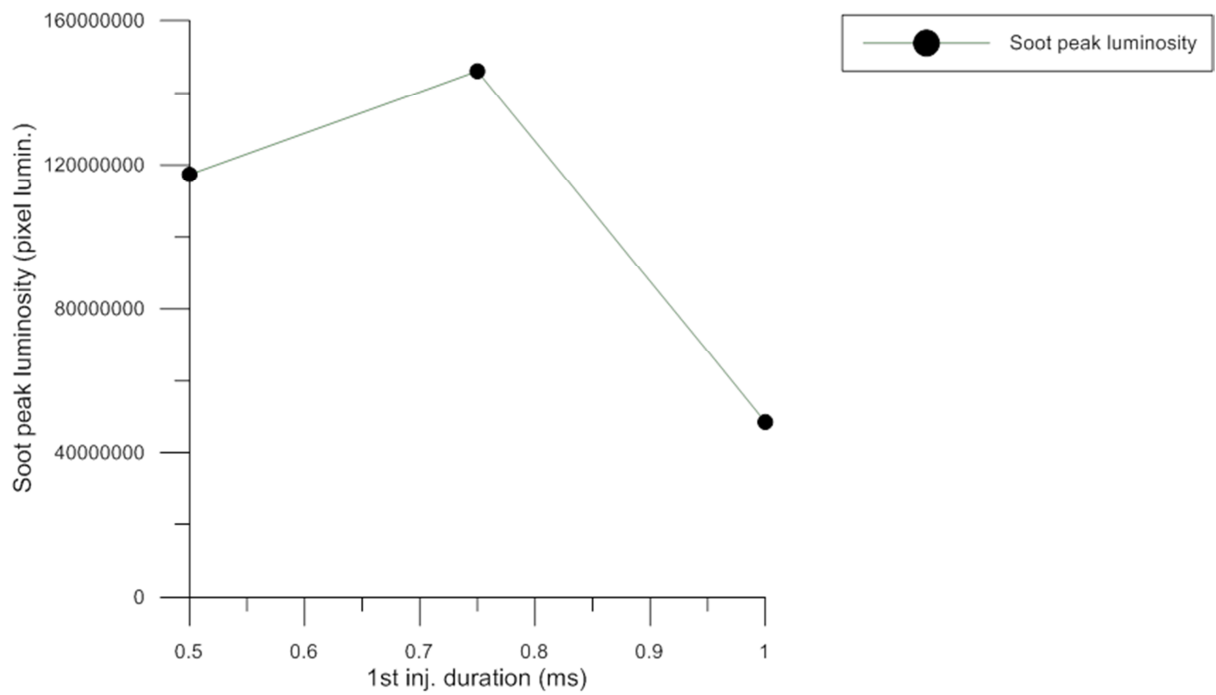


Figura 5.25: Comparación de la luminosidad del hollín entre las tres estrategias ensayadas.

En la Figura 5.25 se observa una disminución de la luminosidad del hollín cercana a la tercera parte de la obtenida con una primera inyección de 0.500 ms para el caso más favorable (primera inyección más duradera). Sin embargo, no desciende monótonicamente, sino que con una primera inyección de 0.750 ms se alcanza el máximo de luminosidad, unas 3.5 veces mayor que el mejor caso de este ensayo.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este Trabajo se han obtenido resultados que definen la formación de hollín, así como su temperatura, fracción volumétrica en toda la llama y su nivel de radiación; junto a otros parámetros como la formación de óxidos de nitrógeno, retrasos a la ignición o longitudes líquidas de cada una de las inyecciones, que concuerdan con las expectativas teóricas dentro de la variabilidad de los ensayos realizados.

Los resultados, obtenidos y presentados de forma ordenada, han permitido validar la metodología de análisis empleada y relacionar los distintos datos para llegar a conclusiones avanzadas, tal y como se presentan en los apartados 5.8 y 5.9 de esta memoria.

De un modo resumido, las conclusiones alcanzadas a lo largo de este Trabajo han sido:

