



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

**Grado en Ingeniería Mecánica**

**VISUALIZACIÓN DE PROCESOS DE  
COMBUSTIÓN CON CÁMARA DE  
ALTA VELOCIDAD**

**Autor:**

**Rodríguez González, Mauro**

**Tutor:**

**Dr. Melgar Bachiller, Andrés**

**Ingeniería Energética y  
Fluidomecánica**

**Valladolid, mayo 2018.**





## RESUMEN

El TFG consiste en la puesta a punto de una instalación para la visualización de la combustión premezclada en una cámara transparente mediante técnicas Schlieren. El trabajo desarrollado incluye un programa elaborado en MATLAB para el procesamiento de las imágenes obtenidas con una cámara de alta velocidad. Posteriormente se ha realizado un estudio de repetitividad de la técnica experimental y finalmente otro estudio de combustión de hidrogeno en diferentes condiciones de presión y dosado relativo. El análisis de resultados ha consistido en la cuantificación de las inestabilidades del frente de llama utilizando la información obtenida con el procesamiento de las imágenes.



## PALABRAS CLAVE

- Combustión premezclada.
- Técnicas Schlieren.
- MATLAB.
- Hidrogeno.
- Cámara de alta velocidad.



## Índice de Contenidos

1.	INTRODUCCIÓN .....	9
1.1.	ANTECEDENTES.....	9
1.2.	JUSTIFICACIÓN .....	9
1.2.1.	SISTEMA DE ENCENDIDO.....	9
1.2.2.	FILAMENTO LÁMPARA DE XENÓN .....	10
1.2.3.	PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN OBTENIDA.....	11
1.3.	OBJETIVOS.....	11
1.3.1.	POSICIONAR EL SALTO DE CHISPA EN UN PUNTO MÁS CENTRADO .....	11
1.3.2.	MEJORAR EL SISTEMA DE ILUMINACIÓN .....	11
1.3.3.	PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN OBTENIDA .....	11
1.3.4.	REALIZACIÓN DE UN ESTUDIO PARAMÉTRICO EXPERIMENTAL.....	12
2.	ESTADO DEL ARTE.....	13
2.1.	COMBUSTIÓN LAMINAR Y CELULAR .....	13
2.2.	FOTOGRAFÍA SCHLIEREN.....	14
2.3.	CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS DE ILUMINACIÓN .....	15
2.3.1.	NOCIONES FÍSICAS.....	15
2.4.	ALGORITMOS DE PROCESADO DE IMÁGENES .....	18
2.4.1.	INTRODUCCIÓN .....	18
2.4.2.	ALGORITMOS RANSAC .....	19
3.	INSTALACIÓN EXPERIMENTAL .....	21
3.1.	FUNDAMENTOS .....	21
3.2.	SISTEMA DE ILUMINACIÓN Y OBTURACIÓN DE RAYOS DESVIADOS.....	22
3.3.	SISTEMA DE LLENADO.....	23
3.3.1.	DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN.....	23
3.3.2.	PROCESO DE LLENADO.....	23
3.4.	CÁMARA DE COMBUSTIÓN Y SISTEMA DE ENCENDIDO .....	26
3.4.1.	CÁMARA DE COMBUSTIÓN .....	26
3.4.2.	SISTEMA DE ENCENDIDO.....	26
3.5.	CÁMARA CCD DE ALTA VELOCIDAD .....	27
4.	MEJORAS Y DESARROLLOS REALIZADOS EN LA INSTALACIÓN.....	31
4.1.	CENTRADO DE LA BUJÍA, ELECTRODO AL FONDO.....	31
4.2.	SISTEMA DE OBTURACIÓN .....	34
4.3.	SISTEMA DE ILUMINACIÓN .....	34
4.4.	AUMENTO DE LA RESOLUCIÓN DE LA INSTALACIÓN PIXEL Y NIVELES DE GRIS.....	36
4.5.	PROCESADO DE IMÁGENES.....	37



# VISUALIZACIÓN DE PROCESOS DE COMBUSTIÓN CON CÁMARA DE ALTA VELOCIDAD



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

Universidad de Valladolid

5.	RESULTADOS .....	49
5.1.	PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO PARAMÉTRICO .....	49
5.2.	RESULTADOS.....	50
5.2.1.	ESTUDIO PARAMÉTRICO .....	50
5.2.2.	ESTUDIO DE REPETITIVIDAD .....	56
6.	CONCLUSIONES .....	59
6.1.	CONCLUSIONES GENERALES.....	59
6.1.1.	POSICIONAMIENTO DE LOS ELECTRODOS .....	59
6.1.2.	CUCHILLA .....	59
6.1.3.	MEJORA DE LA RESOLUCIÓN.....	59
6.1.4.	PROGRAMA DE PROCESAMIENTO .....	59
6.1.5.	TIEMPO INVERTIDO EN CADA ETAPA DEL TRABAJO .....	59
6.2.	CONCLUSIONES SOBRE EL ESTUDIO PARAMÉTRICO .....	60
6.2.1.	MAYOR CELULARIDAD A MENOR DOSADO, MAYOR VELOCIDAD DEL FRENTE ....	60
7.	BIBLIOGRAFIA .....	61
7.1.	TRABAJOS Y PUBLICACIONES.....	61
7.2.	PÁGINAS WEB .....	61
7.3.	FIGURAS.....	61



## Índice de Figuras

Figura 1.1 Comparativa del sistema de encendido .....	10
Figura 1.2 Sombra del filamento de la lámpara de xenón.....	10
Figura 2.1 Combustión laminar de gas natural Fr 0.5 y combustión celular de hidrógeno Fr 1.....	14
Figura 2.2 Fotografía Schlieren de corrientes de convección en fluidos <sup>[1]</sup> .....	14
Figura 2.3 Fotografía Schlieren de productos de combustión de un gas <sup>[2]</sup> .....	15
Figura 2.4 Definición estereorradián <sup>[3]</sup> .....	16
Figura 2.5 Estereorradianes que componen la esfera completa <sup>[4]</sup> .....	16
Figura 2.6 Diferencia entre Lúmenes y Lux <sup>[5]</sup> .....	18
Figura 3.1 Esquema de la instalación de visualización Schlieren .....	21
Figura 3.2 Visualización Schlieren con obturación horizontal <sup>[6]</sup> .....	22
Figura 3.3 Eyector de vacío.....	24
Figura 3.4 Esquema de presiones de llenado .....	25
Figura 3.5 Esquema del circuito de encendido básico.....	27
Figura 3.6 Videocámara de alta velocidad Phantom v210 <sup>[7]</sup> .....	28
Figura 3.7 Ejemplo de fotografía con diferentes velocidades de obturación <sup>[8]</sup> .....	28
Figura 4.1 Esquema de una bujía de automoción .....	31
Figura 4.2 Detalle del gap de salto de chispa en una bujía .....	31
Figura 4.3 Bujía con electrodo modificada .....	32
Figura 4.4 Tapón con contra-electrodo .....	32
Figura 4.5 Cámara de combustión con electrodos montados.....	33
Figura 4.6 Detalle del electrodo y distintas formas de evitar el salto descentrado .....	33
Figura 4.7 Diafragma obturador regulable <sup>[9]</sup> .....	34
Figura 4.8 Diodo LED <sup>[10]</sup> .....	34
Figura 4.9 Niveles de gris con LED a media potencia .....	35
Figura 4.10 Niveles de gris con LED a máxima potencia.....	35
Figura 4.11 Comparación de resoluciones .....	36
Figura 4.12 Esquema general del procesamiento gráfico .....	37
Figura 4.13 Radio y centro de la cámara de combustión .....	38
Figura 4.14 Imagen del contorno del primer fotograma y su inversa .....	39
Figura 4.15 Imagen de contorno de una combustión y su fondo restado .....	40
Figura 4.16 Radio de combustión.....	40
Figura 4.17 Fracaso iteración RANSAC .....	41
Figura 4.18 Distintos resultados de binarización para diferentes niveles.....	42
Figura 4.19 Fotograma original y desviaciones estándar locales .....	43
Figura 4.20 Imagen de desviaciones estándar binarizada y adelgazada .....	44
Figura 4.21 Detalle del frente de llama .....	44
Figura 4.22 Superposición de captura de combustión con las células procesadas .....	45
Figura 4.23 Algoritmos de detección de bordes: Canny, Prewitt, Roberts, Sobel y zerocross.....	46
Figura 4.24 Visualización por pantalla del programa .....	47



## Índice de Gráficas

Gráfica 5-1 Barrido Dosado: Radio del frente de llama frente al Tiempo para distintos dosados..	50
Gráfica 5-2 Barrido Dosado: Número de células por unidad de área frente al Tiempo.....	51
Gráfica 5-3 Barrido Dosado: Número de células por unidad de área frente al Radio del frente de llama .....	52
Gráfica 5-4 Barrido Presión: Radio del frente en función del tiempo .....	53
Gráfica 5-5 Barrido Presión: Número de células por unidad de área frente al tiempo.....	54
Gráfica 5-6 Barrido Presión: Número de células por unidad de área frente al radio del frente de llama .....	55
Gráfica 5-7 Estudio Repetitividad: Radio del frente de llama frente al Tiempo.....	56
Gráfica 5-8 Estudio Repetitividad: Número de células por unidad de área frente al Tiempo .....	57
Gráfica 5-9 Estudio Repetitividad: Número de células por unidad de área frente al Radio del frente de llama .....	58





## Índice de Tablas

Tabla 5-1 Planteamiento del estudio paramétrico.....	49
Tabla 6-1 Distribución de tiempos por semanas (fechas aproximadas).....	60



**Universidad de Valladolid**

# VISUALIZACIÓN DE PROCESOS DE COMBUSTIÓN CON CÁMARA DE ALTA VELOCIDAD



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES



## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. ANTECEDENTES

En 2010, Miguel Santos Herrán en su Proyecto Fin de Carrera “Determinación de velocidades de combustión laminar mediante análisis de imágenes Schlieren y medida de presión en bombas de volumen constante” realizó un estudio comparando algunos métodos para el cálculo de las velocidades de combustión en la bomba de combustión a volumen constante MKII del *Institute of Engineering Thermofluids, Surfaces and Interfaces* de la *School of Mechanical Engineering* de la Universidad de Leeds (Reino Unido).

En 2016, Adrián Rodríguez Cubillo en su Trabajo de Fin de Grado “Instalación de visualización de combustión premezclada mediante técnicas Schlieren” tuvo como fin la construcción y montaje de una instalación para poder visualizar los procesos de combustión en una cámara a volumen constante.

La mejora de dicha instalación, así como el desarrollo de software para el procesamiento de la información recogida son la base de éste proyecto.

### 1.2. JUSTIFICACIÓN

#### 1.2.1. SISTEMA DE ENCENDIDO

El sistema de encendido en los motores de combustión interna alternativos (MCIA) de encendido provocado (MEP), consiste en aportar la energía necesaria en el seno de la mezcla combustible para provocar su ignición.

Esto puede conseguirse mediante diversas técnicas, pero la más empleada consiste en producir una chispa con un componente conocido como bujía.

Por su simplicidad y versatilidad, el mismo sistema es empleado en la cámara de combustión a volumen constante.

El proceso de combustión no es simétrico, existe una transferencia de calor a través de las superficies de cámara allí donde el frente entra en contacto cuando éste se inicia desde el lateral de la cámara y por tanto se requiere de modificaciones que lleven el origen del frente lo más al centro de la misma como sea posible.

En la figura puede verse el antes y después de las modificaciones implantadas, así como la mejora general del aparato óptico.

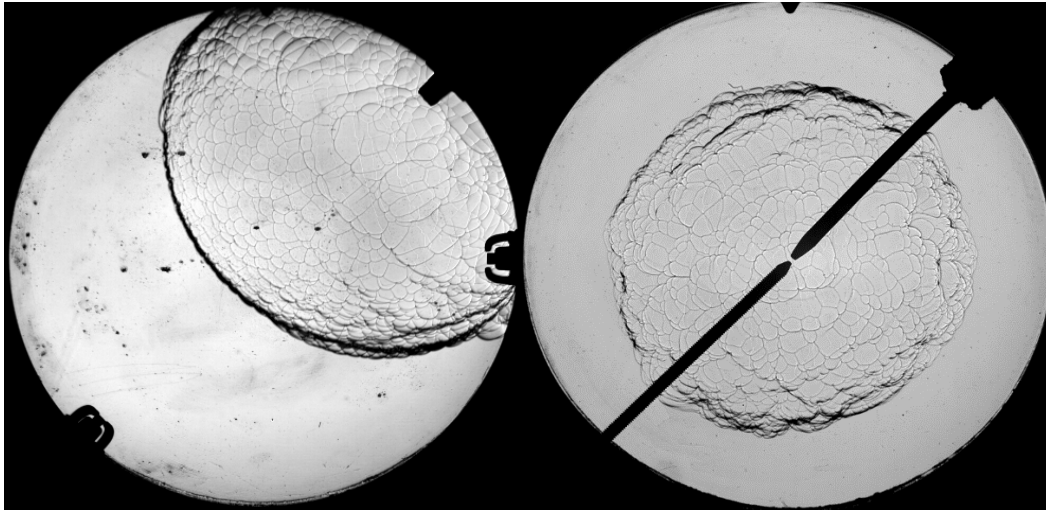


FIGURA 1.1 COMPARATIVA DEL SISTEMA DE ENCENDIDO

### 1.2.2. FILAMENTO LÁMPARA DE XENÓN

Dada la naturaleza del estudio, la importancia del sistema óptico: sus elementos, puesta a punto y funcionamiento es fundamental.

Como sistema de iluminación del sistema se emplea una fuente de luz de Xenón para endoscopios con adaptador de fibra óptica.

Aunque es suficientemente adecuada, ha sido detectada la presencia de una sombra en las capturas de combustiones de ensayos previos.

Ésta sombra tiene origen en el filamento de la lámpara de Xenón y dificulta el procesado de la información de las imágenes obtenidas.



FIGURA 1.2 SOMBRA DEL FILAMENTO DE LA LÁMPARA DE XENÓN

Además, dado que éste instrumento es en su origen de uso médico, la vida útil de la que dispone la lámpara se ve reducida sustancialmente por



motivos de seguridad. Esto supone una inconveniencia en las labores de mantenimiento y un gasto que se puede reducir.

### 1.2.3. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN OBTENIDA

El principal interés, así como la diferencia de la instalación de visualización mediante técnicas Schlieren frente a otras disposiciones es la capacidad de observar el proceso de combustión.

Sin embargo, la información visual que se obtiene del proceso se limita a las observaciones cualitativas, así como las conclusiones derivadas de éstas que el investigador considere oportunas.

## 1.3.OBJETIVOS

En esta sección se listan los objetivos específicos propuestos en el trabajo.

### 1.3.1. POSICIONAR EL SALTO DE CHISPA EN UN PUNTO MÁS CENTRADO

Se desea instalar un sistema de encendido que permita que se inicie la combustión lo más cercana al centro de la cámara posible.

### 1.3.2. MEJORAR EL SISTEMA DE ILUMINACIÓN

Se propone mejorar el sistema de iluminación presente para obtener imágenes más nítidas y/o libres de las manchas o interferencias que puedan depender de dicho sistema.

### 1.3.3. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN OBTENIDA

Se pretende desarrollar una aplicación de software para el procesamiento gráfico y análisis de las combustiones.

Como objetivos principales del análisis se espera poder:

- Determinar la velocidad de propagación del frente de llama.
- Contabilizar el nivel de celularidad mediante alguna métrica.



#### 1.3.4. REALIZACIÓN DE UN ESTUDIO PARAMÉTRICO EXPERIMENTAL

Con motivo de validación de las herramientas desarrolladas se plantea realizar un estudio paramétrico experimental que permita comparar los resultados obtenidos con información ya recogida en la literatura.



## 2. ESTADO DEL ARTE

### 2.1. COMBUSTIÓN LAMINAR Y CELULAR

La combustión es la reacción química que se produce entre el oxígeno (comburente) y un material oxidable (combustible) que viene acompañada de desprendimiento de energía y habitualmente éste se manifiesta por incandescencia o llama.

Existen distintas formas de clasificación de las llamas:

- Dependiendo de la forma en que se encuentran los reactivos:
  - Llamas premezcladas: Combustible y comburente se hallan mezclados previamente a la combustión. Característico de los motores de encendido provocado (MEP).
  - Llamas de difusión: La combustión se produce por intercambio de moléculas en la zona de reacción. Característico de los motores de encendido por compresión (MEC).
- Dependiendo del carácter del flujo:
  - Turbulentas: Presentan ciertas características como:
    - Irregularidad: Magnitudes como velocidad, temperatura, presión y composición son irregulares espacial y temporalmente. El flujo se presenta de forma caótica e impredecible.
    - Difusividad y disipación: Aumentan considerablemente los fenómenos de transporte de masa, cantidad de movimiento y energía. Además, la turbulencia tiende a mantenerse (una vez se ha iniciado ya no vuelve a ser laminar), necesitando un aporte de energía que de no mantenerse tiende a su extinción.
    - Tridimensionalidad: Siempre son irrotacionales y tridimensionales.
  - Laminares: Brevemente, las llamas laminares son aquellas que no son turbulentas.

En la mayoría de aplicaciones tecnológicas de interés, entre las que se incluyen los motores de combustión interna, las llamas presentes en los procesos de combustión son siempre turbulentas.

Éste trabajo se centrará principalmente en combustiones premezcladas laminares y celulares.

