



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

**MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**  
**ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES**  
**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**Caracterización de procesos de combustión de  
mezclas H<sub>2</sub>/aire e H<sub>2</sub>/CO/aire  
para su uso como combustibles en MCIA**

Autor: D. Alejandro Sánchez Calvete  
Tutor: Dra. Miriam Reyes Serrano  
Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica

Valladolid, Julio, 2018

Caracterización de procesos de combustión de mezclas  $H_2$ /aire e  $H_2/CO$ /aire para su uso como combustibles en  
MCIA

## **RESUMEN**

Mediante la utilización de una bomba de combustión cilíndrica a volumen constante preparada para la realización de combustiones de diferentes mezclas combustibles: metano/aire, hidrógeno/aire y mezclas hidrógeno/monóxido de carbono/aire. Se lleva a cabo un registro temporal de la presión en el interior de la bomba durante el proceso de combustión. También se ha utilizado la técnica óptica Schlieren para visualizar y grabar el desarrollo de la combustión, permitiendo el estudio de las inestabilidades celulares que tienen lugar en dicho proceso. Posteriormente, mediante un modelo de diagnóstico termodinámico de dos zonas se ha obtenido la velocidad de combustión laminar a partir de diferentes variables termodinámicas que se van variando para cada experimento. La metodología para la determinación de la velocidad de combustión se ha validado con dos combustibles: metano/aire y hidrógeno/aire. Los resultados muestran que el hidrógeno tiene una velocidad de combustión mucho más alta que otros combustibles como el metano o el monóxido de carbono y que al mezclarlo con ellos permite aumentar su velocidad. Además, se ha utilizado un modelo para el tratamiento de imágenes y así poder caracterizar el proceso de combustión. La combustión de hidrógeno es muy celular, aumentando esta celularidad con bajos dosados, altas presiones y temperaturas iniciales. Por último, se muestra que la velocidad de combustión y la celularidad se incrementan con la cantidad de hidrógeno presente en la mezcla.

## **PALABRAS CLAVE**

Bomba de combustión a volumen constante, velocidad de combustión, celularidad, hidrógeno, mezcla  $H_2/CO$ .

Caracterización de procesos de combustión de mezclas  $H_2$ /aire e  $H_2/CO$ /aire para su uso como combustibles en  
MCIA

## **ABSTRACT**

By means of using a cylindrical constant volumen combustion chamber prepared for the combustion different fuels: methane/air, hydrogen/air and hydrogen/carbon monoxide/air mixtures a pressure-time register inside the bomb is obtained during the combustion process. Schlieren system has also been used to register and visualize the combustion development and study cellullar instabilities that take place in the combustion process. Then, using a two zone thermodynamic diagnostic model the burning velocity has been obtained as a function of different variables which are different for each experiment. Firstly, the methodology has been validated by using methane and hydrogen as fuels, by comparing with results obtained from literature. The results show that hydrogen has higher burning velocity than other fuels such as methane or carbon monoxide and when hydrogen is mixed with them, it allows increasing its laminar burning velocity. Moreover, hydrogen is a great fuel to observe the cellularity, which increases with lower equivalence ratios, and with higher initial pressure and temperature. Finally, it was shown that laminar burning velocity and cellularity are increased with the hydrogen in the mixture.

## **KEYWORDS**

Constant volume combustion chamber, burning velocity, cellularity, hydrogen, H<sub>2</sub>/CO mixture.

Caracterización de procesos de combustión de mezclas  $H_2$ /aire e  $H_2/CO$ /aire para su uso como combustibles en  
MCIA

## **Agradecimientos**

A mis padres y mi hermano, por su apoyo incondicional durante toda la etapa universitaria y porque gracias a ellos he conseguido llegar hasta aquí.

A Miriam por su dedicación y por haberme enseñado, ayudado y aconsejado durante todo este trabajo.

A Eva y Alexandra por la ayuda prestada en todo momento y por los buenos momentos pasados con ellas que han hecho más fácil este trabajo.

A mis amigos y compañeros de clase, por su apoyo y junto con los que he pasado muy buenos momentos.

Caracterización de procesos de combustión de mezclas  $H_2$ /aire e  $H_2/CO$ /aire para su uso como combustibles en  
MCIA



## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	3
<b>1.1 ANTECEDENTES</b> .....	3
<b>1.2 SITUACION ACTUAL</b> .....	5
<b>1.3 EXPERIMENTOS CON HIDRÓGENO</b> .....	6
<b>1.4 OBJETIVOS</b> .....	9
<b>1.5 PLANTEAMIENTO Y DESARROLLO DEL TRABAJO</b> .....	10
<b>2. ESTADO DEL ARTE</b> .....	13
<b>2.1 MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA</b> .....	13
<b>2.2 PARAMETROS DE ESTUDIO DE LA COMBUSTIÓN</b> .....	13
<b>2.2.1 VELOCIDAD DE COMBUSTIÓN LAMINAR</b> .....	13
<b>2.2.2 MÉTODOS DE LLAMAS ESTACIONARIAS</b> .....	15
<b>2.2.3 STRETCH</b> .....	17
<b>2.2.4 CELULARIDAD</b> .....	18
<b>3. INSTALACIÓN, METODOLOGÍA EXPERIMENTAL Y MODELOS DE DIAGNÓSTICO</b> .....	25
<b>3.1 INSTALACIÓN</b> .....	25
<b>3.1.1 Bomba de combustión cilíndrica a volumen constante</b> .....	26
<b>3.1.2 Instrumentación de la BCVC</b> .....	27
<b>3.1.3 Control y medición de la temperatura</b> .....	28
<b>3.1.4 Sistema de encendido</b> .....	30
<b>3.1.5 Sistema de iluminación y obturación de rayos desviados</b> .....	30
<b>3.1.6 Cámara CCD de alta velocidad</b> .....	31
<b>3.1.7 Almacenamiento de los combustibles líquidos y gaseosos</b> .....	32
<b>3.1.8 Equipo de adquisición de datos</b> .....	33
<b>3.2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL</b> .....	34
<b>3.2.1 Realización de la combustión</b> .....	34
<b>3.2.2 Adquisición de datos</b> .....	37
<b>3.3 MODELOS DE DIAGNOSTICO</b> .....	37
<b>3.3.1 MODELO DE DOS ZONAS DE DIAGNOSTICO DE LA COMBUSTIÓN</b> .....	37
<b>3.3.2 MODELO DE PROCESADO DE IMÁGENES</b> .....	40
<b>4. RESULTADOS</b> .....	45
<b>4.1 VALIDACION DEL MODELO</b> .....	45
<b>4.1.1 VALIDACION CON METANO</b> .....	45
<b>4.1.2 VALIDACION DEL MODELO CON HIDRÓGENO</b> .....	48
<b>4.2 ESTUDIO PARAMÉTRICO CON HIDRÓGENO</b> .....	51
<b>4.2.1 VELOCIDAD DE COMBUSTIÓN</b> .....	51
<b>4.2.2 CELULARIDAD</b> .....	55
<b>4.2.3 RADIO DE FRENTE DE LLAMA</b> .....	63
<b>4.2.4 TASA DE STRETCH</b> .....	64
<b>4.2.5 VELOCIDAD DE PROPAGACION DE LLAMA</b> .....	64
<b>4.3 EXPERIMENTOS H<sub>2</sub>/CO/AIRE</b> .....	66

Caracterización de procesos de combustión de mezclas H<sub>2</sub>/aire e H<sub>2</sub>/CO/aire para su uso como combustibles en MCI A

4.3.1 VELOCIDAD DE COMBUSTION .....	66
4.3.2 CELULARIDAD .....	69
4.3.3 RADIO DE FRENTE DE LLAMA.....	73
4.3.4 TASA DE STRETCH .....	74
4.3.5 VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LLAMA.....	74
4.4 COMPARACIÓN MEZCLAS 100% H <sub>2</sub> /AIRE Y 80% H <sub>2</sub> /20% CO/AIRE.....	76
4.4.1 VELOCIDAD DE COMBUSTIÓN .....	76
4.4.2 CELULARIDAD .....	78
5. CONCLUSIONES .....	91
6. TRABAJOS FUTUROS .....	95
7. BIBLIOGRAFÍA.....	99

# **CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN**

Caracterización de procesos de combustión de mezclas  $H_2$ /aire e  $H_2/CO$ /aire para su uso como combustibles en MCI

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 ANTECEDENTES

En la actualidad la escasez de energía y de combustibles fósiles debido a su enorme demanda, en especial en el sector del transporte, sigue aumentando cada año debido sobre todo a dos causas: el crecimiento de la población mundial y la industrialización, por lo que la importancia de encontrar alternativas a los combustibles fósiles es cada vez mayor, sobre todo debido a su futuro agotamiento [1][2].

Además la utilización de combustibles fósiles de una forma masiva ha provocado que la calidad del aire sea cada vez peor tanto a nivel local y como a nivel global, esto se ve reflejado sobre todo en el efecto invernadero [3].

Como se ha destacado, la contaminación atmosférica es cada vez más grave, en la cual el CO<sub>2</sub> es el combustible que más contribuye ya que la actividad humana genera en torno a 25 billones de toneladas de CO<sub>2</sub> anualmente [4].

Por ello la mayoría de los países han establecido diferentes reglamentaciones y normativas sobre las emisiones, cada vez más restrictivas, para mejorar el entorno atmosférico. Además hay que tener en cuenta que la combustión es un proceso que es necesario hacerlo más eficiente y menos contaminante. Las principales emisiones están causadas por los motores de combustión interna de los automóviles [5].

En el caso de la Unión Europea, existe la normativa Euro 6 que entró en vigor en Septiembre de 2014 y que establece las reglamentaciones sobre los valores límites de emisiones contaminantes: monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y partículas materiales (PM), para los motores gasolina y diesel de los turismos y de los vehículos comerciales ligeros. Dicha normativa ha sido una evolución de la normativa Euro 1 que apareció en 1991 [6].

En las tablas 1 y 2 se muestra los límites de emisiones establecidos por cada norma Euro para los turismos:

Table 2  
Detailed matrix of emission control technologies considered in the calculations

Passenger cars an light duty trucks			
Regulation	Gasoline		Diesel
PRE ECE	Carburettor, no aftertreatment		Indirect low-pressure injection, no aftertreatment
ECE 15/00-01			
ECE 15/02			
ECE 15/03			
ECE 15/04	Some models with single point injectors and oxidation catalyst		
Euro 1	Multi-point injection (MPI) and closed-loop three-way catalyst (TWC)		High-pressure injection (HPI)
Euro 2	MPI + TWC		HPI + Oxidation catalyst (OxCat)
Euro 3	MPI + TWC + Twin lambda		HPI + OxCat+exhaust gas recirculation (EGR)
Euro 4	MPI + TWC + Twin lambda		HPI + multi OxCat + EGR
Euro 6	MPI + TWC + Improved catalyst materials		HPI + OxCat + EGR + Diesel particle filter (DPF)
Euro 6			HPI + OxCat + DPF + (deNO <sub>x</sub> catalyst)
Heavy duty vehicles		Two-wheelers	
Regulation	Technology	Regulation	Technology
Conventional	No aftertreatment, indirect low-pressure injection	Conventional (mopeds, motorcycles)	2stroke (2S) or 4-stroke (4S), no aftertreatment
Euro I	Direct injection, no aftertreatment	Euro 1 mopeds	OxCat
Euro II		Euro 1 motorcycles	4-stroke (some with TWC)
		Euro 2 mopeds	2S + Direct Injection + Secondary Air Injection + OxCat or (mainly) 4S + TWC
Euro III	Improved design, high-pressure injection	Euro 2 motorcycles	4S + OxCat or TWC
		Euro 3 motorcycles	4-stroke + TWC
Euro IV	EGR + OxCat or Selective catalytic reduction (SCR)		
Euro V	EGR + OxCat or (mainly) SCR		
Euro VI	SCR + EGR + DPF + OxCat		

Tabla 1.1: Normas EURO y necesidad de hardware en los motores o en los escapes [6]

Caracterización de procesos de combustión de mezclas H<sub>2</sub>/aire e H<sub>2</sub>/CO/aire para su uso como combustibles en MCIA

**Table 3**

Implementation years and emission reductions over Euro 4 (LDVs), Euro IV (HDVs) and Euro 1 (two-wheelers) for future emission standards

Category	Emission standard	Implementation year	NO <sub>x</sub> (%)			PM (%)		
			Emission Standard (g km <sup>-1</sup> or g kW <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )	Reduction according to legislation	Applied reductions	Emission standard (g km <sup>-1</sup> or g kW <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )	Reduction according to legislation	Applied reductions
Gasoline PCs	Euro 4	2005	0.08	0	0	-	0	0
	Euro 5	2010	0.06	25	25	-	0	0
	Euro 6	2015	0.06	25	25	-	0	0
Diesel PCs	Euro 4	2005	0.25	0	0	0.025	0	0
	Euro 5	2010	0.18	28	28	0.003	88	95
	Euro 6	2015	0.08	68	68	0.003	88	95
Gasoline LDVs (Class II)	Euro 4	2006	0.1	0	0	-	0	0
	Euro 5	2011	0.075	25	25	-	0	0
	Euro 6	2016	0.075	25	25	-	0	0
Diesel LDVs (Class II)	Euro 4	2006	0.33	0	0	0.04	0	0
	Euro 5	2011	0.235	28	28	0.003	92.5	95
	Euro 6	2016	0.105	68	68	0.003	92.5	95
HDVs	Euro IV	2006	3.5	0	0	0.03	0	0
	Euro V	2009	2.0	43	43	0.03	0	0
	Euro VI	2014	0.4	89	89	0.015	50	95
Motorcycles	Euro 2	2003		0	0		0	0
	Euro 3	2006		50	50		50	50

Tabla 1.2: Reducciones relativas tras la implantación de cada norma [6]

Además la Figura 1 muestra la evolución de los límites de las emisiones contaminantes de monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y partículas materiales (PM) en las diferentes normativas Euro para motores diesel y gasolina:

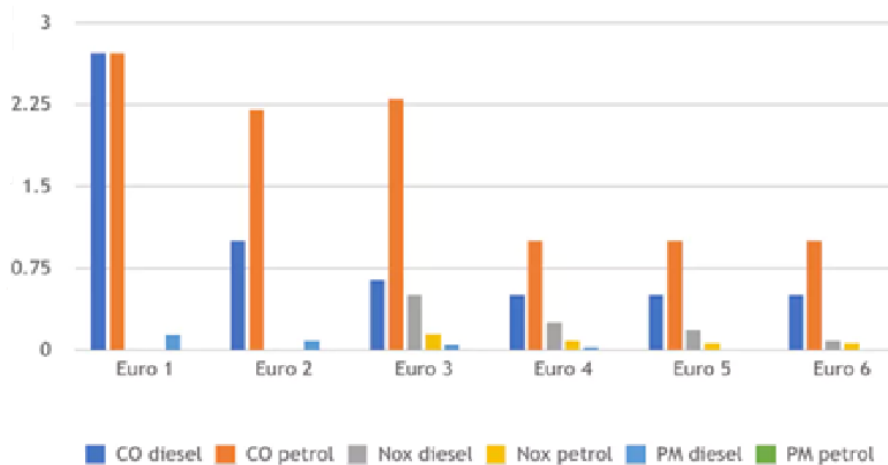


Figura 1.1: Evolución de los límites de emisiones contaminantes en la normativa Euro [7].

Teniendo en cuenta dicha contaminación y dicho agotamiento de los combustibles fósiles como la gasolina o el diesel, se ha llevado a utilizar y desarrollar diversos recursos alternativos o fuentes de energía renovable que se conocen como combustibles alternativos o biocombustibles, como el gas natural, el gas de síntesis y los alcoholes de bajo peso molecular, en especial, el metanol y el etanol en los motores de combustión interna. [2][5].

La importancia de utilizar combustibles alternativos es debido a los siguientes aspectos [4]:

- Perseguir la sostenibilidad energética a través del uso extendido de combustibles alternativos derivados de fuentes de energía renovables y mitigar las preocupaciones de la energía limitada a los combustibles fósiles[4].

- Mejorar la eficiencia del motor y las emisiones de salida del motor con la ayuda de las propiedades físicas y químicas de los combustibles alternativos en comparación con los combustibles fósiles [4].
- Disminuir el uso descontrolado de los combustibles fósiles procedentes del petróleo [4].
- La mayoría están exentos de dióxido de carbono ya que proceden de materia orgánica [1].
- Las propiedades de combustión que determinan si el combustible alternativo es adecuado para el funcionamiento del motor [4].
- Las propiedades físicas que determinan la formación de la mezcla de combustible [4].
- Poder calorífico inferior (PCI o LHV) que determina la cantidad de energía del combustible [4].
- La compatibilidad del material con el hardware actual del motor y con la infraestructura para el suministro de combustible para permitir una buena entrada del combustible alternativo en el mercado [4].
- El coste de fabricación considerado un gran problema tanto para fabricantes como para consumidores ya que aunque han disminuido con la mejora de las tecnologías, el precio de los combustibles alternativos sigue siendo alto en comparación con la gasolina y el diesel [4].

Por estas razones, el uso de combustibles alternativos en un futuro será cada vez mayor, incluso inevitable[8].

Además, la utilización de dichos biocombustibles ha crecido en los últimos años en países de la Unión Europea, Estados Unidos, Japón, India y Brasil [1].

## 1.2 SITUACION ACTUAL

Debido a la ya mencionada preocupación por la eficiencia energética y la protección con el medio ambiente, el hidrógeno se ha convertido en un combustible alternativo debido a que sus emisiones de dióxido de carbono y partículas son nulas. Hay que tener en cuenta que el hidrógeno tiene características que pueden ser peligrosas y a su vez pueden ser aprovechadas para mejorar el proceso de combustión de otros combustibles alternativos, como un amplio rango inflamable y una alta velocidad de combustión. Además tiene tendencia a causar explosiones que incluyen tanto la detonación como la deflagración [9].

El uso del hidrógeno en un motor de combustión interna provoca que sus características de rendimiento y emisión estén dominadas por el proceso de combustión turbulenta premezclado. Las llamas laminares que se generan pueden usarse para validar los mecanismos de reacción química y para obtener una comprensión fundamental del proceso de combustión interna [10].

Otro combustible alternativo, es el gas de síntesis, el cual es considerado de gran interés como una de las alternativas más prometedoras para el futuro. Es un combustible ambientalmente limpio en el campo de la energía y de la combustión [11].

El gas de síntesis, también conocido como syngas, consiste principalmente en una mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono. Este puede ser obtenido a partir de

diversas maneras, como carbón, coque, gas natural y petróleo de alto peso molecular [11].

Se puede utilizar en una gran variedad de dispositivos o maquinas de potencia, como por ejemplo en las turbinas de gas para sistemas de ciclo combinado de gasificación integrada, en motores de combustión interna y en quemadores de gas industriales [11].

La composición del gas de síntesis depende de la fuente de combustible y de la técnica de procesamiento que se utilice para obtenerlo, por a la hora de realizar el diseño de cámaras de combustión y de quemadores supone una gran dificultad y un gran desafío debido a la variación en dicha composición [11].

En el caso de la combustión, el estudio de la llama premezclada debe ser analizado, ya que los dispositivos de combustión favorecen las mezclas de combustibles dando lugar a bajas emisiones y a un alto ahorro de combustible [11].

Otro de los combustibles de interés es el gas natural (GN), ya que se considera un combustible alternativo debido a sus propiedades y su mayor índice de octano frente a la gasolina. Está formado por varios gases de los cuales su principal constituyente es el metano (75-98% de metano, 0.5-13% de etano y 0-2.6% de propano). Destaca por causar menos emisiones que la de los combustibles convencionales ya que su estructura química es menos complicada, además de no tener fase de evaporación del combustible. Además el alto índice de octanaje (120-130) permite que el motor funcione con relaciones de compresión más elevadas ya que proporciona un alto potencial anti detonante. Tiene el inconveniente de que su velocidad de combustión es lenta en comparación con los combustibles líquidos provocando problemas en los motores como una menor eficiencia de combustión o una mayor duración de ésta; esto se puede solucionar mezclándolo con un combustible cuya velocidad de combustión sea alta, por ejemplo el hidrógeno [12].

El hidrógeno también se ha mezclado con gasolina debido a sus buenas propiedades durante el proceso de combustión [12].

El hidrógeno permite lograr una combustión más rápida, con menor energía para la ignición, además reducen las emisiones producidas durante la combustión [13].

### **1.3 EXPERIMENTOS CON HIDRÓGENO**

Diferentes autores han llevado a cabo diferentes estudios acerca de la influencia en las emisiones y la velocidad de combustión; del hidrógeno sobre otros combustibles como el metano, el gas natural o el gas de síntesis.

Las mezclas de combustible de gas natural e hidrógeno se han estudiado ampliamente en los motores de combustión interna y en condiciones de escasez tienen como resultado que el rendimiento del motor puede mejorar y las emisiones de hidrocarburos (CH) y monóxido de carbono (CO) pueden reducirse añadiendo una pequeña cantidad de hidrógeno. También hay que tener en cuenta que en condiciones ricas, las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) aumentan debido al incremento de la temperatura de la llama adiabática [14].

En general, se puede decir que las emisiones de hidrocarburos (CH), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y monóxido de carbono (CO) disminuyen al aumentar el porcentaje de hidrógeno en el gas natural, pero las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) generalmente



aumentan con la adición de hidrógeno ya que aumenta la velocidad de combustión y por tanto la temperatura de la mezcla quemada [14].

Tinaut et al. llevaron a cabo el estudio de la adición de pequeños porcentajes de hidrógeno en motores de encendido provocado que funcionan con gas natural y su influencia en las emisiones de monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>). Los resultados mostraron que al aumentar la cantidad de hidrógeno se producía un aumento de la velocidad de combustión, un aumento del tiempo de ignición óptimo para obtener la máxima presión media indicada en el motor y un aumento de la eficiencia. Las emisiones de monóxido de carbono (CO) son casi inapreciables ya que se oxidan por completo al ser la combustión pobre y las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) aumentaron debido a la mayor temperatura de los quemados [14].

Durante las últimas décadas, también se han llevado varios estudios sobre las inestabilidades de las llamas premezcladas de hidrógeno-aire:

Darrieus & Landau llevaron a cabo el análisis de la inestabilidad hidrodinámica en llamas premezcladas. Los resultados mostraron que la inestabilidad hidrodinámica estaba provocada por la expansión térmica, además la llama es inestable para perturbaciones de cualquier longitud onda, esto quiere decir que dicha inestabilidad aparece para todas las llamas [15].

El desarrollo de la celularidad durante la expansión esférica de las llamas de hidrógeno a presión elevada debido a la aparición de inestabilidades hidrodinámicas, térmicas-difusionales se ha investigado mediante la utilización de imágenes Schlieren de alta velocidad. El desarrollo celular depende sobre todo de la intensidad de la inestabilidad térmica-difusional [15].

Liu et al. llevaron a cabo el estudio del inicio de inestabilidades en llamas premezcladas esféricas de hidrógeno aire en un bomba de combustión a volumen constante mediante tecnología schlieren. Los resultados mostraron que la inestabilidad de difusión se puede identificar visualmente por el crecimiento gradual y la ramificación de la llama. Su apariencia está gobernada por el número de Lewis. La inestabilidad hidrodinámica se puede identificar visualmente por la aparición repentina y espontánea de pequeñas células en toda la superficie de la llama [10].

El aumento de la temperatura tiene un fuerte efecto de retraso en la aparición de células de difusión, particularmente para llamas muy delgadas debido a un aumento de la velocidad de combustión y de la velocidad de la llama que permiten menos tiempo para que las células aparezcan y crezcan. Los resultados experimentales revelaron que la presión es el más dominante en términos del inicio de la inestabilidad de la llama [10].

También se han realizado estudios sobre las inestabilidades intrínsecas de las mezclas de llamas premezcladas de hidrógeno-hidrocarburo-aire, como por ejemplo hidrógeno-metano-aire [16].

Huang et al también llevaron a cabo el estudio de la velocidad de combustión en mezclas metano e hidrógeno a temperatura y presión ambiente (300K y 1bar). Los resultados permitieron establecer tres zonas en la velocidad de combustión en función del porcentaje en hidrógeno de la mezcla. Una primera zona donde la mezcla tenía menos del 60% de hidrógeno y la combustión está dominada por el metano, luego una segunda zona o zona de transición entre 60% y 80% y por ultimo una tercera zona cuyo contenido en hidrógeno es mayor del 80% y donde la combustión estaba dominada por el hidrógeno. En la primera y en la tercera zona la velocidad de combustión aumentaba

linealmente con el aumento del porcentaje de hidrógeno en la mezcla. En cambio en la segunda zona el aumento era de forma exponencial [17].

Huang et al. llevo a cabo el estudio de la velocidad de combustión y de las características de la llama para diferentes mezclas de gas natural e hidrógeno en una bomba de combustión a volumen constante a una temperatura de 300 K y a una presión de 0.1 MPa utilizando el método Schlieren y una cámara de alta velocidad. Los resultados mostraron que la velocidad de combustión laminar aumentaba exponencialmente con el aumento del porcentaje de hidrógeno en la mezcla [18].

Sin embargo, para las llamas premezcladas con gas de síntesis, los estudios sobre inestabilidades intrínsecas son relativamente escasos, el gas de síntesis es un combustible mezclado principalmente compuesto por H<sub>2</sub> y CO; por lo tanto, sus características de combustión fundamentales son más complejas debido a la variación en las fracciones de H<sub>2</sub> y/o CO [17].

Li et al. llevaron a cabo el estudio de la velocidad de combustión laminar y las inestabilidades en mezclas de H<sub>2</sub>, CO y aire variando la cantidad de oxígeno (30%, 50% y 70%) y para diferentes casos de presión (0,05 MPa a 0,4 MPa) en una bomba a volumen constante mediante el sistema Schlieren. Los resultados mostraron que las velocidades de combustión aumentaban con el aumento de la cantidad de hidrógeno en la mezcla y disminuían al aumentar la presión [11].

Además al aumentar la presión, la inestabilidad hidrodinámica aumentaba pero la inestabilidad térmica-difusional disminuía provocando que la llama fuera más inestable [11].

Con el aumento del dosado, la llama tiende a ser más estable cuando la cantidad de hidrógeno es del 70% y 50%; sin embargo, la llama se vuelve más inestable con el aumento del dosado cuando la cantidad de hidrógeno es del 30% [11].

Tanto la inestabilidad hidrodinámica como la inestabilidad térmica difusional se mejoran al aumentar el dosado cuando la cantidad de hidrógeno es del 30%. Sin embargo, cuando la cantidad de hidrógeno es del 70% y 50%, la inestabilidad hidrodinámica se incrementa, mientras que la inestabilidad térmica difusional se reduce por lo que la inestabilidad térmica difusional es la que rige el comportamiento de la llama en este caso [11].

## 1.4 OBJETIVOS

En este TFM se ha llevado a cabo la caracterización óptica de diferentes combustiones: mezclas de metano-aire, hidrógeno-aire y mezclas de hidrógeno/ monóxido de carbono - aire para estudiar el proceso de combustión de dichos combustibles y caracterizar las inestabilidades celulares (celularidad) que se producen durante las combustiones. El desarrollo de la llama y las arrugas que se forman en la superficie se registran mediante la técnica óptica Schlieren.

Podemos subdividir los objetivos de la siguiente forma:

1. Realizar un estudio del estado del arte del proceso de combustión premezclada de hidrógeno y mezclas de hidrógeno-monóxido de carbono.
2. Realizar un estudio experimental de los procesos de combustión de dichos combustibles:
  - a. Registrando la presión durante el proceso de combustión
  - b. Usar técnica Schlieren para la visualización de las combustiones
3. Tratamiento de todos los datos obtenidos usando modelos:
  - a. Modelo de diagnóstico de la combustión de dos zonas para tratar la presión y obtener velocidades de combustión entre otros valores.
  - b. Modelo desarrollado para tratar y caracterizar la visualización de las combustiones. Caracterizar la celularidad a través de la densidad de celularidad.
4. Validación de la instalación y realización de estudio paramétrico: el dosado, la presión, la temperatura y la cantidad de hidrógeno y de monóxido de carbono.

## **1.5 PLANTEAMIENTO Y DESARROLLO DEL TRABAJO**

Este trabajo fin de máster pretende ampliar el conocimiento actual del comportamiento de diferentes combustibles alternativos, en este caso del hidrógeno durante el proceso de combustión. Los ensayos se han llevado a cabo en una bomba cilíndrica de combustión a volumen constante.

Para ello se ha utilizado como herramienta un modelo de diagnóstico experimental, el cual se basa en el registro de determinadas variables y propiedades de la combustión que permitirán conocer diferentes características de dicha combustión y su posterior estudio.

En los siguientes capítulos se llevara a cabo una explicación de la situación o estado de los parámetros más importantes que se van a estudiar del proceso de combustión, una descripción de la bomba que se ha utilizado en los ensayos detallando sus componentes, el almacenamiento de los combustibles, el sistema de llenado de la bomba, los diferentes equipos de medida de temperatura y de presión, el osciloscopio utilizado para el registro de la presión y la metodología llevada a cabo para cada uno de los ensayos.

Posteriormente se llevara a cabo la explicación de las diferentes hojas de Excel utilizadas para el cálculo de presiones durante los experimentos y las variables de interés para el estudio. También se llevará a cabo la explicación de los modelos de diagnóstico utilizados para el análisis de las variables obtenidas durante los ensayos y cómo evolucionan durante el proceso.

Por último se llevara a cabo, el análisis de todos los resultados obtenidos mediante el apoyo de graficas y realizando comparaciones con otros autores.

# CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE

Caracterización de procesos de combustión de mezclas  $H_2$ /aire e  $H_2/CO$ /aire para su uso como combustibles en  
MCIA

## **2. ESTADO DEL ARTE**

### **2.1 MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA**

Los motores de combustión interna son maquinas que convierten el calor producido durante una combustión en energía mecánica. La combustión es uno de los principales procesos para la conversión de energía donde la energía química procedente de un combustible es transformada directamente en calor [4].

Los motores más utilizados son los motores de encendido provocado y los motores de encendido por compresión. Se han utilizado como fuentes de energía para vehículos comerciales, de pasajeros, para la generación de energía eléctrica y en otros ámbitos de la industria, debido sobre todo a su alta potencia y a su alta eficiencia [4].

Los dos principales combustibles que se han desarrollado y utilizado ampliamente junto con el desarrollo de los motores de encendido provocado en el último siglo han sido la gasolina y el diesel. La combustión de la gasolina sufre una propagación de llama tras producirse la chispa inicial que enciende la mezcla homogénea de combustible y aire, en cambio, la combustión del diesel es provocada por el autoencendido del combustible cuando es expuesto a gas a alta temperatura [4].

Durante dicho periodo de combustión, se libera la energía almacenada en el combustible en un periodo de tiempo relativamente corto dando lugar alta presión y alta temperatura de los gases quemados que se expanden dentro de la cámara de combustión [19].

El proceso de combustión comienza con una chispa en la bujía y dar lugar a un núcleo de alta temperatura entre los electrodos de la misma. La alta descarga genera temperaturas muy altas que provocan una rápida conducción de calor a la mezcla del combustible que se encuentra en los alrededores [19].

El núcleo generado en la bujía provoca la propagación de la llama a través de la cámara de combustión, donde inicialmente se comporta como una llama laminar. En función del combustible y las condiciones de la combustión como pueden ser la temperatura, la presión y el dosado de la mezcla, dicha llama laminar puede convertirse de manera gradual en una llama turbulenta [19].

### **2.2 PARAMETROS DE ESTUDIO DE LA COMBUSTIÓN**

#### **2.2.1 VELOCIDAD DE COMBUSTIÓN LAMINAR**

Uno de los parámetros más importante para el estudio de la combustión es la velocidad de combustión laminar que se define como la velocidad de propagación del frente de llama de la zona de combustión con respecto a la mezcla sin quemar. Dicho parámetro caracteriza la combustión de mezclas de combustibles homogéneos en motores de encendido provocado, además de que puede ser usada para desarrollar y justificar los mecanismos cinéticos químicos de los sistemas de combustión, calcular la velocidad de

combustión turbulenta, analizar la estructura de la llama y predecir su rendimiento y las emisiones de los sistemas de combustión [20] [21].

Además es un parámetro clave para la simulación numérica de procesos de combustión en los motores de gasolina y da información sobre la reactividad, exotermia y difusividad del combustible utilizado durante la combustión [22] [23].