- No hay efecto de la combustión sobre la longitud líquida de ninguna de las inyecciones, además de tampoco haber diferencia entre la longitud líquida de una inyección singular y otra múltiple.
- Las gráficas obtenidas de la tasa de liberación de calor muestran que:
 - Según se aumenta la pausa entre inyecciones, pasa de tenerse una combustión premezclada y una de difusión, a dos combustiones premezcladas.
 - Según se aumenta la duración de la primera inyección, esta combustión de forma premezclada con cada vez más violencia, debido a la mayor cantidad de combustible en la cámara de combustión. Además, según la primera inyección es más duradera, la segunda pasa de tener un comportamiento muy similar a una inyección singular (existen fase premezclada y fase de difusión en la segunda inyección), a perder importancia la fase premezclada.
 - El tiempo de retraso a la ignición de la segunda inyección es aproximadamente el 50% del de la primera.
- La masa de hollín en llama disminuye según se aumenta la pausa entre inyecciones y la duración de la primera inyección, alcanzando niveles inferiores a los obtenidos con una inyección singular.
- La radiación del hollín también disminuye al aumentar el tiempo entre pausas (monotónicamente) y la duración de la primera inyección (para duraciones intermedias se obtienen luminosidades más elevadas que con duraciones cortas o largas, siendo la obtenida con duraciones largas la menor). Además, el tiempo que transcurre desde que el hollín empieza a ganar luminosidad hasta que alcanza su luminosidad máxima no parece variar significativamente ni con cambios en el tiempo de pausa, ni en la duración de la primera inyección (sí con la duración de la segunda inyección).
- Los resultados de la deconvolución KL y fracción volumétrica indican que el hollín se forma en la parte interna de la llama, zona donde el oxígeno no puede penetrar para oxidarlo. Las estrategias de inyección múltiple se muestran efectivas para reducir la opacidad y la luminosidad de la llama, con tiempos altos de pausa entre inyecciones y duraciones de la primera inyección.
- Asimismo, la deconvolución de temperaturas muestra que con una estrategia de inyecciones múltiples adecuada (primera inyección y pausa entre inyecciones duraderas), se alcanzan temperaturas menores del hollín (también en la llama), hecho

que repercute de forma positiva en la formación de óxidos de nitrógeno, reduciéndolos.

Como posibles trabajos futuros, este Trabajo ha permitido comprobar que el tiempo de retraso a la ignición de la primera a la segunda inyección se reduce en aproximadamente un 50%, pero no ha sido posible obtener valores absolutos de dichos retrasos debido a la gran variabilidad experimental implícita en estos ensayos. Asimismo, también está abierta a investigación la determinación del efecto de un número mayor de inyecciones. El presente Trabajo es una primera aproximación en ese aspecto y permite que, utilizando la misma metodología de análisis, se estudien inyecciones múltiples más numerosas y complejas.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Emil O. Akesson, K. J. (2008). *Parameter selection methods for axisymmetric flame tomography through Tikhonov regularization*. Optical Society of America, Suecia.
- Francisco Payri González, J. M. (2011). *Motores de combustión interna alternativos*. Valencia: Reverté, Universidad Politécnica de Valencia.
- Guillaume Legros, Q. W.-L. (2015). *Simultaneous soot temperature and volume fraction measurements in axis-symmetric flames by a two-dimensional modulated absorption/emission technique*. The Combustion Institute.
- Jose V. Pastor, J. M.-O. (2015). *Soot quantification of Single-Hole Diesel Sprays by Means of Extinction Imaging*. SAE international.

PRESUPUESTO

PR1. INTRODUCCIÓN

En este apartado se estimará el coste de tratamiento, análisis de datos y la realización del presente Trabajo, dividido en tres presupuestos parciales:

- Coste de mano de obra: Tratamiento y análisis de datos.
- Coste de amortización de los equipos utilizados.
- Coste de materiales o elementos no amortizables.

El coste total del Trabajo será la suma de los tres presupuestos parciales más un beneficio industrial del 6% y el 21% de I.V.A.

PR2. COSTES UNITARIOS

PR2.1 COSTE DE MANO DE OBRA: TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

Para calcular el coste de mano de obra se hará uso de un precio unitario, en este caso €/h, y se multiplicará por el tiempo dedicado.

En el presente Trabajo han participado el autor, más un tutor del Trabajo y un director del Trabajo. Considerando al autor como un Ingeniero Industrial sin experiencia, al tutor del Trabajo como un Ingeniero Industrial con cuatro años de experiencia y al director del Trabajo como un Ingeniero Director de Proyectos experimentado, se tienen los costes anuales que se detallan en las tablas PR2.1, PR2.2 y PR2.3:

Salario bruto	20.000 €
Seguridad Social (23.6%)	4.720 €
Formación Profesional (0.6%)	120 €
Fondo de Garantía Salarial (0.3%)	60 €
Desempleo (5.5%)	1.100 €
Coste anual	26.000 €

Tabla PR2.1: Coste anual del Ingeniero Industrial sin experiencia.