Para más información consultar: Determinación de velocidades de combustión laminar mediante análisis de imágenes Schlieren y medida de presión en bombas de volumen constante. Autor: Miguel Santos Herrán

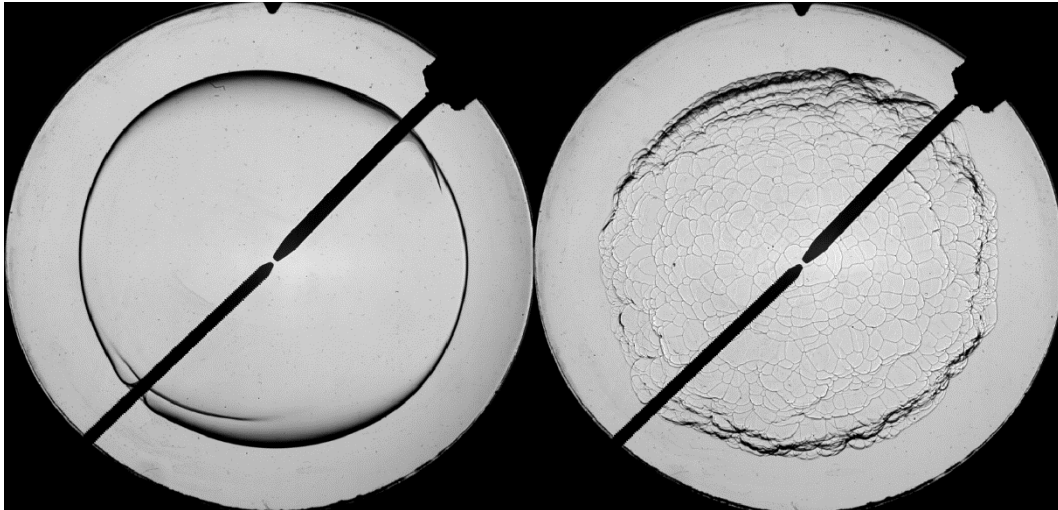


FIGURA 2.1 COMBUSTIÓN LAMINAR DE GAS NATURAL Fr 0.5 Y COMBUSTIÓN CELULAR DE HIDRÓGENO Fr 1  
La combustión se denomina celular cuando aparece en el frente de llama un cambio en la textura, pasa de ser liso y uniforme a desarrollarse unas células abovedadas como las de la Figura 2.1

## 2.2.FOTOGRAFÍA SCHLIEREN

El sistema Schlieren es una técnica óptica que permite la visualización de medios transparentes basada en sus cambios de densidad.

Es aplicable típicamente a medios líquidos:

Ej.: Visualización de corrientes de convección en fluidos

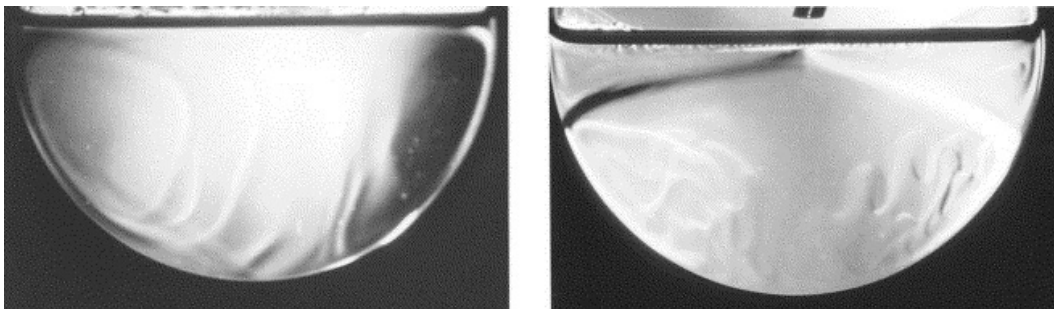
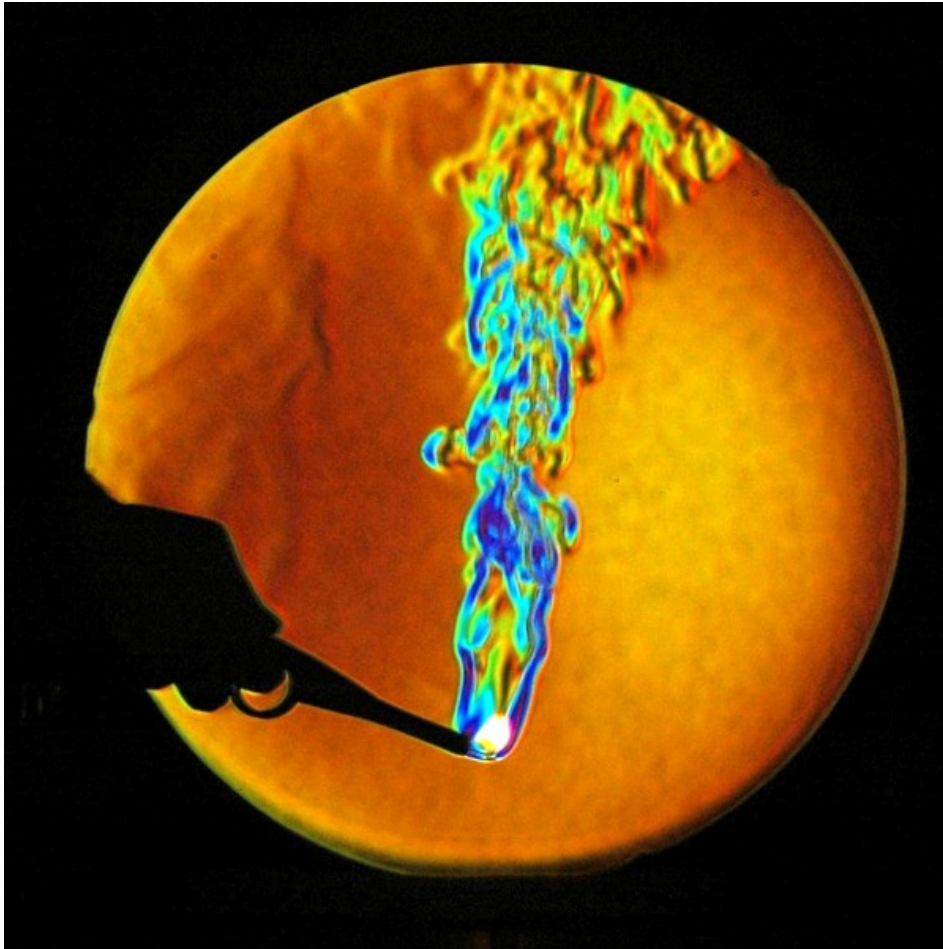


FIGURA 2.2 FOTOGRAFÍA SCHLIEREN DE CORRIENTES DE CONVECCIÓN EN FLUIDOS<sup>[1]</sup>

O medios gaseosos:

Ej.: Flujo de gases quemados procedentes de una llama.



FIGURA 2.3 FOTOGRAFÍA SCHLIEREN DE PRODUCTOS DE COMBUSTIÓN DE UN GAS<sup>[2]</sup>

Su uso se extiende en diversos campos tecnológicos: como método de verificación de la calidad constructiva de lentes en el campo de la óptica hasta el estudio de flujos y ondas de choque en el de la aerodinámica.

Para más información consultar: Instalación de visualización de combustión premezclada mediante técnicas Schlieren. Autor: Adrián Rodríguez Cubillo

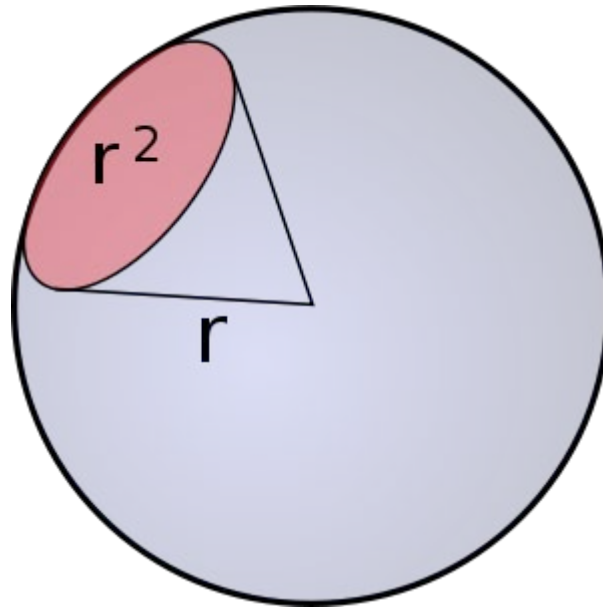
## 2.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS DE ILUMINACIÓN

### 2.3.1. NOCIONES FÍSICAS

#### 2.3.1.1. MAGNITUDES CARACTERÍSTICAS Y DEFINICIONES

Esterorradián (sr): Es la unidad del sistema internacional para la medida de ángulos sólidos. Es el análogo tridimensional del radián.

Se define para una esfera de radio  $r$  como la porción contenida en una superficie de su área de valor  $r^2$  y su centro.

FIGURA 2.4 DEFINICIÓN ESTERERRADIÁN<sup>[3]</sup>

De tal forma que:

$$\Omega = \frac{S}{r^2}$$

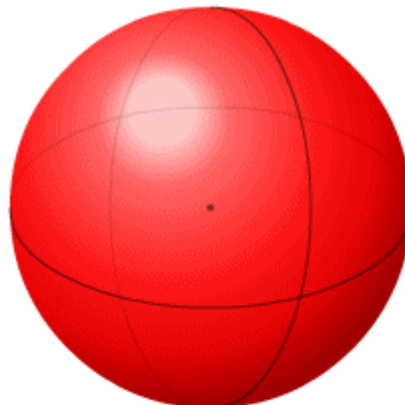
Es decir, un estereorradián:

$$1sr = \frac{r^2}{r^2}$$

El ángulo sólido correspondiente a la esfera completa será:

$$\Omega = \frac{4\pi r^2}{r^2}$$

$$\Omega = 4\pi sr$$



$$4\pi sr$$

FIGURA 2.5 ESTERERRADIANES QUE COMPONEN LA ESFERA COMPLETA<sup>[4]</sup>



Las principales magnitudes luminotécnicas son:

- Flujo radiante: Es la medida de la potencia de radiación electromagnética. Incluye todo el espectro de longitudes de onda (infrarrojos, espectro visible y ultravioleta)
- Flujo luminoso: Es la medida de la potencia luminosa percibida, es decir, ajustada de acuerdo a la sensibilidad que tiene el ojo humano a las diferentes longitudes de onda comprendidas únicamente en el espectro visible.

Su unidad de medida es el Lumen ( $lm$ ).

- Intensidad luminosa: Es la densidad de luz por ángulo sólido. Su unidad de medida es la candela luminosa ( $cd$ ): se define como la intensidad luminosa emitida por una fuente de radiación monocromática, de frecuencia  $540 \cdot 10^{12} Hz$ , y cuya intensidad energética es de  $1/683 W$  por estereorradián ( $sr$ ).

Se relaciona con el Lumen según:

$$1 lm = 1 cd \cdot sr$$

- Cantidad de luz: Es una magnitud derivada que mide el flujo luminoso por unidad de tiempo ( $lm/h$ )
- Iluminancia: Es la cantidad de flujo luminoso recogido sobre una superficie por unidad de área.

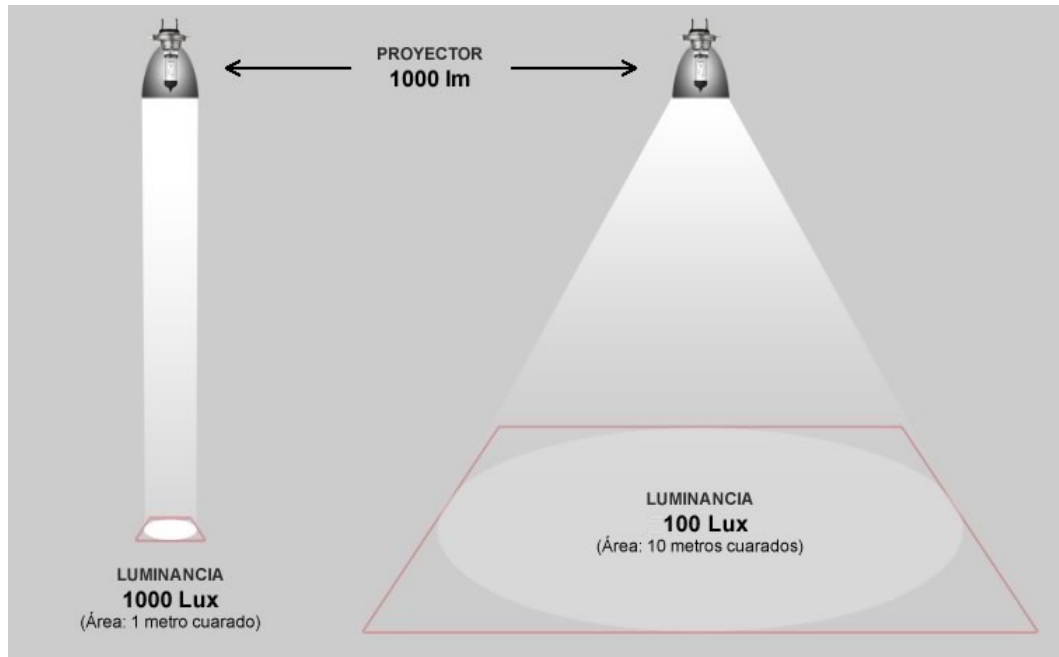
Su unidad de medida es el lux ( $lx$ ).

Es equivalente al lumen por metro cuadrado.

Una fuente luminosa como un proyector puede ser capaz de proporcionar un determinado flujo luminoso, pero si éste es difundido, la iluminancia de la superficie corresponderá a la ecuación:

$$1 lx = 1 lm/m^2$$

Ej.: Un foco de  $1000 lm$  concentra su haz sobre una superficie de  $1 m^2$ . Por lo tanto, la iluminancia en esa superficie será de  $1000 lx$  mientras que si su flujo luminoso es dispersado a lo largo de una superficie de  $10 m^2$  la iluminancia en esa región corresponderá a  $100 lx$

FIGURA 2.6 DIFERENCIA ENTRE LÚMENES Y LUX<sup>[5]</sup>

### 2.3.1.2. PRINCIPIOS FÍSICOS

Principio de Huygens: *Cada punto de un frente de onda primario sirve como foco o fuente de ondas esféricas secundarias que avanzan con una velocidad y frecuencia igual a las de la onda primaria. El frente de onda primario al cabo de un cierto tiempo es la envolvente de estas ondas elementales.*

Principio de Fermat: *La trayectoria seguida por la luz para pasar de un punto a otro es aquella para la cual el tiempo de recorrido es mínimo.*

## 2.4. ALGORITMOS DE PROCESADO DE IMÁGENES

### 2.4.1. INTRODUCCIÓN

La visión artificial es la disciplina encargada de adquirir, analizar y procesar información del mundo real.

Sus inicios se remontan a 1961, Larry Roberts creó un programa con el fin de ver una estructura de bloques para analizar su contenido.

El desarrollo de herramientas, así como de algoritmos eficientes de procesado ha ido de la mano con el de sistemas de computación más potentes y rápidos y está experimentando actualmente un boom con su aplicación en sistemas de conducción autónoma en el sector de la automoción.



## 2.4.2. ALGORITMOS RANSAC

### 2.4.2.1. INTRODUCCIÓN

El algoritmo RANSAC (Random Sample Consensus) es un método iterativo no determinista que tiene como fin obtener un modelo matemático de un set de datos que pueden presentar una distribución de ruido anormal, típicamente no Gaussiana con media distinta de cero.

### 2.4.2.2. APLICACIÓN

Se pueden emplear algoritmos RANSAC para determinar circunferencias como las de la cámara de combustión, así como la del frente de llama en cada instante de tiempo y también para identificar la posición de los electrodos.

### 2.4.2.3. CALCULO DE CIRCUNFERENCIAS

La tarea consiste en identificar en una nube de puntos una determinada circunferencia, para ello:

Primero, se guardan en dos vectores las coordenadas de todos los puntos mediante una función.

Segundo, mediante un bucle iterativo se realizan las siguientes tareas:

Se selecciona un número determinado de puntos al azar, 3 para las circunferencias, del vector coordenadas.

Se construye la circunferencia que pasa por dichos puntos.

Sobre esta circunferencia y con una tolerancia dada:  $Radio \pm t$  se calcula el número de puntos que quedan encerrados dentro de esta franja. Éstos son los llamados Inliers, que son guardados en un vector.

Al finalizar el bucle, el tercer y último paso, será ajustar nuevamente por mínimos cuadrados utilizando los inliers para obtener la circunferencia buscada.

El objetivo del proceso iterativo consiste en encontrar el mayor número de inliers a base de guardar el mejor valor obtenido.

Si se realiza la búsqueda el suficiente número de veces, se espera poder encontrar la mejor circunferencia que se ajusta a la nube de puntos original.



**Universidad de Valladolid**

# VISUALIZACIÓN DE PROCESOS DE COMBUSTIÓN CON CÁMARA DE ALTA VELOCIDAD



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

### 3. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

La instalación con la que el departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica cuenta, se halla en el laboratorio del Área de máquinas y motores térmicos y consiste en una estructura con montaje en Z.

En la siguiente figura puede verse un esquema de la instalación y disposición de los componentes y subsistemas principales.

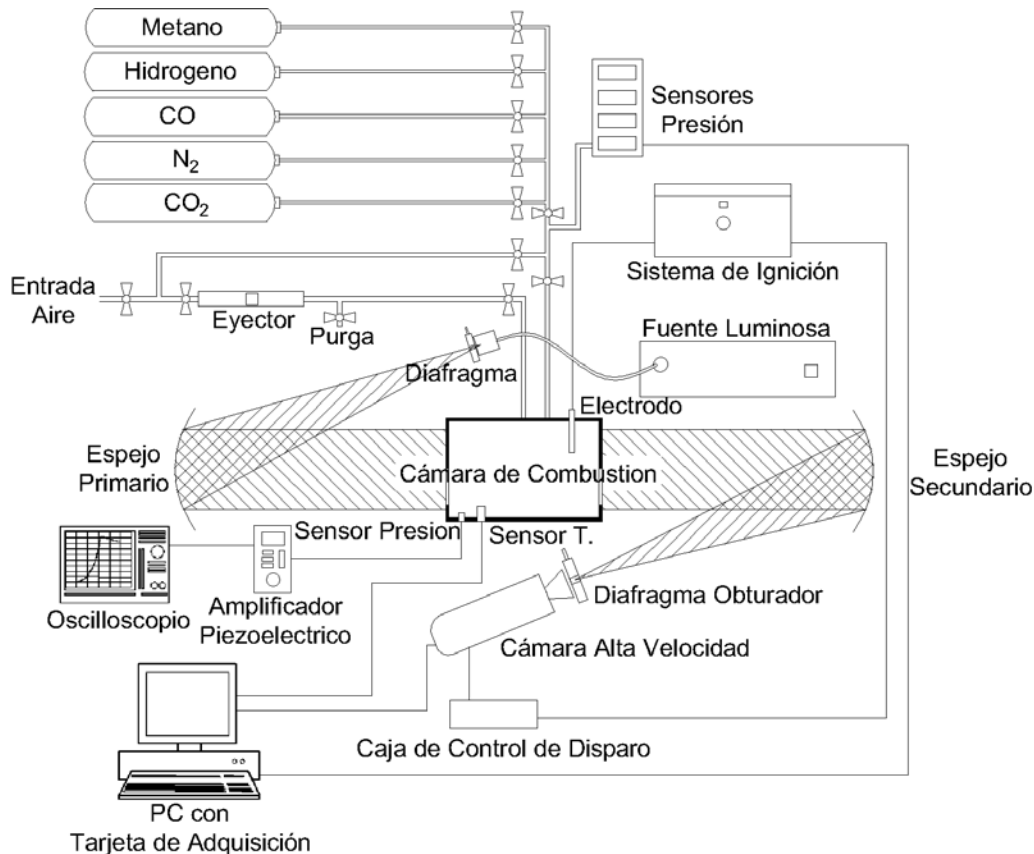


FIGURA 3.1 ESQUEMA DE LA INSTALACIÓN DE VISUALIZACIÓN SCHLIEREN

#### 3.1.FUNDAMENTOS

A continuación, se describen las partes de la instalación y su funcionamiento:

La fuente de luz puntual emite un haz de luz que se propaga en la dirección del carril superior hasta incidir en el espejo primario.