Los factores que gobiernan la velocidad de combustión de una mezcla de combustible y aire son la temperatura y los gradientes de concentración de especies entre la llama y la mezcla y de las propiedades termodinámicas. La velocidad se define mediante la ecuación 2.1 [19]:

$$C_c = \frac{dm_q/dt}{A_f \rho_{sq}} \quad (2.1)$$

Donde  $dm_q/dt$  es la tasa de quemado de combustible,  $A_f$  es el área del frente de llama y  $\rho_{sq}$  es la densidad del combustible sin quemar.

La velocidad de combustión laminar se puede expresar mediante diferentes correlaciones empíricas, en la cual se observa puede depender solamente de la temperatura ya que la presión no influye en ella o de la temperatura y de la presión como se observa en la ecuaciones 2.2 y 2.3 respectivamente [22]:

$$C_c = C_{c,o} * \left( \frac{T_{sq}}{T_{sq,o}} \right)^\alpha \quad (2.2)$$

$$C_c = C_{c,o} * \left( \frac{T_{sq}}{T_{sq,o}} \right)^\alpha * \left( \frac{p}{p_o} \right)^\beta \quad (2.3)$$

Donde  $\alpha$  es el exponente correspondiente con la temperatura que presenta valores positivos y para los combustibles más habituales está entre  $1 < \alpha < 2$ ; y es función del tipo de mezcla y dosado.  $\beta$  es el exponente correspondiente con la presión que suele presentar valores negativos entre  $-0.5 < \beta < 0$  y también es función del tipo de mezcla y dosado,  $T_{sq,o}$  es la temperatura de referencia,  $p_{u,o}$  es la presión de referencia y  $C_{c,o}$  es la velocidad de combustión laminar de referencia a una temperatura de 300 K y a una presión de 0.1 MPa [22].

Dicha velocidad de combustión laminar como se observa en las ecuaciones 5 y 6 depende principalmente de 3 parámetros [20]:

- Presión inicial de la mezcla
- Temperatura inicial de la mezcla o temperatura de la mezcla sin quemar
- Dosado de la mezcla sin quema

Presión inicial de la mezcla ( $p$ ): es un parámetro físico, que en general se puede decir que cuanto mayor es la presión de la mezcla menor es la velocidad de combustión de dicha mezcla, esto es debido a que el aumento de presión aumenta la densidad de la mezcla provocando una disminución en la difusividad y un aumento del tiempo característico de reacción [24].

Temperatura de la mezcla sin quemar ( $T_{sq}$ ): es un parámetro físico, el cual cuanto mayor es mayor es la velocidad de combustión laminar. Esta tendencia suele ser mayor



que lineal y es debido principalmente a un efecto de precalentamiento que provoca un aumento de la temperatura adiabática de llama. Además una mayor temperatura de los reactivos también favorece la difusión [24].

Además hay que destacar la temperatura de llama o temperatura de los quemados, la cual cuando aumenta también aumenta la velocidad de combustión laminar. Esto se debe al aumento de la difusión y de la tasa de reacción. También favorece la disociación permitiendo una mayor concentración de los radicales libres que provocan nuevas reacciones [24].

Dosado de la mezcla (F): es una propiedad química que expresa la relación entre la masa de combustible y la masa de aire de la mezcla. Se utiliza el dosado relativo (F<sub>r</sub>) que expresa la relación entre el dosado (F) y el dosado estequiométrico (F<sub>e</sub>). El dosado estequiométrico es el dosado que contiene la masa de aire estequiométrico necesaria para quemar el combustible de forma completa. El comportamiento de la velocidad de combustión laminar con el dosado relativo viene gobernado sobre todo por la variación de este con la temperatura de los quemados [24].

Para la mayoría de los combustibles, la velocidad de combustión alcanza su máximo para el dosado estequiométrico o ligeramente por encima del mismo [24].

Otra propiedad química a destacar es la estructura molecular ya que por ejemplo una molécula con el mismo número de átomos de carbono, cuanto más saturado sea el hidrocarburo menor será la velocidad de combustión, es decir, un alcano tendrá menor velocidad de combustión que un alqueno y éste menor que un alquino. En el caso de que la saturación sea la misma, cuanto mayor sea el número de carbonos y mayor número de ramificaciones menor será la velocidad de combustión laminar [24].

Además, a partir de estos parámetros se puede determinar la tasa de masa quemada, el desarrollo de la llama, la duración de la combustión, el tiempo que tarda en empezar la combustión y la temperatura máxima de los quemados [25].

## 2.2.2 MÉTODOS DE LLAMAS ESTACIONARIAS

Existen diferentes métodos para medir la velocidad de combustión laminar y se dividen en dos grupos en función de si la llama se mueve o no con respecto al sistema de referencia fijo. El primero emplea llamas estacionarias, estabilizadas en un flujo de mezcla combustible donde se incluirían los distintos tipos de quemadores y el método de la llama plana con flujo divergente. El segundo la mezcla de combustible se encuentra inicialmente en reposo y tras el encendido de la mezcla, la llama avanza con una cierta velocidad respecto del sistema de referencia fijo. Aquí se incluye el método del tubo y cualquier método que emplea llamas con frente esférico debido a un encendido puntual de la mezcla.

### 2.2.2.1 MÉTODOS DE LLAMAS QUE SE PROPAGAN LIBREMENTE

#### Método de tubo

El método consiste en un tubo de sección uniforme con uno de los extremos abierto, y con un diámetro considerablemente mayor que el diámetro de apagado de llama para permitir que ésta progrese fácilmente. La mezcla de combustible se introduce en el interior del tubo y posteriormente, se enciende en el extremo abierto. De esta forma se genera un frente de llama, de forma convexa hacia la mezcla fresca, que avanza a lo largo del tubo a una velocidad constante.

#### Métodos que emplean una bomba a volumen constante

Son métodos en los cuales se emplea la deflagración de una mezcla de combustible confinada en el interior de una cámara rígida de volumen constante para medir la velocidad de combustión laminar. La principal ventaja que ofrecen los métodos que emplean una bomba a volumen constante es que con un buen diseño de la bomba resultan idóneos para obtener resultados de velocidad de combustión en condiciones de alta presión y temperatura.

Una vez que se tiene la mezcla en el interior de la cámara de combustión se procede a su encendido. Se emplea un único punto de ignición que se sitúa en el centro geométrico de la cámara de combustión. El encendido puntual de la mezcla da lugar a un frente de llama que se puede suponer esférico y concéntrico con el punto de ignición. Dicho frente avanza hacia afuera englobando mezcla fresca, la cual sufre un aumento progresivo de presión y de temperatura durante el proceso, por lo que estas condiciones de presión y temperatura son diferentes en cada instante de la combustión.

Los dos métodos más utilizados para medir la velocidad de combustión laminar tienen en común el hecho de que en ambos la combustión se realiza en el interior de una cámara a volumen constante y a partir de un único frente de llama esférico, con la diferencia de que la forma en que se obtiene la velocidad de combustión laminar es muy distinta.

Así, en el primero se obtiene la velocidad de combustión a partir del registro del radio del frente de llama frente al tiempo durante los primeros instantes de la combustión en los que la presión y la temperatura de la mezcla fresca apenas aumenta y se puede considerar constante. Esta etapa de la combustión se denomina periodo de pre-presión. En el segundo método se mide la evolución de la presión frente al tiempo durante toda la combustión. Posteriormente, mediante un modelo de diagnóstico se obtiene la velocidad de combustión para cada instante del proceso que es el que se utilizará para este trabajo [24].

### 2.2.2.2 Método de llama plana estabilizada en un flujo divergente

#### Método de llama de flujo divergente

Hay dos métodos experimentales que emplean una llama plana estabilizada en un flujo divergente para medir velocidad de combustión. El más sencillo consiste en proyectar el

flujo contra una pared, provocando la apertura de las líneas de corriente. Este método es conocido en inglés como stagnation flame. El otro método consiste en enfrenar dos flujos y se conoce como counterflow.

### Método de quemador

En estos métodos un flujo laminar de una mezcla gaseosa y combustible que recorre el interior de un tubo se quema a la salida del mismo en una llama estacionaria. Existen distintos tipos de quemadores que dan lugar a distintas geometrías de llama y a distintas técnicas de medida.

### 2.2.3 STRETCH

Otro parámetro importante a tener en cuenta son los efectos de stretch (estiramiento o expansión, arrugamiento del frente de llama), fenómenos que se producen cuando la velocidad de combustión laminar es afectada por la geometría de la llama y el campo de fluido donde se propaga. De esta forma la llama presenta curvatura, se arruga y se propaga en diferentes flujos no uniformes.

Para cuantificar la deformación de la llama y el campo fluido donde se propaga se emplea la tasa de stretch ( $K$ ) que se define en la ecuación 2.4:

$$K = \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} \quad (2.4)$$

Donde  $A$  es el frente de llama.

Se puede establecer que  $K > 0$  el área del frente de llama sufre un “estiramiento” o una “expansión”, en cambio, si  $K < 0$  el frente de llama sufre una “contracción” o una “compresión”.

En las llamas adiabáticas, estables y con bajas tasas de stretch la relación entre la velocidad de combustión laminar y la tasa de stretch se aproxima mediante la siguiente ecuación 2.5:

$$C_c = C_{c0} - L * K \quad (2.5)$$

Donde  $C_{c0}$  es la velocidad de combustión laminar de la llama sometida a la tasa de stretch ( $K$ ) y  $L$  es la longitud de Markstein, un parámetro con la dimensión de longitud que expresa la sensibilidad de la velocidad de combustión con la tasa de stretch [24].

En el caso de mezclas con combustibles como el H<sub>2</sub>/aire  $L$  es positivo y decrece a medida que la mezcla varía desde dosados ricos a pobres, pudiendo llegar a ser negativo en mezclas muy pobres. En el caso de otros combustibles como los

hidrocarburos L también es positivo y decrece pero con la diferencia de que es desde dosados pobres a ricos.

Cuando la tasa de stretch es alta, dicha expresión no se válida y se utiliza la relación entre los números adimensionales de Karlovitz y de Markstein, la cual se muestra en la ecuación 2.6:

$$\frac{C_{c0} - C_c}{C_{c0}} = Ma * Ka \quad (2.6)$$

Donde Ma es la relación entre la longitud de Markstein y el espesor del frente de llama, como se observa en la ecuación 2.7:

$$Ma = \frac{L}{l_D} \quad (2.7)$$

Y el número de Karlovitz es la relación entre el tiempo característico de llama ( $\tau_D$ ) y el tiempo hidrodinámico k, como se observa en la ecuación 2.8 [24]:

$$Ka = \tau_D * k = \frac{l_D}{C_c} * K \quad (2.8)$$

Por lo tanto, el producto de los números de Ma y Ka expresa el déficit en la velocidad de combustión laminar de una llama debido al efecto del stretch en la misma.

#### 2.2.4 CELULARIDAD

Otro de los parámetros más importantes en el estudio de las combustiones es la celularidad. Durante la propagación laminar de llamas premezcladas, el frente de llama se arruga, es decir, se genera una estructura celular de forma espontanea debido a diferentes inestabilidades que inducen a la turbulencia de las llamas, aceleran la propagación de la llama y son una de las razones principales detrás de la auto-turbulencia e incluso de la detonación de la llama [19].

Las inestabilidades que provocan dicha celularidad son las siguientes [26]:

- **Inestabilidades hidrodinámicas:** es causada por la expansión de la llama debido a las interacciones entre ella y las perturbaciones externas. Se encuentra presente en todas las llamas.
- **Inestabilidades térmicas-difusivas:** es causada por la expansión durante la propagación de la llama, en la cual existen difusiones de masa y térmicas a través de la superficie de la llama. Sólo está presente en las llamas cuyo número de Lewis (relación entre la difusividad térmica y másica) es menor a 1.

- **Inestabilidades de fuerzas de volumen:** considera el frente de llama como una discontinuidad de densidad y la gravedad como fuerza de volumen. Solo es aparente cuando la velocidad de propagación laminar de la llama es baja.

Las inestabilidades hidrodinámicas y térmicas difusionales son las principales responsables de los problemas comunes en la estructura celular de las llamas premezcladas. La inestabilidad de fuerza corporal se suele tener menos en cuenta ya que su efecto sobre las llamas que se propagan rápidamente es menor en comparación con las otras dos [26] [27].

Este fenómeno se estudia con frentes de llamas esféricas.

Dicha celularidad provoca un aumento de la velocidad de combustión [26].

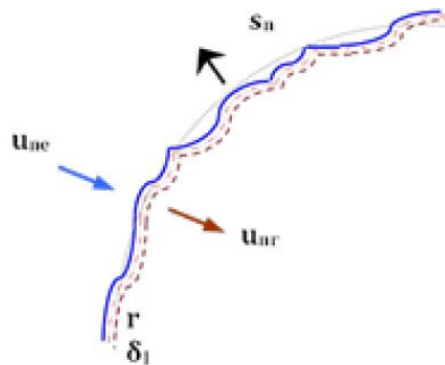


Figura 2. 1: Frente de llama arrugado [26]

Cuando la llama se encuentra en régimen turbulento, dicha turbulencia arruga y distorsiona la llama, incrementando el número de reacciones en el frente de llama. Estas distorsiones provocan un aumento de la tasa de quemado de la masa, pero también provocan una distorsión local o stretch que provoca una disminución de la velocidad de difusión molecular dentro de la propia llama. Además la velocidad de llama aumenta en aproximadamente 10 veces con respecto a la velocidad de deflagración laminar [19].

Keck llevo a cabo el estudio de la evolución de la estructura de la llama y su velocidad. Los resultados mostraron que la velocidad de deflagración aumenta rápidamente desde 1 m/s, que es la velocidad característica de un frente de llama laminar, hasta valores de aproximadamente 10 m/s. Estos valores son característicos de las intensidades de turbulencia en el gas sin quemar [28].

En la siguiente figura se muestra una representación de la estructura de llama turbulenta donde se observan los siguientes parámetros característicos [19]:

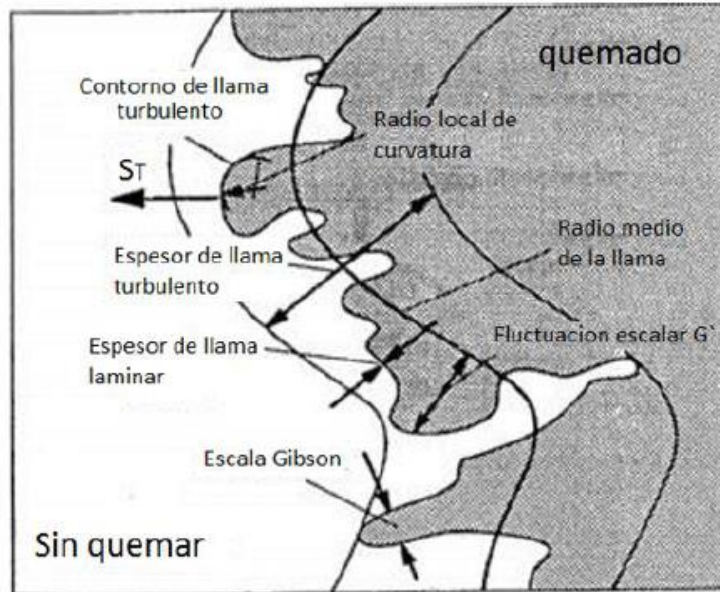


Figura 2.2: Parámetros característicos de una llama turbulenta [19]

Las observaciones de la estructura de la llama se pueden realizar mediante el método Schlieren, éste muestra que durante el proceso de combustión inicialmente la llama es delgada y siempre con una zona de reacción entre los gases quemados y sin quemar.

Las llamas de premezcla en mezclas combustible-aire se caracterizan por una velocidad de deflagración laminar ( $S_l$ ) y un espesor de llama laminar ( $\delta_l$ ). Además, existen una serie de números adimensionales que caracterizan las llamas premezcla turbulentas. El parámetro que define la turbulencia es el número de Reynolds que se define en la ecuación 2.9:

$$Re = \frac{u * l_0}{\nu} \quad (2.9)$$

Donde  $u$  es velocidad o intensidad de turbulencia,  $l_0$  es la dimensión característica y  $\nu$  es la viscosidad cinemática del fluido.

Otro parámetro a tener en cuenta en la turbulencia es la tasa de stretch ya explicada anteriormente, ya que permite dar una medida de la influencia del flujo turbulento en los procesos químicos que ocurren dentro de la llama. Este estrangulamiento es cuantificado mediante el producto del número de Lewis ( $Le$ ) y la tasa de stretch ( $K$ ). El número de Lewis viene definido por la relación entre la difusividad térmica ( $\alpha$ ) y la difusividad molecular ( $D$ ), que se define en la ecuación 2.10 y la tasa de stretch se define en la ecuación 2.11:

$$Le = \frac{\alpha}{D} \quad (2.10)$$

$$K = \frac{\tau_T}{\tau_L} = \left( \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} \right) * \tau_T = \left( \frac{u}{l_0} \right) \left( \frac{\delta_l}{S_l} \right) \quad (2.11)$$

Donde  $\tau_T$  es el tiempo de mezclado turbulento,  $\tau_L$  es el tiempo químico y A es el área del frente de llama.

Cuanto más alto sea el producto entre el número de Lewis y la tasa de stretch ( $Le \cdot K$ ) más importante será el impacto del stretch en la velocidad de deflagración laminar.

En el caso del número de Lewis, cuando este es mayor que 1, la difusión térmica excede a la difusión de la masa y las partes “hinchadas” de la superficie de la llama pierden energía térmica más rápidamente de lo que la difusión de la masa del reactivo puede compensar. Por lo tanto, el flujo de energía neta sería negativo. Como resultado, la temperatura de la llama cae gradualmente por debajo de la temperatura adiabática y la velocidad de combustión se reduce. Las partes cóncavas, por el contrario, obtienen energía neta positiva debido a una mayor difusión de la masa del reactivo que la pérdida de energía por difusión térmica. En consecuencia, la temperatura de la llama y la velocidad de combustión aumentan. Por lo que, estos aumentos y disminuciones de velocidad provocan que la superficie de la llama mantenga su suavidad y estabilidad. Por otro lado, cuando el número de Lewis es inferior a 1, tanto las partes “hinchadas” como las cóncavas se verán mejoradas, y por lo tanto la llama pierde rápidamente su suavidad superficial. Dicha inestabilidad ocurre a menudo en la etapa temprana de propagación de la llama cuando el número de Lewis es menor que 1 y puede identificarse por distorsiones irregulares de la superficie de la llama [19].





# **CAPÍTULO 3: INSTALACIÓN, METODOLOGÍA EXPERIMENTAL Y MODELOS DE DIAGNÓSTICO**



### 3. INSTALACIÓN, METODOLOGÍA EXPERIMENTAL Y MODELOS DE DIAGNÓSTICO

En este capítulo se va a llevar a cabo una explicación de la instalación y sus componentes más importantes.

#### 3.1 INSTALACIÓN

Los ensayos experimentales se han llevado a cabo en una bomba de combustión a volumen constante (BCVC) cilíndrica que se encuentra en el laboratorio del Área de Máquinas y Motores térmicos del departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica de la Universidad de Valladolid.

En la Figura 3.1 se observa una vista general de la bomba y en la Figura 3.2 un esquema de la instalación completa junto con la disposición de los componentes y sistemas principales:

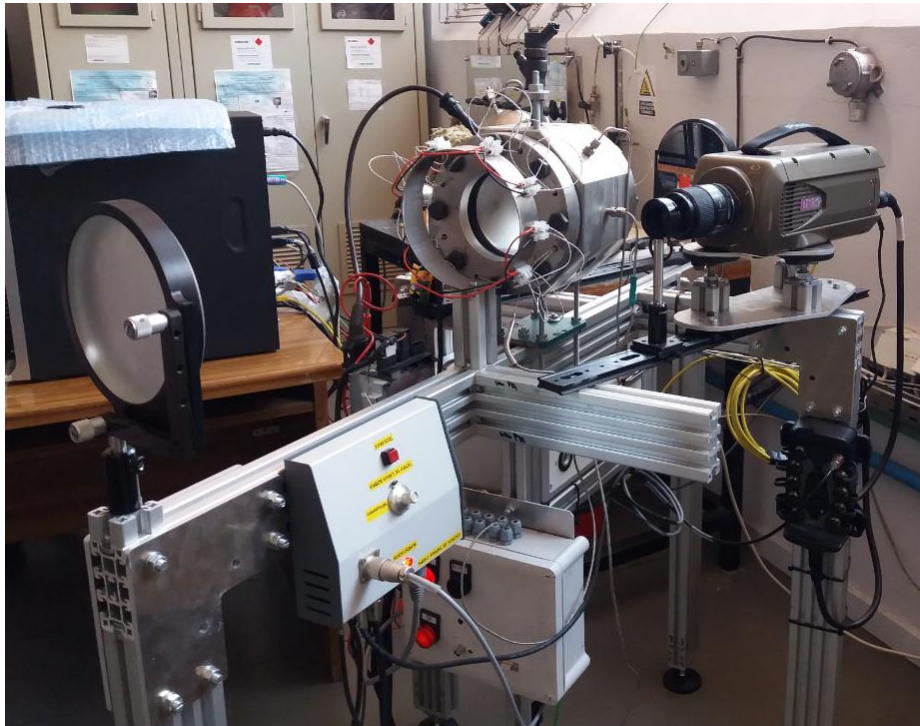


Figura 3.1: Vista general de la instalación experimental

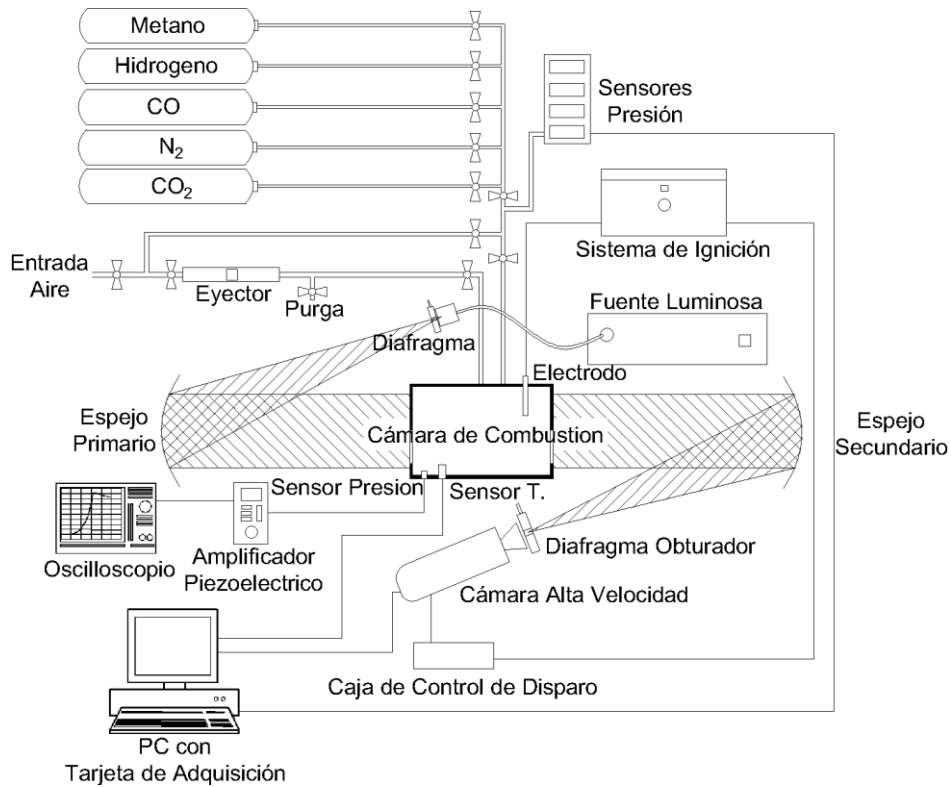


Figura 3.2: Esquema general de la instalación experimental

El uso de las bombas de combustión es de gran utilidad ya que permiten la realización de un gran número de ensayos en su interior además de un buen aislamiento del proceso de combustión, y son más fáciles de utilizar que un motor de combustión interna.

### 3.1.1 Bomba de combustión cilíndrica a volumen constante

La bomba de combustión a volumen constante o BCVC, es el elemento principal de la instalación, consiste en una cámara de combustión cuya geometría es cilíndrica, con encendido centrado y que se utiliza para caracterizar el proceso de combustión que tiene lugar en su interior. Consiste en un bloque octogonal prismático de acero con un vaciado cilíndrico central que forma la cámara. Este hueco está cerrado en ambos extremos mediante dos ventanas ópticas de sílice fundida en las paredes laterales del cilindro, que a su vez están sostenidas por tapas metálicas con pernos cuya estanqueidad está asegurada. Tiene una longitud de 135 mm y un radio de 114.3 mm, por lo tanto tiene un volumen de 1.385 L. Está diseñada para soportar hasta 20 bares durante el transcurso de una combustión y se puede precalentar hasta 400 K. El encendido de la mezcla de combustible y de aire tiene lugar en el centro geométrico de la misma, cuando una chispa, generada por una bujía se produce entre dos electrodos. De esta forma se genera un frente de llama esférico que se propaga a través de la bomba hasta que choca con las paredes de la misma.

Dicha bomba está formada por los siguientes elementos:

- Dos orificios opuestos, que comunican la bomba con el exterior para la introducción de los líquidos o gases que forman la mezcla y para la extracción de los productos que se generen durante la combustión.
- Un electrodo en la parte superior que consiste en una varilla roscada en un taladro.
- Un orificio en la parte inferior donde se coloca el transductor piezoeléctrico que registra la evolución de la presión durante el transcurso de la combustión.
- Un orificio en la parte inferior, en el cual va situado el termopar que mide la temperatura en las paredes de la BCVC.
- Un orificio donde se coloca la bujía de encendido y el correspondiente electrodo.
- Un orificio donde se coloca el electrodo opuesto al anterior.
- 8 resistencias colocadas alrededor de una de las bases.

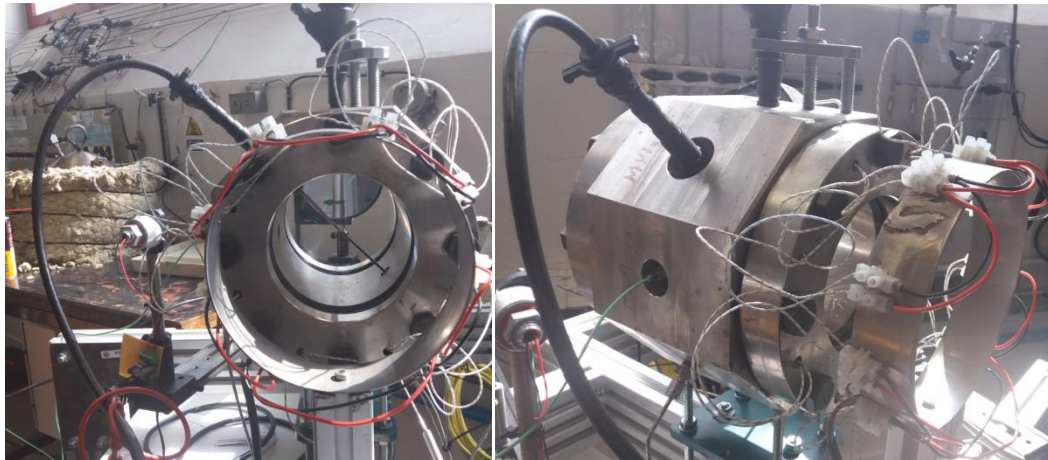


Figura 3.3: Bomba de combustión a volumen constante cilíndrica

### 3.1.2 Instrumentación de la BCVC

Existen un conjunto de elementos de medida de la instalación que permiten controlar y medir los parámetros de interés durante la combustión, como la temperatura y la presión en la cámara de combustión o el sistema de encendido utilizado para que se inicie la combustión.

#### Control y medición de la presión

En este caso se tiene un transductor piezo resistivo que permite medir la presión durante la fase de llenado y un transductor piezoeléctrico que se utiliza para medir la presión durante la fase de combustión.

La instalación está provista de cuatro transductores piezo resistivos para diferentes rangos de presiones, el primero de ellos alcanza hasta 1 bar, el segundo hasta 4 bares, el tercero hasta 10 bares y el cuarto hasta 20 bares. En función de la presión a la que vaya a tener lugar la combustión se utilizara uno u otro para obtener la mayor precisión posible en la medida. Los captadores de 1, 4 y 10 bares llevan incorporadas unas válvulas de cierre para prevenir daños cuando las presiones alcanzadas sean superiores a las de su valor máximo.

Cada uno de los captadores tiene su propio circuito de alimentación y a su vez están conectados a una tarjeta de adquisición de datos PCL 812-PG. Para transformar la señal de intensidad del captador entre 2,5 mA y 4 mA, a voltaje entre 1 V y 5 V se conecta una resistencia de 250  $\Omega$  en paralelo a la tarjeta de adquisición.

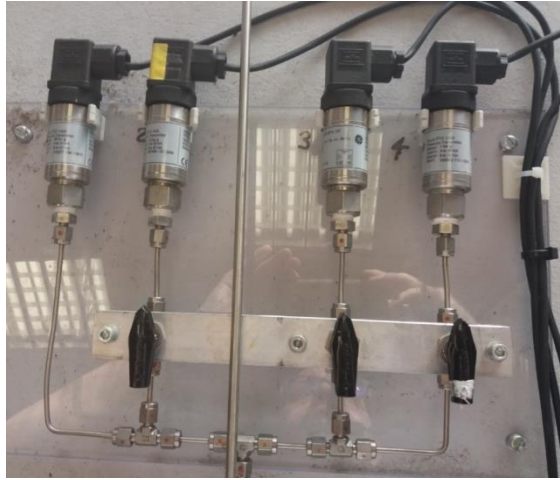


Figura 3.4: Transductores piezo resistivos

En la instalación se tiene un transductor piezoeléctrico para registrar la presión dentro de la BCVC durante el proceso de combustión. El transductor utilizado es un Kistler tipo 7063 que permite medir presiones entre 0 y 200 bares y soporta 350 °C. La señal transmitida por el sensor piezoeléctrico pasa por un amplificador modelo Kistler, el cual se observa en la figura 3.5 y llega hasta la tarjeta de adquisición PCL 812-PG.

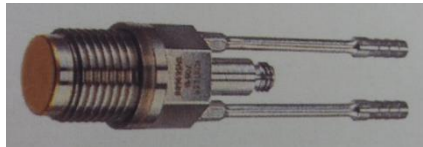


Figura 3.5: Transductor piezoeléctrico



Figura 3.6: Amplificador Kistler

### 3.1.3 Control y medición de la temperatura

En este caso para la medida de la temperatura se utiliza un termopar y para el control de la misma un controlador PID.

La instalación está provista de un termopar que consta de un circuito formado por dos metales diferentes que producen un voltaje dependiendo de la diferencia de temperatura entre sus extremos, es decir, entre la zona caliente y la zona fría; esto se conoce como efecto Seebeck. Dicho termopar se encuentra en el interior de la BCVC colocado en una carcasa de acero inoxidable para protegerlo de altas temperaturas y presiones durante la combustión.

El control de la temperatura en el interior de la BCVC se realiza mediante un controlador PID (Proporcional Integral Derivativo). El PID funciona de la siguiente manera: recibe una señal del termopar que es la temperatura que tiene en su interior la BCVC. A su vez, dicho PID lee una señal externa que le indica el valor que debe alcanzar, este valor se conoce como punto de consigna. El PID resta ambas señales para calcular la diferencia entre ellas y en función de dicha diferencia el PID manda una señal al circuito eléctrico formado por ocho resistencias para alcanzar la temperatura del punto de consigna y mantenerla.



Figura 3.7: PID

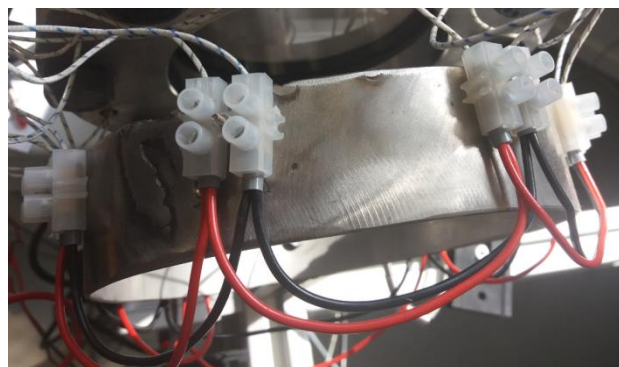


Figura 3.8: Resistencias

### 3.1.4 Sistema de encendido

El encendido de la mezcla de aire y combustible en la BCVC se produce mediante el salto de una chispa eléctrica en el centro geométrico de la BCVC. La chispa es provocada por una bujía, que se observa en la figura 4, junto a una bobina de encendido alimentada mediante una fuente de alimentación externa.