Salario bruto	28.000 €
Seguridad Social (23.6%)	6.608 €
Formación Profesional (0.6%)	168 €
Fondo de Garantía Salarial (0.3%)	84 €
Desempleo (5.5%)	1.540 €
Coste anual	36.400 €

Tabla PR2.2: Coste anual del Ingeniero Industrial con 4 años de experiencia.

Salario bruto	45.000 €
Seguridad Social (23.6%)	10.620 €
Formación Profesional (0.6%)	270 €
Fondo de Garantía Salarial (0.3%)	135 €
Desempleo (5.5%)	2.475 €
Coste anual	58.500 €

Tabla PR2.3: Coste anual del Ingeniero Director de Proyectos experimentado.

Considerando 12 meses, cada uno con 22 días laborables y 8 horas diarias, se tienen los costes horarios de cada Ingeniero del equipo, tal y como se recoge en la Tabla PR2.4:

Concepto	Coste unitario (€/h)
Coste horario I.Ind sin experiencia	12,311
Coste horario I.Ind. con 4 años de experiencia	17,235
Coste horario I.D.Proy. experimentado	27,699

Tabla PR2.4: Coste horario de cada miembro del equipo.

PR2.2 COSTE DE AMORTIZACIÓN DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS

Para la realización de este Trabajo, cada miembro del equipo ha utilizado un ordenador de características muy similares, cuya amortización se detalla en este apartado, además de las licencias necesarias de Matlab para los tres ordenadores. Estos costes unitarios se detallan en la Tabla PR2.5:

Concepto	Coste (€)	Periodo útil (años)	Periodo amortizado (meses)	Coste total (€)
Ordenador	1200	3	5	166,667
Licencia de Matlab	1800	1	5	750

Tabla PR2.5: Coste total por amortización de un ordenador utilizado.

Este coste total se divide entre la duración del proyecto en horas para obtener el coste unitario de un ordenador utilizado, como se muestra en la tabla PR2.6:

Coste total amortizado (€)	Duración proyecto (h)	Coste unitario (€/h)
916,667	550,000	1,667

Tabla PR2.6: Coste unitario de la amortización de uno de los ordenadores utilizados.

PR2.3 COSTE DE MATERIALES O ELEMENTOS NO AMORTIZABLES

En este apartado de costes se incluyen aquellos que se deben a materiales fungibles, que no son susceptibles de ser amortizados. En este Trabajo el único coste de este tipo es la electricidad consumida por los tres ordenadores personales, además de la climatización y la iluminación de 2 salas durante la duración del proyecto. El cálculo de los costes unitarios se muestra en las Tablas PR2.7 y PR2.8:

Concepto	Unidad	Cantidad
Potencia para un ordenador	KW	0,5
Potencia para climatizar una sala	KW	4
Potencia para iluminar una sala	KW	0,3

Tabla PR2.7: Potencia para un ordenador y una sala.

Concepto	Unidad	Rendimiento (unidades/h)	Precio unitario (€/unidad)	Coste unitario (€/h)
Energía ordenadores	KWh	0,5	0,14	0,07
Energía climatización	KWh	4	0,14	0,56
Energía iluminación	KWh	0,3	0,14	0,042

Tabla PR2.8: Coste unitario de los elementos no amortizables.

PR3. SUMA DE COSTES PARCIALES

Para hallar la suma de costes parciales del Trabajo se multiplican los costes unitarios obtenidos por la duración del trabajo (5 meses) y la dedicación por parte de cada persona del equipo, tal y como muestra la Tabla PR2.9.

Concepto	Unidad	Coste unitario total (€/h)	Dedicación (%)	Duración Trabajo (h)	Coste parcial (€)
Coste I.I. sin experiencia	€	14,349	100,000	550,000	7891,950
Coste I.I. con 4 años de experiencia	€	19,273	50,000	550,000	5300,075
Coste I.D.Proy experimentado	€	30,038	30,000	550,000	4956,270
Suma de costes parciales	€				18148,295

Tabla PR3.1: Suma de costes parciales de cada persona del equipo.

PR4. COSTE FINAL DEL TRABAJO

El coste final del Trabajo será la suma de los costes parciales más el 6% de beneficio industrial y el 21% de I.V.A, como se muestra en la Tabla PR4.1:

Suma de costes parciales	18148,295	€
Beneficio Industrial (6%)	1088,898	€
I.V.A (21%)	3811,142	€
Coste total del Trabajo	23048,33	€

Tabla PR4.1: Coste total del Trabajo como la suma de costes parciales, beneficio industrial e I.V.A.

Así, el coste total del Trabajo asciende a VEINTITRES MIL CUARENTA Y OCHO EUROS CON TREINTA Y TRES CÉNTIMOS DE EURO.