La luz se reflejará y será colimada, es decir, formará un haz de luz paralelo de acuerdo con el principio de Huygens.

Después, el haz atravesará la cámara de combustión o zona de observación en la que cierta proporción de los rayos serán desviados de su

eje paralelo de acuerdo con los gradientes de densidad presentes en el medio de estudio.

El haz de luz ya perturbado se refleja a continuación en el espejo secundario y es nuevamente concentrado en un punto.

El sistema de obturación dejará pasar una cierta cantidad de luz del haz.

Por último, las imágenes son recogidas por la videocámara.

### 3.2.SISTEMA DE ILUMINACIÓN Y OBTURACIÓN DE RAYOS DESVIADOS

El sistema de iluminación de la instalación se compone de la fuente de luz y un diafragma a la salida de la fuente de luz.

El objetivo de éste diafragma es controlar la cantidad de luz (iluminancia) que llega al espejo, abriendo o cerrando su iris. Cuanto más grande sea el iris, menor puntual será la fuente y como consecuencia se producirá mayor aberración óptica.

El sistema de obturación de rayos desviados (cuchilla) consiste en un dispositivo que tiene como finalidad eliminar aquellos rayos.

Dependiendo del sistema utilizado, el resultado de visualización será distinto.

Como puede verse en la figura, una imagen Schlieren con obturación mediante cuchilla en disposición horizontal, presentará zonas de sombra e iluminación en la dirección de ese mismo eje.



FIGURA 3.2 VISUALIZACIÓN SCHLIEREN CON OBTURACIÓN HORIZONTAL<sup>[6]</sup>





### 3.3.SISTEMA DE LLENADO

#### 3.3.1. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN

El sistema de llenado comprende todos los elementos desde las botellas de almacenamiento hasta los conductos de llenado de la cámara.

Los combustibles, así como otros gases inertes se almacenan en botellas de gas de pequeño volumen.

Los combustibles disponibles son:

- Hidrógeno (H<sub>2</sub>)
- Metano (CH<sub>4</sub>)
- Monóxido de Carbono (CO)

Las botellas de los gases combustibles y tóxicos se hallan en armarios estancos con sistema de venteo de seguridad.

Los gases inertes disponibles son:

- Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)
- Nitrógeno (N<sub>2</sub>)

Como comburente, se dispone de una línea de aire común a laboratorios de la escuela. Se trata de aire húmedo con una composición aproximada de 21% O<sub>2</sub> y 79% N<sub>2</sub> a una presión máxima de 8 bar.

#### 3.3.2. PROCESO DE LLENADO

Para un combustible o mezcla de combustibles con un dosado relativo y una presión total inicial dados se requiere saber las cantidades de los componentes a introducir en la cámara.

Este cálculo se realiza mediante el método de presiones parciales de Dalton.

Para una mezcla de gases, la presión total contenida en un recipiente es igual a la suma de las presiones parciales de los distintos gases.

$$P_{Total} = P_{Gas\ 1} + P_{Gas\ 2} + P_{Gas\ 3} + \dots$$

Donde la presión parcial de cada gas se obtiene mediante la ecuación de gases ideales:

$$P_{Gas} = \frac{n_{Gas}RT}{V}$$

El volumen a llenar es el de la cámara y se hace la suposición de que las moléculas de los gases no ocupan ningún volumen para considerarlo éste constante.

La temperatura puede suponerse constante e igual a la de la cámara de combustión y las velocidades de llenado son bajas, por lo que es aceptable despreciar los efectos de calentamiento del gas debido a disipación viscosa.

Recogiendo todo lo anterior, la presión del gas es proporcional a la cantidad contenida en moles:

$$P_{Gas} = n_{Gas} \cdot cte$$

La fracción molar de un gas en una mezcla se define como:

$$X_{Gas\ 1} = \frac{n^{\circ} \text{ moles Gas 1}}{n^{\circ} \text{ moles Gas 1} + n^{\circ} \text{ moles Gas 2} + n^{\circ} \text{ moles Gas 3} + \dots}$$

Por lo tanto, para todos los gases de la mezcla:

$$\sum_{i=1}^n X_{Gas\ i} = 1$$

Y la presión parcial de cada gas para la Ley de Dalton se puede expresar como:

$$P_{Gas\ i} = X_{Gas\ i} \cdot P_{Total}$$

Sustituyendo se puede expresar como:

$$P_{Total} = P_{Total} \cdot X_{Gas\ 1} + P_{Total} \cdot X_{Gas\ 2} + P_{Total} \cdot X_{Gas\ 3} + \dots$$

Para conseguir el vacío en la cámara se utiliza un eyector en la línea de salida de la cámara.

Por efecto Venturi causa una depresión lo suficientemente baja como para vaciar la cámara.

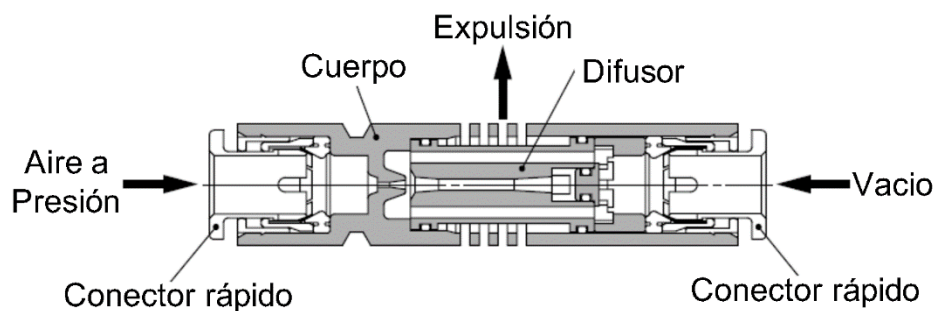


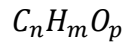
FIGURA 3.3 EYECTOR DE VACÍO

La presión de la línea de aire oscila de 6 bar a 8 bar y comúnmente se consigue una presión media de vacío de unos 0.095 bar (Presión absoluta).

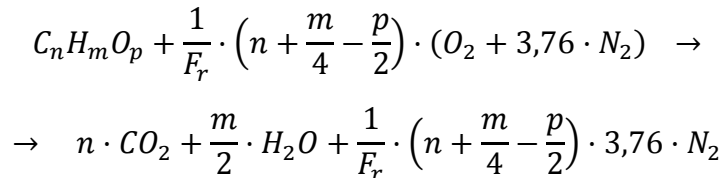
Después de cada combustión, se realizan sucesivos vaciados y llenados de aire limpio con motivo de que se garantice que, cuando se inicie el

siguiente llenado de la cámara, ésta solo contenga aire y así poder calcular las presiones de llenado como se detalla a continuación.

La reacción de combustión genérica para cualquier combustible de formulación química:



Puede expresarse como:



Donde los coeficientes n, m y p son los índices estequiométricos del combustible o índices equivalentes en caso de ser una mezcla de varios gases, en cuyo caso se calculan como:

$$C_n H_m O_p = C_{n1} H_{m1} O_{p1} + C_{n2} H_{m2} O_{p2} + C_{n3} H_{m3} O_{p3} + \dots$$

Suponiendo que no se forman óxidos de nitrógeno ni monóxido de carbono u otros.

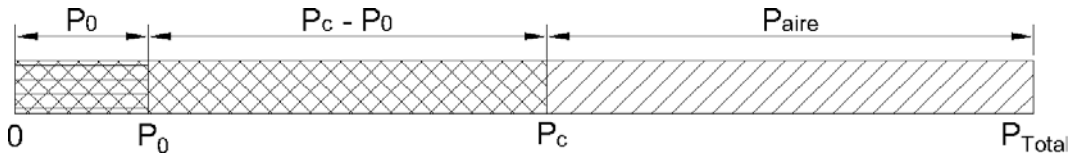


FIGURA 3.4 ESQUEMA DE PRESIONES DE LLENADO

La presión del combustible correspondiente será la diferencia en la presión de llenado y la presión remanente del vacío:

$$P_c - P_0 = X_c \cdot P_{Total}$$

Donde:

$$X_c = \frac{n^\circ \text{ moles combustible}}{n^\circ \text{ moles combustible} + n^\circ \text{ moles aire}}$$

$$X_c = \frac{1}{1 + \left( \frac{(1 + 3.76)}{F_r} \cdot \left( n + \frac{m}{4} - \frac{p}{2} \right) \right)}$$

Por lo tanto, la presión del combustible o de una mezcla de combustibles se calcula como:

$$P_c = P_0 + P_{Total} \cdot \frac{1}{1 + \left( \frac{(4.76)}{F_r} \cdot \left( n + \frac{m}{4} - \frac{p}{2} \right) \right)}$$



### 3.4. CÁMARA DE COMBUSTIÓN Y SISTEMA DE ENCENDIDO

#### 3.4.1. CÁMARA DE COMBUSTIÓN

La cámara de combustión es un sistema cerrado a volumen constante.

Consiste en un bloque octogonal prismático de acero con un vaciado cilíndrico central que compone la cámara. Este hueco es cerrado en ambos extremos por ventanas de cuarzo, y éstas sostenidas por tapas metálicas con pernos cuya estanqueidad es asegurada gracias a juntas tóricas de altas prestaciones.

Cuenta con diversos taladros pasantes que comunican la cámara con el exterior cuyas funciones se listan a continuación:

Un orificio superior roscado que aloja un inyector de combustible.

Dos orificios roscados opuestos para inserción de bujías.

Un orificio a media altura roscado para inserción de bujía o captador de presión.

Un orificio a media altura roscado opuesto al anterior para la posición del termopar.

Dos orificios opuestos para el llenado y vaciado de la cámara.

#### 3.4.2. SISTEMA DE ENCENDIDO

El sistema de encendido de la cámara, circuito y componentes es similar al presente en cualquier automóvil. Los principales elementos son: Condensador, elemento de salto de chispa (bujía), interruptor, y bobina para elevar la tensión en la bujía a 20.000 V.

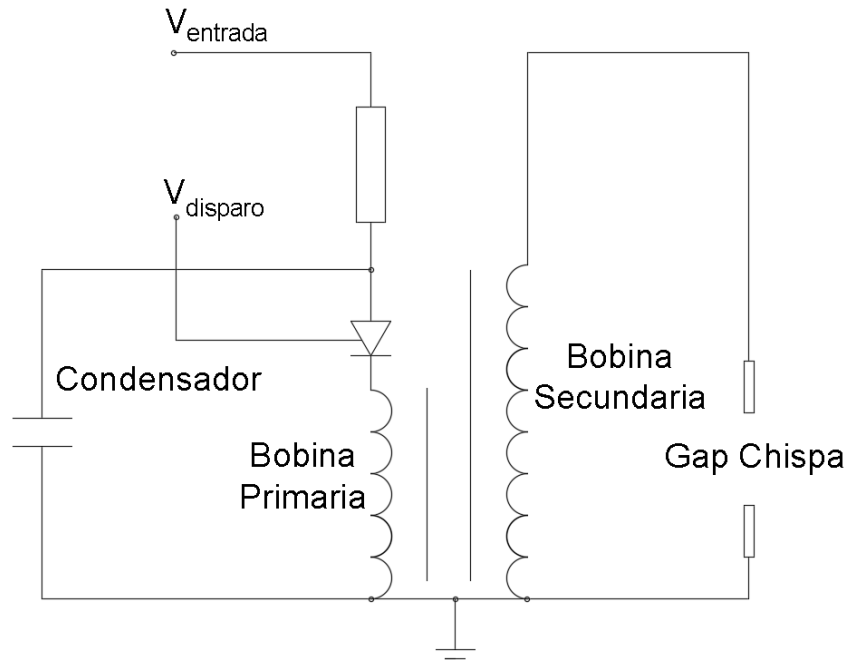


FIGURA 3.5 ESQUEMA DEL CIRCUITO DE ENCENDIDO BÁSICO

### 3.5. CÁMARA CCD DE ALTA VELOCIDAD

La videocámara se trata de una Phantom v210.

Sus especificaciones más importantes se recogen a continuación:

- Resolución máxima: 1280 x 800. Corresponde al tamaño máximo que pueden tener los fotogramas (en píxeles).
- Velocidad de captura máxima: 300000 *fps* (fotogramas por segundo). Está sujeta a la resolución de captura, de tal forma que para mayores resoluciones la velocidad máxima se disminuye.
- Mínimo tiempo de obturación: 2  $\mu$ s.
- Resolución de píxel (nivel de gris): 12 *bit*.
- Velocidad a 1 Megapíxel (Resolución máxima): 2000 *fps*.



FIGURA 3.6 VIDEOCÁMARA DE ALTA VELOCIDAD PHANTOM V210<sup>[7]</sup>

El CCD (charge-coupled device) o dispositivo de carga acoplada es el sensor encargado de captar la imagen.

Está compuesto por una matriz de diminutas células fotovoltaicas en las que el número de electrones producidos (carga acumulada) es proporcional a la cantidad de luz registrada.

El tiempo de obturación hace referencia al tiempo que la cámara permite que las células acumulen la carga, de tal forma que a cuanto mayor tiempo mayor cantidad de luz registrada pero también menor nitidez.

Este efecto de distorsión es mayor cuanto mayor sea la velocidad del sujeto de estudio.



FIGURA 3.7 EJEMPLO DE FOTOGRAFÍA CON DIFERENTES VELOCIDADES DE OBTURACIÓN<sup>[8]</sup>



Dado que los frentes de llama, así como las combustiones en general, son muy rápidas, el tiempo de obturación de la cámara es uno de los parámetros principales a tener en cuenta.



Universidad de Valladolid

# VISUALIZACIÓN DE PROCESOS DE COMBUSTIÓN CON CÁMARA DE ALTA VELOCIDAD



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES



## 4. MEJORAS Y DESARROLLOS REALIZADOS EN LA INSTALACIÓN

### 4.1. CENTRADO DE LA BUJÍA, ELECTRODO AL FONDO

La tarea consiste preparar una bujía clásica de automoción como la representada en la figura.

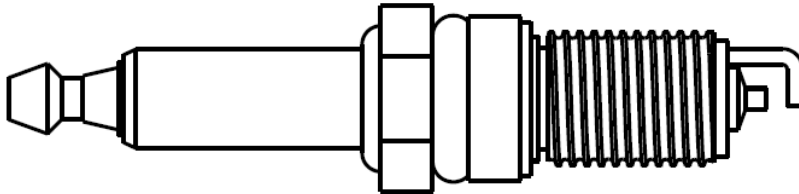


FIGURA 4.1 ESQUEMA DE UNA BUJÍA DE AUTOMOCIÓN

El salto de chispa en este tipo de bujías ocurre en el entrehierro del electrodo y el electrodo de masa y se denomina gap o luz.

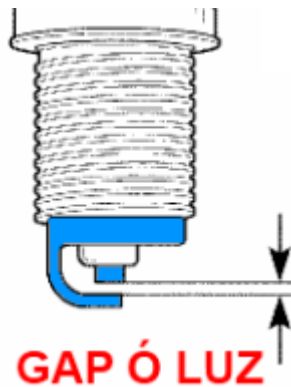


FIGURA 4.2 DETALLE DEL GAP DE SALTO DE CHISPA EN UNA BUJÍA

El electrodo de masa forma parte del cuerpo de acero de la bujía y hace contacto con donde quiera que ésta esté roscada, formando así la toma de tierra del circuito.

En motores de automoción, el bloque motor hace de masa o toma a tierra y similarmente, esta función, en la cámara de combustión a volumen constante, la realiza el bloque.

La protuberancia que cubre el electrodo es eliminada, exponiendo así, parte del cuerpo del electrodo. Además, se retira también un segmento de la rosca para exponer el aislamiento cerámico de la misma manera.

El objetivo consistía en prevenir que ocurriera un salto de chispa inesperado entre el extremo del electrodo y el material roscado cercano a él. Más adelante se detallan los problemas y soluciones derivados de esto.

Se realizan roscados de  $2,5\text{mm}$  tanto en el extremo del electrodo original de la bujía como en el interior de tubo de acero inoxidable de  $3\text{mm}$  de diámetro. El tubo es medido, cortado a longitud y achaflanado a  $15^\circ$  en su extremo libre.

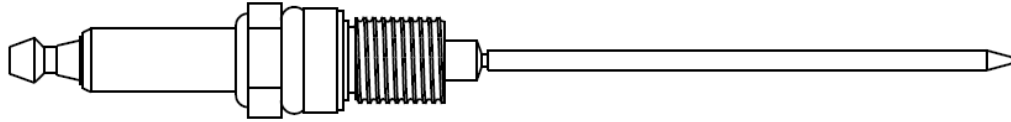


FIGURA 4.3 BUJÍA CON ELECTRODO MODIFICADA

Como contra-electrodo se mecaniza un tapón del mismo diámetro y forma similar a la bujía. Para además facilitar así las labores de montaje y mantenimiento. Se realiza un taladro ciego sobre él y un roscado con diámetro de  $3\text{mm}$  para acomodar varilla roscada de acero, también de  $3\text{mm}$  de diámetro, que se corta a la longitud necesaria para garantizar la presencia del gap de chispa.

La punta es igualmente achaflanada, para precisar más el punto de salto.

El taladro ciego de unos  $5\text{mm}$  de profundidad tiene espacio suficiente para regular la longitud del contra-electrodo. Se dispone de una longitud aproximada de:  $d \approx 3\text{mm}$ .