El encendido de la mezcla se produce cuando la energía eléctrica suministrada por la bujía se transforma en energía térmica suficiente para que el volumen crítico entre los dos electrodos alcance las condiciones óptimas para encenderse e iniciar la combustión.

### 3.1.5 Sistema de iluminación y obturación de rayos desviados

En la instalación existen dos elementos que permiten visualizar el proceso que tiene lugar dentro de la cámara de combustión.

El primer elemento de la instalación es el sistema de iluminación, el cual a su vez está formado por dos componentes: la fuente luminosa y el diafragma que se encuentra situado a la salida de ésta. Dicho diafragma permite limitar el rayo de luz que llega al espejo, ya que al igual que el iris del ojo humano permite controlar la cantidad de luz, conocida como iluminancia, abriéndose o cerrándose.

La fuente luminosa emite un haz de luz que se propaga hasta incidir sobre el espejo primario, dicha luz es reflejada y colimada, es decir, se forma un haz de luz paralelo que atraviesa la zona de observación, en este caso la cámara de combustión.

Una parte de los rayos que atraviesan la cámara de combustión son desviados de su eje paralelo debido a la existencia de gradientes de densidad en el medio en el cual se está llevando a cabo el proceso de combustión.

El nuevo haz de luz que sale de la cámara de combustión, cuyas propiedades han cambiado se refleja en el espejo secundario y es concentrado en un punto que pertenece al sistema de obturación de rayos desviados.

La fuente luminosa emite a través de un diodo LED de luz blanca con disipador de calor y lente focalizadora, cuyas características principales son:

- 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





Figura 3.10: Diodo LED

El segundo elemento de la instalación es el sistema de obturación de rayos desviados, que consiste en un dispositivo que permite concentrar los rayos procedentes del espejo. Tiene dos características importantes:

Es regulable ya que el iris tiene una apertura de 1 mm a 30 mm de diámetro, lo cual permite tener un mayor control.

Tiene auto centrado, ya que la construcción del soporte y poste de montaje asegura la concentricidad del haz de luz procedente del espejo de la videocámara.

En este caso recibe los rayos procedentes del espejo secundario.



Figura 3.11: Diafragma obturador regulable

### 3.1.6 Cámara CCD de alta velocidad

La cámara de alta velocidad consiste en una videocámara Phantom v210 a 7000 fps, cuyas especificaciones más importantes son las siguientes:

- Resolución máxima: 1280 x 800, se corresponde con el tamaño máximo que pueden tener los fotogramas (en píxeles).
- Velocidad de captura máxima: 300000 fps (fotogramas por segundo). Está sujeta a la resolución de la cámara, de tal forma que para una mayor resolución la velocidad máxima disminuye.

- **Mínimo tiempo de obturación: 2 $\mu$ s.**
- **Resolución de pixel (nivel de gris): 12 bit**
- **Velocidad a 1 Megapíxel (Resolución máxima): 2000 fps (fotogramas por segundo).**

El CCD (charge-coupled device) o dispositivo de carga acoplada es el sensor encargado de captar la imagen. Está formado por una matriz de diminutas células fotovoltaicas donde la carga acumulada, que es el número de electrones producidos, 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 cuanto mayor tiempo mayor cantidad de luz registrada, pero a su vez menor nitidez. Este efecto de distorsión es mayor cuanto mayor sea a velocidad del sujeto de estudio.

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

Dicha cámara se observa en la figura 3.12:



Figura 3.12: Videocámara de alta velocidad Phantom V210

### **3.1.7 Almacenamiento de los combustibles líquidos y gaseosos**

Los combustibles líquidos utilizados durante los experimentos se almacenan en sus respectivas botellas o recipientes, en este caso en las botellas de metanol y etanol, teniendo en cuenta en todo momento las precauciones necesarias para su manejo y almacenamiento.

Los combustibles gaseosos, en este caso metano, hidrógeno, nitrógeno, monóxido de carbono y dióxido de carbono, se almacenan en botellas de alta presión. Además, también se puede tomar aire ambiente desde una línea de aire comprimido que se encuentra en el laboratorio cuya composición es de 21%  $O_2$  y 79% de  $N_2$  a una presión máxima de 8 bar. A partir de cada botella, sale una línea de gas que llega hasta un panel de control que permite seleccionar el gas que se introduce en la BCVC y regular su caudal en cada momento.

Debido a que algunos de los gases utilizados son combustibles y tóxicos, la instalación dispone de diferentes medidas de seguridad junto con la extracción continua de aire en las celdas de gases.

Para evitar el peligro por la posible acumulación de gases tóxicos por inhalación y gases que presenten riesgos de explosión como el metano, el hidrógeno y el monóxido de carbono, sus botellas se encuentran en el interior de cabinas con ventilación forzada. El aire entra en el interior de las cabinas a través de rejillas situadas en la parte inferior y se expulsan al exterior mediante un extractor situado en la parte superior.

Para detectar fugas de gases en el interior del laboratorio, se han colocado dos sensores, uno para los gases combustibles como el metanol y el hidrógeno y otro para el monóxido de carbono. Dichos sensores están conectados con una central de detección que indica la concentración de dichos gases y dispone de una alarma que se activa cuando las concentraciones superan un valor crítico.

### **3.1.8 Equipo de adquisición de datos**

#### **Osciloscopio digital**

El osciloscopio es el equipo utilizado para detectar y visualizar las señales que queremos medir: evolución de la presión, salto de la chispa y salto del trigger. Consiste en un equipo que permite la detección de señales eléctricas y su representación gráfica en función del tiempo. En la pantalla del osciloscopio se puede observar el tiempo, representado en el eje de ordenadas; y la señal, representada en el eje de abscisas.

El osciloscopio utilizado para el tfm es un osciloscopio digital de Yokogawa, formado por ocho canales, de los cuales se utilizan solamente tres, que son los siguientes:

- Canal 1: señal del captador de presión piezoeléctrico
- Canal 5: Señal de la chispa
- Canal 6: Señal del trigger

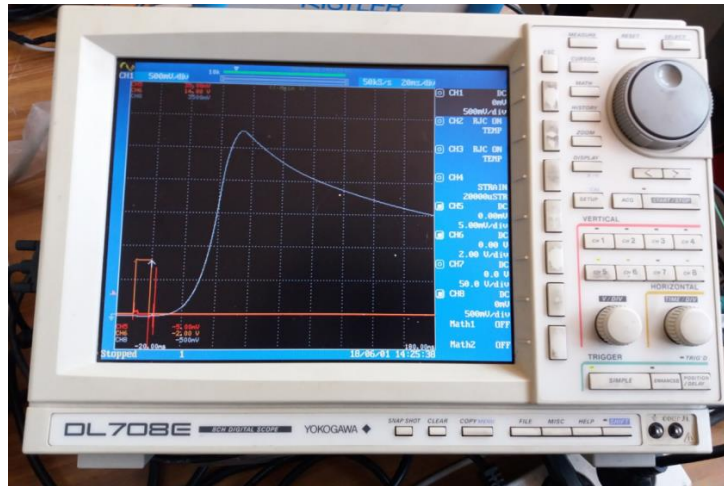


Figura 3.13: Osciloscopio digital

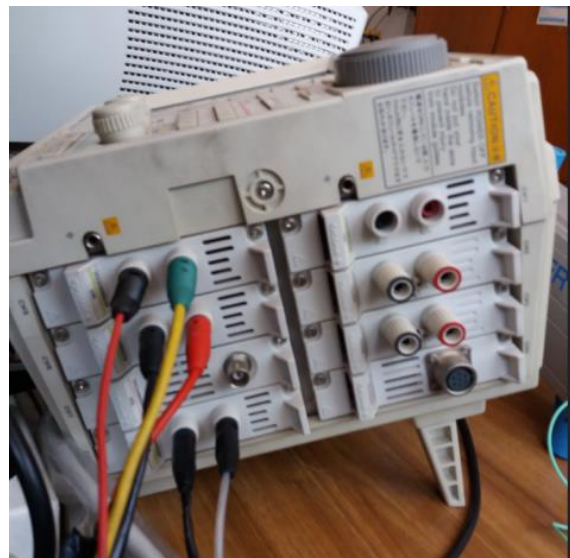


Figura 3.14: Módulos utilizados para la adquisición de datos

## 3.2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

En este capítulo se explica la metodología llevada a cabo para conseguir en el interior de la cámara de combustión una mezcla homogénea en unas determinadas condiciones de presión y temperatura

### 3.2.1 Realización de la combustión

#### Preparación de la BCVC

Inicialmente, antes del llenado de la BCVC es necesario vaciar completamente la bomba, es decir, eliminar todos los productos de la combustión o combustiones

anteriores junto con el agua que se forma después de cada una de ellas, ya que muchas veces la temperatura de la BCVC no es la necesaria para que se produzca su evaporación. Esto se lleva a cabo primero realizando un venteo, luego pasando aire a través de la BCVC y por último haciendo el vacío en dicha BCVC mediante un eyector (Figura 8) que por efecto venturi causa una depresión lo suficientemente baja como para vaciar la cámara de combustión. De esta manera se puede asegurar que los gases residuales de la combustión se han eliminado y solo se tiene aire en el interior.

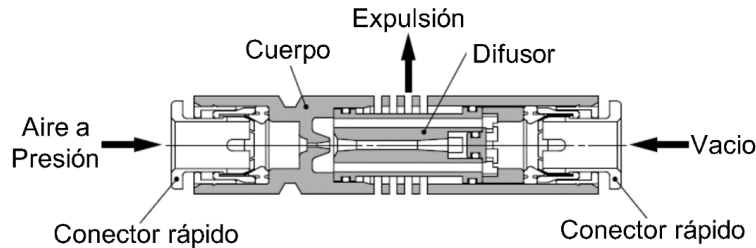


Figura 3.15: Eyector de vacío

Si existe una gran cantidad de agua residual tras el proceso de combustión, será necesario hacer varios venteos, pasar aire varias veces y realizar varios vacíos; de esta forma el agua pasará a estado gaseoso ya que la presión en la BCVC es menor que la presión de saturación.

Las condiciones iniciales a las que se va a realizar cada experimento se establecen antes de realizar el proceso de combustión. En el caso de la temperatura se fija mediante el controlador PID y en el caso de la presión se fija mediante la cantidad de aire que se introduce en la BCVC.

### Llenado de la BCVC

El proceso de llenado de la BCVC es diferente si el combustible es líquido o gaseoso. En un proceso muy importante ya que es la clave para obtener una mezcla lo más homogénea posible. La cantidad de combustible a introducir en la BCVC, ya sea líquido o gaseoso, se determina mediante un Excel que contiene las ecuaciones termoquímicas. Dicha cantidad depende de la temperatura, la presión y el dosado.

### Introducción de combustibles líquidos

El combustible líquido se introduce en la BCVC mediante una jeringa. En función de la cantidad de volumen que se tenga que introducir, se utilizarán jeringas con diferentes rangos de volumen. A cada jeringa se le acopla una aguja y se introduce en la bomba a través de una válvula situada en la entrada del proceso en el panel de control. Para asegurar que el combustible entra, se introduce tras realizar el vacío en la BCVC ya que al existir una depresión entre la bomba y el exterior asegura dicha entrada y evita el escape del combustible.

El volumen que hay que introducir de combustible líquido se obtiene a partir de la ley de los gases ideales:

$$PV = nRT \quad (3.1)$$

$$V = \frac{nRT}{P} \quad (3.2)$$

V es el volumen del combustible

P es la presión a la que se realiza el proceso de combustión

T es la temperatura a la que se realiza el proceso de combustión

R es la constante de los gases ideales

n es el numero de moles del combustible

Introducción de combustibles gaseosos y aire

El combustible gaseoso y el aire se introducen en la BCVC mediante un conducto que se encuentra en el panel de control, como se observa en la figura 7, en la entrada del proceso y llega hasta la BCVC. Los conductos de entrada y salida tienen unas válvulas de cierre de alta presión que permiten aislar de forma segura la cámara de combustión durante el proceso de combustión. Dichas válvulas pueden soportar hasta 200 bares.



Figura 3.16: panel de control

Para introducir los gases en la BCVC se utiliza el método de las presiones parciales de Dalton, donde para una mezcla de gases, la presión total es igual a la suma de la presión parcial de cada uno de los gases. Dicha presión parcial de cada uno de los gases es igual a su vez a la presión total por la fracción molar de cada uno de los gases de la mezcla:

$$p_{total} = p_{total} * X_{Gas\ i} + p_{total} * X_{Gas\ i+1} + p_{total} * X_{Gas\ i+2} + \dots \quad (3.3)$$

Primero se introduce el combustible o los combustibles gaseosos hasta la presión parcial de cada de ellos y por último el aire hasta conseguir la presión a la que se va a realizar el proceso de combustión.

### **Tiempo de mezcla**

El tiempo de mezcla es el tiempo necesario para que se produzca la mezcla homogénea en el interior de la BCVC tras añadir el combustible y el aire que es aproximadamente de 5 minutos. Dicho tiempo es necesario para permitir la mezcla entre el combustible y el aire.

### **Combustión**

Una vez que ha transcurrido el tiempo de mezcla, se inicia la combustión mediante el salto de la chispa en el centro geométrico de la bomba. Dicha combustión da lugar a un frente de llama que se propaga a través de la bomba comprimiendo la mezcla de aire y combustible aun sin quemar hasta chocar con las paredes donde finaliza la combustión.

### **3.2.2 Adquisición de datos**

En el momento en que salta la chispa se produce la adquisición de datos. El trigger está conectado al osciloscopio de manera que nos permita registrar el momento en el cual salta la chispa. Además el osciloscopio se programa de tal manera que registre datos instantes antes a la combustión, por ejemplo un 10% o 20% del tiempo de grabación total. Tras cada una de las combustiones se obtienen tres curvas en la pantalla del osciloscopio como se observa en la figura 1.

La curva de presión es posteriormente trasladada a un programa de tratamiento de los datos para su análisis.

Una vez finalizada la combustión se vuelve a realizar el venteo y vacío de la BCVC.

## **3.3 MODELOS DE DIAGNOSTICO**

### **3.3.1 MODELO DE DOS ZONAS DE DIAGNOSTICO DE LA COMBUSTIÓN**

#### **3.3.1.1 HIPOTESIS DEL MODELO**

El tratamiento de los datos obtenidos se lleva a cabo mediante el modelo de diagnostico de la combustión basado en la aplicación de las principales leyes de conservación de la termodinámica para obtener los diferentes parámetros característicos de cada combustión como la temperatura de cada una de las zonas, las fracciones de masa quemadas, la fracción de calor liberado y la velocidad de combustión.

El modelo de diagnostico es un modelo matemático de dos zonas cuasidimensional que tiene las siguientes hipótesis:

- La BCVC se encuentra dividida en dos zonas concéntricas entre sí: la zona de mezcla fresca o sin quemar (esfera interior), la cual está formada por la mezcla de combustible y aire; y la zona de quemados (zona exterior) compuesta por los

productos de la combustión de la mezcla fresca. Al inicio, la BCVC es una única zona sin quemar y al producirse la chispa se forman dos zonas concéntricas.

- Cada zona es caracterizada mediante valores promediados de las propiedades como la temperatura, el dosado, el volumen o la composición química. En el caso de la zona sin quemar dichas propiedades son constantes, pero en la zona quemada son variables con el tiempo.
- La presión es constante e igual en las dos zonas establecidas.
- La ecuación térmica de estado utilizada para cada zona es la ecuación de los gases ideales, ya que la presión y la temperatura aumentan al mismo tiempo.
- La transmisión de calor solo existe en el interior de la BCVC y en sus paredes, por lo que no se tiene en cuenta la transmisión entre las dos zonas del modelo.
- Se considera un único flujo másico, que se conoce como tasa de combustión ( $\dot{m}_{sq \rightarrow q}$ ) y se transfiere desde la zona sin quemar hasta la zona quemada.

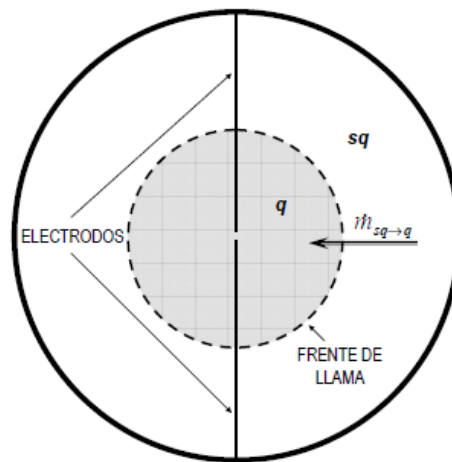


Figura 3.17: Esquema del modelo de diagnóstico cuasidimensional de dos zonas [24]

El modelo utiliza el valor experimental de la presión como dato de entrada para resolver el resto de variables termodinámicas del sistema como son la temperatura, el volumen y la composición en cada zona. A partir del volumen de la zona quemada con la hipótesis del frente de llama esférico, se calcula el radio de dicha esfera y la posición del frente de llama. La evolución del frente de llama viene dada por el radio de la zona de quemados, determinando la velocidad del frente de llama y su superficie permite calcular la velocidad de combustión laminar.

### 3.3.1.2 PLANTEAMIENTO DE LAS ECUACIONES

Al tener dos zonas, cada una se comporta como un sistema abierto, en el cual la energía interna varía debido al aporte de calor, de trabajo y de entalpía que acompaña a flujo de la combustión. Esto se expresa mediante el primer principio de la termodinámica para sistemas abiertos, adiabáticos y no estacionarios aplicándolo en cada una de las zonas como se observa en las ecuaciones 3.1 y 3.2:

$$\frac{dU_{sq}}{dt} = \dot{W}_{sq} - \dot{m}_{sq \rightarrow q} * h_{sq} \quad (3.1)$$



$$\frac{dU_q}{dt} = \dot{W}_q + \dot{m}_{sq \rightarrow q} * h_{sq} \quad (3.2)$$

Donde U es la energía interna total de la zona sin quemar,  $\dot{W}$  es la potencia mecánica desarrollada sobre la zona sin quemar y  $h_{sq}$  es la entalpia por unidad de masa de la zona sin quemar.

El incremento de masa en la zona quemada está motivado por la entrada de masa procedente de la zona sin quemar debido al proceso de combustión  $\dot{m}_{sq \rightarrow q}$ . Esto se expresa mediante las ecuaciones de conservación de la masa para cada una de las zonas como se observa en las ecuaciones 3.3 y 3.4:

$$\dot{m}_{sq} = -\dot{m}_{sq \rightarrow q} \quad (3.3)$$

$$\dot{m}_q = \dot{m}_{sq \rightarrow q} \quad (3.4)$$

También se utiliza la ecuación de los gases ideales como ecuación térmica de estado para cada una de las zonas como se observa en las ecuaciones 3.5 y 3.6:

$$p * V_{sq} = m_{sq} * R_{sq} * T_{sq} \quad (3.5)$$

$$p * V_q = m_q * R_q * T_q \quad (3.6)$$

El volumen de la cámara de combustión en cualquier momento se puede poner como la suma de los volúmenes de ambas zonas como se observa en las ecuaciones 3.7:

$$V_T = V_{sq} + V_q \quad (3.7)$$

Las energías internas, entalpias y flujo de trabajo de cada zona presentes en las ecuaciones 5.1 y 5.2 pueden expresarse a través de las temperaturas, los volúmenes, la composición química de la zona sin quemar se puede considerar constante y conocida y la composición química de la zona quemada se puede obtener admitiendo equilibrio químico a partir de la presión, la temperatura y la composición de la zona sin quemar. Por último, la posición del frente de llama puede obtenerse a partir del volumen de los quemados.

De esta forma se tiene un sistema de ecuaciones que representa el modelo, el cual está formado por 7 ecuaciones (5.1 a 5.7) y 8 incógnitas: la temperatura de las dos zonas ( $T_{sq}$ ,  $T_q$ ), los volúmenes de las dos zonas ( $V_{sq}$  y  $V_q$ ), la masa de las dos zonas ( $m_{sq}$  y  $m_q$ ), la presión (p) y el flujo de combustión ( $\dot{m}_{sq \rightarrow q}$ ).

Como en el modelo la presión es un dato que se conoce, el sistema tendría 7 ecuaciones con 7 incógnitas, por lo que dicho modelo se puede resolver, en el cual la velocidad de combustión se puede obtener mediante la ecuación 3.8:

$$c_c = \frac{\dot{m}_{sq \rightarrow q}}{\rho_{sq} * A_f} = \frac{\dot{m}_{sq \rightarrow q}}{\frac{p}{R_{sq} * T_{sq}} * A_f} \quad (3.8)$$

Donde A<sub>f</sub> es el frente de llama, C<sub>c</sub> es la velocidad de combustión y ρ<sub>sq</sub> es la densidad de los no quemados.

### 3.3.1.3 RESULTADOS DEL MODELO

A partir de este modelo establecido, se puede obtener diferentes parámetros del proceso de combustión además de la ya mencionada velocidad de combustión, la temperatura de la zona sin quemar, la fracción de masa quemada (FMQ), el radio de frente de llama y la fracción de calor liberado (FQL).

La fracción de masa quemada (FMQ) se define como cociente entre la masa de quemados y la masa total en cada instante como se observa en la ecuación 3.9:

$$FMQ = \frac{m_q}{m_q + m_{sq}} \quad (3.9)$$

Además la tasa de FMQ se obtiene como la derivada temporal de la FMQ, dFMQ.

### 3.3.2 MODELO DE PROCESADO DE IMÁGENES

Es un algoritmo desarrollado en matlab que realiza el procesamiento gráfico y análisis de las combustiones. Este modelo permite:

- Determinar la velocidad de propagación del frente de llama.
- Cuantificar el nivel de celularidad de la llama (células/cm<sup>2</sup>), es decir, el número y tamaño de las células en la superficie de la llama después del inicio de las inestabilidades celulares.
- Obtener la evolución del radio de llama

El procedimiento del procesamiento gráfico es el siguiente: Una vez adquirido el video mediante la videocámara de alta velocidad es introducido en el programa. Dicho video es leído fotograma a fotograma desde el inicio de la combustión hasta que esta finaliza.

Inicialmente se extrae y se almacena el primer fotograma de la captura, luego se calcula el radio de la cámara de combustión en píxeles y las coordenadas de su centro sobre el fotograma mediante el algoritmo RANSAC.

Después tiene lugar un bucle de procesamiento en el que en cada iteración se obtienen los parámetros dichos anteriormente: el radio de frente de llama y el cálculo de la celularidad.

Una vez que se ha realizado el procesamiento de las imágenes se llevan a cabo diferentes representaciones del proceso:

- Los fotogramas de la combustión sin alterar
- El procesamiento para la obtención del radio de combustión superpuesto al resultado
- Una gráfica que representa el radio frente al tiempo

- El algoritmo de procesado para el cálculo del número de células dentro de la región estudiada, junto con la superposición de los centroides de cada área obtenida.
- El algoritmo de procesado superpuesto a los fotogramas de la combustión sin alterar
- Una grafica con la representación del número de células por unidad de área en función del tiempo
- La ventana de control del programa que permite controlar el ritmo de reproducción de videos.

De esta forma se puede obtener para cada instante el radio del frente de llama y la celularidad correspondiente expresada como el número de células por unidad de área. Para más información sobre el modelo de procesado o tratamiento de imágenes ver M. Rodríguez González [29].



# **CAPÍTULO 4: RESULTADOS**



## 4. RESULTADOS

En este capítulo se va a llevar a cabo una descripción de todos los resultados obtenidos durante los experimentos realizados para el presente trabajo.

Primero se realizará una validación de la metodología para la determinación de la velocidad de combustión en la bomba de combustión cilíndrica. Para ello se compara la velocidad de combustión del metano y el hidrógeno con los obtenidos por otros autores en condiciones ambientales. En segundo lugar, se realiza un estudio paramétrico de mezclas de hidrógeno/aire, variando presiones iniciales, temperaturas y dosado. En tercer lugar, se presentan resultados obtenidos con mezclas H<sub>2</sub>/CO/aire. Y en cuarto lugar una comparación de los resultados de las mezclas 100% H<sub>2</sub> y aire con las mezclas 80% H<sub>2</sub>-20% CO y aire. En todos los casos se presentan resultados obtenidos a través del registro de la presión durante el proceso de combustión (como velocidades de combustión, temperaturas, etc, al aplicar el modelo de diagnóstico de dos zonas) y resultados obtenidos de las imágenes obtenidas con la técnica Schlieren al aplicar el modelo de tratamiento de imágenes.

### 4.1 VALIDACION DEL MODELO

Inicialmente se ha llevado a cabo la validación de la instalación y metodología, es decir, la validación de la bomba cilíndrica de combustión a volumen constante. Esta validación permitirá asegurar que los experimentos que se vayan a realizar en ella, los datos obtenidos en ella y la metodología llevada a cabo sean totalmente válidos.

La validación se ha llevado a cabo utilizando dos combustibles diferentes: el metano y el hidrógeno, ya que son dos combustibles para los cuales existe una gran cantidad de bibliografía y permiten una amplia comparación y validación de los datos obtenidos.

La validación se va a llevar a cabo a través de los valores de la velocidad de combustión laminar.

#### 4.1.1 VALIDACION CON METANO

El metano, como se ha dicho antes, además de existir numerosos trabajos en la bibliografía para comparar, tiene una serie de características que le hacen un combustible adecuado para ser utilizado como gas de referencia a la hora de comparar resultados y validar una metodología.

Para llevar a cabo la validación con metano, inicialmente se han hecho una serie de experimentos con las siguientes condiciones:

- Presión inicial:  $p_i=0.1$  MPa
- Temperatura inicial:  $T_i=300$  K
- Rango de dosados:  $\phi=0.7-1.2$

Los experimentos llevados a cabo en estas condiciones se observan en la Figura 4.1, en la cual se ve cómo evoluciona la presión en función del tiempo a una presión fija de 0.1 MPa y a una temperatura fija de 300 K para todo el rango de dosados:

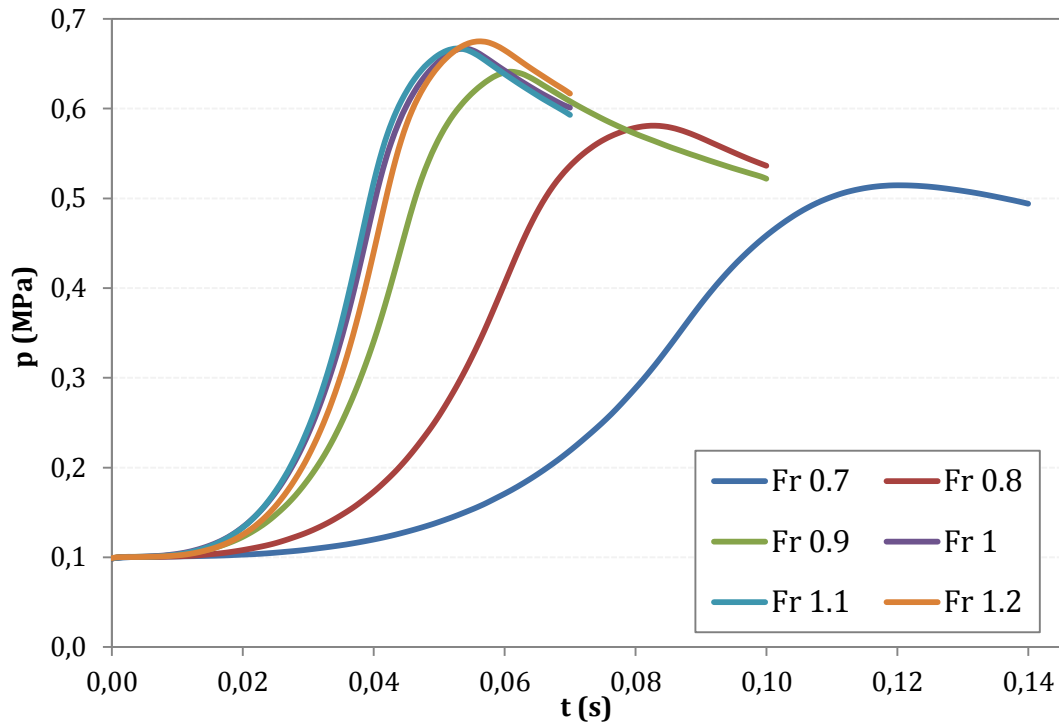


Figura 4.1: Evolución de la presión frente al tiempo variando el dosado de mezclas metano/aire para 0.1 MPa y 300 K de condiciones iniciales

Como se observa en la Figura 4.1, a medida que aumenta el dosado, es decir, la relación entre la cantidad de combustible (en este caso  $CH_4$ ) y aire; la presión máxima alcanza valores más altos y la combustión es más rápida, es decir, la curva se desplaza hacia la izquierda. Ese máximo de presión es alcanzado en menor tiempo para los dosados 1 y 1.1, pero para dosado 1.2 la curva de presión vuelve a desplazarse hacia la derecha, esto quiere decir que si se sigue aumentando el dosado la combustión será cada vez más lenta y tendrá valores de presión máxima más pequeños.

A partir de las curvas de presión obtenidas, se ha llevado a cabo la obtención de las velocidades de combustión laminar para cada dosado mediante el modelo de diagnóstico termodinámico de dos zonas en Matlab explicado anteriormente. La evolución de la velocidad de combustión frente a la temperatura de los no quemados para diferentes dosados se observa en la Figura 4.2:



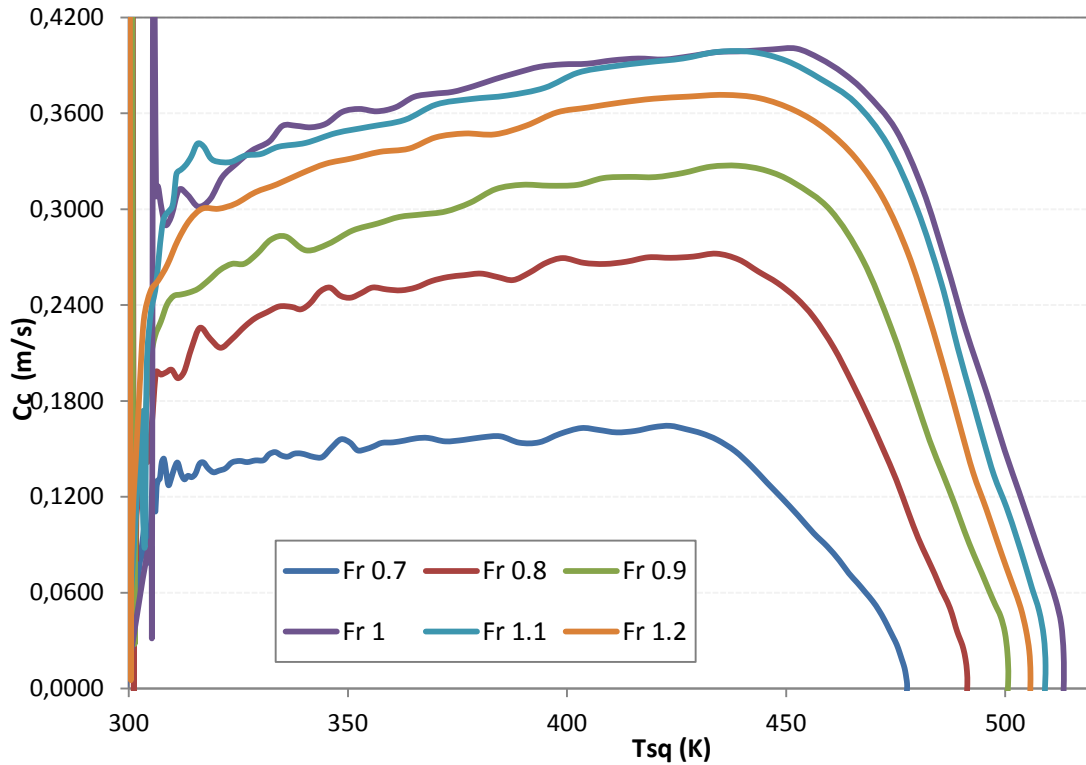


Figura 4.2: Evolución de la velocidad de combustión laminar frente a la temperatura de los no quemados variando el dosado de mezclas metano/aire para condiciones iniciales 0.1 MPa y 300 K

En la Figura 4.2, se puede observar que a medida que el dosado aumenta, la velocidad de combustión aumenta hasta alcanzar dosado 1, es decir, hasta alcanzar el dosado estequiométrico. Una vez que el dosado sigue aumentando la velocidad de combustión comienza a descender. Esto se observa en el caso de dosado 1.1, donde la velocidad comienza a disminuir pero se mantiene muy cercana a la de dosado 1, pero para el caso de dosado 1.2 ya tiene lugar dicha disminución en la velocidad de combustión laminar. Esto corrobora lo dicho anteriormente de que a partir de dosado 1.2 la combustión es más lenta.

Por último, una vez obtenida la velocidad de combustión para cada dosado, se realiza un ajuste a una correlación del tipo Metghalchi and Keck [30] que relaciona la velocidad de combustión con la temperatura y la presión durante la combustión.

De esta forma se puede extrapolar y obtener los datos de la velocidad de combustión a las condiciones ambientales, 300K y 1 bar de presión. Para la validación del modelo se realiza una representación de cada valor de la velocidad de combustión en función del dosado y se compara con los experimentos realizados por otros autores, esto se observa en la Figura 4.3:

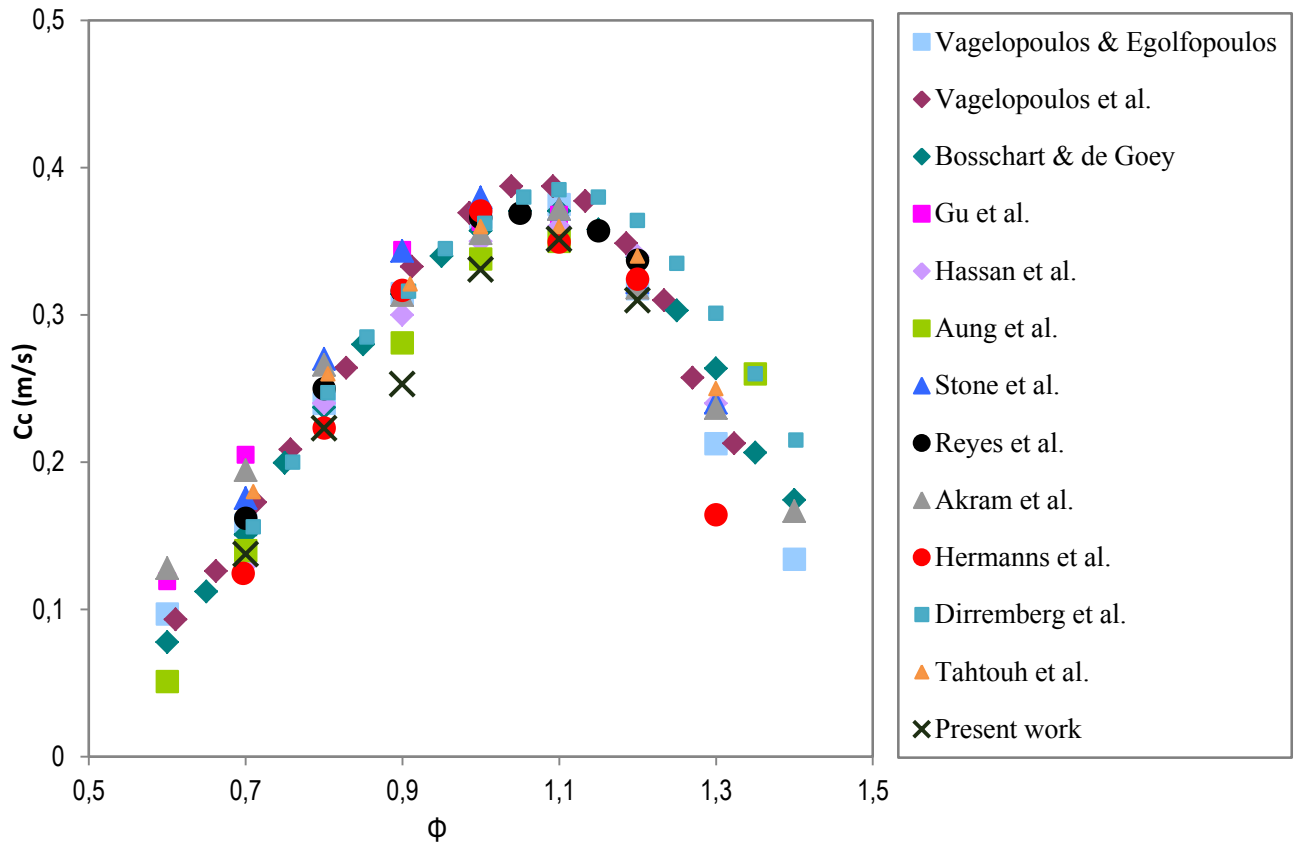


Figura 4.3: Comparación de los resultados obtenidos de la velocidad de combustión laminar con los de diferentes autores para un rango de dosados de mezclas metano/aire a 0.1 MPa y 300 K de condiciones iniciales

Como se observa en la Figura 4.3, los datos obtenidos en los experimentos se encuentran en el mismo rango de valores que los de los autores. Los valores elegidos son para un radio de 0.04 m, para que el frente de llama sea esférico.

Los valores obtenidos son muy parecidos a los obtenidos por Aung et al. [31] también en una bomba de combustión y un poco más bajos que los obtenidos por Vagelopoulos & Egolfopoulos [32] con una llama estacionaria. Los valores obtenidos por Reyes et al. [33] han sido obtenidos en una bomba de combustión esférica existente en el laboratorio de motores.

Por tanto, se puede concluir que los valores obtenidos son coherentes, y por ello la metodología desarrollada para la determinación de la velocidad de combustión en la bomba de combustión cilíndrica queda validada con metano.

#### 4.1.2 VALIDACION DEL MODELO CON HIDRÓGENO

Al igual que el combustible metano, para el hidrógeno también existen numerosos estudios en la bibliografía, además de poseer una serie de características que le hacen un combustible adecuado para ser utilizado como gas de referencia a la hora de comparar resultados y validar una metodología, por ello también se ha utilizado como combustible de validación.

Los experimentos realizados con hidrógeno para llevar a cabo la validación se han hecho con las siguientes condiciones:

- Presión inicial:  $p_i=0.1$  MPa
- Temperatura inicial:  $T_i=315$  K
- Rango de dosados:  $\phi=0.4-1$

En la Figura 4.4, tiene lugar la evolución de la presión en función del tiempo para diferentes dosados a una presión fija de 0.1 MPa y una temperatura fija de 315 K:

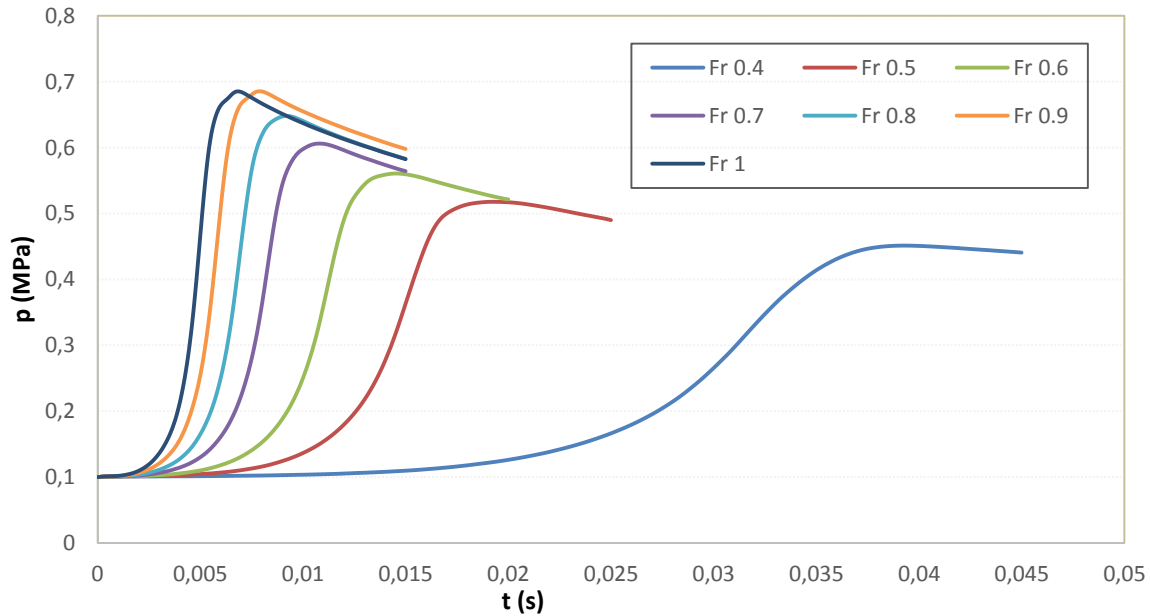


Figura 4.4: Evolución de la presión frente al tiempo variando el dosado de mezclas hidrógeno/aire para 0.1 MPa y 315 K

Como se observa en la Figura 4.4, a medida que aumenta el dosado la presión máxima alcanza valores más altos y la combustión es más rápida, ya que ese máximo de presión es alcanzado en menor tiempo, como era de esperar.

A partir de las curvas de presión obtenidas, se obtienen las velocidades de combustión laminar para cada dosado mediante el modelo de diagnóstico de dos zonas, al igual que con el metano. La evolución de la velocidad de combustión frente a la temperatura de los no quemados para diferentes dosados tiene lugar en la Figura 4.5:

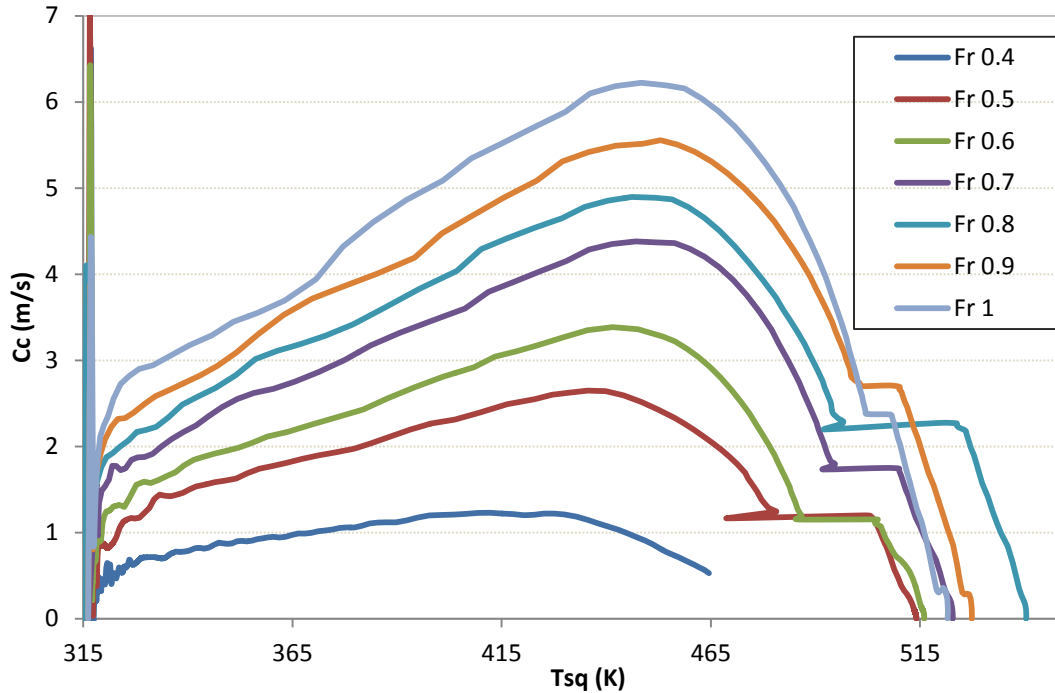


Figura 4.5: Evolución de la velocidad de combustión laminar frente a la temperatura de los no quemados variando el dosado de mezclas hidrógeno/aire para 0.1 MPa y 300 K

Como se observa en la Figura 4.5, a medida que la cantidad de dosado aumenta, la velocidad de combustión aumenta hasta alcanzar dosado 1.

Por último, una vez obtenida la velocidad de combustión para cada dosado, se ajustan en función de presión y temperatura para obtener los valores discretos y llevar a cabo la validación, al igual que con el metano. En la Figura 4.6. se representan las velocidades de combustión en función del dosado y se comparan con los experimentos realizados por otros autores.

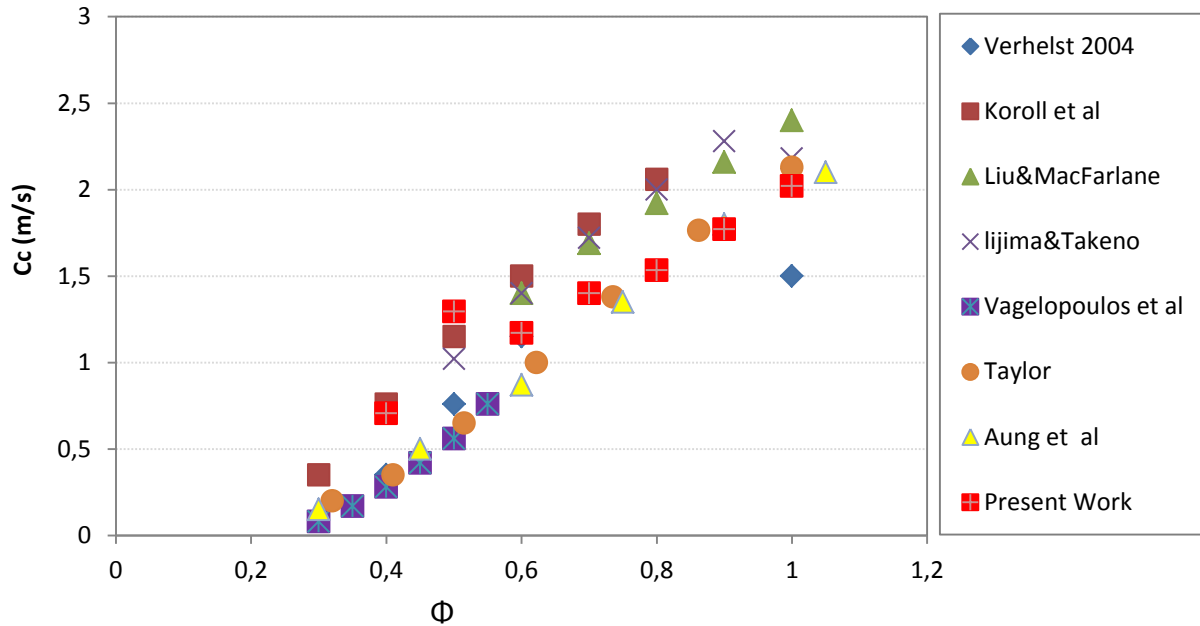


Figura 4.6: Comparación de los resultados obtenidos de la velocidad de combustión laminar con los de diferentes autores para un rango de dosados de mezclas hidrógeno/aire a 0.1 MPa y 300 K

Los valores obtenidos, sobre todo a partir de dosado 0.6, son muy parecidos a los obtenidos por Aung et al. [34] a los obtenidos por Taylor et al. [35], en ambos casos en una bomba de combustión.

En la Figura 4.6, se observa que los datos obtenidos en los experimentos se encuentran en el mismo rango de valores que los de los autores, proporcionando la validez de que la metodología desarrollada para la determinación de la velocidad de combustión es la correcta. Se observa una tendencia en la que los puntos obtenidos para este trabajo disminuyen, esto es debido a que existe menos celularidad en la llama y por tanto la velocidad de combustión laminar no disminuye de forma constante.

## 4.2 ESTUDIO PARAMÉTRICO CON HIDRÓGENO

Una vez que la metodología ha sido validada, se ha realizado un estudio paramétrico de la influencia de los factores (presión, temperatura, dosado) que influyen sobre las principales características de la combustión de mezclas hidrógeno/aire en la velocidad de combustión, la densidad de celularidad, la tasa de stretch y el radio de frente de llama:

### 4.2.1 VELOCIDAD DE COMBUSTIÓN

Para el estudio de la velocidad de combustión, se ha llevado a cabo un estudio paramétrico de los principales factores que influyen sobre las mezclas hidrógeno/aire, los cuales son: la presión, la temperatura y el dosado.

#### 4.2.1.1 INFLUENCIA DE LA PRESIÓN INICIAL

Para estudiar la influencia de la presión inicial en la velocidad de combustión se han mantenido constantes la temperatura inicial y el dosado y se ha variado la presión.

Las condiciones de los experimentos realizados para comprobar la influencia de la presión inicial han sido las siguientes:

- Temperatura inicial:  $T_i=323$  K
- Rango de presiones:  $p_i=0.1-0.3$  MPa
- Dosado:  $\phi=0.5$

En la Figura 4.7 se puede observar la evolución de la presión, partiendo de diferentes presiones iniciales:

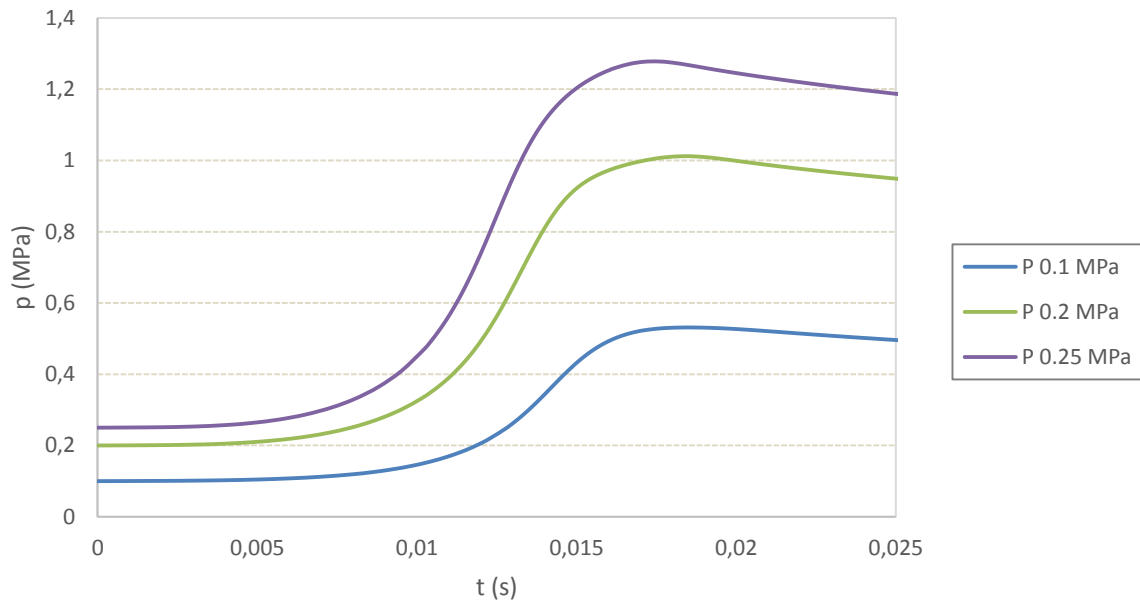


Figura 4.7: Evolución de la presión frente al tiempo variando la presión inicial de mezclas hidrógeno/aire para  $\phi=0.5$  y 323 K

Como era de esperar, cuanto mayor es la presión inicial de la que se parte, mayor presión y más rápido se desarrolla la combustión, al revés de lo que ocurría con el metano.

En la Figura 4.8 se ha realizado la representación de la evolución de la velocidad de combustión laminar frente a la temperatura de los no quemados para las diferentes presiones iniciales:

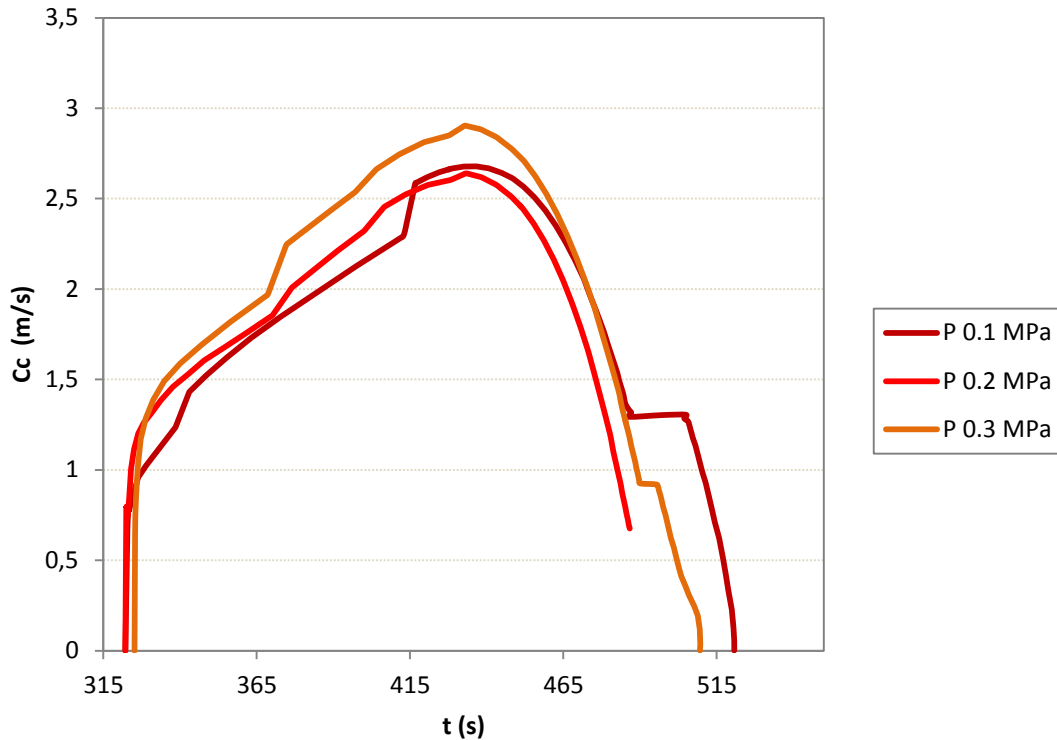


Figura 4.8: Evolución de la velocidad de combustión laminar frente a la temperatura de los no quemados variando la presión de mezclas hidrógeno/aire para  $\phi=0.5$  y 300 K

Como se observa en la Figura 4.8 la velocidad de combustión laminar se mantiene en un rango de valores aproximado para presiones de 0.1 MPa y 0.2 MPa, teniendo un pequeño aumento para 0.3 MPa. Esto establece que un aumento en la presión genera un aumento en la velocidad de combustión laminar del hidrógeno.

#### 4.2.1.2 INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA INICIAL

Para el estudio de la influencia de la temperatura inicial se han llevado a cabo los siguientes experimentos, en los cuales las condiciones son:

- Rango de presiones inicial:  $p_i=0.1$  MPa-0.3 MPa
- Rango de temperaturas inicial:  $T_i=323$  K y  $T_i=373$  K
- Dosado:  $\phi=0.5$

Se han realizado dos comparaciones, una a menor temperatura y otra a mayor temperatura.

Dicha influencia se ha comprobado en la evolución de la presión durante el proceso y en la velocidad de combustión.

En la Figura 4.9, se puede ver que para una misma presión inicial, un aumento de temperatura supone que la combustión se produzca sea más rápida, ya que el máximo de presión es alcanzado en menor tiempo, pero a su vez dicha presión máxima es menor.

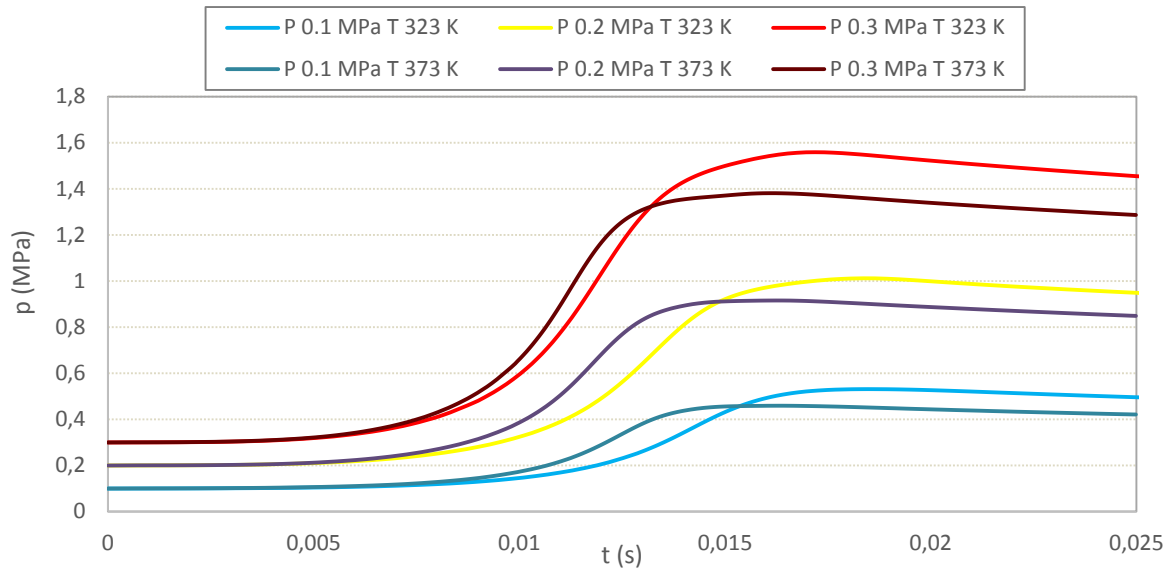


Figura 4.9: Evolución de la presión frente al tiempo variando la presión y temperatura iniciales de mezclas hidrógeno/aire para  $\phi=0.5$

En la Figuras 4.10, 4.11 y 4.12, se observa que para una misma presión inicial, un aumento de temperatura supone un aumento de la velocidad de combustión laminar en los tres casos. El aumento que se produce en los tres casos es muy similar, siendo aproximadamente entre 0.7-0.9 m/s.

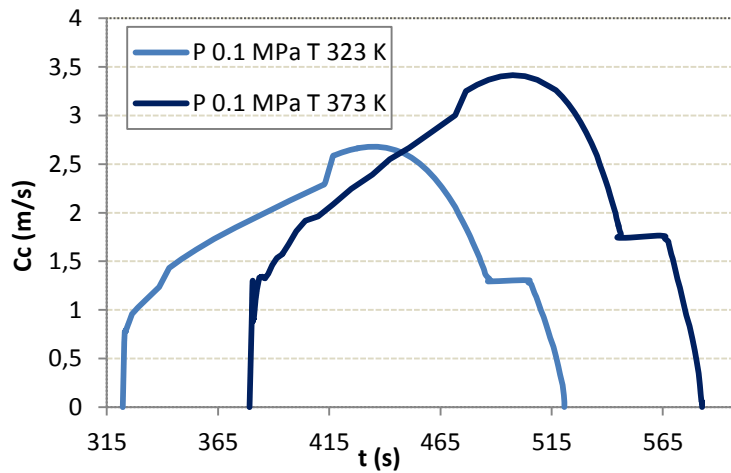


Figura 4.10: Evolución de la velocidad de combustión laminar frente a la temperatura de los no quemados variando la temperatura de mezclas hidrógeno/aire para  $\phi=0.5$  y 0.1 MPa



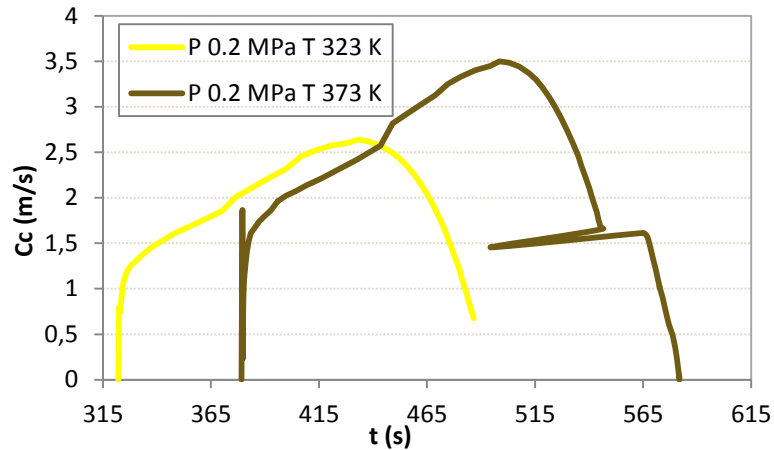


Figura 4.11: Evolución de la velocidad de combustión laminar frente a la temperatura de los no quemados variando la temperatura de mezclas hidrógeno/aire para  $\phi=0.5$  y 0.2 MPa

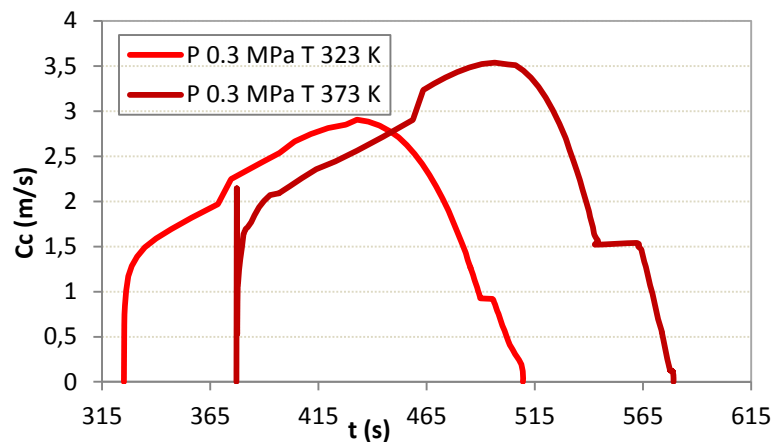


Figura 4.12: Evolución de la velocidad de combustión laminar frente a la temperatura de los no quemados variando la hidrógeno de mezclas hidrógeno/aire para  $\phi=0.5$  y 0.3 MPa

#### 4.2.1.3 INFLUENCIA DEL DOSADO

La influencia del dosado sobre la velocidad de combustión laminar se ha explicado en el apartado 4.1.2 de validación del modelo mediante hidrógeno.

#### 4.2.2 CELULARIDAD

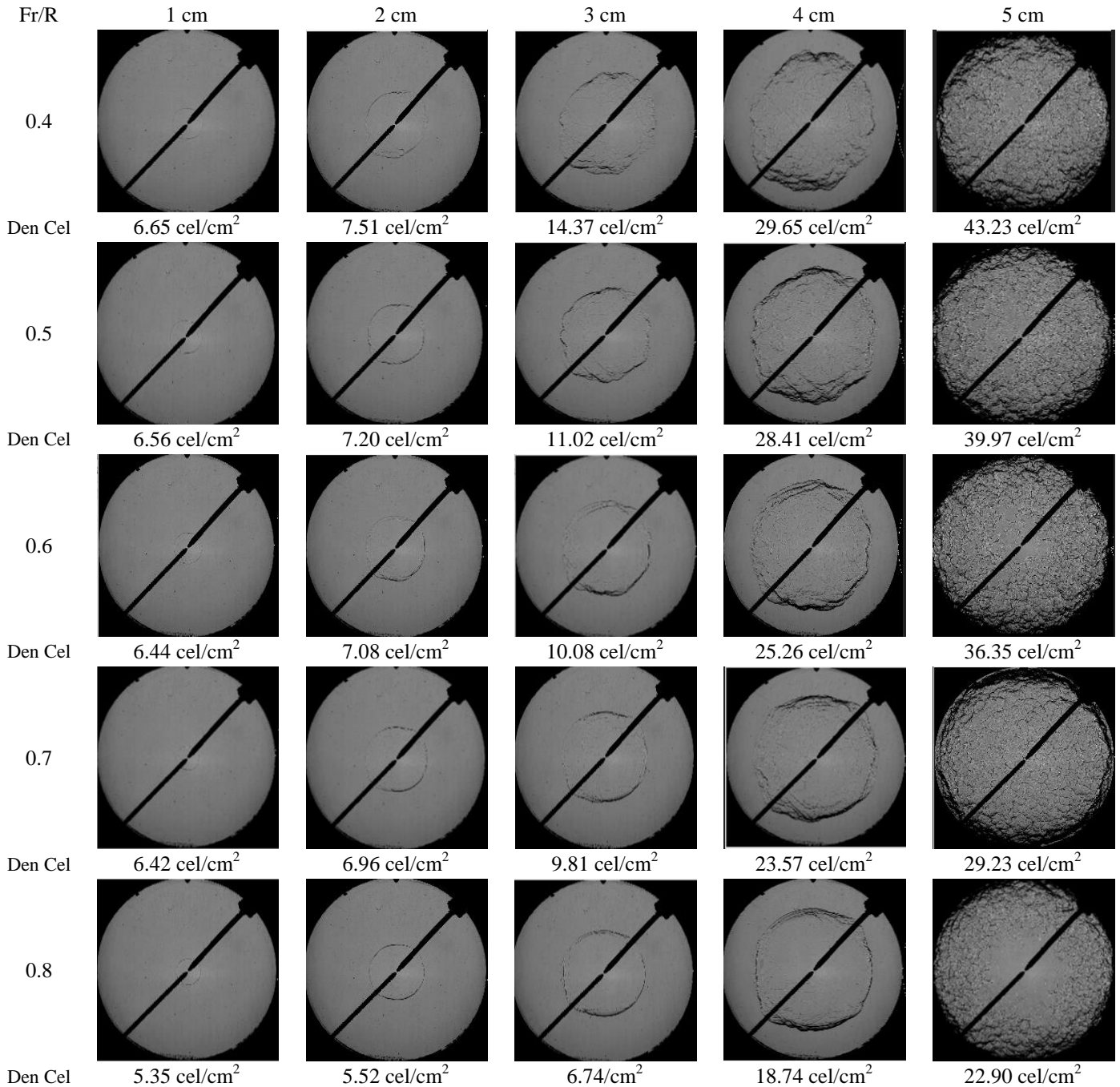
Para el estudio de la celularidad, al igual que para la velocidad de combustión laminar se ha realizado un estudio paramétrico de los principales factores que influyen sobre las mezclas hidrógeno/aire, los cuales como ya se ha dicho antes son: la presión, la temperatura y el dosado, además de un estudio de las inestabilidades que se producen en el frente de llama y dan lugar a unas celdas que es lo que se conoce como celularidad.