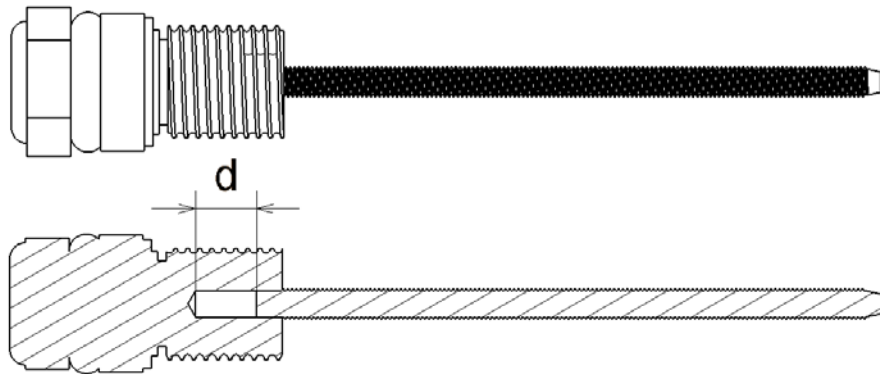


FIGURA 4.4 TAPÓN CON CONTRA-ELECTRODO

La cámara de combustión con los electrodos montados:

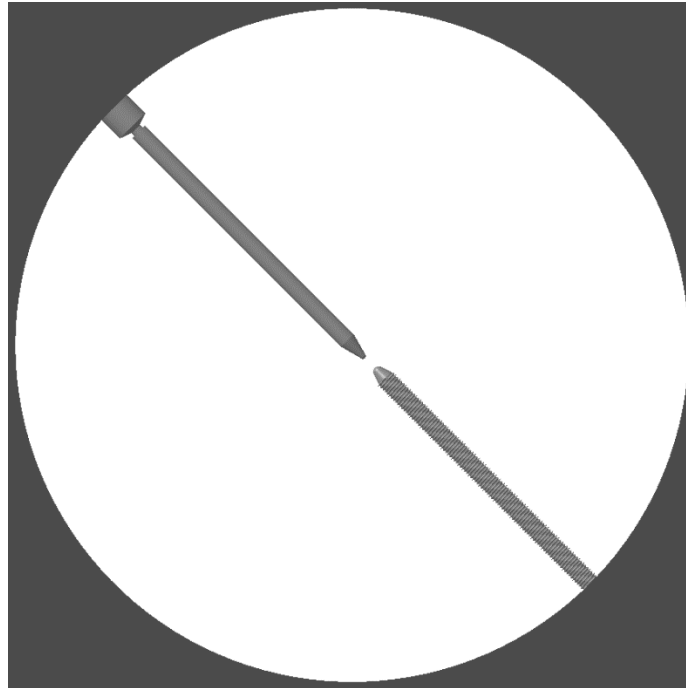


FIGURA 4.5 CÁMARA DE COMBUSTIÓN CON ELECTRODOS MONTADOS

Aunque la distancia entre electrodos es menor que la presente entre el electrodo y la pared de la cámara, en sucesivas combustiones realizadas el salto de chispa no se produjo desde el centro.

Con fin de solventarlo se intentaron implementar varias opciones:

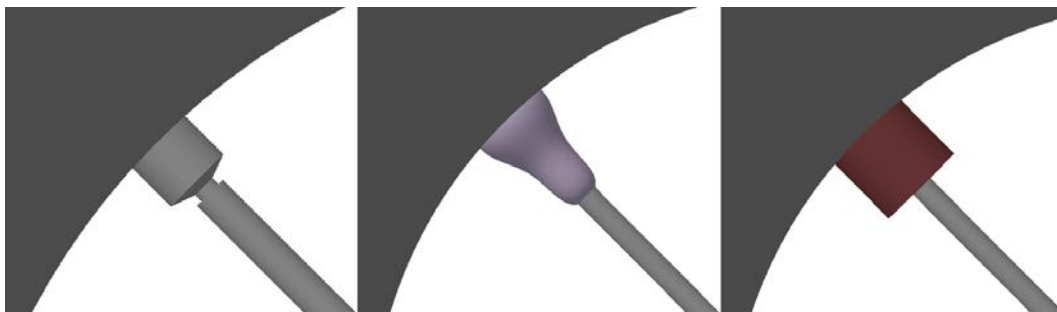


FIGURA 4.6 DETALLE DEL ELECTRODO Y DISTINTAS FORMAS DE EVITAR EL SALTO DESCENTRADO

La primera de ellas consistió en cubrir el hueco con silicona aislante (centro de la figura).

Desafortunadamente esta no dio resultado y la chispa conseguía encontrar un camino a lo largo de la superficie de la silicona.

La solución se halló, por fin, al emplear un separador de Viton, que es un termo-polímero utilizado en aplicaciones químicas por su alta resistencia a disolventes, hidrocarburos, ácidos, altas temperaturas, es auto extingible y no propaga la llama.

Desde su instalación, el salto de chispa ocurre en el hueco previsto entre electrodos consistentemente y no se cree que pueda suponer otros problemas derivados.

#### 4.2.SISTEMA DE OBTURACIÓN

Se adquiere un diafragma óptico.



FIGURA 4.7 DIAFRAGMA OBTURADOR REGULABLE<sup>[9]</sup>

Éste sustituirá al sistema utilizado anteriormente, sobre el que presenta varias ventajas:

Es regulable: El iris tiene una apertura regulable de  $1\text{mm}$  a  $30\text{mm}$  de diámetro, lo cual permite tener un mayor control.

Auto centrado: La construcción del soporte y poste de montaje asegura la concentricidad del haz de luz procedente del espejo con la videocámara.

#### 4.3.SISTEMA DE ILUMINACIÓN

Se adquiere un diodo LED de luz blanca con disipador de calor y lente focalizadora.



FIGURA 4.8 DIODO LED<sup>[10]</sup>

Las características principales se listan a continuación:

- Potencia (a  $350mA$ ):  $1.09 W$
- Potencia (a  $700mA$ ):  $2.17 W$
- Tensión directa: de  $2.7 V$  a  $3.5 V$
- Flujo luminoso (a  $350mA$ ):  $< 164 lm$
- Angulo de dispersión:  $12^\circ \pm 6^\circ$
- Color: Blanco frio
- Temperatura de color:  $5700k$

Se han determinado experimentalmente, que los mejores resultados dependen principalmente de la intensidad luminosa y su ángulo de apertura. De tal forma, que el nivel de iluminación sea lo más uniforme posible (evite efectos linterna con regiones más intensas o tenues) dentro del área cubierta por el espejo primario.

Además, un mayor nivel de intensidad luminosa permite reducir el tiempo de exposición u obturación de la videocámara, pues de ésta forma los condensadores del CCD se cargan más rápidamente, proporcionando como resultado imágenes más nítidas a mayores velocidades.

La intensidad luminosa del LED puede regularse mediante la fuente de alimentación pudiendo visualizarse la diferencia:



FIGURA 4.9 NIVELES DE GRIS CON LED A MEDIA  
POTENCIA

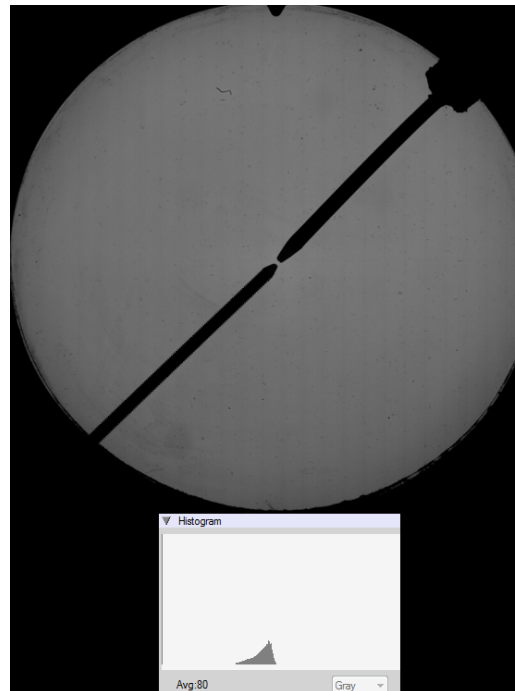


FIGURA 4.10 NIVELES DE GRIS CON LED A  
MÁXIMA POTENCIA

Con la fuente a media potencia puede verse que la iluminación es escasa.

En el histograma se puede ver la distribución de niveles de gris de la imagen. El histograma será más estrecho a cuanto más uniforme sea el nivel de iluminación. Idealmente debería ser un único valor finito.

Aumentando al máximo la fuente se incrementa el nivel medio de gris.

#### 4.4. AUMENTO DE LA RESOLUCIÓN DE LA INSTALACIÓN PIXEL Y NIVELES DE GRIS

Con motivo de aprovechamiento máximo de los recursos se decide buscar aumentar la resolución de la videocámara a su máxima resolución posible.

El objetivo óptico instalado en la videocámara permitía capturar un tamaño de pantalla de resolución:  $640 \times 480$  *pixeles*, pues éste objetivo de mediana distancia enfocaba la cámara de combustión en ésta pequeña región. Con un objetivo macro los bordes de la cámara de combustión se encierran cómodamente en un tamaño de ventana equivalente a  $832 \times 800$  *pixeles*, así se obtiene el mejor detalle posible en las capturas.

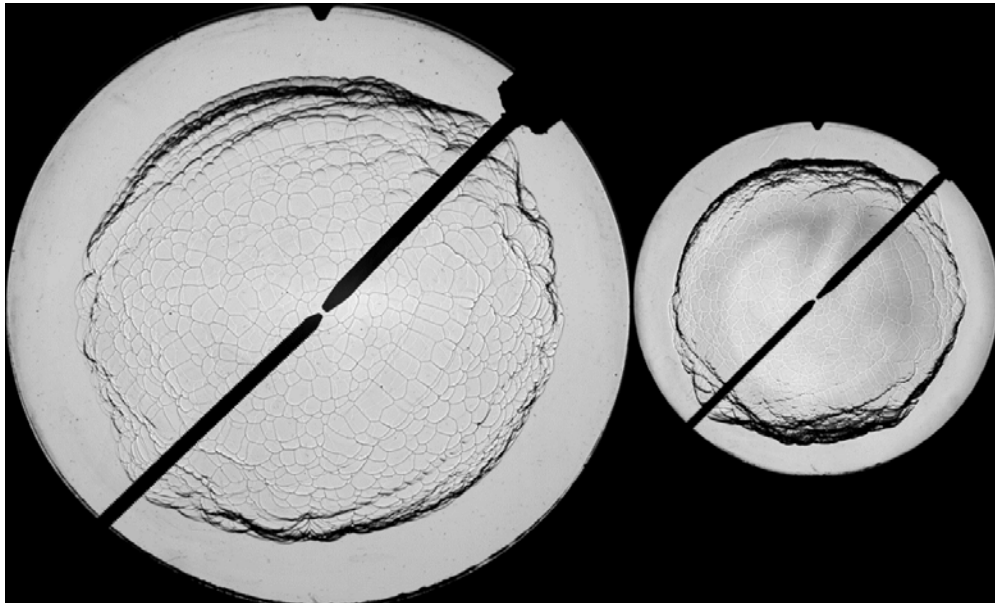


FIGURA 4.11 COMPARACIÓN DE RESOLUCIONES

#### 4.5. PROCESADO DE IMÁGENES

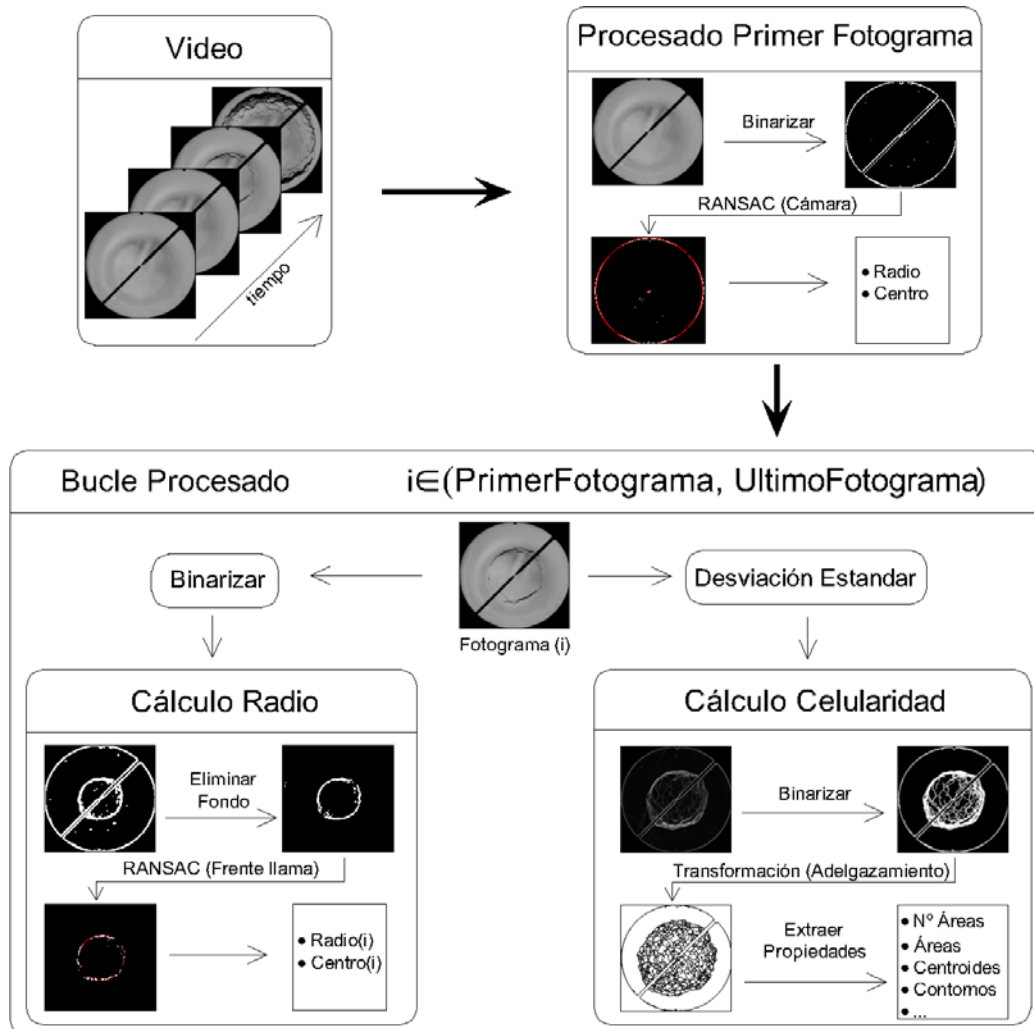


FIGURA 4.12 ESQUEMA GENERAL DEL PROCESAMIENTO GRÁFICO

A continuación, se detalla el diagrama de flujo seguido en el procesamiento gráfico.

Adquisición de video: La captura de la videocámara es guardada como archivo de video (.avi). Éste será leído fotograma a fotograma desde el inicio de la combustión hasta su conclusión. Para su análisis se ha optado por utilizar el entorno de programación Matlab, que cuenta con librerías de procesamiento gráfico que recogen diversas funciones útiles.

En primer lugar, se crea un objeto tipo video que contiene todos los datos relacionados con el archivo de video como por ejemplo el número total de fotogramas.

En segundo lugar, se extrae y almacena el primer fotograma de la captura.

A continuación, se calcula el radio de la cámara de combustión y las coordenadas de su centro sobre éste fotograma. Para ello se calculan los

contornos de la imagen del primer fotograma y se aplica el algoritmo RANSAC para cálculo de circunferencias.

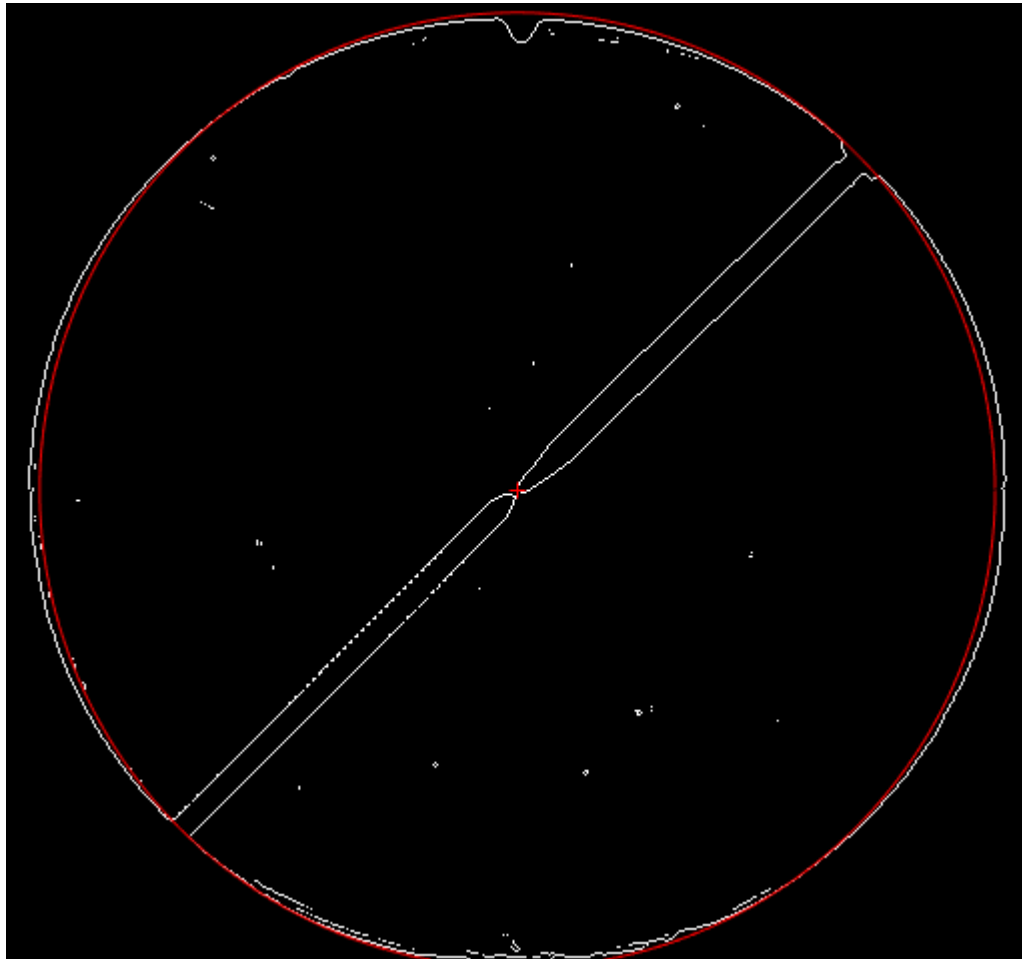


FIGURA 4.13 RADIO Y CENTRO DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN

Además de los parámetros obtenidos, éste paso sirve también como método de diagnóstico para comprobar el ajuste óptico: Se verifica el centrado de los electrodos. También puede verse una forma elíptica en lugar de circular de la cámara de combustión, pues la circunferencia calculada no se ajusta completamente.