##### 4.2.2.1 INFLUENCIA DEL DOSADO

Para el estudio de la influencia del dosado se han llevado a cabo experimentos en los cuales las condiciones son las siguientes:

- Presion inicial:  $p_i = 0.1$  MPa
- Temperatura inicial:  $T_i = 315$  K
- Dosado:  $\phi = 0.5$

En la Figura 4.13, se representa la evolución de la celularidad en función del radio variando el dosado:



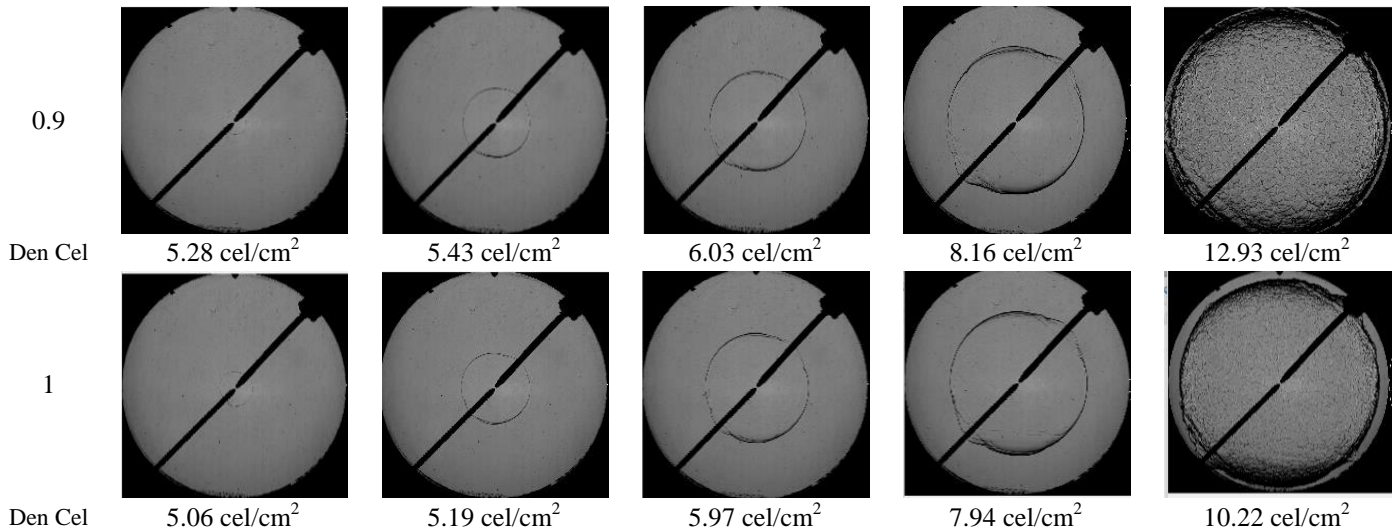


Figura 4.13: Imágenes Schlieren para mezclas hidrógeno/aire para diferentes radios variando el dosado a 0.1 MPa y 315 K

Como se observa a medida que el dosado disminuye, la celularidad va aumentando ya que la llama tiende a hacerse más inestable. Esto se puede ver reflejado para el radio 5 donde partiendo de dosado 1 hasta dosado 0.4 la llama se encuentra mucho más arrugada y la cantidad de celdas que se forman en la llama es mayor.

En la Figura 4.14 se representa la evolución de dicha densidad celular obtenida anteriormente en función del radio variando el dosado:

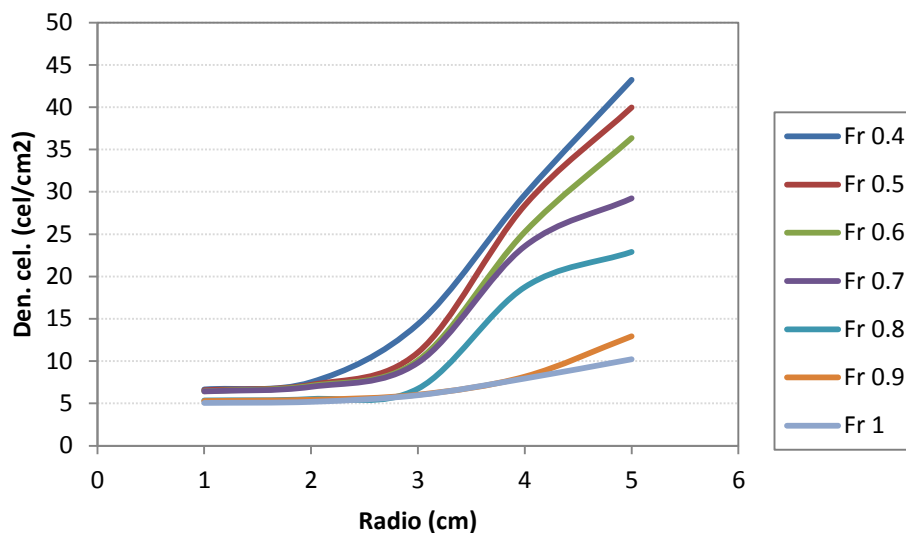


Figura 4.14: Evolución de la densidad celular en función del radio variando el dosado a 0.1 MPa y 315 K de condiciones iniciales.

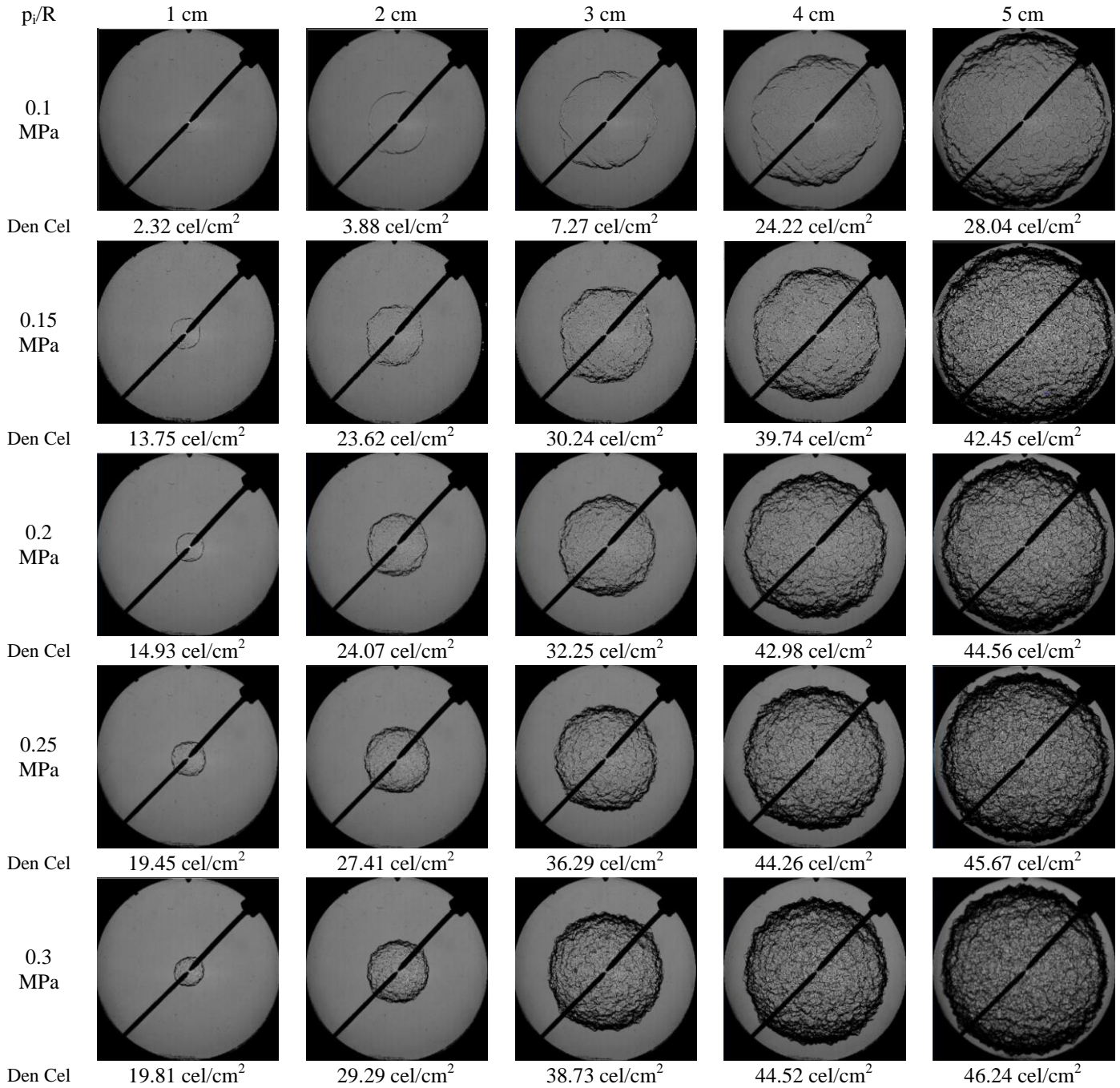
Como ya se ha dicho con el análisis en las imágenes Schlieren, a menor dosado la llama se encuentra más arrugada y por lo tanto mayor número de celdas.

#### 4.2.2.2 INFLUENCIA DE LA PRESION

Para el estudio de la influencia de la presión se han llevado a cabo experimentos en los cuales las condiciones son las siguientes:

- Rango de presiones iniciales:  $p_i = 0.1 \text{ MPa} - 0.5 \text{ MPa}$
- Temperatura inicial:  $T_i = 323 \text{ K}$
- Dosado:  $\phi = 0.5$

En la Figura 4.15, tiene lugar la evolución de la celularidad en función del radio variando la presión:



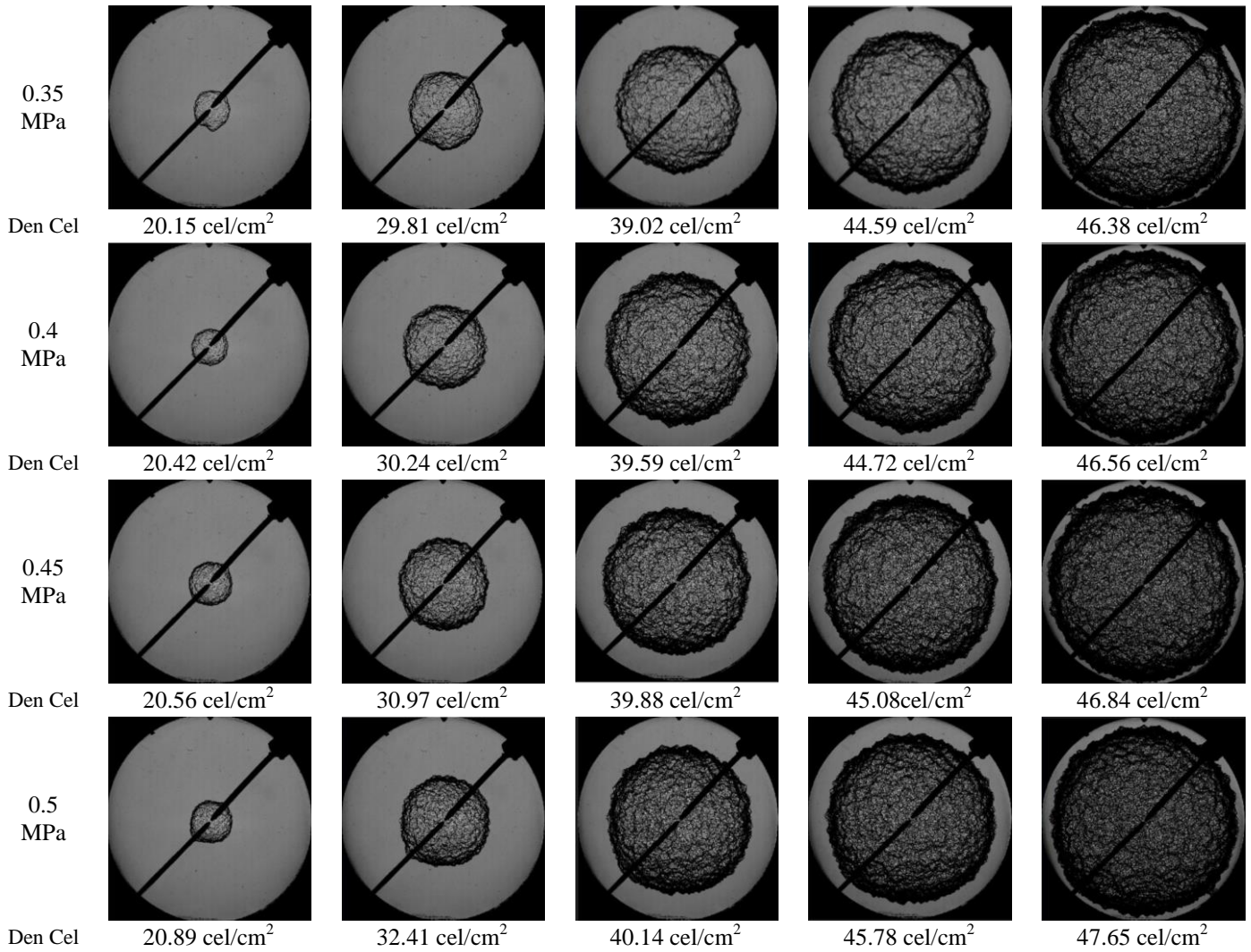


Figura 4.15: Imágenes Schlieren para mezclas hidrógeno/aire para diferentes radios variando la presión a  $\phi=0.5$  y a 323 K

Como se observa a medida que la presión aumenta, la celularidad va aumentando ya que la llama tiende a hacerse más inestable. Esto se puede ver reflejado para el radio 5 donde partiendo de presión 0.1 MPa hasta presión 0.5MPa, la llama esta se va arrugando cada vez más y la cantidad de celdas que se forman en la llama es mayor.

En la Figura 4.16 se representa la evolución de dicha densidad celular obtenida anteriormente en función del radio variando la presión:

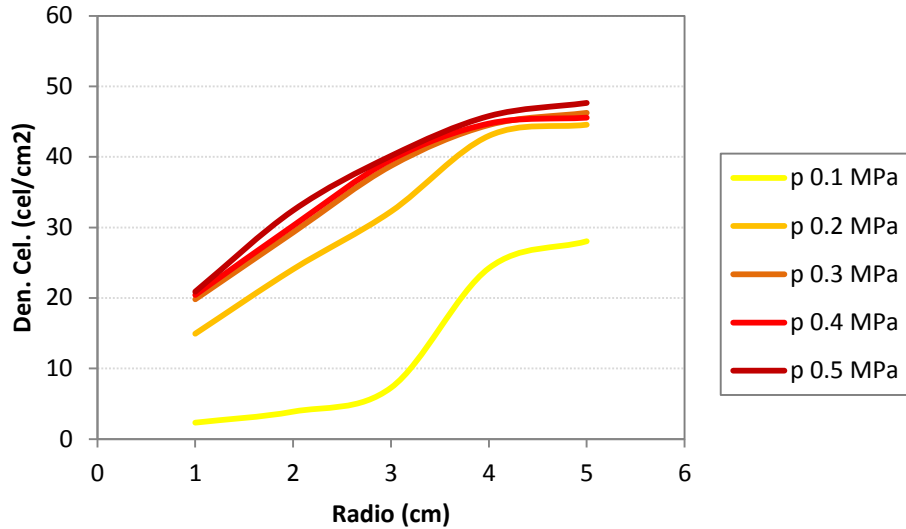


Figura 4.16: Evolución de la densidad celular en función del radio variando la presión a  $\phi=0.5$  y 315 K

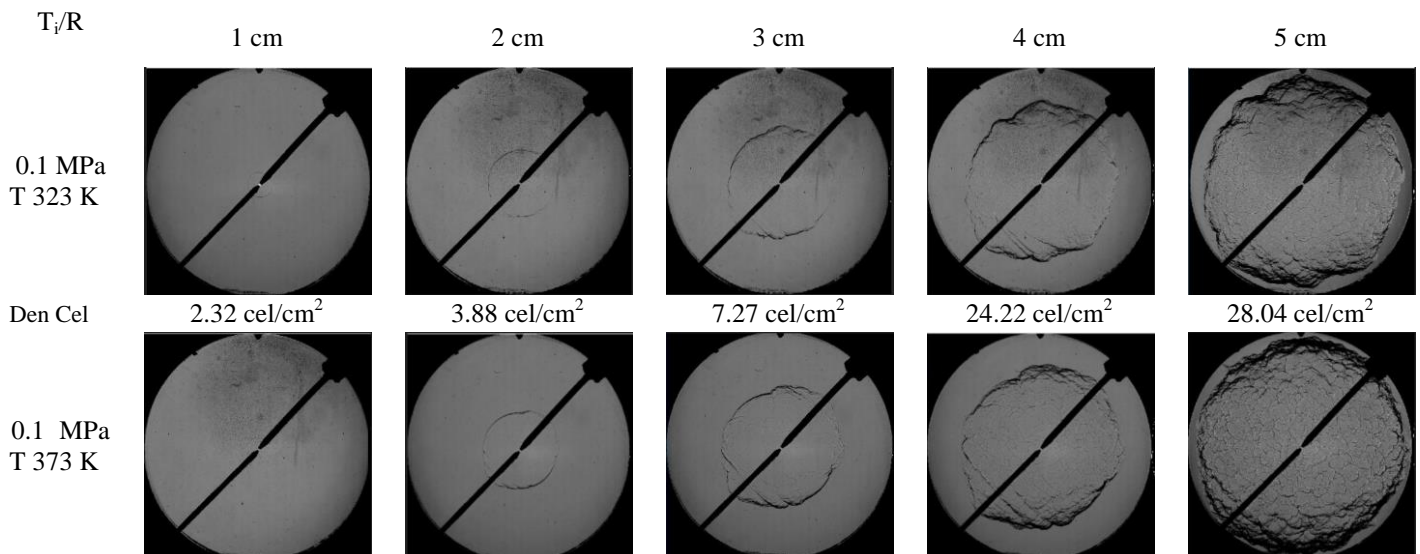
Como ya se ha dicho con el análisis en las imágenes Schlieren, a mayor presión la llama se encuentra más arrugada y por lo tanto mayor número de celdas. Destacar que el mayor cambio se produce al pasar de 0.1 MPa a 0.2 MPa, ya que a partir de esta presión la densidad celular aumenta de forma más lenta como se observa en el paso de 0.3 MPa a 0.4 MPa y a 0.5 MPa.

#### 4.2.2.3 INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA

Las condiciones de los experimentos llevados a cabo para observar la influencia de la temperatura son las siguientes:

- Rango de presiones iniciales:  $p_i=0.1$  MPa-0.3 MPa
- Temperatura inicial:  $T_i=323$  K-373 K
- Dosado:  $\phi=0.5$

En la Figura 4.16, 4.17 y 4.18 se representa la evolución de la celularidad en función del radio, en la cual se varía la temperatura para una misma presión:



Caracterización de procesos de combustión de mezclas  $H_2$ /aire e  $H_2$ /CO/aire para su uso como combustibles en MCIA

Den Cel      8.63 cel/cm<sup>2</sup>      15.84 cel/cm<sup>2</sup>      26.24 cel/cm<sup>2</sup>      36.94 cel/cm<sup>2</sup>      40.32 cel/cm<sup>2</sup>

Figura 4.16: Imágenes Schlieren para mezclas hidrógeno/aire para diferentes radios variando la temperatura para  $\phi=0.5$  y a 0.1 MPa

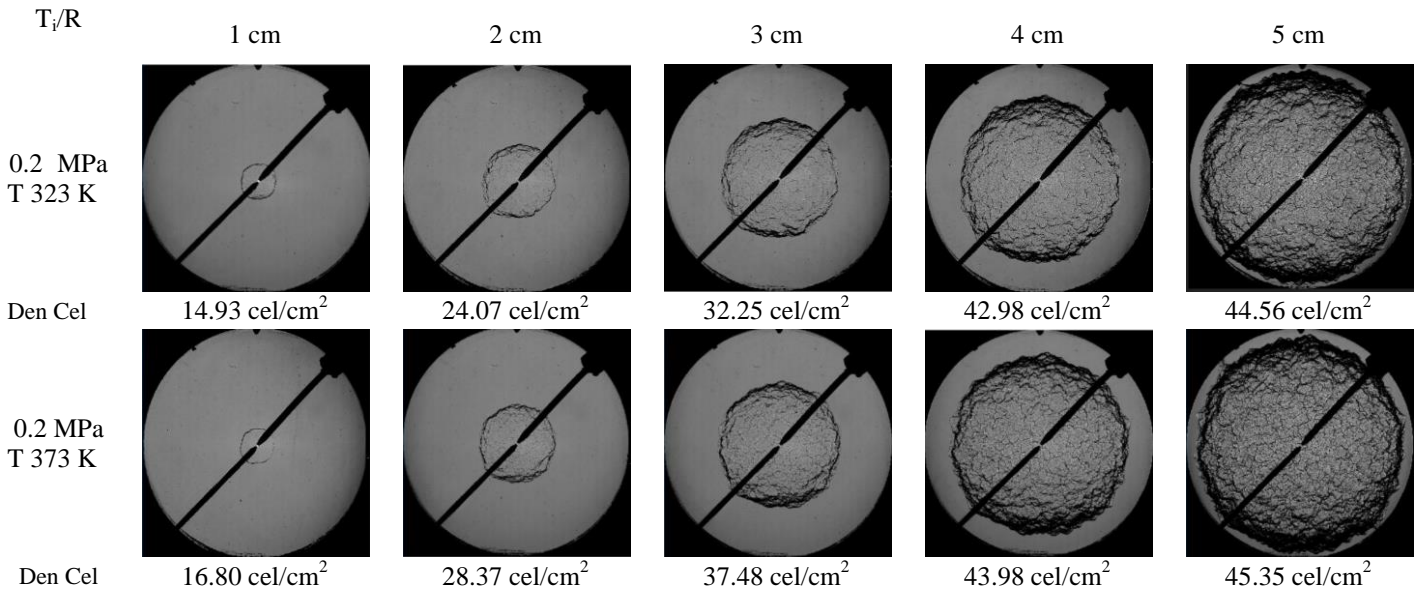


Figura 4.17: Imágenes Schlieren para mezclas hidrógeno/aire para diferentes radios variando la temperatura para  $\phi=0.5$  y a 0.2 MPa

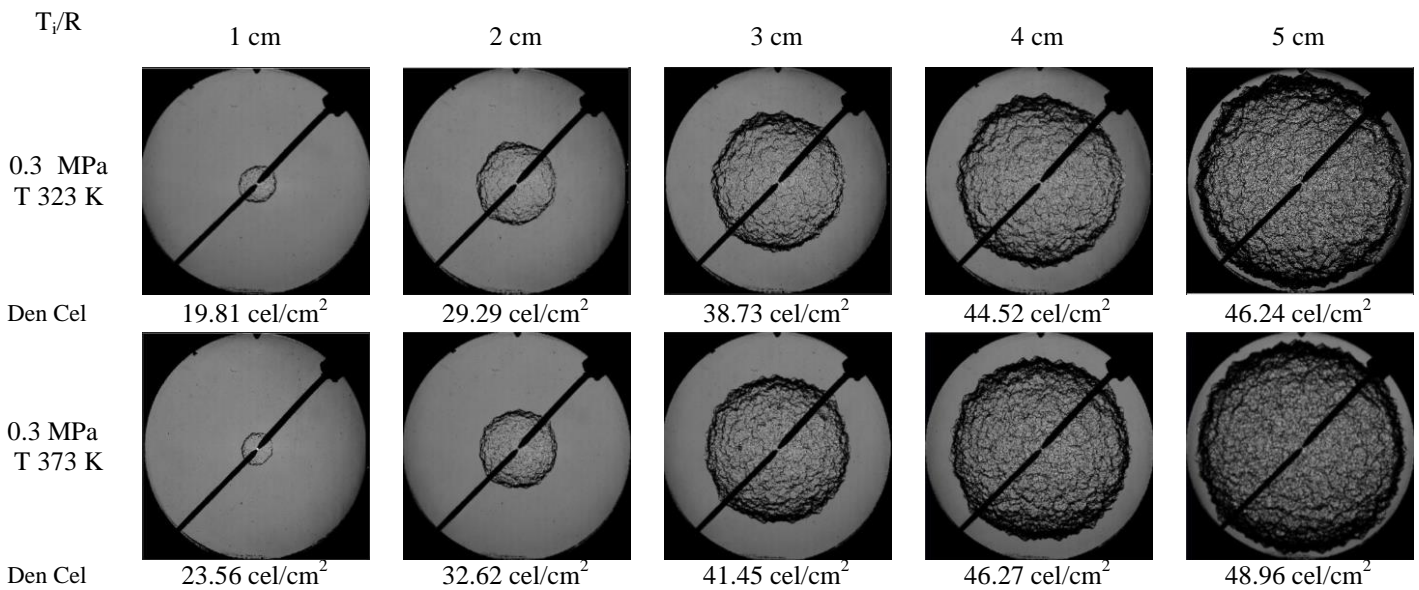


Figura 4.18: Imágenes Schlieren para mezclas hidrógeno/aire para diferentes radios variando la temperatura para  $\phi=0.5$  y a 0.1 MPa

Como se observa a medida que la temperatura aumenta, la celularidad va aumentando, debido a que la llama se arruga y se hace más inestable. El cambio más notable se observa para presión 0.1 MPa, ya que para presión 0.2 MPa y 0.3 MPa aunque la celularidad aumenta, los valores obtenidos son muy próximos.

En la Figura 4.19, 4.20 y 4.21 se representa la evolución de la densidad celular obtenida anteriormente en función del radio variando la temperatura para una misma presión:

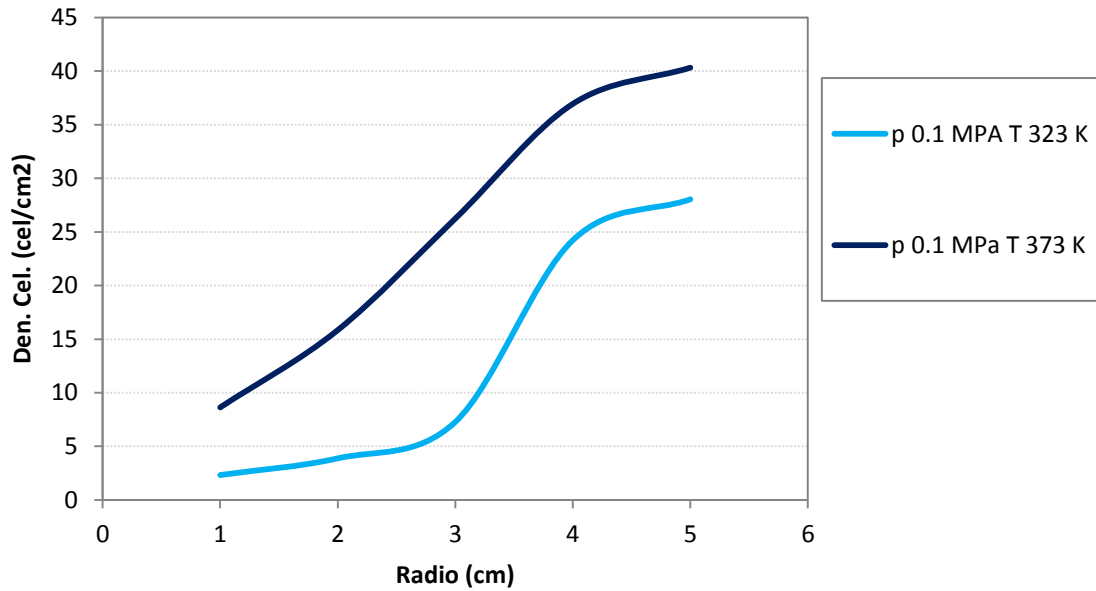


Figura 4.19: Imágenes Schlieren para mezclas hidrógeno/aire para diferentes radios variando la temperatura a  $\phi=0.5$  y 0.1 MPa

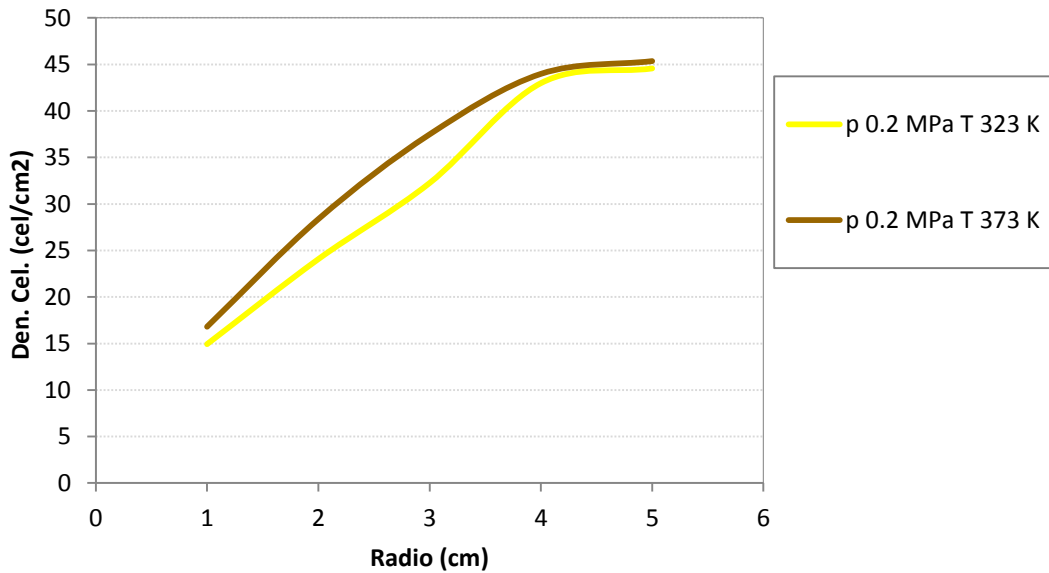


Figura 4.20: Imágenes Schlieren para mezclas hidrógeno/aire para diferentes radios variando la temperatura a  $\phi=0.5$  y 0.2 MPa



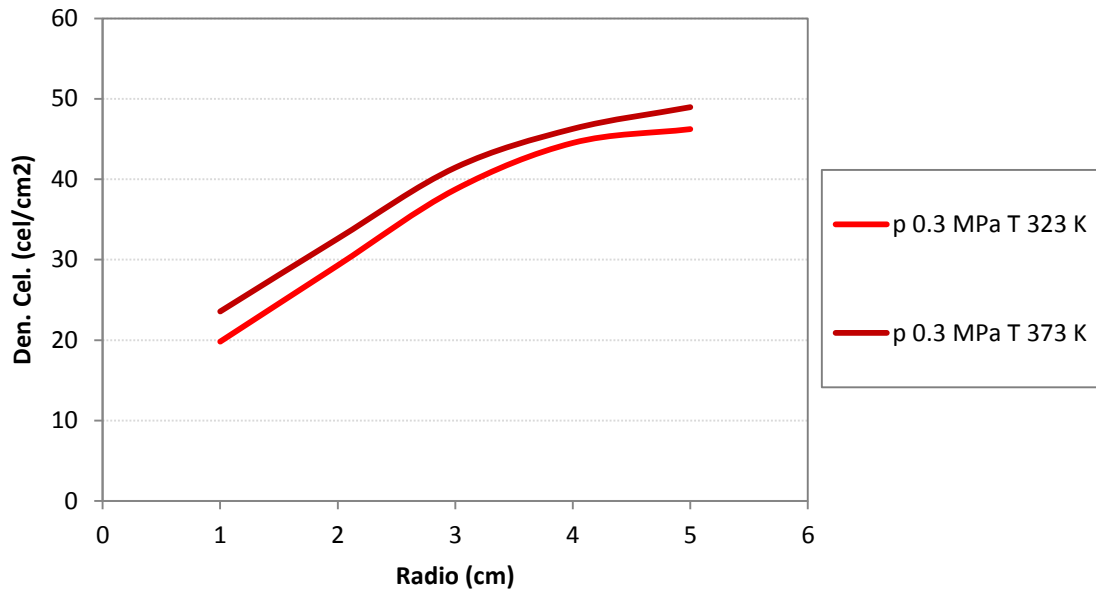


Figura 4.21: Imágenes Schlieren para mezclas hidrógeno/aire para diferentes radios variando la temperatura a  $\phi=0.5$  y 0.3 MPa

### 4.2.3 RADIO DE FRENTE DE LLAMA

En la figura 4.22 se observa la evolución del radio de frente de llama frente al tiempo variando el dosado:

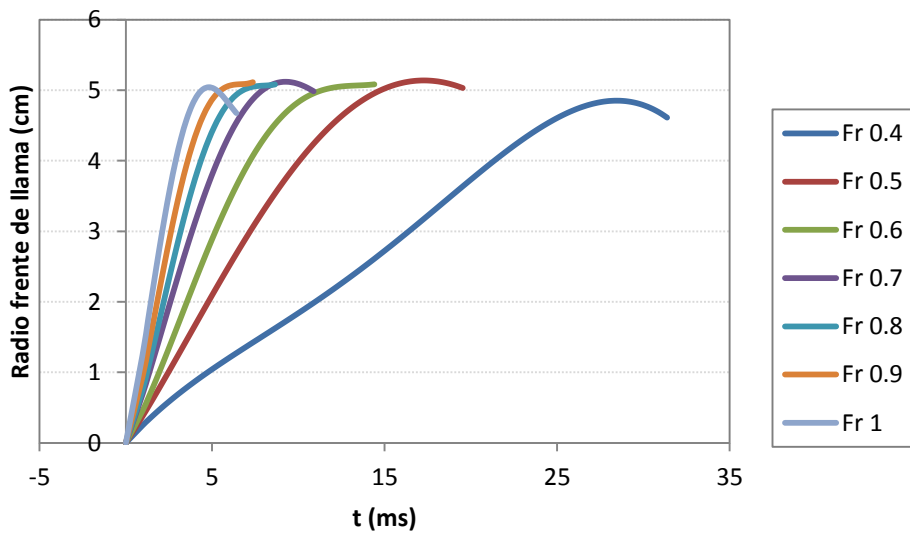


Figura 4.22: Evolución del radio de frente de llama en función del tiempo variando el dosado 0.1 MPa y 315 K

Se observa que a medida que el dosado aumenta, el proceso de combustión es más rápido ya que alcanza el radio máximo de 5 cm, que se corresponde con el choque con la pared, en menor tiempo.

#### 4.2.4 TASA DE STRETCH

Para el estudio de la tasa de stretch, al igual que para las demás características se realizó un estudio paramétrico de los principales factores que influyen sobre las mezclas hidrógeno/aire, los cuales son: la presión, la temperatura y el dosado.

##### 4.2.4.1 INFLUENCIA DEL DOSADO

En la Figura 4.23 se ha llevado a cabo la representación de la tasa de stretch frente al radio del frente de llama. Se observa que a medida que la tasa de stretch aumenta con el incremento del dosado, el punto máximo se alcanza a diferentes radios. Pero este punto máximo siempre es el mismo.

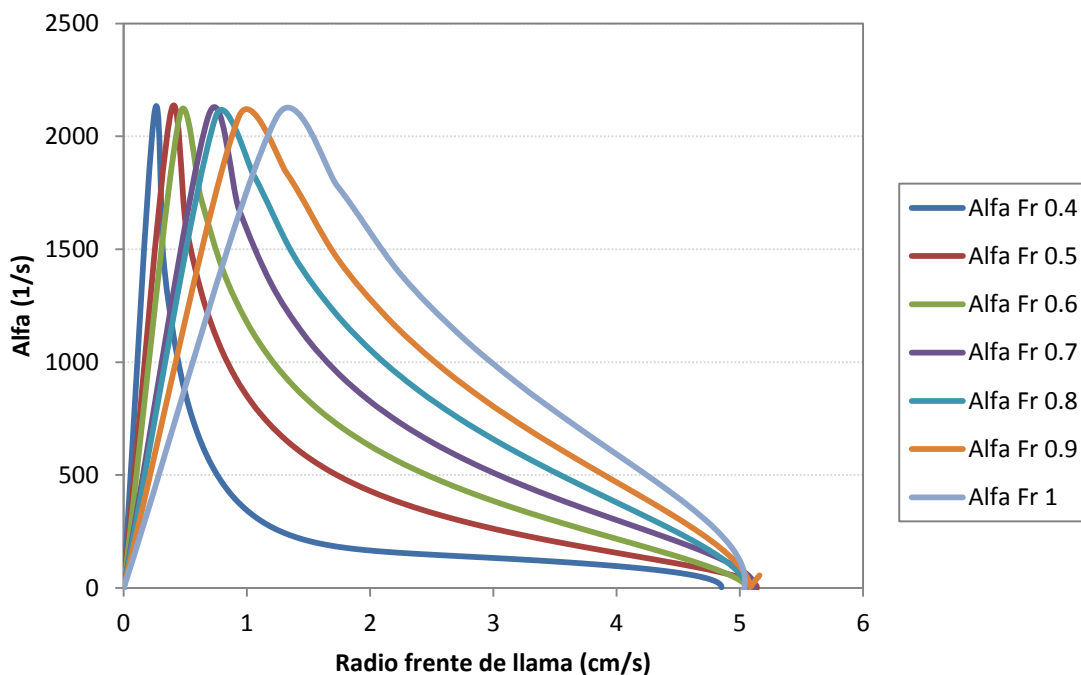


Figura 4.23: Evolución de la tasa de stretch en función del radio de frente de llama variando el dosado

#### 4.2.5 VELOCIDAD DE PROPAGACION DE LLAMA

Para el estudio de la velocidad de propagación de llama, también se ha llevado a cabo un estudio paramétrico de los principales factores que influyen sobre las mezclas hidrógeno/aire, los cuales son: la presión, la temperatura y el dosado.

La velocidad de propagación de llama se representa en función de la tasa de stretch porque se observa cómo afecta dicho stretch a la velocidad y del radio de llama porque se observa cómo se desarrolla la velocidad a lo largo del radio.

##### 4.2.5.1 INFLUENCIA DEL DOSADO

En las Figura 4.24, tiene lugar la representación de la velocidad de propagación de llama frente a la tasa de stretch. Se observa que cuanto mayor es el dosado mayor es dicha velocidad del frente de llama, además de que el cambio de pendiente tiene lugar para una mayor tasa de stretch al aumentar el dosado.

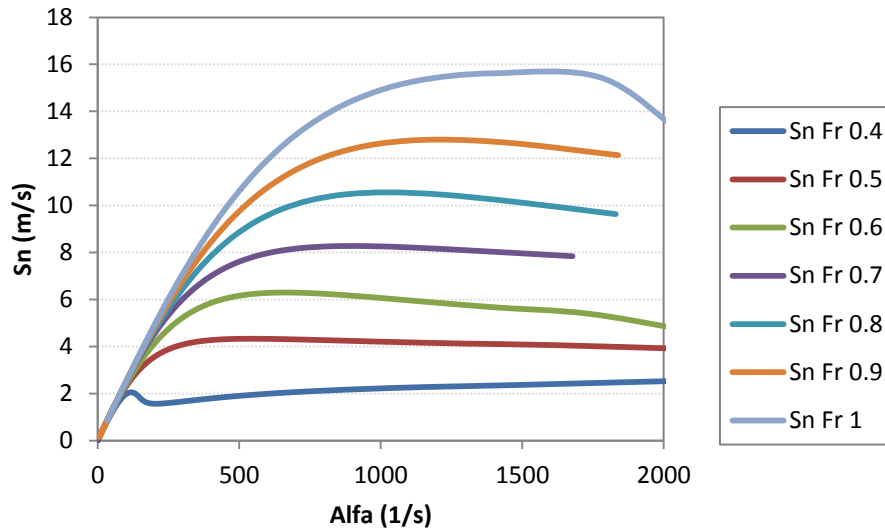


Figura 4.24: Evolución de la velocidad de propagación de llama en función de la tasa de stretch variando el dosado

En las Figura 4.25 se ha llevado a cabo la representación de la velocidad de propagación de llama frente al radio del frente de llama. Se observa, al igual que en la anterior figura, que cuanto mayor es el dosado mayor es dicha velocidad del frente de llama.

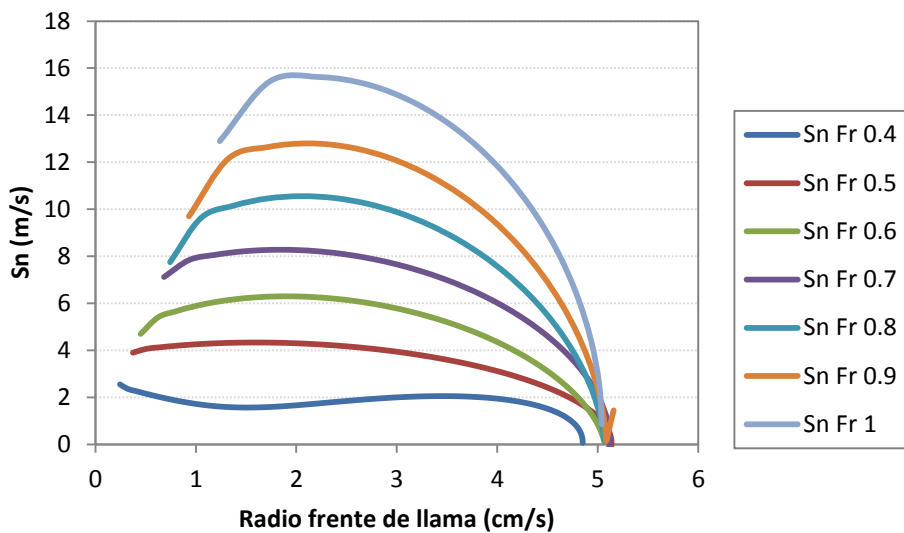


Figura 4.25: Evolución de la velocidad de propagación de llama en función del radio de frente de llama variando el dosado

### **4.3 EXPERIMENTOS H<sub>2</sub>/CO/AIRE**

Las mezclas de hidrógeno y monóxido de carbono constituyen lo que se conoce como gas de síntesis, que como se ha destacado en la introducción pueden ser utilizados como combustible en una gran variedad de dispositivos y máquinas de potencia, por lo en el caso de la combustión, el estudio de la llama premezclada deber ser analizado.

Para ello al igual que para el hidrógeno, se ha llevado a cabo un estudio paramétrico de la influencia de los factores (presión, temperatura, dosado) que influyen sobre las principales características de la combustión de mezclas H<sub>2</sub>/CO/aire, en la cual la proporción en todos los experimentos entre el hidrógeno (H<sub>2</sub>) y el monóxido de carbono (CO) es de 80% y 20% respectivamente:

#### **4.3.1 VELOCIDAD DE COMBUSTION**

Para el estudio de la velocidad de combustión, se ha realizado un estudio paramétrico en función de los principales factores que influyen sobre las mezclas H<sub>2</sub>/CO/aire, los cuales son: el dosado y la presión inicial.

##### **4.3.1.1 INFLUENCIA DEL DOSADO**

Para el estudio de la influencia del dosado en mezclas H<sub>2</sub>/CO/aire donde la proporción entre el H<sub>2</sub> y el CO es de 80% y 20% respectivamente, se han llevado a cabo experimentos en los cuales las condiciones son las siguientes:

- Presión inicial:  $p_i=0.1$  MPa
- Temperatura inicial:  $T_i=315$  K
- Rango de dosados:  $\phi=0.4-1$

En la Figura 4.26, tiene lugar la evolución de la presión en función del tiempo para diferentes dosados a una presión fija de 0.1 MPa y una temperatura fija de 315 K:

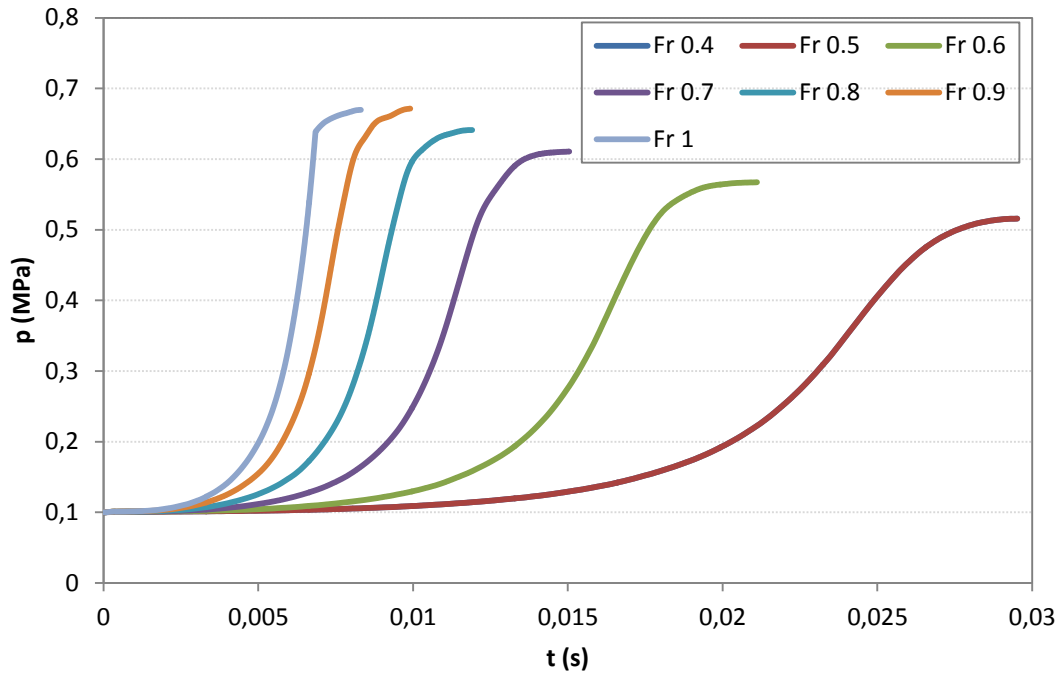


Figura 4.26: Evolución de la presión frente al tiempo variando el dosado de mezclas  $H_2$ /CO/aire para 0.1 MPa y 315 K

Como se observa a medida que aumenta el dosado la presión máxima alcanza valores más altos y la combustión es más rápida, ya que ese máximo de presión es alcanzado en menor tiempo.

A partir de las curvas de presión obtenidas, se ha llevado a cabo la obtención de las velocidades de combustión laminar para cada dosado. La evolución de la velocidad de combustión frente a la temperatura de los no quemados para diferentes dosados se observa en la Figura 4.27:

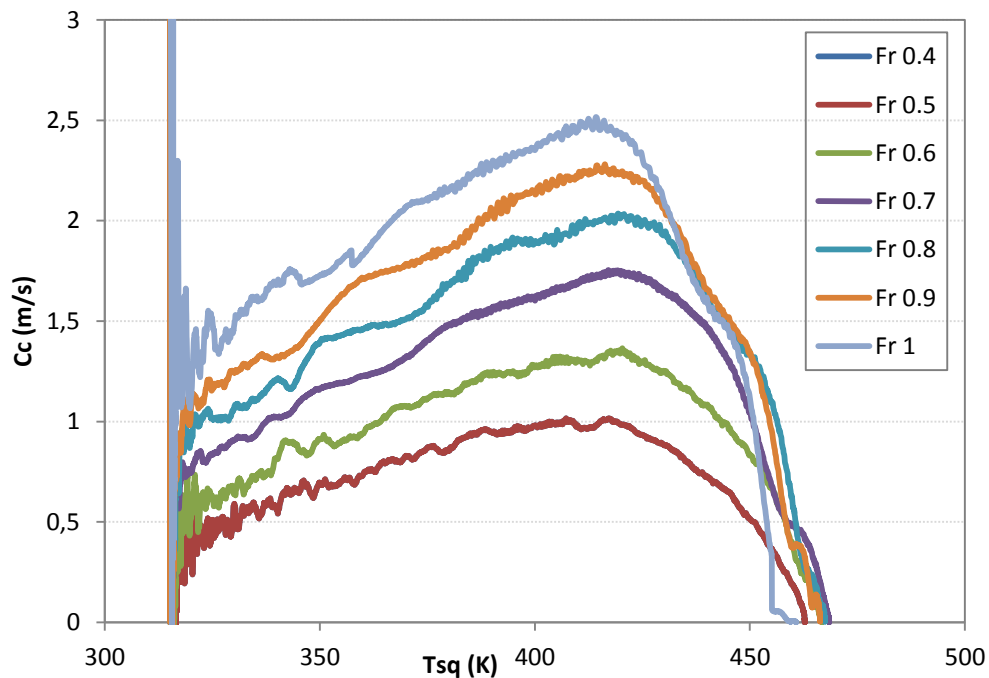


Figura 4.27: Evolución de la velocidad de combustión laminar frente a la temperatura de los no quemados variando el dosado de mezclas  $H_2$ /CO/aire para 0.1 MPa y 315 K

Como se observa a medida que la cantidad de dosado aumenta, la velocidad de combustión va aumentando.

#### 4.3.1.2 INFLUENCIA DE LA PRESIÓN INICIAL

Para el estudio de la influencia de la presión inicial en el proceso de combustión de mezclas H<sub>2</sub>/CO/aire donde la proporción entre el H<sub>2</sub> y el CO es de 80% y 20% respectivamente, se han llevado a cabo varios experimentos en los cuales las condiciones han sido las siguientes:

- Temperatura inicial:  $T_i=373$  K
- Rango de presiones:  $p_i=0.1-0.3$  MPa
- Dosado:  $\phi=0.5$

En la Figura 4.28 se ha realizado la evolución de la presión, partiendo de diferentes presiones iniciales:

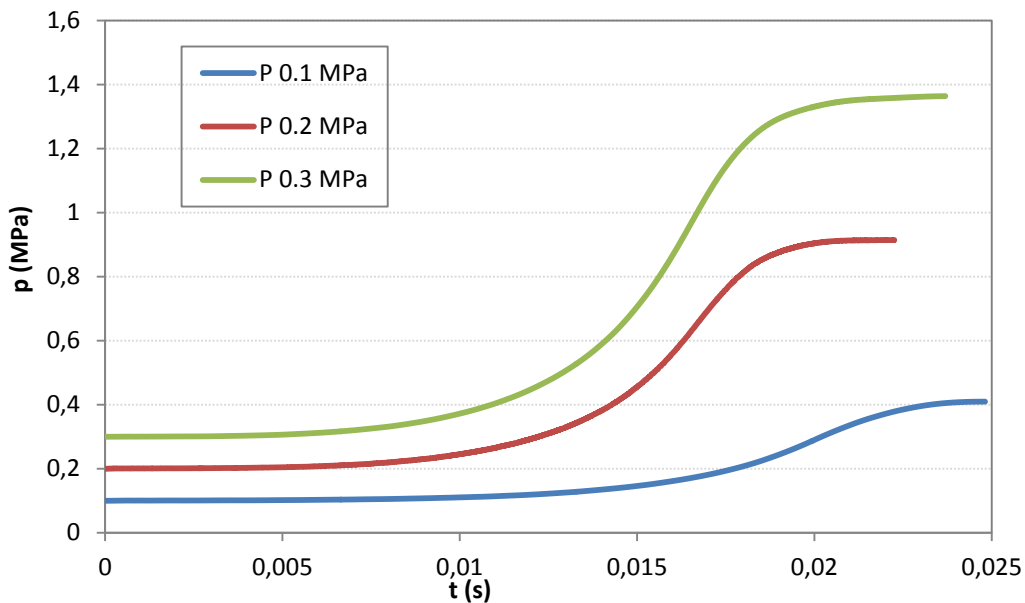


Figura 4.28: Evolución de la presión frente al tiempo variando la presión inicial de mezclas H<sub>2</sub>/CO/aire para  $\phi=0.5$  y 373 K

Como es de esperar, cuando mayor es la presión inicial de la que se parte, mayor es la presión final alcanzada.

En la Figura 4.29 tiene lugar la evolución de la velocidad de combustión laminar frente a la temperatura de los no quemados:

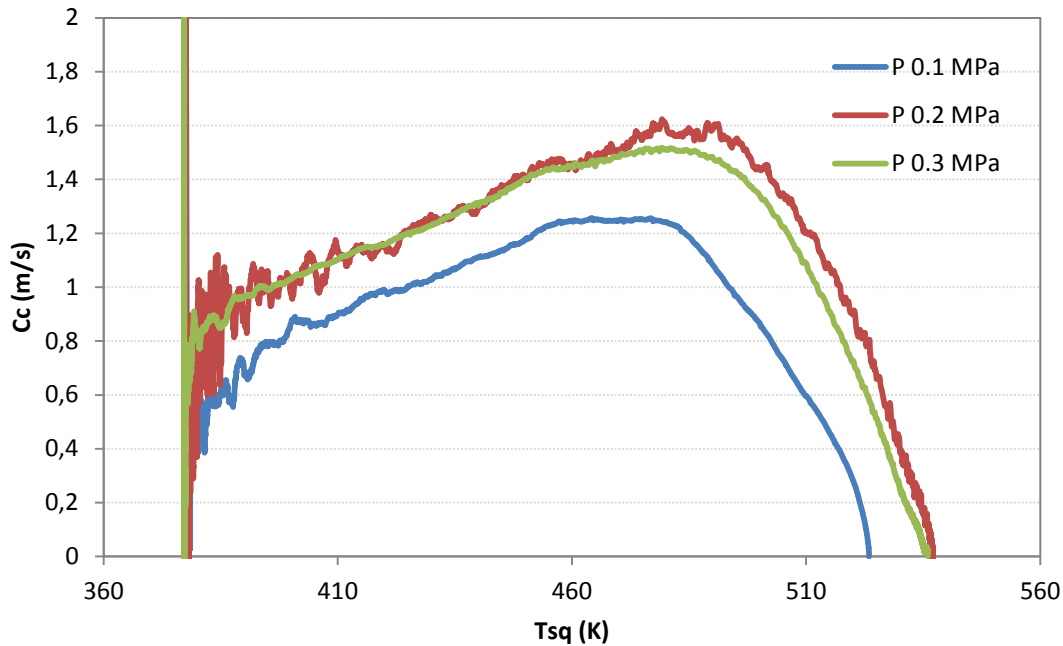


Figura 4.29: Evolución de la velocidad de combustión laminar frente a la temperatura de los no quemados variando la presión de mezclas  $H_2$ /CO/aire para  $\phi=0.5$  y 373 K

Como se observa en la Figura 4.29 la velocidad de combustión laminar aumenta al pasar de una presión 0.1 MPa a 0.2 MPa para posteriormente para una presión de 0.3 MPa mantenerse en unos valores muy próximos a la presión de 0.2 MPa.

### 4.3.2 CELULARIDAD

Para el estudio de la celularidad, también se ha llevado a cabo un estudio paramétrico de los principales factores que influyen sobre las mezclas  $H_2$ /CO/aire, en este caso: el dosado y la presión.

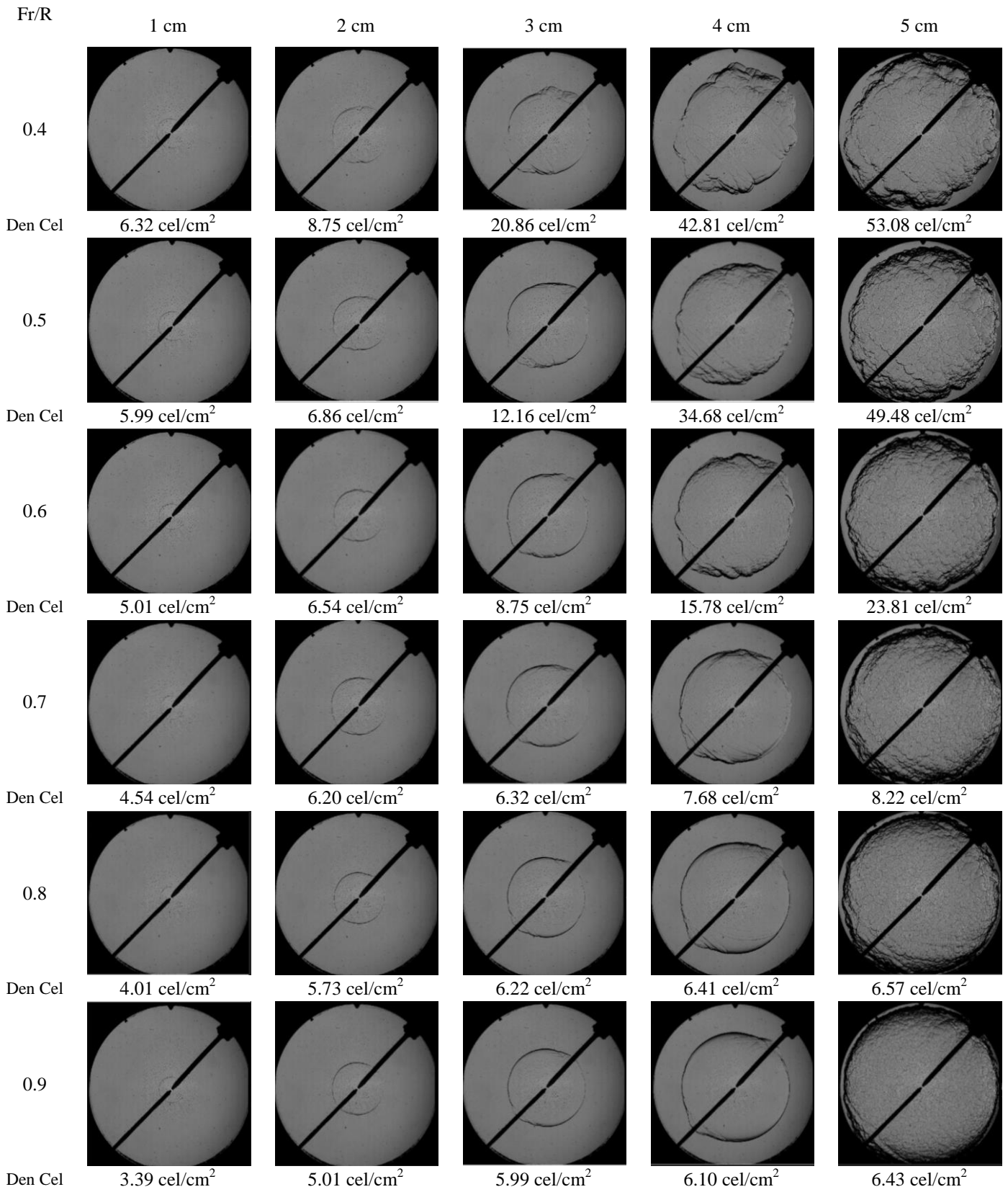
#### 4.3.2.1 INFLUENCIA DEL DOSADO

Para el estudio de la influencia del dosado se han llevado a cabo experimentos en los cuales las condiciones son las siguientes:

- Presión inicial:  $p_i=0.1$  MPa
- Temperatura inicial:  $T_i=315$  K
- Dosado:  $\phi=0.5$

En la Figura 4.30 se representa la evolución de la celularidad en función del radio variando el dosado:

Caracterización de procesos de combustión de mezclas H<sub>2</sub>/aire e H<sub>2</sub>/CO/aire para su uso como combustibles en MCIA





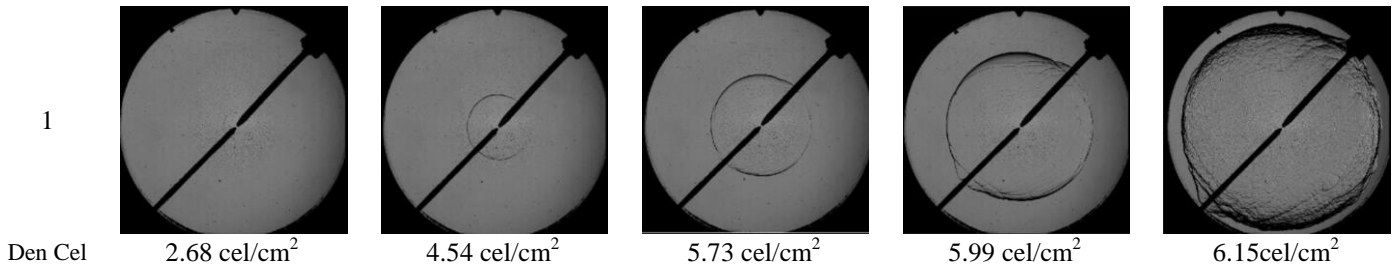


Figura 4.30: Imágenes Schlieren para mezclas H<sub>2</sub>/CO/aire para diferentes radios variando el dosado para 0.1 MPa y 315 K

Como se observa a medida que el dosado disminuye, la celularidad va aumentando ya que la llama tiende a hacerse más inestable. Esto se puede ver reflejado para el radio 5 donde partiendo de dosado 1 hasta dosado 0.4 el arrugamiento de la llama es mayor y la cantidad de celdas que se forman también es mayor.

En la Figura 4.31 se representa la evolución de la densidad celular obtenida anteriormente en función del radio variando el dosado:

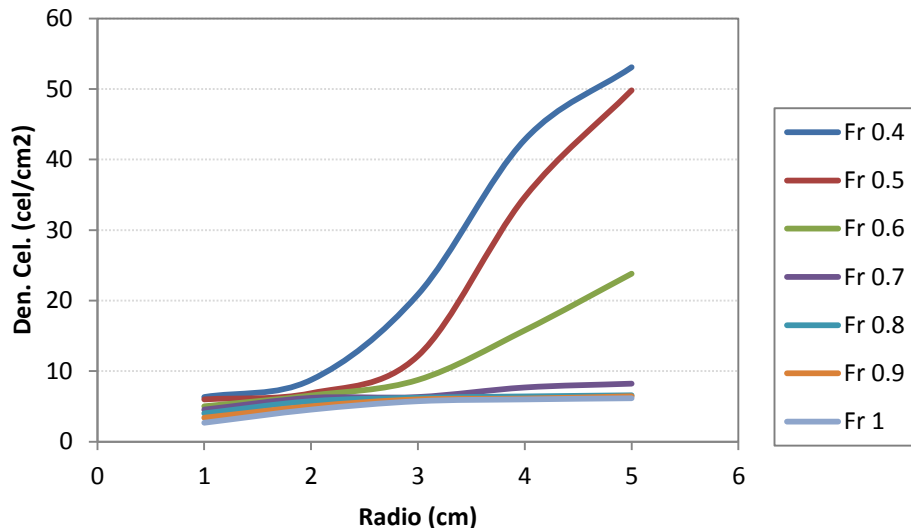


Figura 4.31: Evolución de la densidad celular en función del radio variando el dosado a 0.1 MPa y 315 K

Como ya se ha dicho con el análisis en las imágenes Schlieren, a menor dosado la llama se encuentra más y hay mayor número de celdas. Destacar que se produce una disminución muy brusca de la densidad celular al pasar de dosado 0.6 a 0.7 y manteniéndose en valores aproximados para los dosados posteriores hasta dosado 1.