Esto se cree que se debe principalmente a la distorsión causada por el montaje en Z y no se puede corregir.

Como resultado de aplicación del algoritmo, se obtiene el radio de la circunferencia (en píxeles), y las coordenadas del centro. Se define así la variable Calibración como la relación entre el radio de la cámara en píxeles y el radio real en centímetros:

$$Calibracion = \frac{RadCam}{Radio\ Camara} \left[ \frac{pixel}{cm} \right]$$

Será utilizada posteriormente en las representaciones gráficas finales.



En tercer lugar, se inicia el bucle de procesamiento, a cada iteración se realizan tres tareas:

Cálculo del radio de frente de llama:

El primer paso consiste en suprimir el borde de la cámara de combustión y los electrodos. Para ello se realiza la operación:

$$Fotograma_i = ContornoFotograma_i \cdot (1 - ContornoFotograma_0)$$

$ContornoFotograma_0$  es una imagen binaria, es decir, consiste en una matriz del tipo:

$$ContornoFotograma_{n \times m}$$

Donde  $n$  y  $m$  es la resolución de la imagen en píxeles y cada elemento de la matriz puede contener un uno o un cero, donde uno representa el color blanco y cero el negro.

La operación  $(1 - ContornoFotograma_0)$ , por lo tanto, invierte los colores.

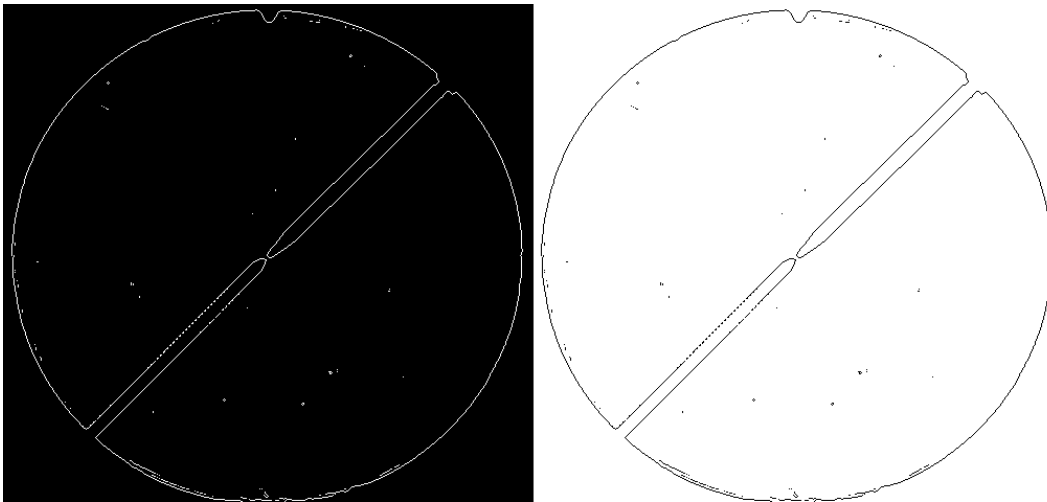


FIGURA 4.14 IMAGEN DEL CONTORNO DEL PRIMER FOTOGRAMA Y SU INVERSA

La inversa es multiplicada elemento a elemento por la imagen de contorno de cada fotograma dando como resultado el contorno del frente de llama aislado.

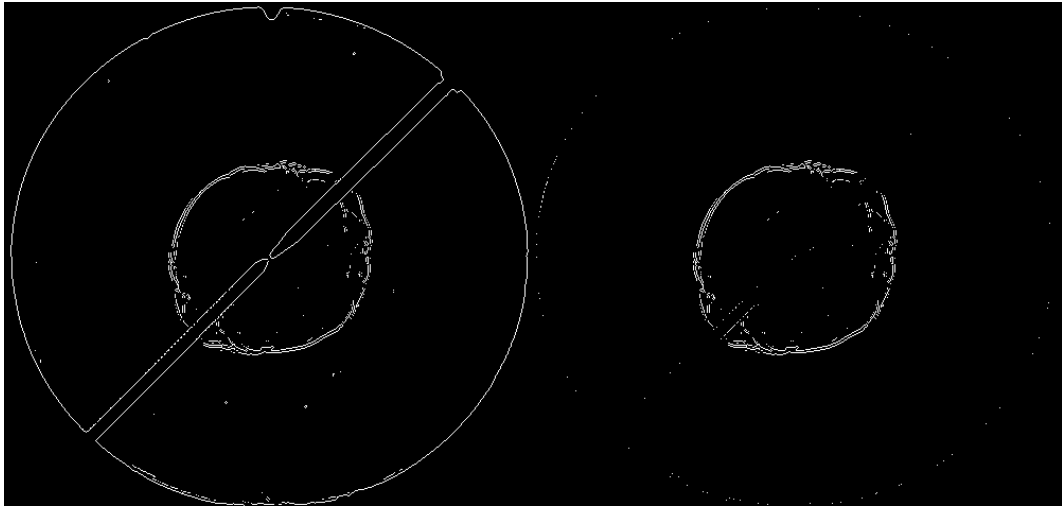


FIGURA 4.15 IMAGEN DE CONTORNO DE UNA COMBUSTIÓN Y SU FONDO RESTADO

El segundo paso consiste en aplicar nuevamente el algoritmo RANSAC para cálculo de circunferencias al frente de llama aislado.

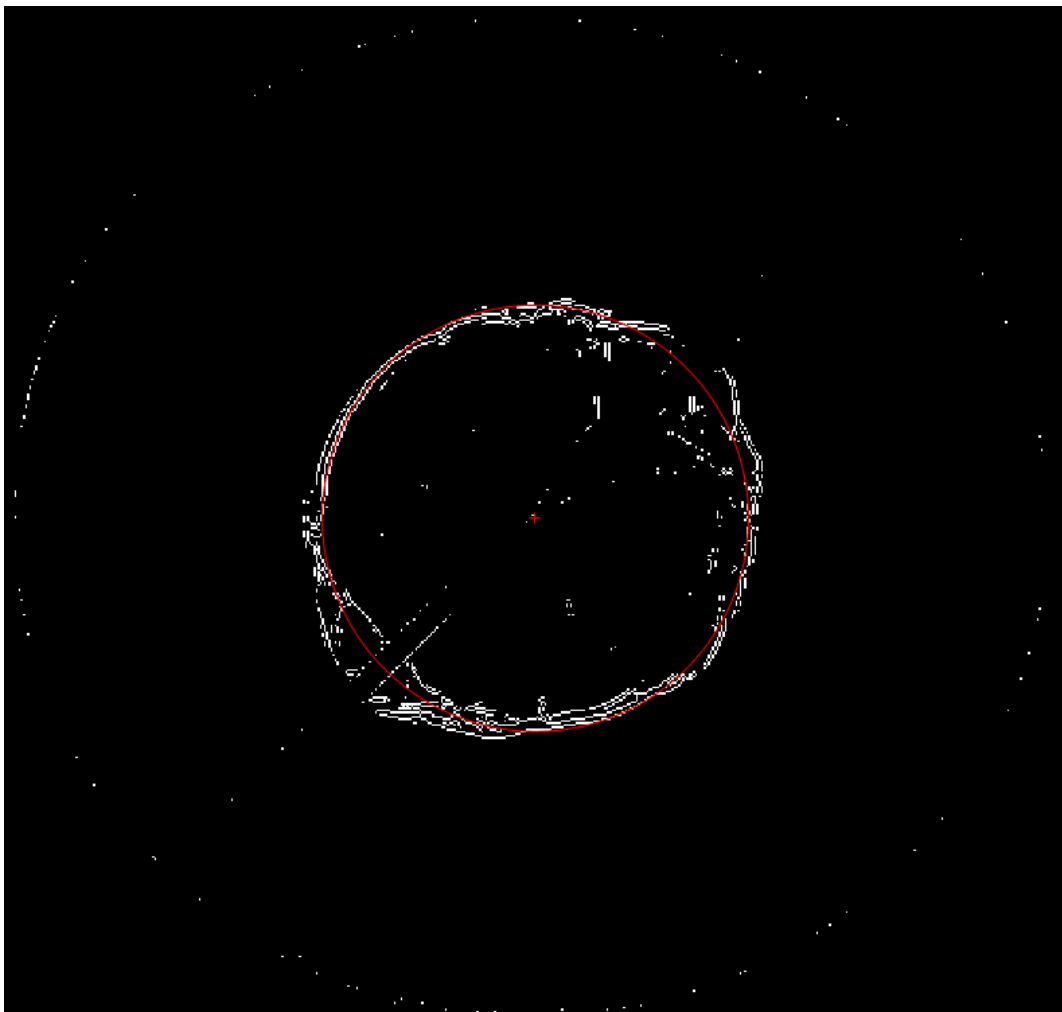


FIGURA 4.16 RADIO DE COMBUSTIÓN

Durante el transcurso de la combustión el algoritmo puede fallar, encontrando circunferencias que no se corresponden con el frente de llama.

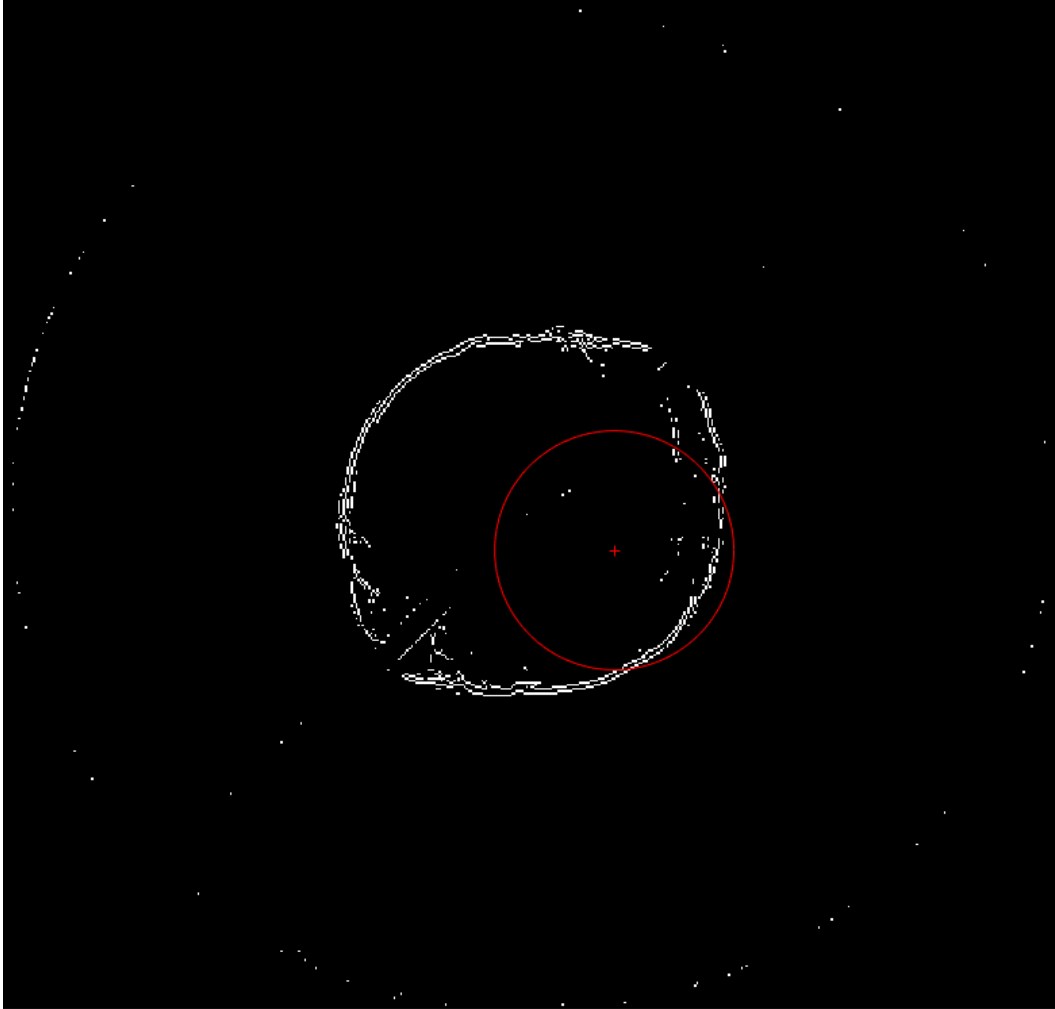


FIGURA 4.17 FRACASO ITERACIÓN RANSAC

Para evitar que esto ocurra se establece un criterio para tomar únicamente como válidos aquellos radios que sean mayores que los del fotograma anterior.

También se puede ajustar el número mínimo de iteraciones que realiza el algoritmo en cada fotograma. Ésta estrategia presenta la desventaja de ralentizar el procesamiento, especialmente para radios grandes con muchos puntos de contorno (inliers).

El tercer paso consiste simplemente en almacenar los radios obtenidos en función del tiempo.

Cálculo de celularidad:

Para poder contabilizar el nivel de celularidad de la combustión se ha acordado establecer como métrica el número de células por unidad de superficie dentro de una región de estudio.

Para ello, primero se procesa cada fotograma para crear una imagen binarizada en la que se puedan distinguir adecuadamente las células según se desarrollan en la superficie del frente de llama.

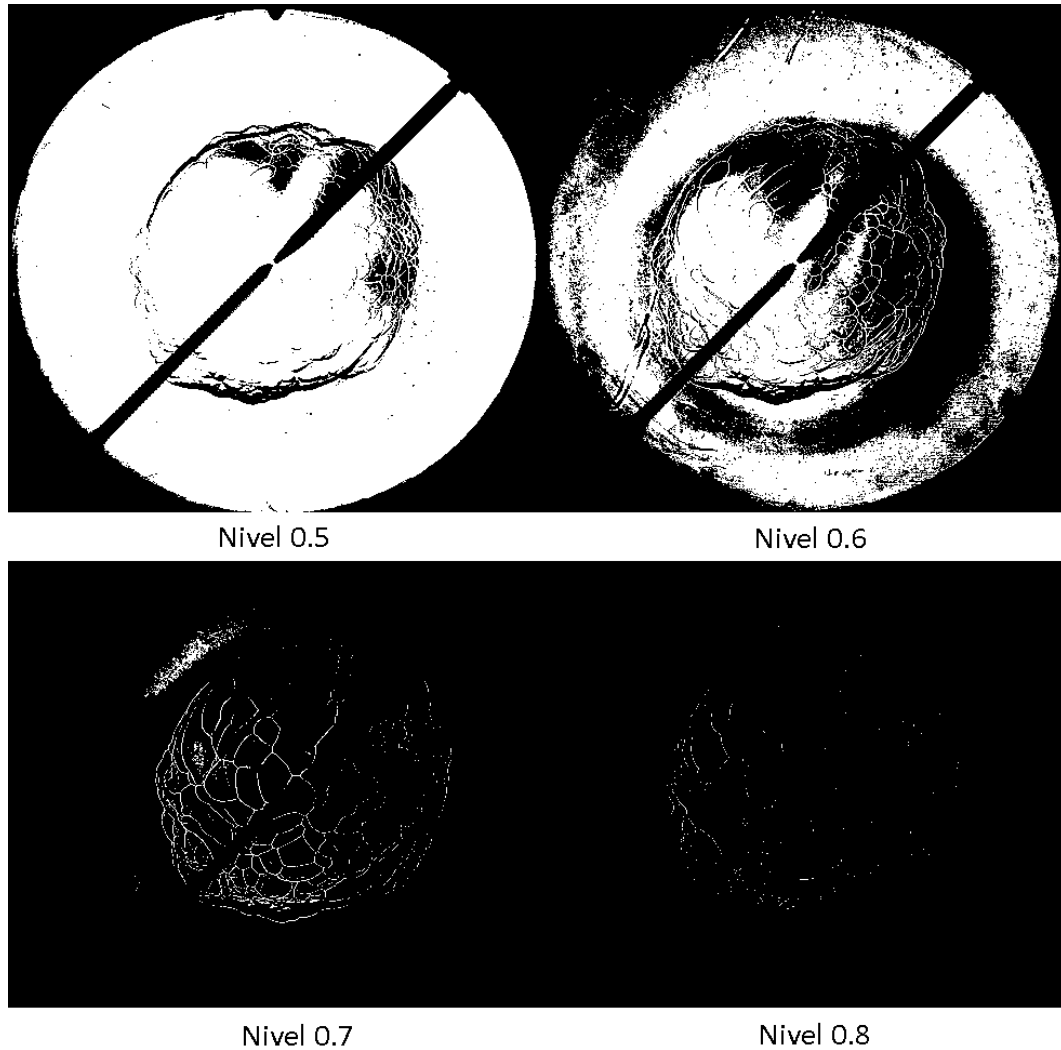


FIGURA 4.18 DISTINTOS RESULTADOS DE BINARIZACIÓN PARA DIFERENTES NIVELES

MatLab es capaz de convertir una imagen a color o escala de grises en binaria con una función en la que se puede especificar un cierto nivel.

Éste nivel puede tomar valores entre 0 y 1 y establece el nivel de iluminancia de corte a partir de la cual los píxeles con valores superiores pasaran a valer 1 (color blanco) y los demás 0 (color negro).

Como se puede ver en la figura, se presenta la problemática de escoger un nivel arbitrario hasta que el resultado sea el deseado. Éste planteamiento, aunque válido, puede dar problemas si no se escoge adecuadamente el nivel o incluso durante el transcurso de la combustión puede convertirse en necesario cambiarlo.

Para evitar eso se opta por otra solución de binarizado:

Consiste en, primeramente, calcular la matriz de desviación estándar local, es decir, cada pixel contendrá la desviación estándar del bloque de 3x3 pixeles que lo rodea.

Para los pixeles pertenecientes a los bordes de la imagen se usa simetría por reflexión: Se supone que los vecinos fuera de la imagen tienen el mismo valor que sus simétricos dentro, no obstante, éstos son irrelevantes en éste estudio.