#### 4.3.2.2 INFLUENCIA DE LA PRESION

Para el estudio de la influencia de la presión se han llevado a cabo experimentos en los cuales las condiciones son las siguientes:

- Rango de presiones iniciales: P=0.1 MPa-0.5 MPa
- Temperatura inicial: T=373 K
- Dosado:  $\phi=0.5$

En la Figura 4.32 se representa la evolución de la celularidad en función del radio variando la presión

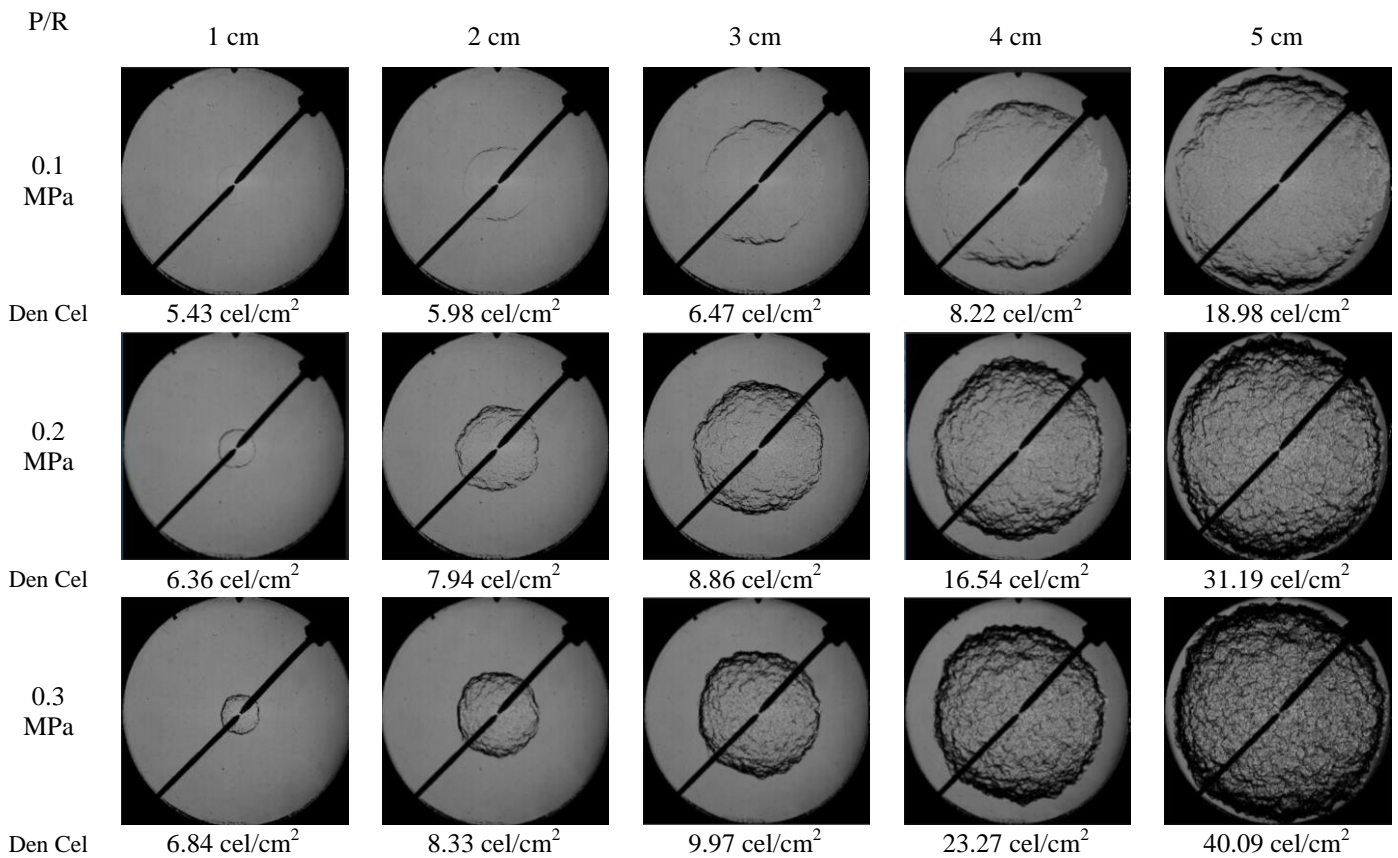


Figura 4.32: Imágenes Schlieren para mezclas H<sub>2</sub>/CO/aire para diferentes radios variando la presión para  $\phi=0.5$  y 373 K

Como se observa a medida que la presión aumenta, la celularidad va aumentando ya que la llama tiende a hacerse más inestable. Esto se puede ver reflejado para el radio 5 donde partiendo de presión 0.1 MPa hasta presión 0.3 MPa, el arrugamiento de la llama es mucho mayor, sobre todo en el paso de presión 0.1 MPa a 0.2 MPa, además de que la cantidad de celdas que se forman también es mayor.

En la Figura 4.33 se representa la evolución de dicha densidad celular obtenida anteriormente en función del radio variando la presión:

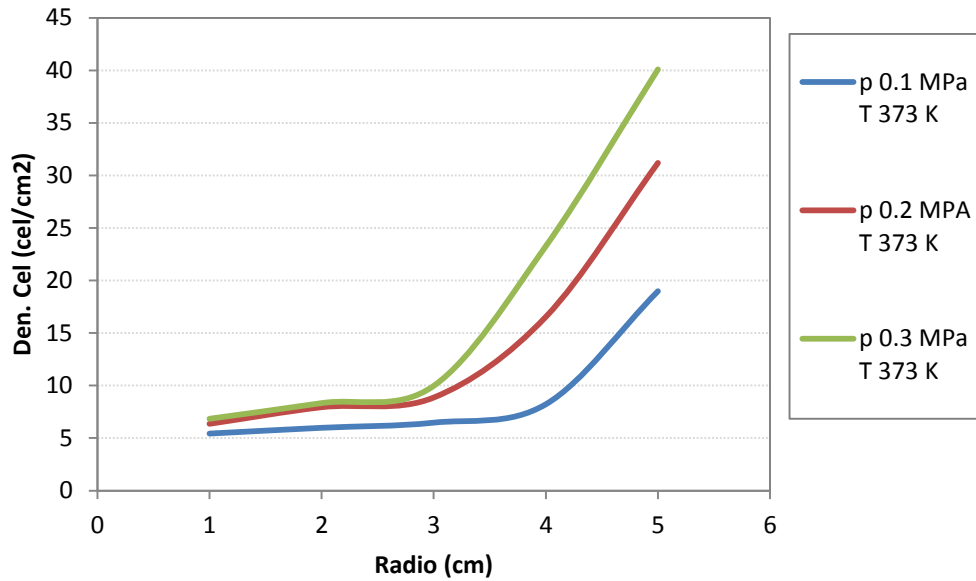


Figura 4.33: Evolución de la densidad celular en función del radio variando la presión a  $\phi=0.5$  y 373 K

Como ya se ha dicho con el análisis en las imágenes Schlieren, a mayor presión la llama se encuentra más arrugada y por lo tanto mayor número de celdas.

#### 4.3.3 RADIO DE FRENTE DE LLAMA

En la figura 4.34 se observa la evolución del radio de frente de llama frente al tiempo variando el dosado:

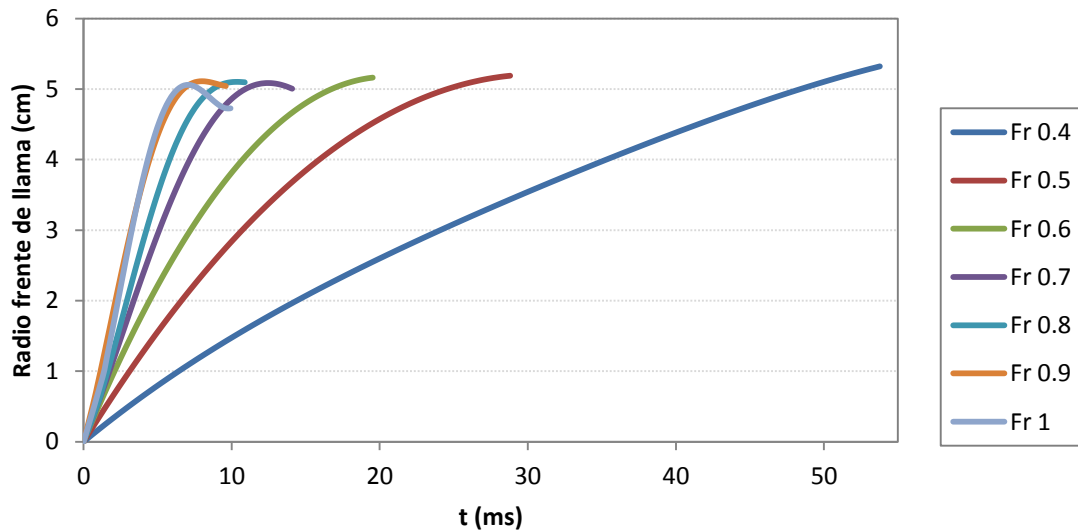


Figura 4.34: Evolución del radio de frente de llama en función del tiempo variando el dosado 0.1 MPa y 315 K

Se observa que a medida que el dosado aumenta, el proceso de combustión es más rápido ya que alcanza el radio máximo de 5 cm, que se corresponde con el choque con la pared, en menor tiempo. Siendo para dosado 0.9 y dosado 1 casi igual, esto establece que la velocidad está alcanzado su máximo.

#### 4.3.4 TASA DE STRETCH

Para el estudio de la tasa de stretch, al igual que para las demás características se ha llevado a cabo un estudio paramétrico de los principales factores que influyen sobre las mezclas hidrógeno/aire, los cuales son: el dosado y la presión.

##### 4.3.4.1 INFLUENCIA DEL DOSADO

En las Figura 4.35 se ha llevado a cabo la representación de la tasa de stretch frente al radio del frente de llama. Se observa que a medida que la tasa de stretch aumenta con el incremento del dosado, el punto máximo se alcanza a diferentes radios, siendo el radio cada vez mayor. Además este punto máximo es diferente y cada vez menor según aumenta el radio.

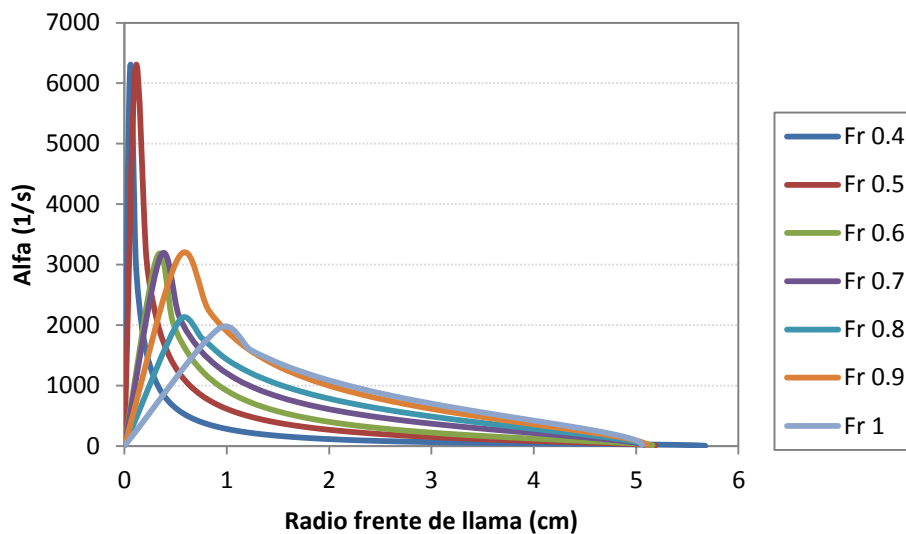


Figura 4.35: Evolución de la tasa de stretch en función del radio de frente de llama variando el dosado 0.1 MPa y 315 K

#### 4.3.5 VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LLAMA

Para el estudio de la velocidad de propagación de llama, también se ha realizado un estudio paramétrico de los principales factores que influyen sobre las mezclas hidrógeno/aire, los cuales son: la presión, la temperatura y el dosado.

##### 4.3.5.1 INFLUENCIA DEL DOSADO

En las Figura 4.36 se ha llevado a cabo la representación de la velocidad de propagación de llama frente a la tasa de stretch. Se observa que cuanto mayor es el dosado mayor es dicha velocidad del frente de llama, además de que el cambio de pendiente tiene lugar para una mayor tasa de stretch al aumentar el dosado.

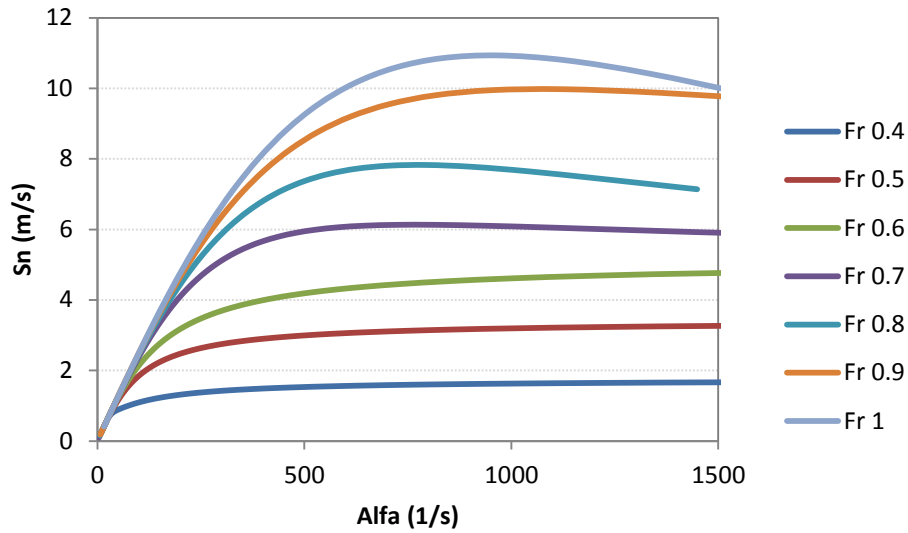


Figura 4.36: Evolución de la velocidad de propagación de llama en función de la tasa de stretch variando el dosado

En las Figura 4.37 tiene lugar la representación de la velocidad de propagación de llama frente al radio del frente de llama. Se observa que cuanto mayor es el dosado mayor es dicha velocidad del frente de llama, al igual que ocurría en la figura anterior.

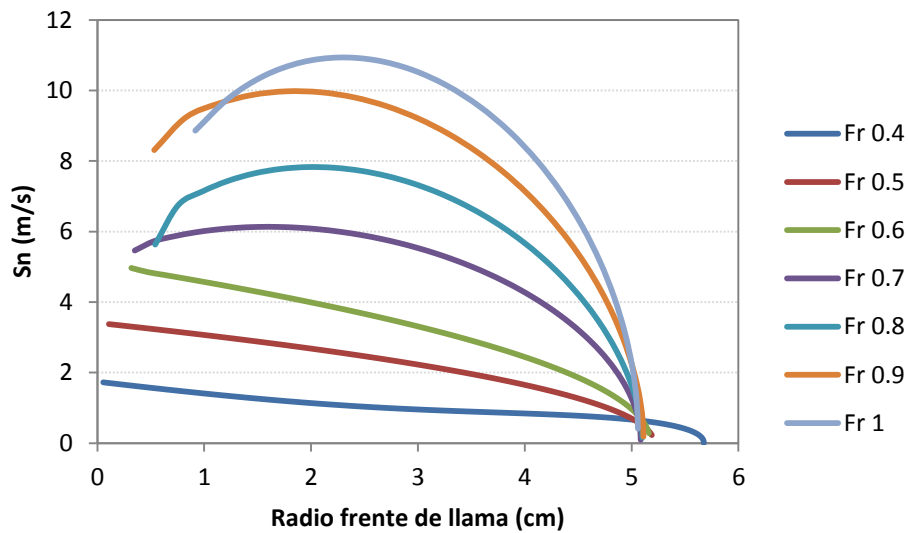


Figura 4.37: Evolución de la velocidad de propagación de llama en función del radio de frente de llama variando el dosado

#### **4.4 COMPARACIÓN MEZCLAS 100% H<sub>2</sub>/AIRE Y 80% H<sub>2</sub>/20% CO/AIRE**

Por último, se ha realizado una comparación de cómo influye el hidrógeno en la velocidad de combustión laminar en otros gases, en este caso del monóxido de carbono. Para ello se ha llevado a cabo una comparación de una mezcla de 100% H<sub>2</sub> y aire y 80% H<sub>2</sub>/ 20% CO y aire, teniendo en cuenta la variación en el dosado y en la presión.

##### **4.4.1 VELOCIDAD DE COMBUSTIÓN**

###### **4.4.1.1 INFLUENCIA DEL DOSADO**

Para estudiar la influencia del dosado en la velocidad de combustión se han mantenido constantes la temperatura inicial y la presión y se ha variado el dosado.

Las condiciones de los experimentos realizados para comprobar la influencia de la presión inicial han sido las siguientes:

- Temperatura inicial:  $T_i=315$  K
- Rango de presiones:  $p_i=0.1$  MPa
- Dosado:  $\phi=0.4-1$

Como se observa en la Figura 4.38, la velocidad de combustión laminar del H<sub>2</sub> es mucho más alta que la de la mezcla de H<sub>2</sub> y CO. Esto es debido a que el CO hace que disminuya la velocidad de combustión por su bajo contenido energético, que es 10 KJ/Kg a diferencia del hidrógeno que es de 120 KJ/Kg.

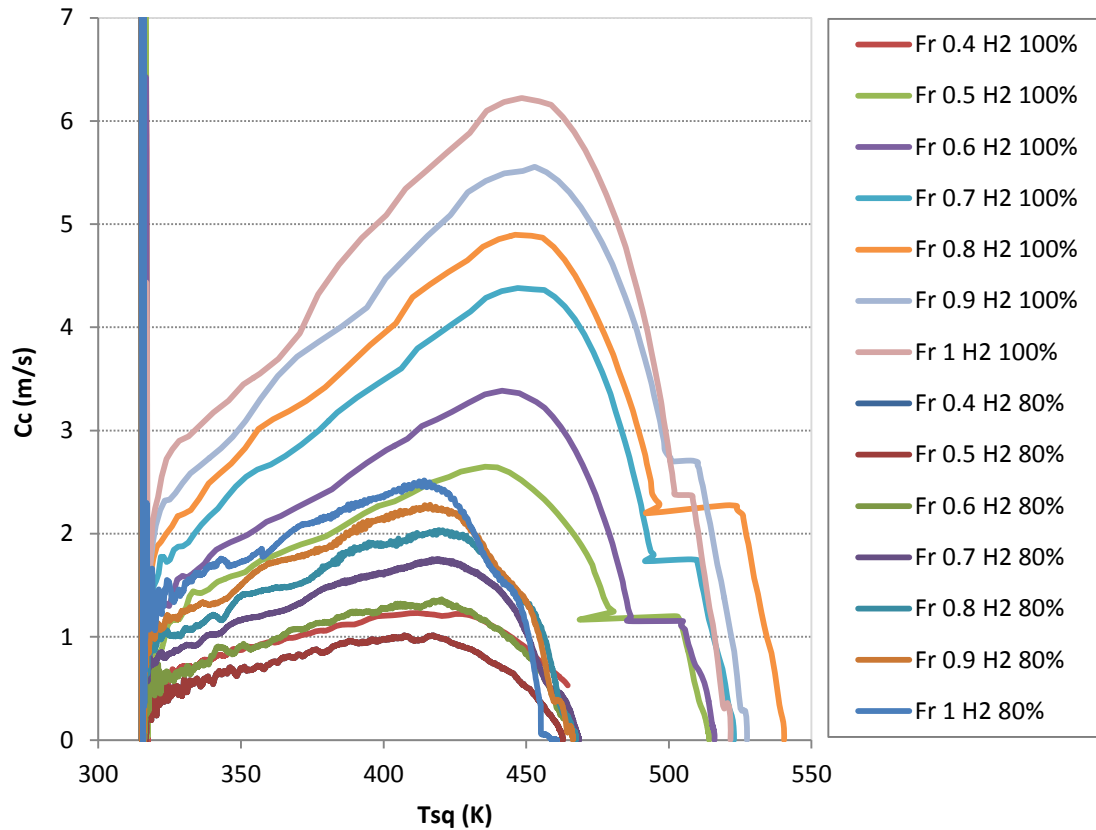


Figura 4.38: Comparación de la velocidad de combustión laminar entre mezclas 100% H<sub>2</sub>/aire y entre mezclas 80% H<sub>2</sub>/20% CO/aire variando el dosado a 0.1 MPa y 315 K

#### 4.4.1.2 INFLUENCIA DE LA PRESIÓN

Para estudiar la influencia de la presión inicial en la velocidad de combustión se han mantenido constantes la temperatura inicial y el dosado y se ha variado la presión.

Las condiciones de los experimentos realizados para comprobar la influencia de la presión inicial han sido las siguientes:

- Temperatura inicial:  $T_i=373$  K
- Rango de presiones:  $p_i=0.1-0.3$  MPa
- Dosado:  $\phi=0.5$

Al igual que en el caso explicado anteriormente, en la Figura 4.39 se puede observar que al aumentar la presión la velocidad de combustión laminar del H<sub>2</sub> es mucho más alta que la de la mezcla de H<sub>2</sub> y CO.

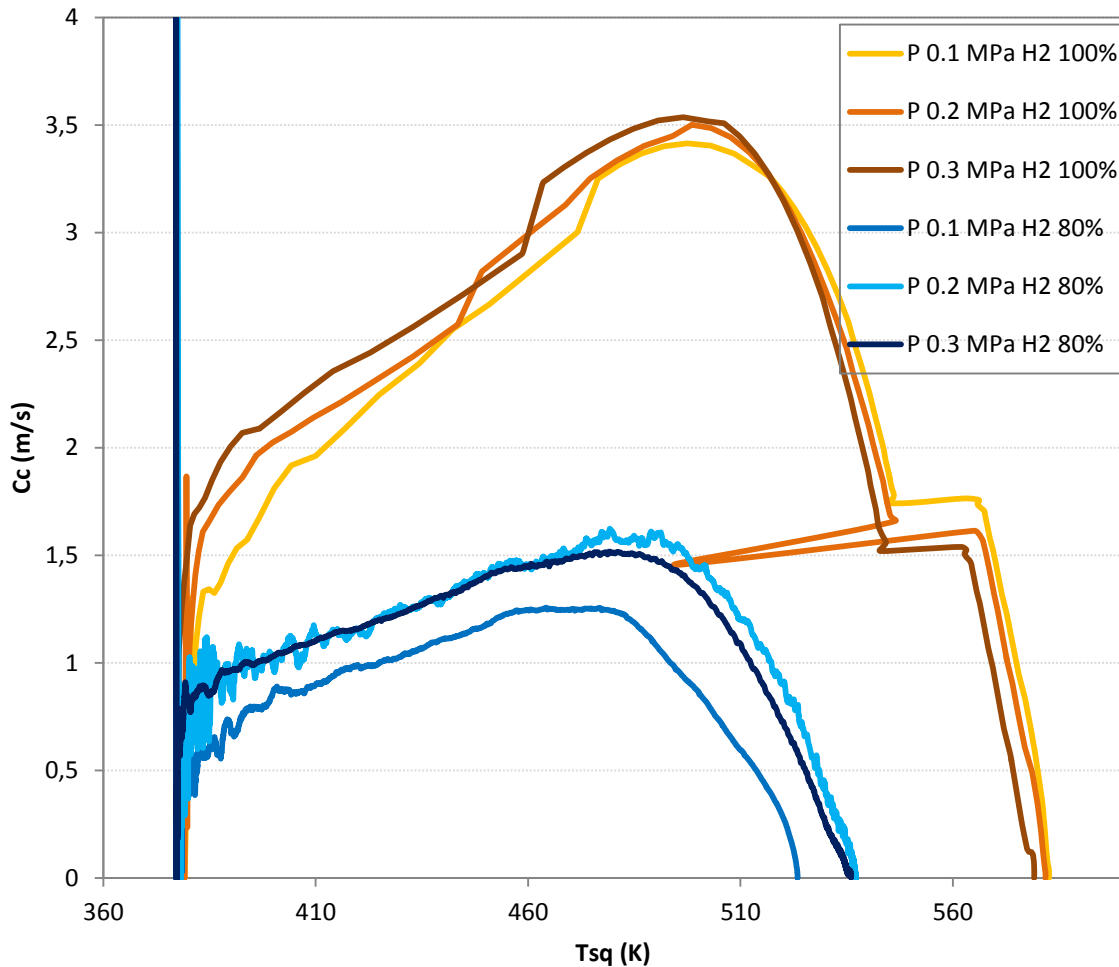


Figura 4.39: Comparación de la velocidad de combustión laminar entre mezclas 100%  $H_2$ /aire y entre mezclas 80%  $H_2$ /20% CO/aire variándola la presión para  $\phi=0.5$  y 373 K

## 4.4.2 CELULARIDAD

### 4.4.2.1 INFLUENCIA DEL DOSADO

Para estudiar la influencia del dosado en la velocidad de combustión se han mantenido constantes la temperatura inicial y la presión y se ha variado el dosado.

Las condiciones de los experimentos realizados para comprobar la influencia de la presión inicial han sido las siguientes:

- Temperatura inicial:  $T_i=315$  K
- Rango de presiones:  $p_i=0.1$  MPa
- Dosado:  $\phi=0.4-1$

Como se observa en la figuras 4.40 y 4.42, la densidad celular del  $H_2$  es más baja que la de la mezcla de  $H_2$  y CO, esto se debe a que la mezcla es 100%  $H_2$ . En cambio en las figuras 4.44, 4.46, 4.48, 4.50 y 4.52 la densidad celular del  $H_2$  es más alta que la de la mezcla de  $H_2$  y CO. Esto se debe a que al tener una cierta cantidad de CO la disminución de densidad celular es mucho mayor que en el caso de la mezcla 100%  $H_2$ .



En las figuras 4.41, 4.43, 4.45, 4.47, 4.49, 4.51 y 4.53 se representa la evolución de dicha densidad celular obtenida anteriormente en función del radio para cada dosado de forma individual:

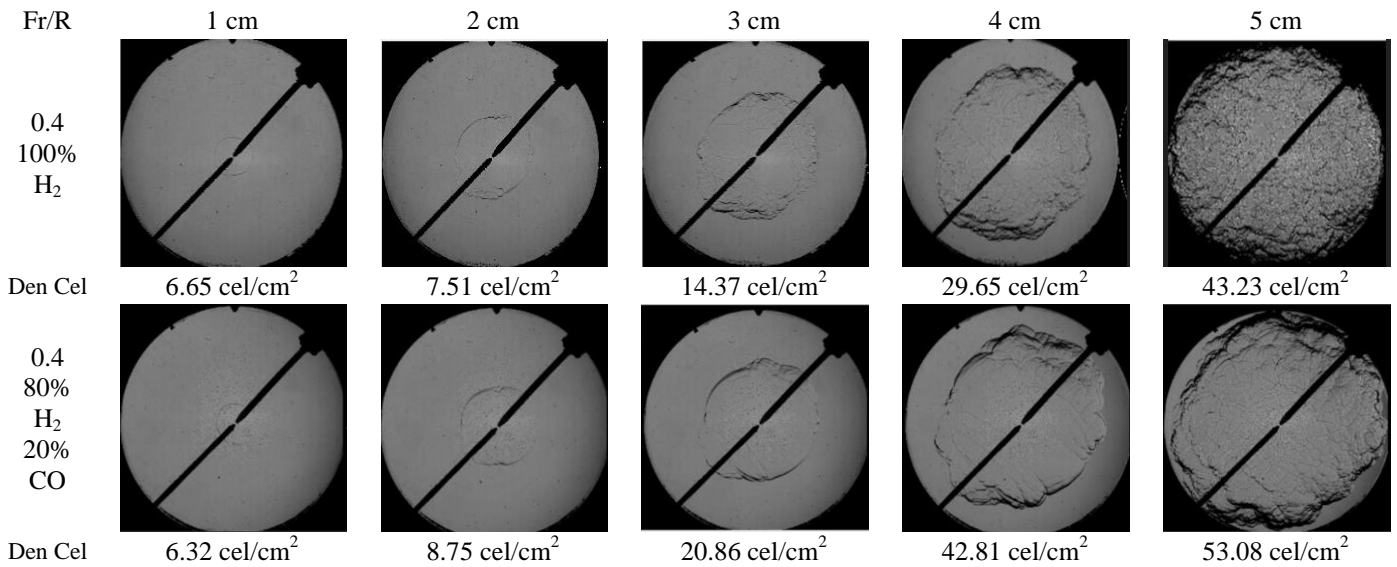


Figura 4.40: Imágenes Schlieren para mezclas H<sub>2</sub>/aire y H<sub>2</sub>/CO/aire para diferentes radios variando la composición de la mezcla  $\phi=0.4$ , 0.1 MPa y 315 K

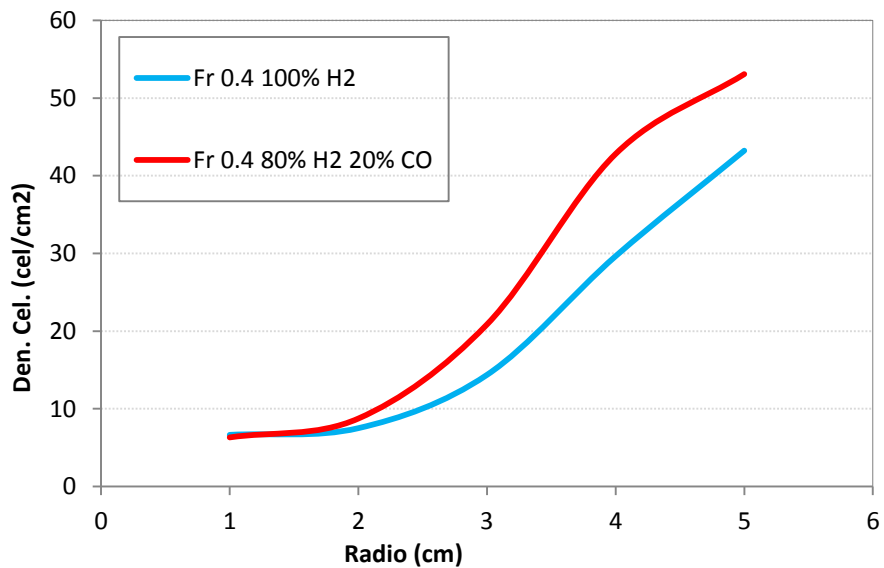


Figura 4.41: Evolución de la densidad celular en función del radio variando la composición de la mezcla para mezclas H<sub>2</sub>/aire (azul) e H<sub>2</sub>/CO/aire (rojo) a  $\phi=0.4$ , 0.1 MPa y 315 K

Caracterización de procesos de combustión de mezclas  $H_2$ /aire e  $H_2$ /CO/aire para su uso como combustibles en MCIA

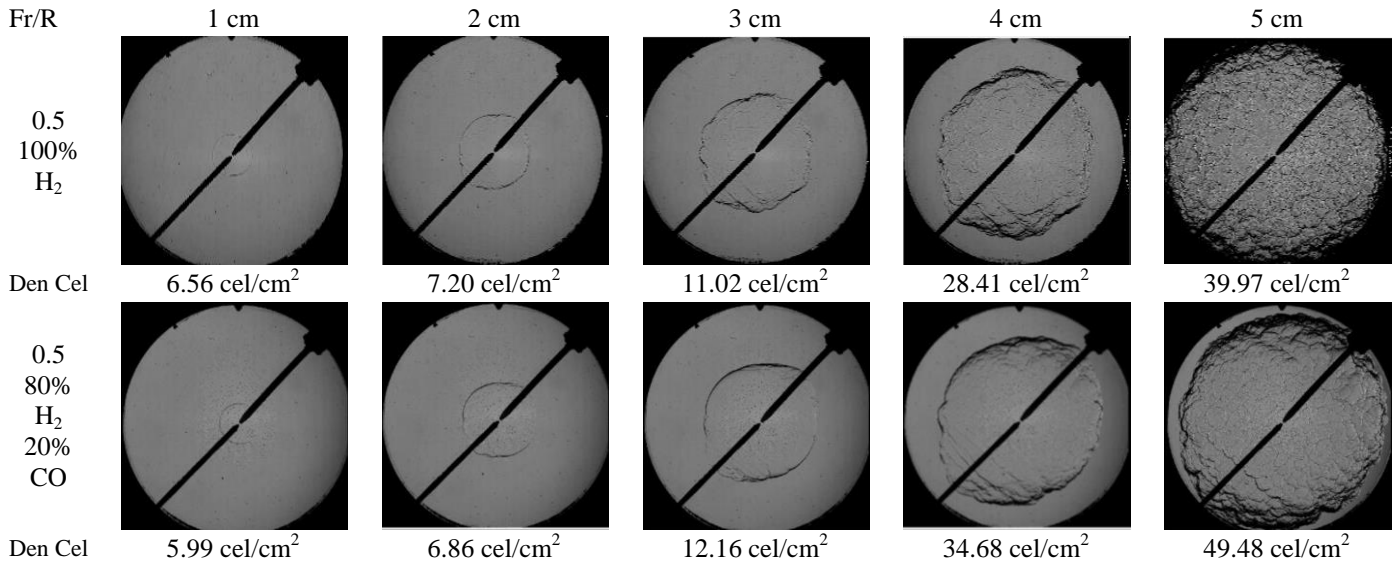


Figura 4.42: Imágenes Schlieren para mezclas  $H_2$ /aire y  $H_2$ /CO/aire para diferentes radios variando la composición de la mezcla  $\phi=0.5$ , 0.1 MPa y 315 K