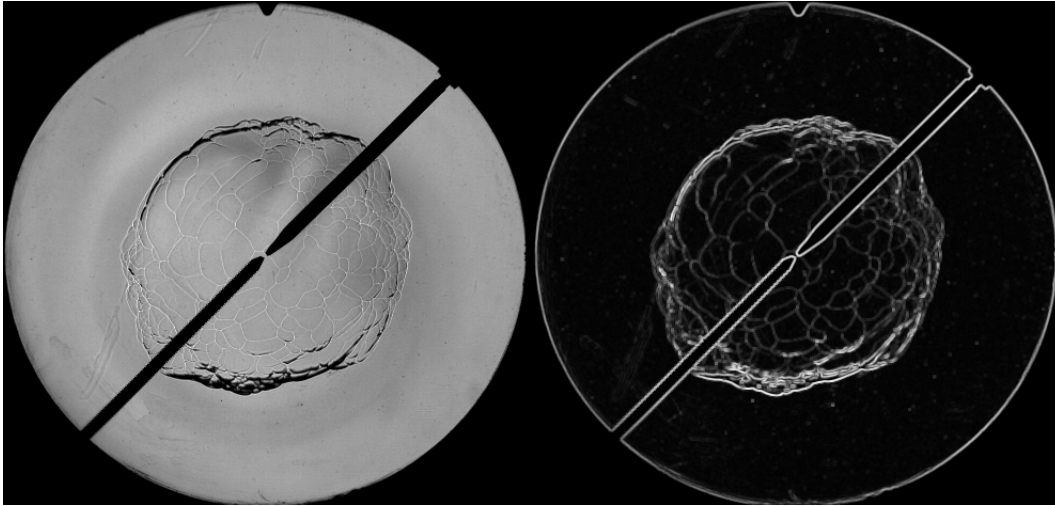


FIGURA 4.19 FOTOGRAMA ORIGINAL Y DESVIACIONES ESTÁNDAR LOCALES

Después la imagen se binariza con un nivel bajo de tal forma que los bordes de las células se presenten claros.

A continuación, se ejecuta una transformación morfológica conocida como “thinning” o adelgazamiento.

La principal ventaja de éste método es que no depende del nivel de iluminación general en la cámara puesto que la desviación estándar local de cada pixel solo tiene en cuenta sus vecinos y, por lo tanto, su valor será relativo. Como puede verse en la figura de las desviaciones estándar el nivel de gris de los bordes de células es casi tan alto como el de, por ejemplo, los electrodos.

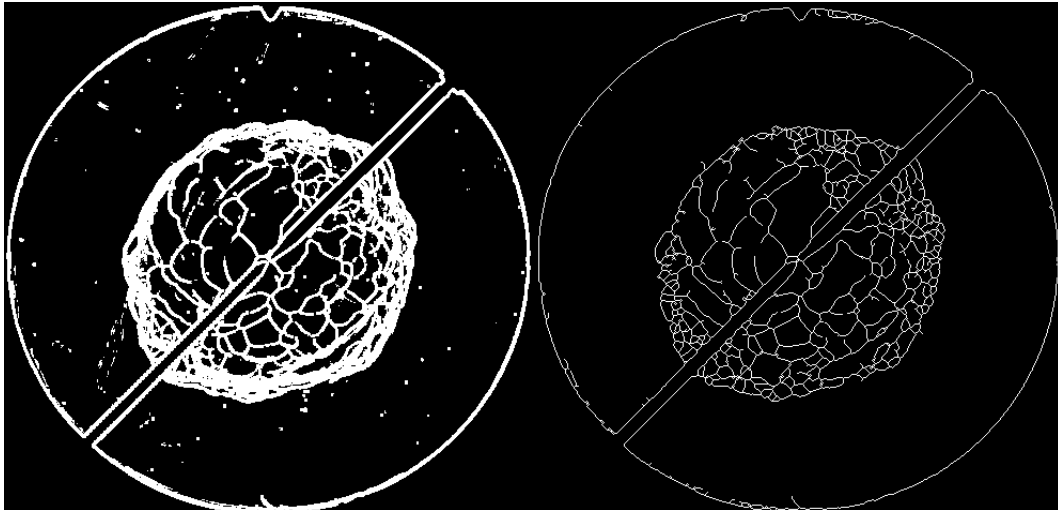


FIGURA 4.20 IMAGEN DE DESVIACIONES ESTÁNDAR BINARIZADA Y ADELGAZADA

Aparece, sin embargo, un inconveniente de ésta técnica: Las regiones próximas a la frontera del frente se ven altamente distorsionadas dada la curvatura. Estas regiones no tienen un gradiente de contraste lo suficientemente alto como para que el algoritmo sea capaz de diferenciar adecuadamente los bordes.

En la figura se muestra un detalle de una superposición de los bordes de las células obtenidos por el procesamiento con el frente de llama real, como puede verse, casi ninguna célula es encontrada exitosamente.

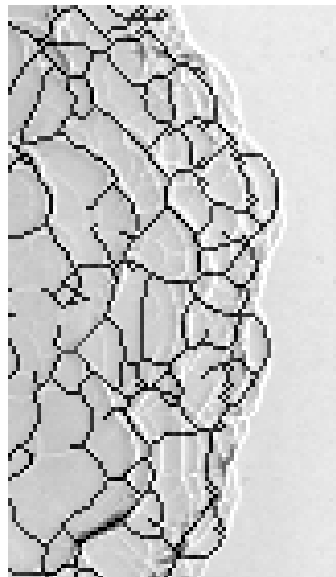


FIGURA 4.21 DETALLE DEL FRENTE DE LLAMA

Se resuelve éste problema restringiendo la región de estudio al 80% del radio del frente de llama obtenido.

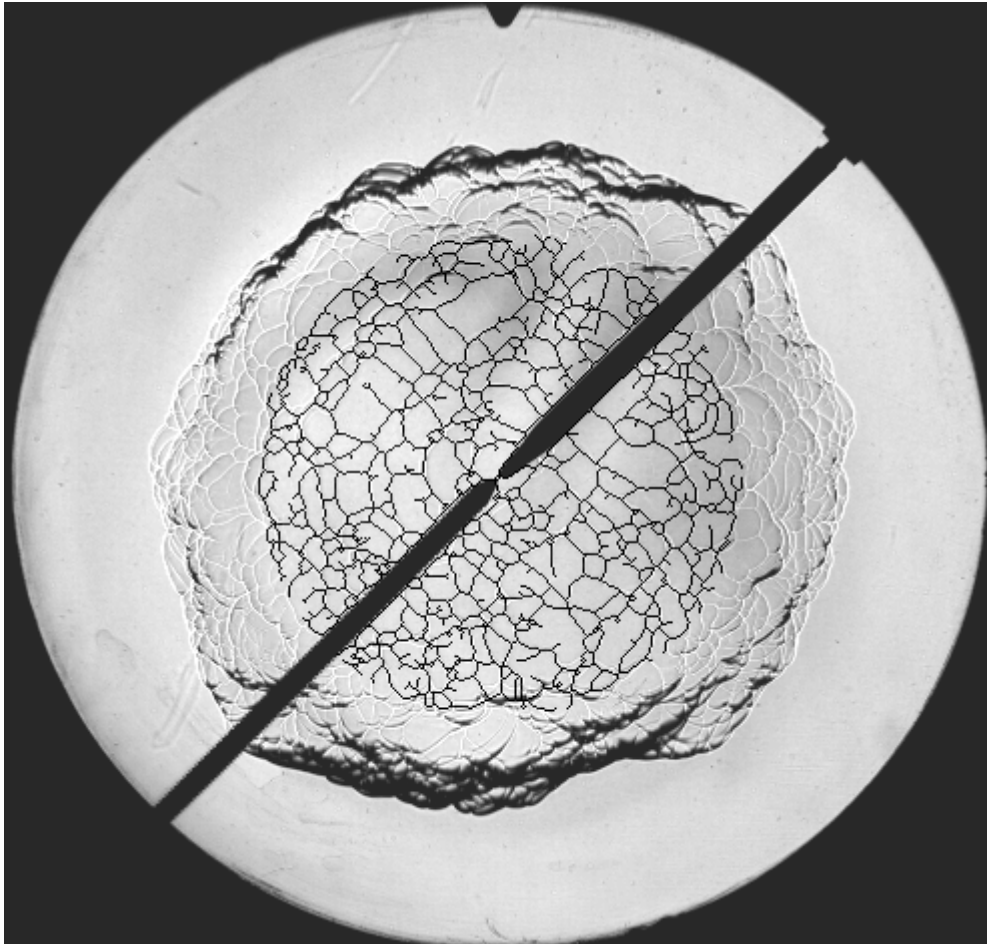


FIGURA 4.22 SUPERPOSICIÓN DE CAPTURA DE COMBUSTIÓN CON LAS CÉLULAS PROCESADAS

Dentro de ésta región la tasa de error es más baja.

Existen también otros algoritmos para la detección de bordes o contornos, aunque la mayoría están basados en un planteamiento similar al seguido, ninguno de ellos parece acercarse tanto al objetivo como el algoritmo planteado.

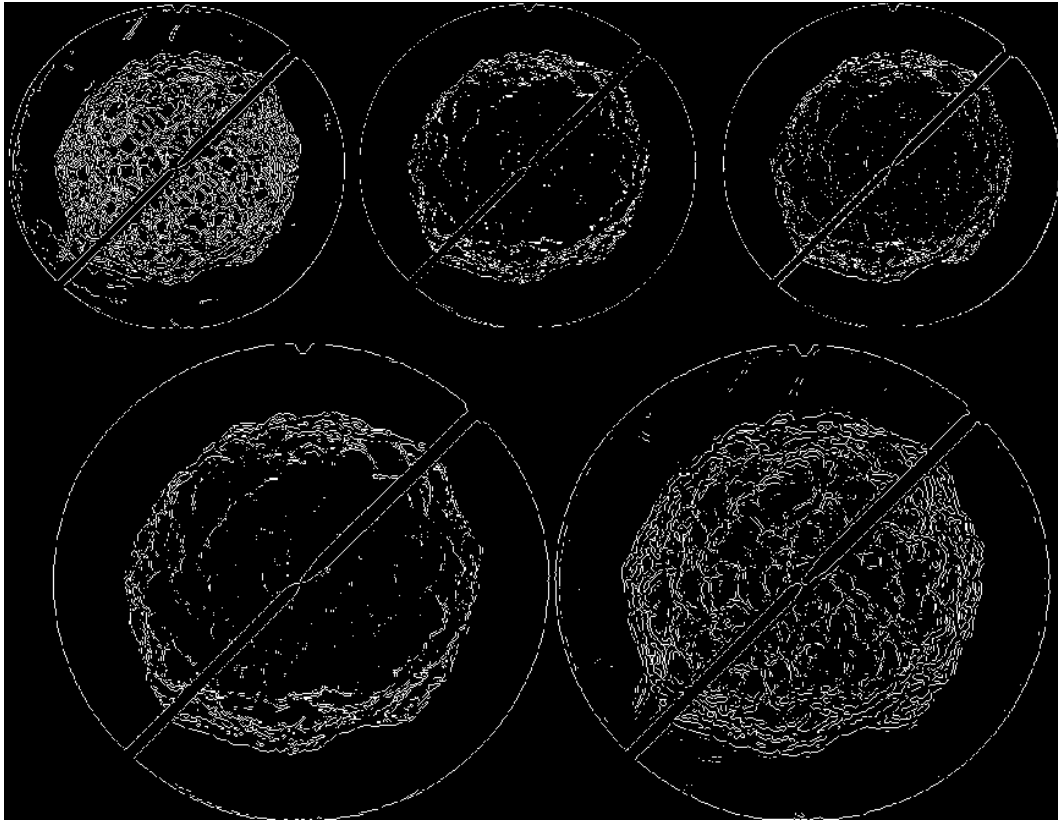


FIGURA 4.23 ALGORITMOS DE DETECCIÓN DE BORDES: CANNY, PREWITT, ROBERTS, SOBEL Y ZEROCROSS

Impresión por pantalla:

Durante el procesado resulta muy interesante poder visualizar el correcto desarrollo del programa, para ello, se representan por pantalla distintos estadios del proceso.

En la figura se pueden ver representadas, de izquierda a derecha y arriba a abajo:

Los fotogramas de la combustión sin alterar.

El procesado para la obtención del radio de combustión superpuesto al resultado.

Una gráfica que representa éste radio frente al tiempo.

El algoritmo de procesado para el cálculo del número de células dentro de una región de acuerdo. Se superponen a éste los centroides de cada una de las áreas de las células obtenidas.

Seguido de éste, se puede ver el mismo algoritmo de procesado superpuesto a los fotogramas de la combustión sin alterar (primer cuadro).

En último lugar se representa gráficamente el número de células obtenidas por unidad de área en función del tiempo.



Además, también puede verse la ventana de control del programa. Es básicamente una botonera general que permite controlar el ritmo de la reproducción de los videos.

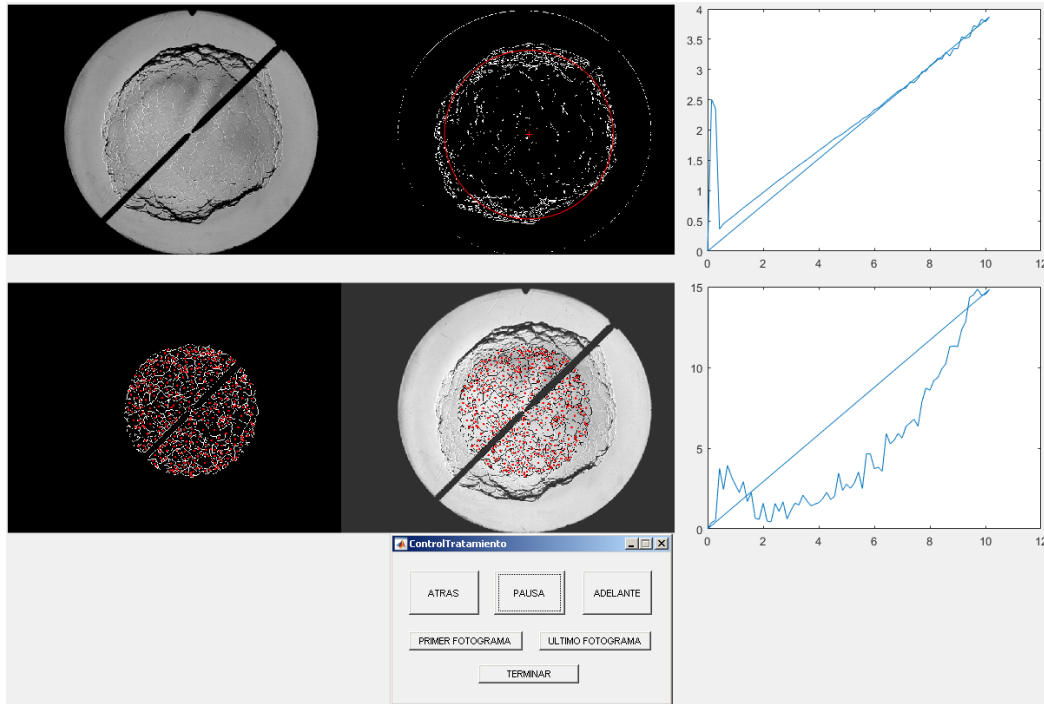


FIGURA 4.24 VISUALIZACIÓN POR PANTALLA DEL PROGRAMA

Resulta muy útil disponer de todos estos cuadros para poder realizar un diagnóstico del procesado en general.

La representación del centroide de cada área permite validar el éxito del algoritmo a la hora de localizar células.

Los valores que se representan en ambos gráficos se guardan en archivos de texto para facilitar la representación de resultados.



Universidad de Valladolid

# VISUALIZACIÓN DE PROCESOS DE COMBUSTIÓN CON CÁMARA DE ALTA VELOCIDAD



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

## 5. RESULTADOS

### 5.1. PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO PARAMÉTRICO

El estudio paramétrico consiste en realizar distintos barridos de algunas variables de interés, en concreto presión total y dosado relativo.

El combustible de estudio es Hidrógeno.

En la tabla se muestran los experimentos a realizar:

Ensayo		Dosados					
		0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	1
Presiones (bar)	1	SI	SI	SI	SI	SI	SI
	1,25	NO	NO	SI	NO	NO	NO
	1,5	NO	NO	SI	NO	NO	NO
	1,75	NO	NO	SI	NO	NO	NO
	2	NO	NO	SI	NO	NO	NO
	2,5	NO	NO	SI	NO	NO	NO
	3	NO	NO	SI	NO	NO	NO

TABLA 5-1 PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO PARAMÉTRICO

Como condiciones de referencia se han escogido:

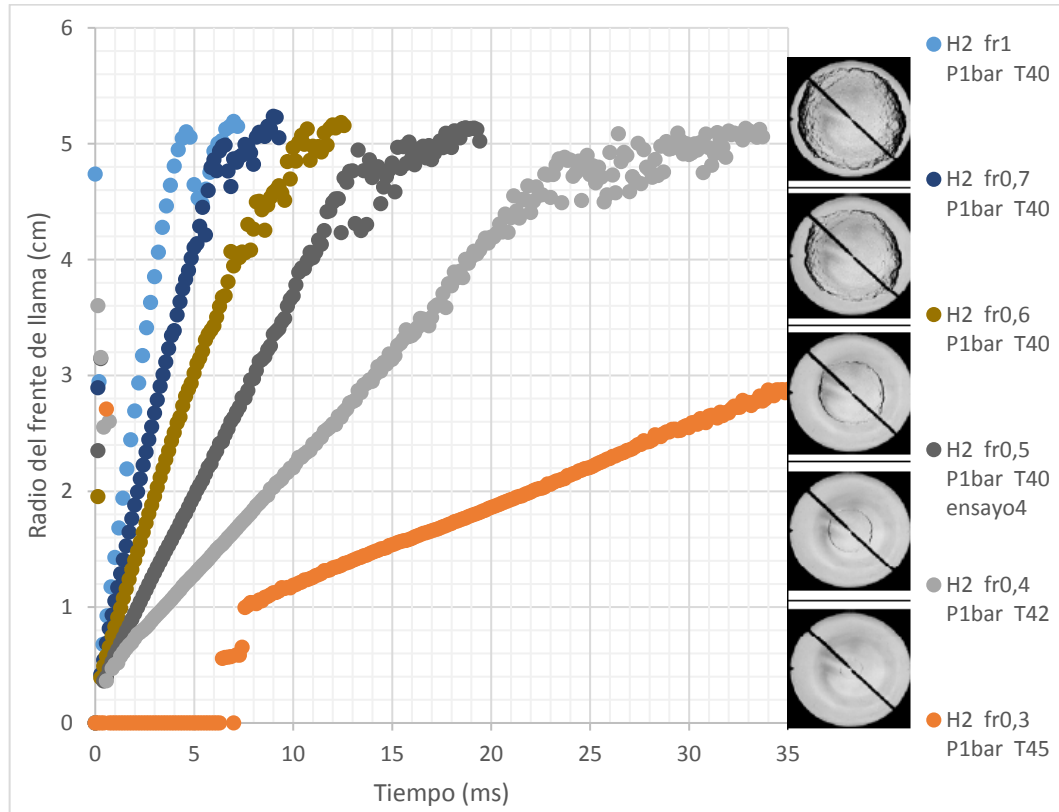
- Presión: 1 bar
- Dosado relativo: 0.5
- Temperatura: 40°

Sobre estas condiciones se realiza además un estudio de repetitividad con cinco combustiones que se procesan similarmente mediante las herramientas desarrolladas.

## 5.2.RESULTADOS

### 5.2.1. ESTUDIO PARAMÉTRICO

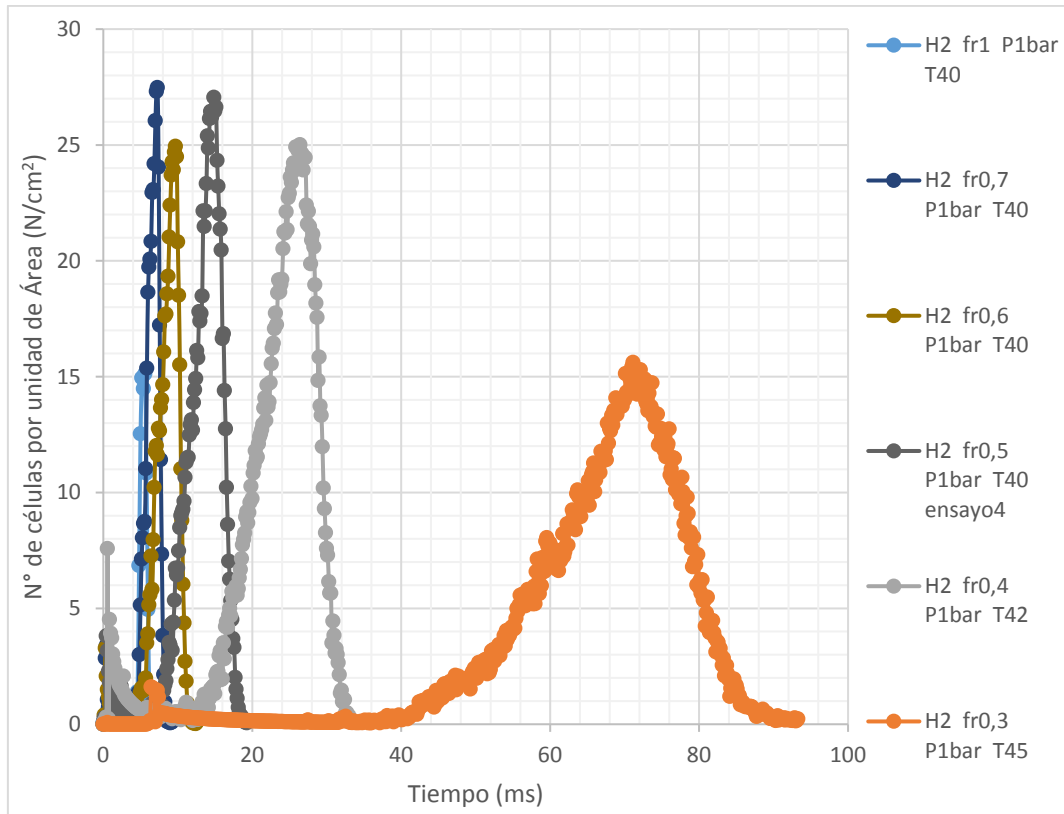
#### 5.2.1.1. BARRIDO DE DOSADO



GRÁFICA 5-1 BARRIDO DOSADO: RADIO DEL FRENT DE LLAMA FRENTE AL TIEMPO PARA DISTINTOS DOSADOS

#### CONCLUSIONES:

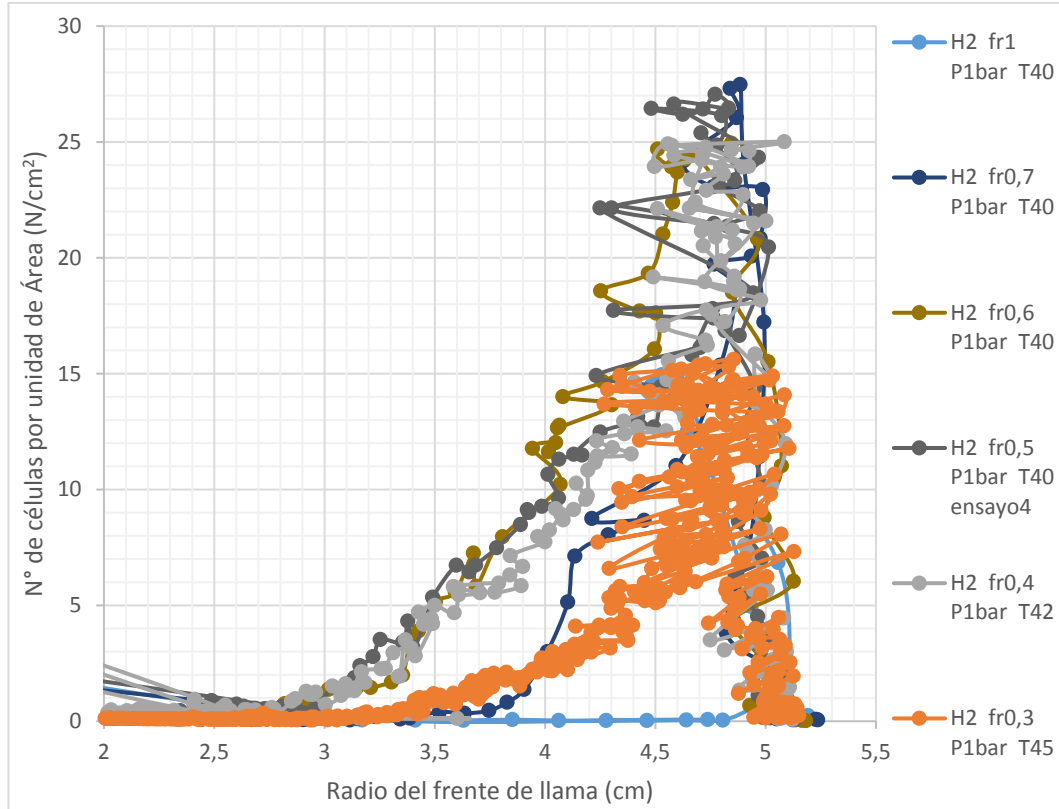
- Las velocidades del frente son muy lineales.
- La influencia del dosado en la velocidad es muy importante, a mayor dosado relativo, mayor velocidad.
- Los puntos (radios) en los últimos instantes de la combustión (antes de alcanzar los bordes de la cámara), no coinciden correctamente con los radios reales y no son representativos.
- (Nota): Se ha acotado la gráfica a tiempo 35 ms para apreciar mejor los puntos de mayor dosado.  
La combustión a dosado 0,3 concluye después de 60 ms.



GRÁFICA 5-2 BARRIDO DOSADO: NÚMERO DE CÉLULAS POR UNIDAD DE ÁREA FRENTE AL TIEMPO

CONCLUSIONES:

- El nivel de celularidad (Nº de células/unidad de superficie) es más alto a cuanto mayor dosado relativo.

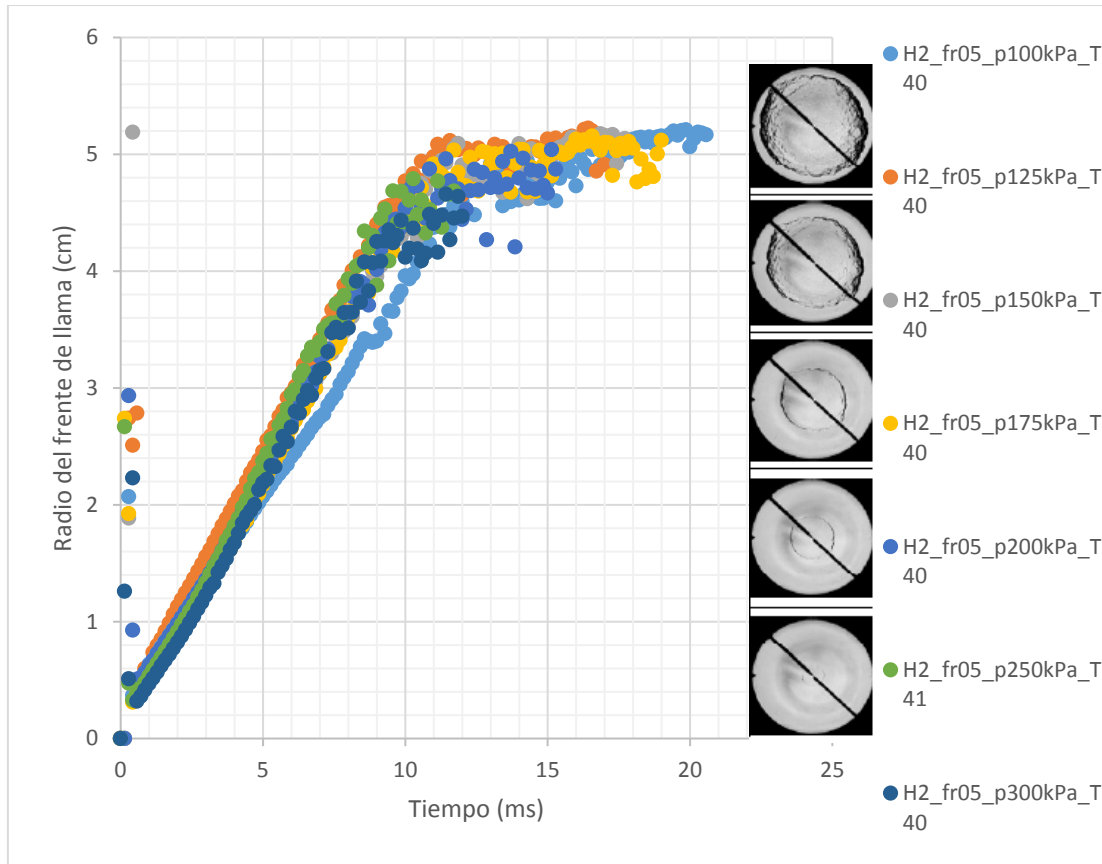


GRÁFICA 5-3 BARRIDO DOSADO: NÚMERO DE CÉLULAS POR UNIDAD DE ÁREA FRENTE AL RADIO DEL FRENTE DE LLAMA

#### CONCLUSIONES:

- A menor dosado, las combustión desarrollan células más tempranamente.  
Según aumenta el dosado, estas células empiezan a aparecer a mayores radios.
- (Nota): La combustión a dosado 0.3 roza el límite de inflamabilidad del hidrógeno, el frente de llama no se asemeja mucho a una esfera y por ello los valores del radio son poco representativos como se ve en la gráfica “saltan” a valores más grandes y más pequeños.

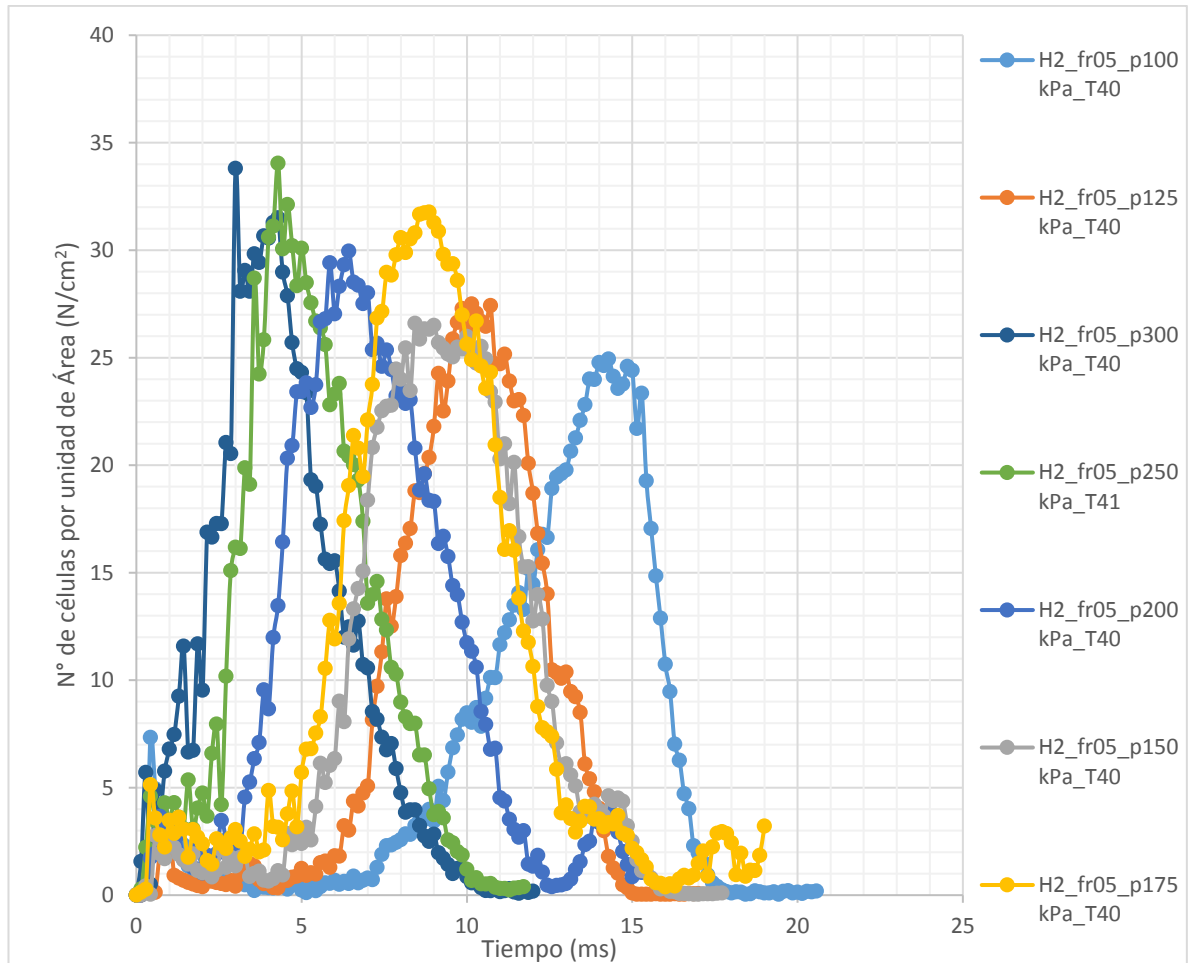
### 5.2.1.2. BARRIDO DE PRESIÓN



GRÁFICA 5-4 BARRIDO PRESIÓN: RADIO DEL FRENTE EN FUNCIÓN DEL TIEMPO

#### CONCLUSIONES:

- La presión no tiene una gran influencia en la velocidad del frente.
- Nuevamente, los puntos (radios) en los últimos instantes de la combustión (antes de alcanzar los bordes de la cámara), no coinciden correctamente con los radios reales y no son representativos.

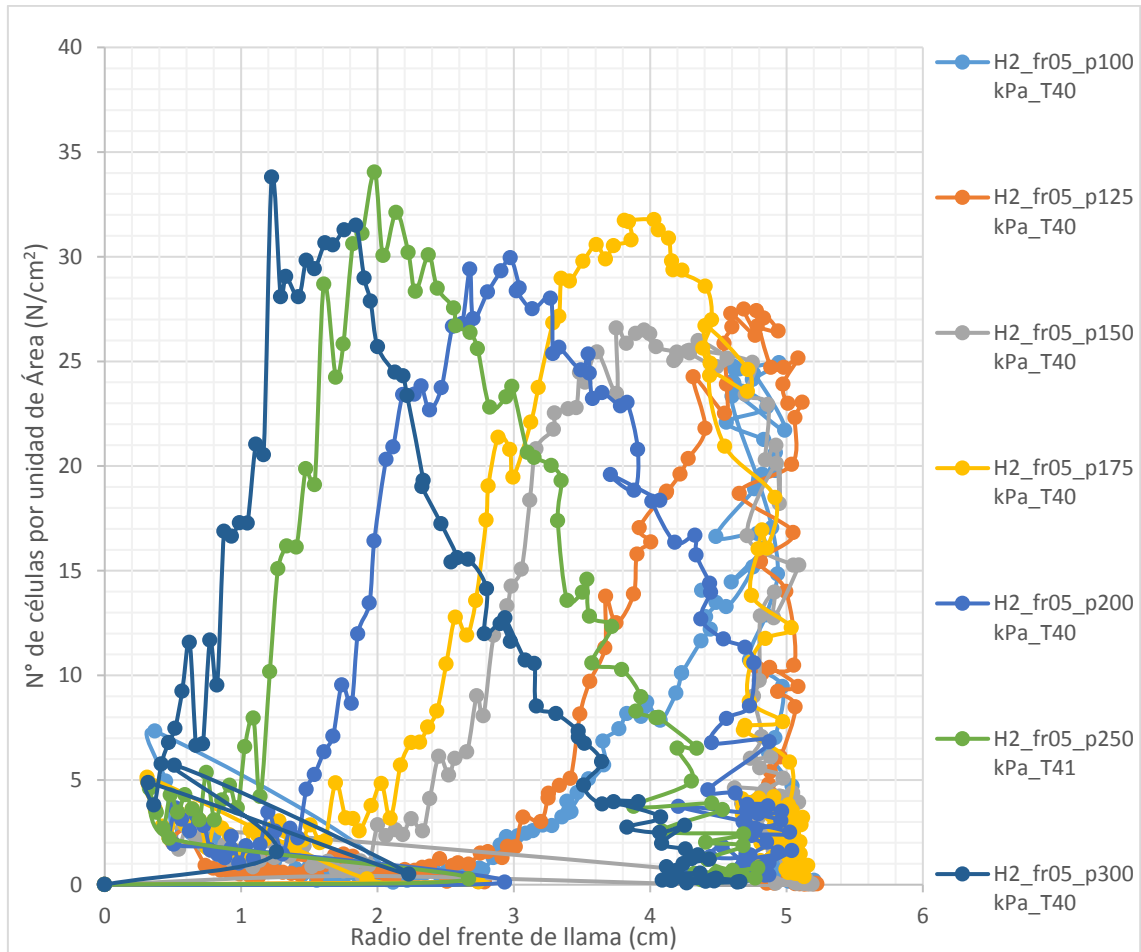


GRÁFICA 5-5 BARRIDO PRESIÓN: NÚMERO DE CÉLULAS POR UNIDAD DE ÁREA FRENTE AL TIEMPO

CONCLUSIONES:

- El nivel de celularidad es mayor a cuanto mayor es la presión inicial de la mezcla.
- La celularidad comienza a desarrollarse antes a mayores presiones.





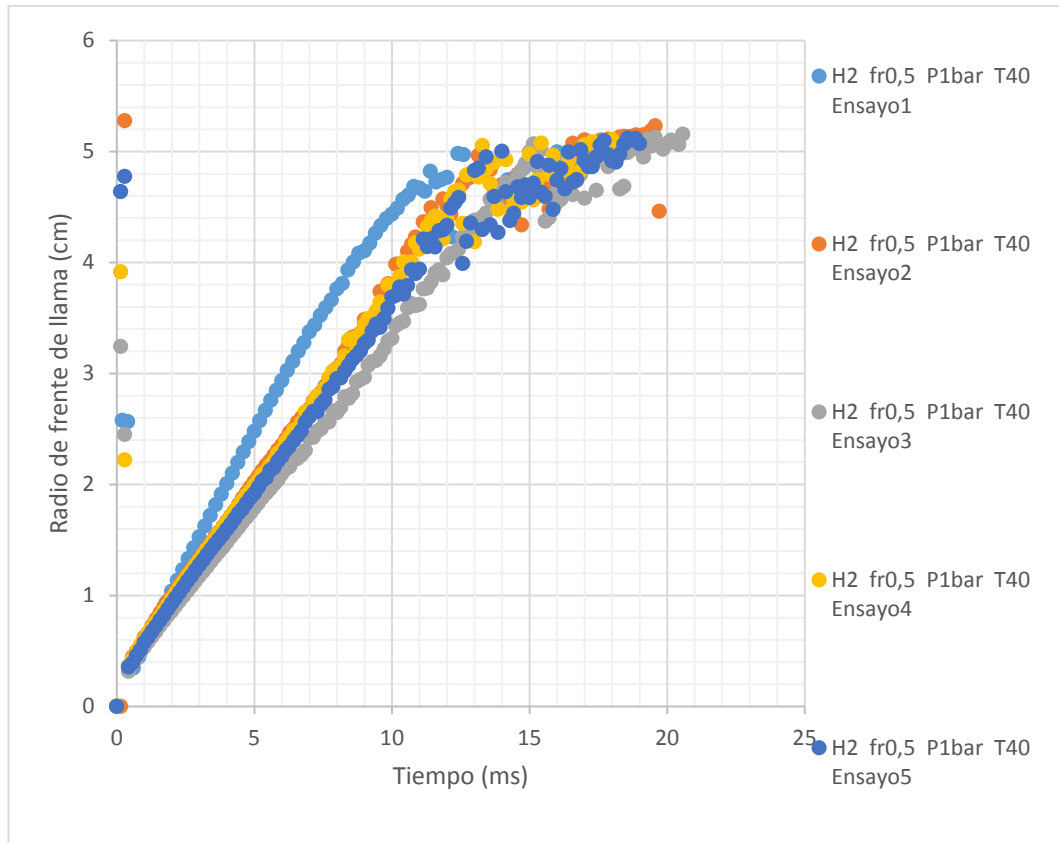
GRÁFICA 5-6 BARRIDO PRESIÓN: NÚMERO DE CÉLULAS POR UNIDAD DE ÁREA FRENTE AL RADIO DEL FRENTE DE LLAMA

CONCLUSIONES:

- Nuevamente, se aprecia cómo el nivel de celularidad es mayor a mayor presión inicial.
- Las células se desarrollan más tempranamente a mayor presión.

## 5.2.2. ESTUDIO DE REPETITIVIDAD

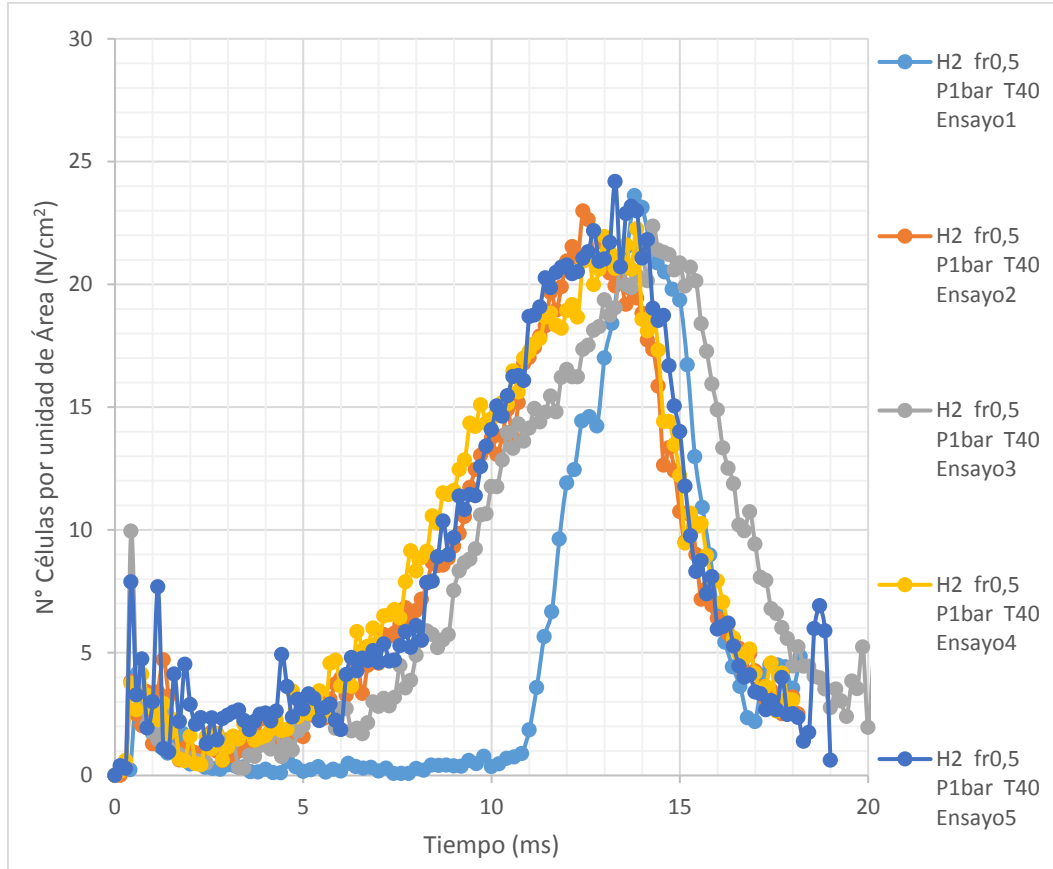
## 5.2.2.1. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS



GRÁFICA 5-7 ESTUDIO REPETITIVIDAD: RADIO DEL FRENTE DE LLAMA FRENTE AL TIEMPO

## CONCLUSIONES:

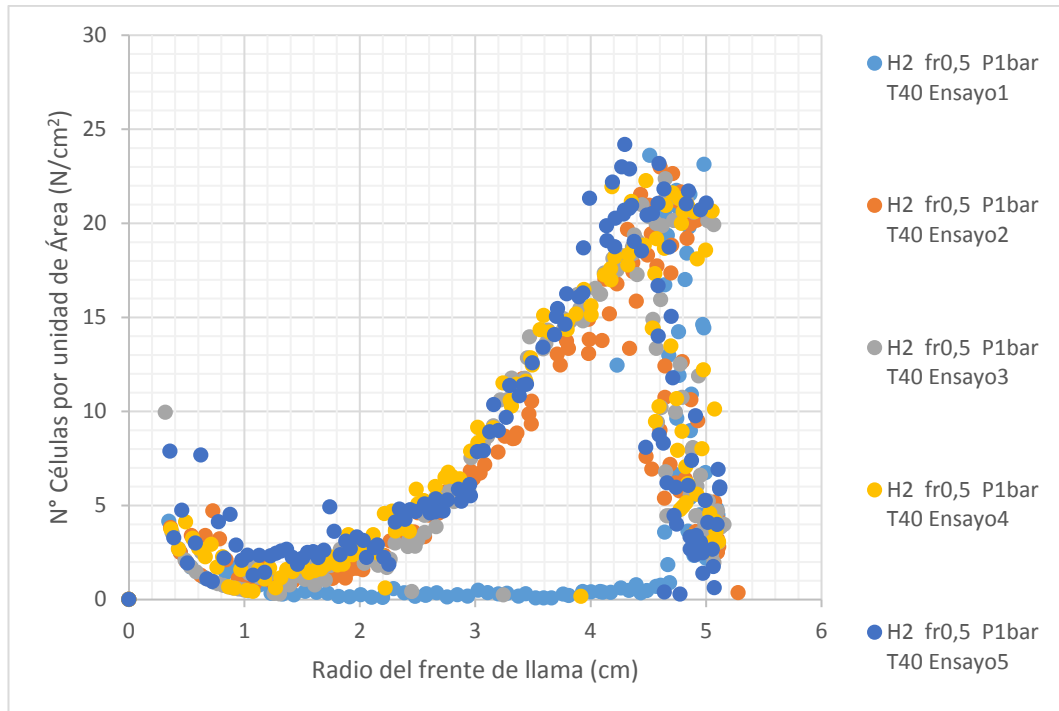
- Las velocidades del frente son bastante lineales.
- Nuevamente, los puntos (radios) en los últimos instantes de la combustión (antes de alcanzar los bordes de la cámara), no coinciden correctamente con los radios reales y no son representativos.
- Los resultados del ensayo número 1 pueden llevar a la conclusión de que no fue realizado en las mismas condiciones que los demás. La combustión permanece laminar, sin arrugas en el frente de llama hasta bien avanzado el proceso, y la velocidad del mismo es substancialmente superior.



GRÁFICA 5-8 ESTUDIO REPETITIVIDAD: NÚMERO DE CÉLULAS POR UNIDAD DE ÁREA FRENTE AL TIEMPO

#### CONCLUSIONES:

- El nivel de celularidad aumenta en el transcurso de la combustión.
- Los puntos de elevada celularidad iniciales no son representativos, pues estos surgen en el ajuste inicial de la imagen en el programa de procesado.
- (Nota): Una vez se alcanzan los máximos en celularidad y las gráficas comienzan a disminuir, esto se debe a que el frente de llama choca contra las ventanas de la cámara y las células desaparecen. Por lo tanto, solo tienen interés las gráficas hasta sus máximos.



GRÁFICA 5-9 ESTUDIO REPETITIVIDAD: NÚMERO DE CÉLULAS POR UNIDAD DE ÁREA FRENTE AL RADIO DEL FRENTE DE LLAMA

CONCLUSIONES:

- Se puede apreciar la gran diferencia del ensayo 1, cuyo nivel de celularidad no aumenta hasta bien avanzado el frente de llama.



## 6. CONCLUSIONES

### 6.1. CONCLUSIONES GENERALES

#### 6.1.1. POSICIONAMIENTO DE LOS ELECTRODOS

Se ha planteado un sistema que permite fácilmente realizar modificaciones en la longitud de los electrodos a partir de tubo de inoxidable y material procedente de las bujías.

#### 6.1.2. CUCHILLA

Se ha colocado un sistema que permite modificar las características del sistema óptico a fin de obtener las mejores imágenes posibles.

Gracias al obturador regulable, se puede modificar la cantidad de luz captada por la videocámara de una forma que sería imposible de controlar con simplemente la antigua cuchilla.

#### 6.1.3. MEJORA DE LA RESOLUCIÓN

Después del cambio de objetivo, se pudo aprovechar al máximo la resolución disponible en la cámara, a costa de una pequeña disminución en la velocidad de captura.

#### 6.1.4. PROGRAMA DE PROCESAMIENTO

##### 6.1.4.1. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

El programa desarrollado permite el rápido procesamiento de las imágenes. Se obtienen fácilmente graficas en función del tiempo de los distintos parámetros obtenidos.

El programa supone la adición, al laboratorio, de una herramienta muy útil que podrá ser utilizada en investigaciones futuras, así como mejorada o adaptada.

##### 6.1.5. TIEMPO INVERTIDO EN CADA ETAPA DEL TRABAJO

Para cada etapa en el desarrollo del trabajo, ésta ha sido la distribución en tiempos por semanas:



<b>Etapa</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Fecha Inicio</b>	<b>Fecha Fin</b>
<b>Estudios previos, presentación de la instalación</b>	2 semanas	19/06/2017	30/06/2017
<b>Tareas de mecanizado</b>	1 semanas	03/07/2017	07/07/2017
<b>Ensayos de combustión</b>	3 semanas	03/07/2017	20/07/2017
	1 semanas	18/09/2017	22/09/2017
	1 semanas	16/10/2017	20/10/2017
<b>Elaboración del programa de procesamiento</b>	3 semanas	10/07/2017	28/07/2017
<b>Procesamiento de datos</b>	1 semanas	24/07/2017	28/07/2017
<b>Conclusiones</b>	1 semanas	25/09/2017	29/09/2017
<b>Redacción del trabajo</b>	10 semanas	11/09/2017	22/12/2017

TABLA 6-1 DISTRIBUCIÓN DE TIEMPOS POR SEMANAS (FECHAS APROXIMADAS)

## 6.2. CONCLUSIONES SOBRE EL ESTUDIO PARAMÉTRICO

### 6.2.1. MAYOR CELULARIDAD A MENOR DOSADO, MAYOR VELOCIDAD DEL FRENTE

A la vista de los gráficos presentados en el capítulo 5-resultados, se puede ver la relación directa que existe entre el dosado relativo y velocidad de combustión (A mayor dosado mayor velocidad del frente).

También se observa una relación inversa entre el dosado relativo y nivel de celularidad (mayores deformaciones del frente)

Los resultados obtenidos de este estudio han llevado a la elaboración de una publicación científica para su presentación en el Congreso Europeo de la Energía del Hidrógeno 2018 que se incluye en el Anexo.



## 7. BIBLIOGRAFIA

### 7.1. TRABAJOS Y PUBLICACIONES

- Fischler, M. A., R. C. Bolles. *Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography*. ACM New York 1981 (Publicación técnica)
- Mayo Monge, Luis Manuel. *Análisis de conceptos y expresiones de la velocidad de combustión laminar en aire de hidrogeno y de mezclas hidrogeno – gas natural*. UVa, Valladolid 2015 (Tesis Doctoral)
- Rodríguez Cubillo, Adrián. *Instalación de visualización de combustión premezclada mediante técnicas Schlieren*. Uva, Valladolid, 2016. (Trabajo de Fin de Grado)
- Santos Herrán, Miguel. *Determinación de velocidades de combustión laminar mediante análisis de imágenes Schlieren y medida de presión en bombas de volumen constante*. UVa, Valladolid, 2010. (Trabajo de Fin de Carrera)
- Yoma Vásquez, Jorge Luis, *Visualización de flujos no isotérmicos con un dispositivo óptico Schlieren*. UChile, Santiago de Chile, 2007. (Trabajo de Fin de Carrera)

### 7.2. PÁGINAS WEB

N.A. *Sistemas de encendido de automoción*.

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/magnetic/ignition.html>

(Ultimo acceso: noviembre 2017)

### 7.3. FIGURAS

[1] N.A. *Schlieren visualization of natural convection in binary gas–liquid systems Schlieren image during CO<sub>2</sub> transfer in the case of  $Ra < 0$ . (a) CO<sub>2</sub> absorption into chlorobenzene,  $\uparrow DSt$ ,  $Q(\text{CO}_2) = 20 \text{ ml/min}$ ; initial stage of the process: buoyant convection starts, small-scale turbulence is clearly seen under the interface. 2007.*

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000925099800092X>

(Ultimo acceso: Abril 2018)

[2] S. Settles, Gary. *Schlieren Photo Of Turbulent Gas*, 2014

<https://fineartamerica.com/featured/schlieren-photo-of-turbulent-gas-gary-s-settles.html>

(Ultimo acceso: Mayo 2018)



- [3] N.A. *Solid angle*. Archimedes on Spheres and Cylinders  
<https://www.revolvy.com/main/index.php?s=Solid%20angle>  
(Ultimo acceso: Abril 2018)
- [4] N.A. *Estereorradián*. Esacademic. 2010  
<http://www.esacademic.com/dic.nsf/eswiki/458200>  
(Ultimo acceso: Abril 2018)
- [5] N.A. *Diferencias entre lúmenes y luxes*. LedBox  
<https://blog.ledbox.es/informacion-led/diferencias-entre-lumens-y-luxes>  
(Ultimo acceso: Abril 2018)
- [6] Muller, Derek. *Seeing the Invisible: Schlieren Imaging in SLOW MOTION*  
Veritasium, 2017  
<https://www.youtube.com/watch?v=4tgOyU34D44>  
(Ultimo acceso: Febrero 2018)
- [7] N.A. *Videocamara Phantom v210 Datasheet*. Phantom High Speed  
<http://www.phantomhighspeed.com/>  
(Ultimo acceso: Mayo 2018)
- [8] N.A. *Velocidad de Obturación Rápida / Tiempo de Exposición Corto*.  
Dzoom. 2000  
<https://www.dzoom.org.es/para-que-sirve-la-velocidad-de-obturacion/>  
(Ultimo acceso: Mayo 2018)
- [9] N.A. *Barril para Diafragmas de Iris Montura-T*. EdmundOptics  
<https://www.edmundoptics.es/optomechanics/tube-system/t-mount-components/t-mount-iris-diaphragm-barrel/>  
(Ultimo acceso: Febrero 2018)
- [10] N.A. *Led Osram*. Rs Amidata. 2000  
<https://es.rs-online.com/web/p/kits-led/1225167/>  
(Ultimo acceso: Abril 2018)