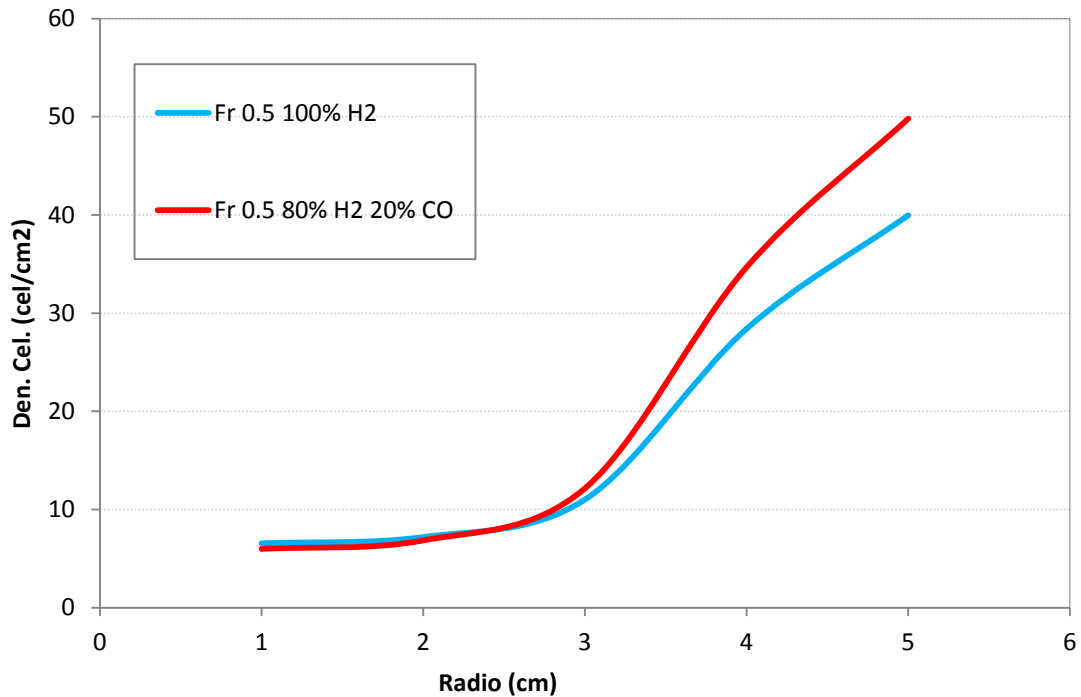


Figura 4.43: Evolución de la densidad celular en función del radio variando la composición de la mezcla para mezclas  $H_2$ /aire (azul) e  $H_2$ /CO/aire (rojo) a  $\phi=0.5$ , 0.1 MPa y 315 K

Caracterización de procesos de combustión de mezclas H<sub>2</sub>/aire e H<sub>2</sub>/CO/aire para su uso como combustibles en MCIA

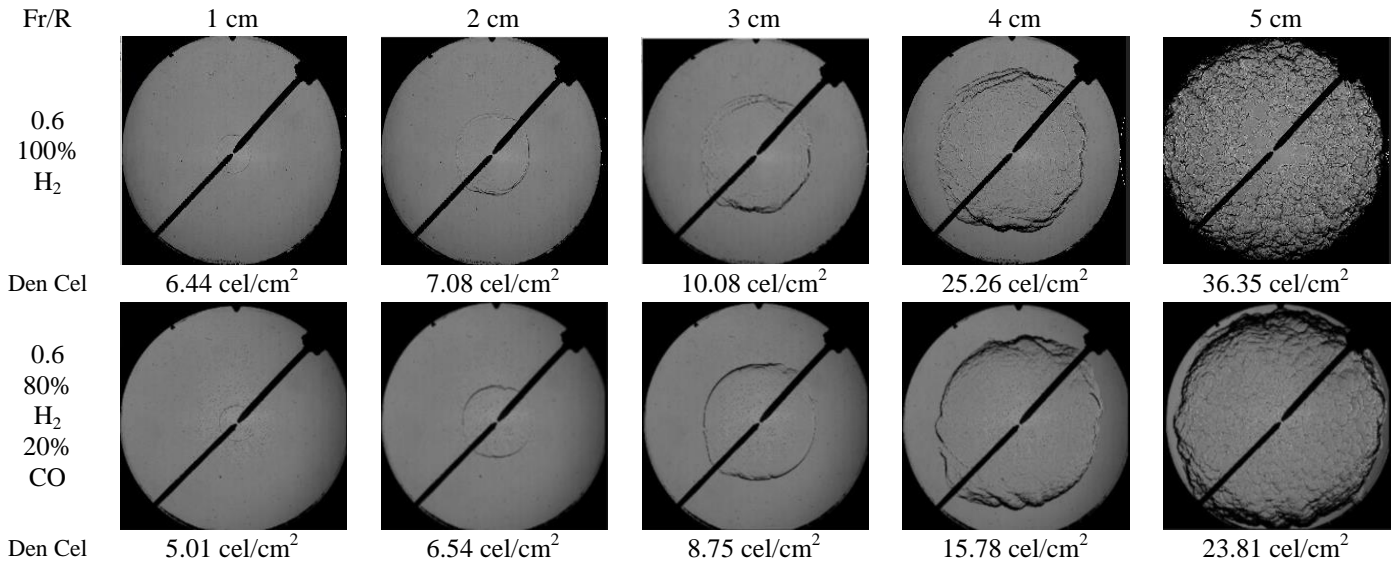


Figura 4.44: imágenes Schlieren para mezclas H<sub>2</sub>/aire e H<sub>2</sub>/CO/aire para diferentes radios variando la composición de la mezcla  $\phi=0.6$ , 0.1 MPa y 315 K

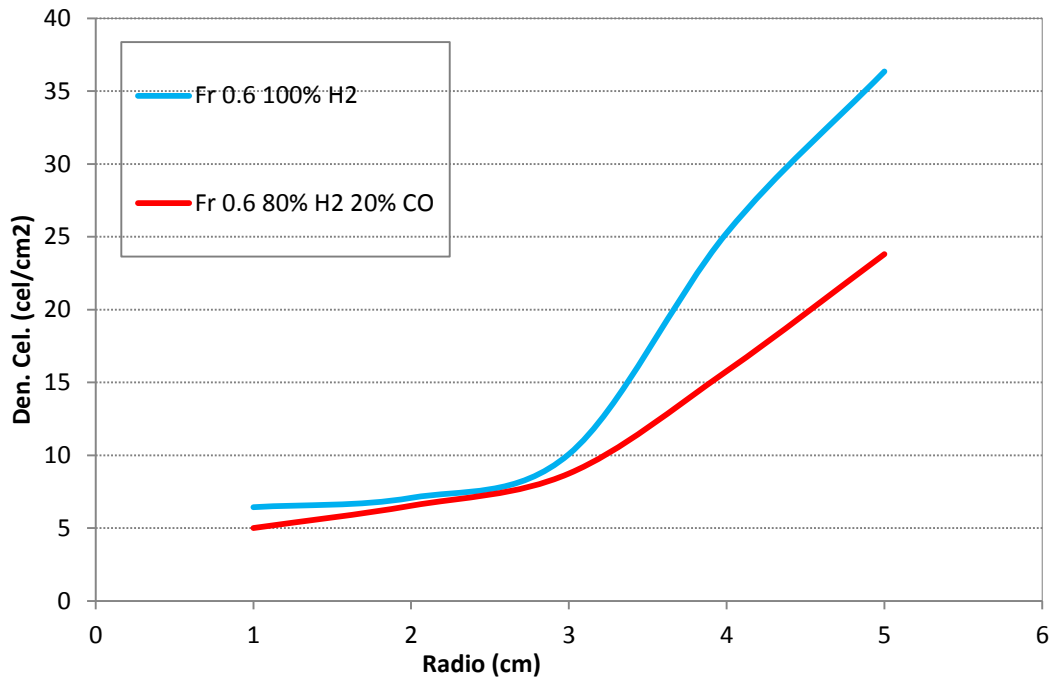


Figura 4.45: Evolución de la densidad celular en función del radio variando la composición de la mezcla para mezclas H<sub>2</sub>/aire (azul) e H<sub>2</sub>/CO/aire (rojo) a  $\phi=0.6$ , 0.1 MPa y 315 K

Caracterización de procesos de combustión de mezclas H<sub>2</sub>/aire e H<sub>2</sub>/CO/aire para su uso como combustibles en MCIA

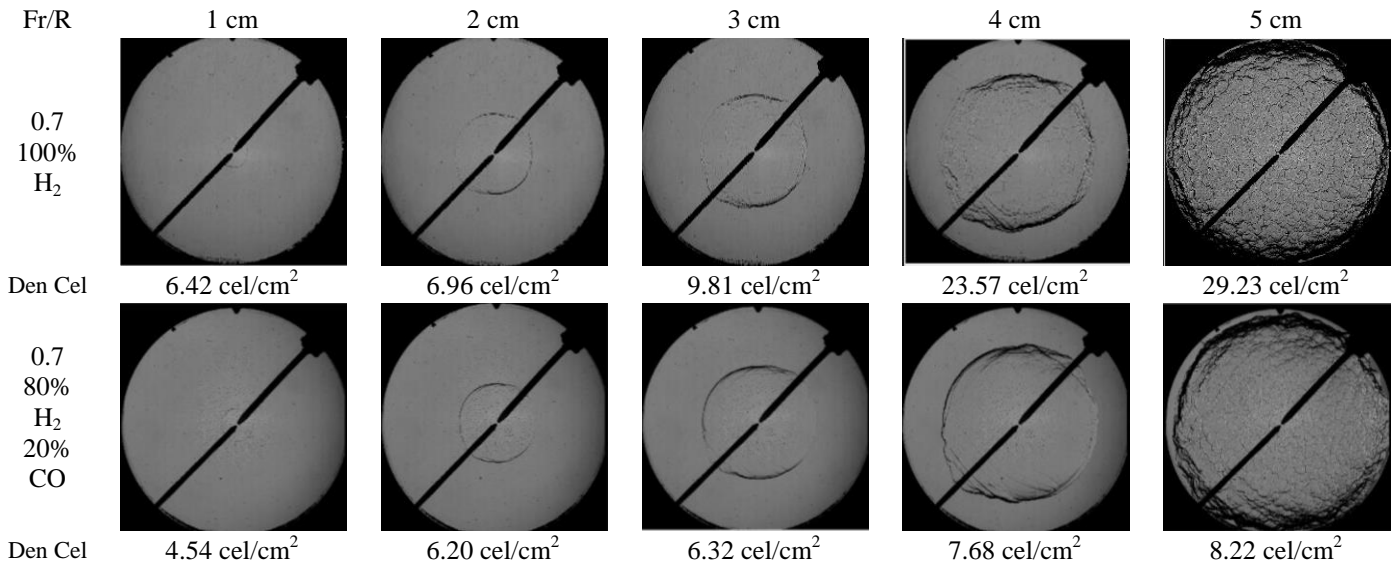


Figura 4.46: Imágenes Schlieren para mezclas H<sub>2</sub>/aire e H<sub>2</sub>/CO/aire para diferentes radios variando la composición de la mezcla  $\phi=0.7$ , 0.1 MPa y 315 K

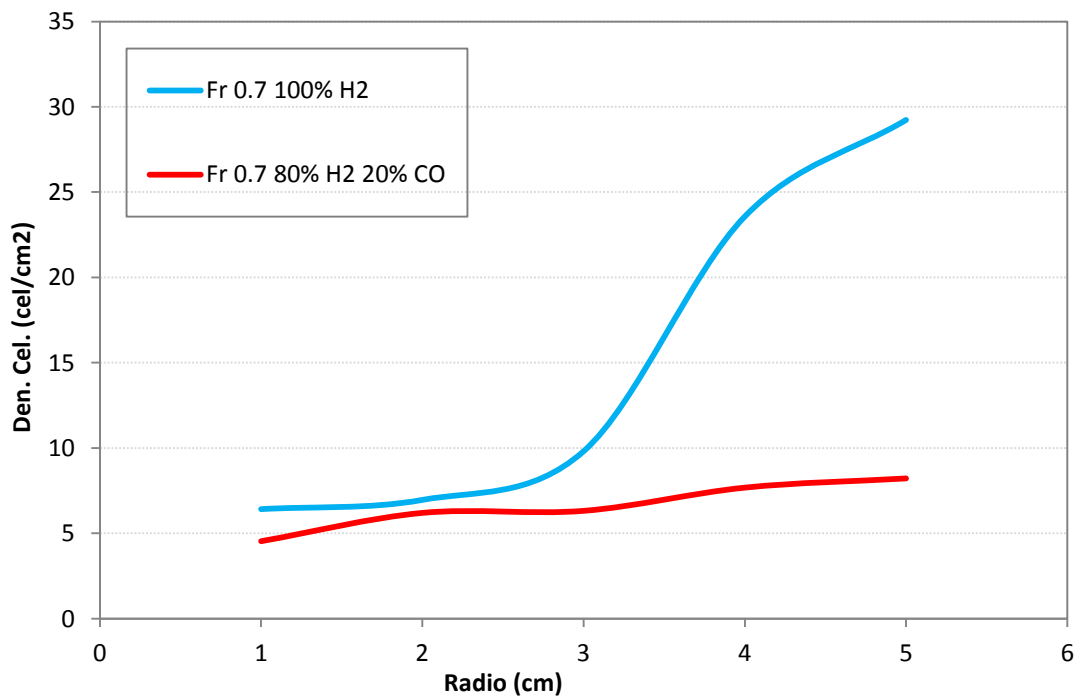


Figura 4.47: Evolución de la densidad celular en función del radio variando la composición de la mezcla para mezclas H<sub>2</sub>/aire (azul) y H<sub>2</sub>/CO/aire (rojo) a  $\phi=0.7$ , 0.1 MPa y 315 K

Caracterización de procesos de combustión de mezclas H<sub>2</sub>/aire e H<sub>2</sub>/CO/aire para su uso como combustibles en MCIA

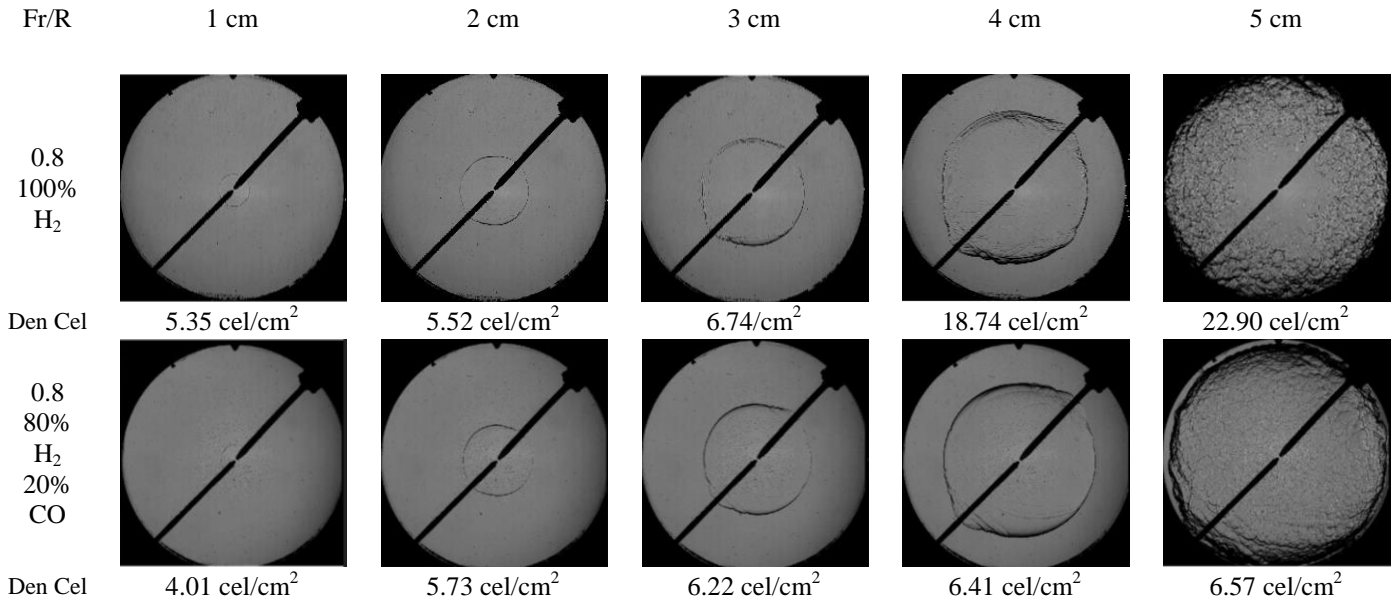


Figura 4.48: Imágenes Schlieren para mezclas H<sub>2</sub>/aire y H<sub>2</sub>/CO/aire para diferentes radios variando la composición de la mezcla  $\phi=0.8$ , 0.1 MPa y 315 K

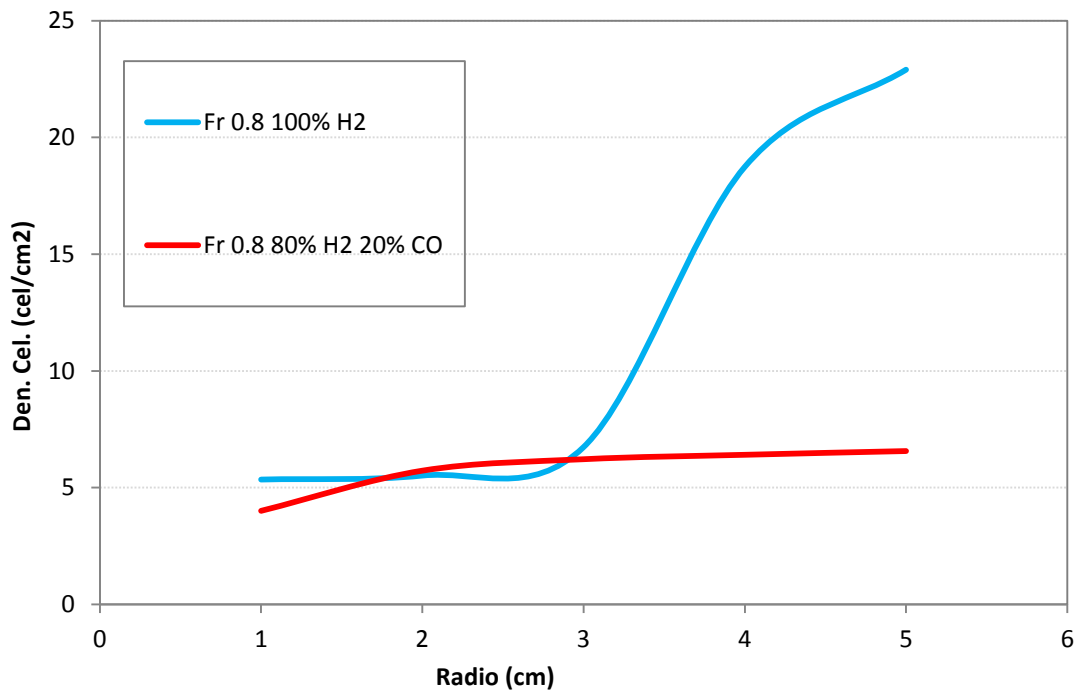


Figura 4.49: Evolución de la densidad celular en función del radio variando la composición de la mezcla para mezclas H<sub>2</sub>/aire (azul) y H<sub>2</sub>/CO/aire (rojo) a  $\phi=0.8$ , 0.1 MPa y 315 K

Caracterización de procesos de combustión de mezclas H<sub>2</sub>/aire e H<sub>2</sub>/CO/aire para su uso como combustibles en MCIA

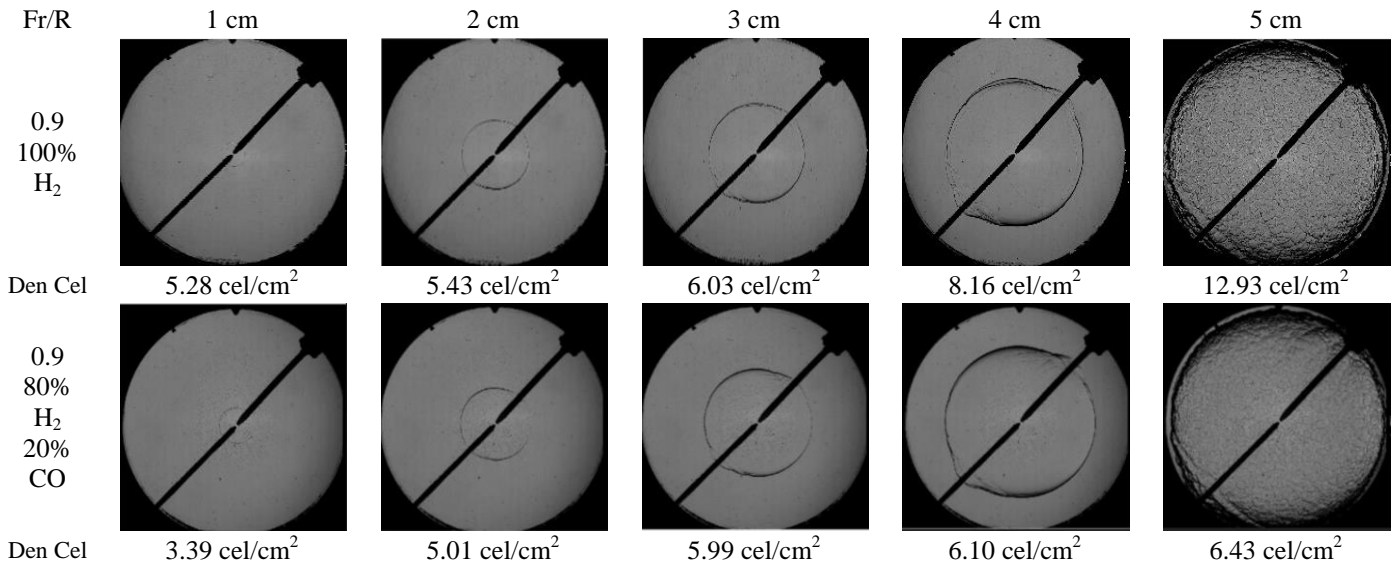


Figura 4.50: Imágenes Schlieren para mezclas H<sub>2</sub>/aire y H<sub>2</sub>/CO/aire para diferentes radios variando la composición de la mezcla  $\phi=0.9$ , 0.1 MPa y 315 K

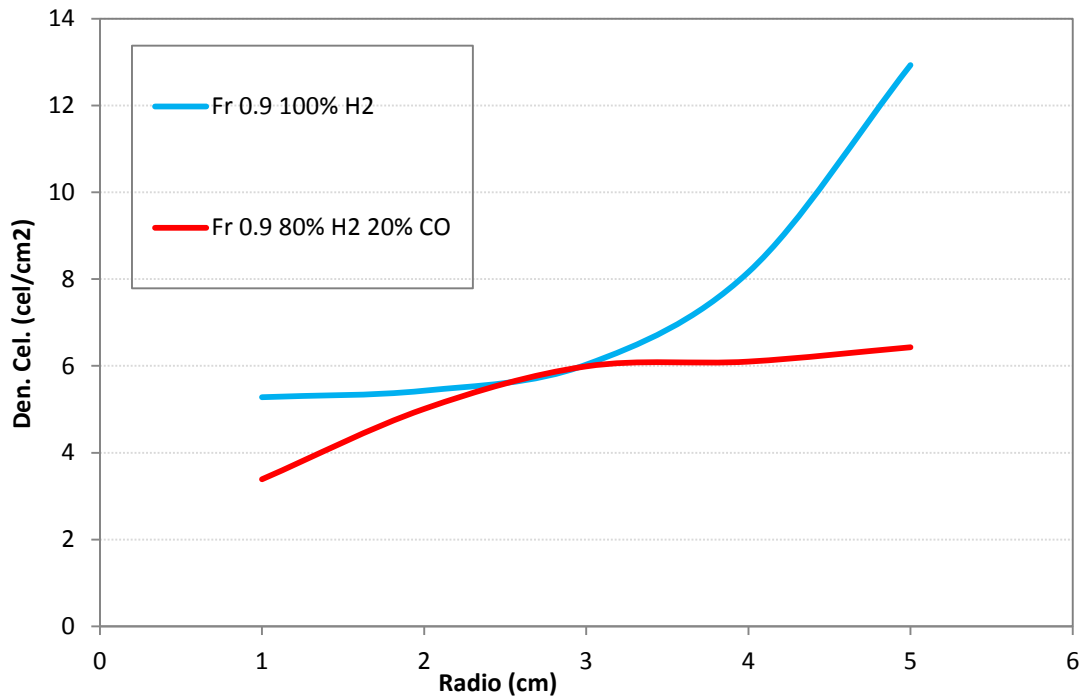


Figura 4.51: Evolución de la densidad celular en función del radio variando la composición de la mezcla para mezclas H<sub>2</sub>/aire (azul) y H<sub>2</sub>/CO/aire (rojo) a  $\phi=0.9$ , 0.1 MPa y 315 K

Caracterización de procesos de combustión de mezclas H<sub>2</sub>/aire e H<sub>2</sub>/CO/aire para su uso como combustibles en MCIA

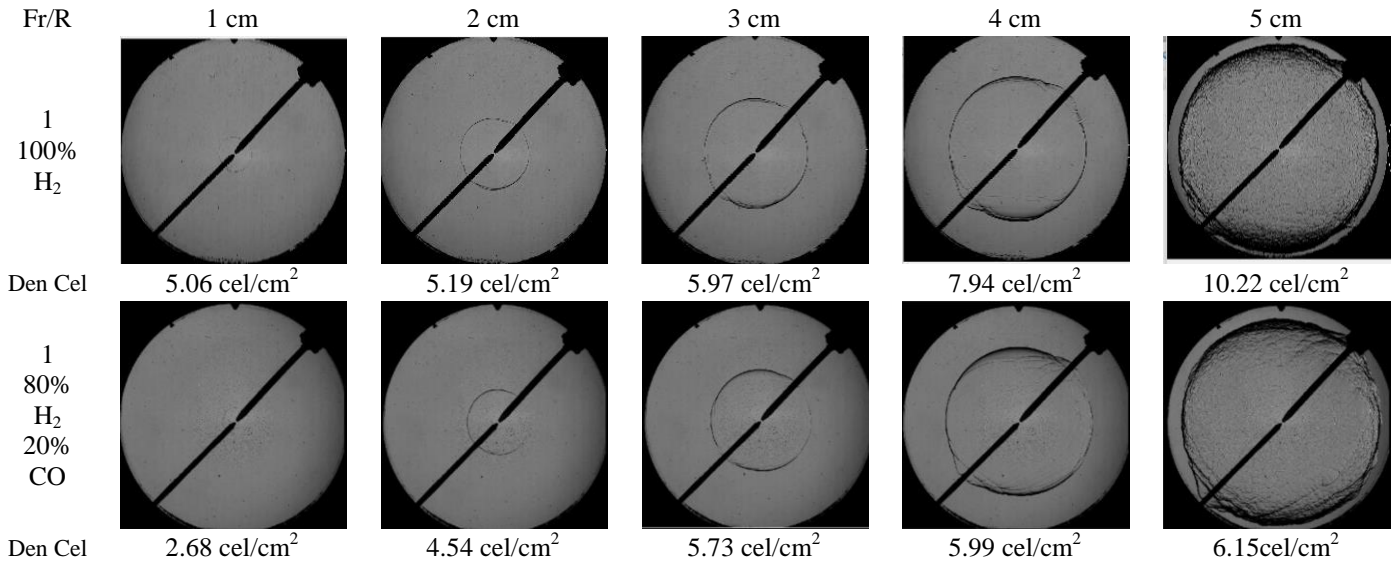


Figura 4.52: Imágenes Schlieren para mezclas H<sub>2</sub>/aire y H<sub>2</sub>/CO/aire para diferentes radios variando la composición de la mezcla  $\phi=1$ , 0.1 MPa y 315 K

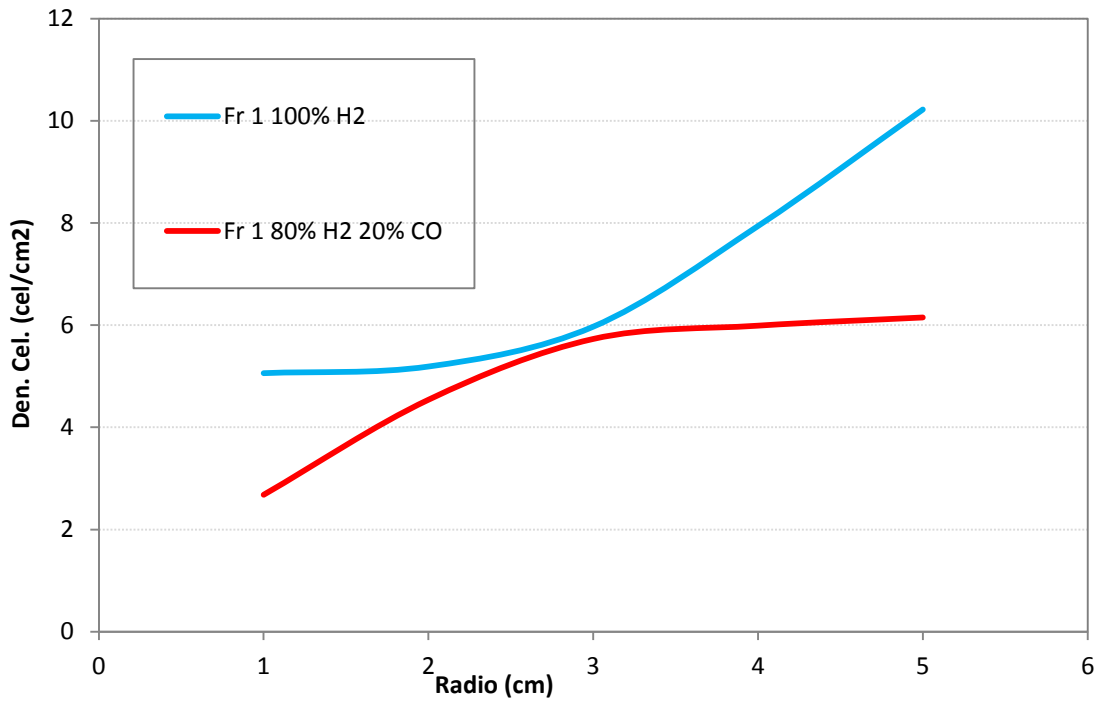


Figura 4.53: Evolución de la densidad celular en función del radio variando el dosado para mezclas H<sub>2</sub>/aire (azul) y H<sub>2</sub>/CO/aire (rojo) a  $\phi=1$ , 0.1 MPa y 315 K

Como ya se ha dicho con el análisis en las imágenes Schlieren, a menor dosado la llama se encuentra más arrugada y por lo tanto mayor número de celdas. Para mezclas H<sub>2</sub>/CO/aire la celularidad a un dosado es mayor que para la mezcla H<sub>2</sub>/aire, aunque tiene una disminución mucho mayor de celularidad a partir de dosado 0.6.

#### 4.4.2.2 INFLUENCIA DE LA PRESIÓN

Para el estudio de la influencia de la presión se han llevado a cabo experimentos en los cuales las condiciones son las siguientes:

- Rango de presiones iniciales:  $p_i = 0.1$  MPa
- Temperatura inicial:  $T_i = 373$  K
- Dosado:  $\phi = 0.5$

Como se observa en la figuras 4.54, 4.55 y 4.56 la densidad celular del H<sub>2</sub> es más alta que la de la mezcla de H<sub>2</sub> y CO, esto se debe a que al ser la mezcla 100% H<sub>2</sub> la celularidad es mayor ya que la llama se arruga mas. En ambos casos la celularidad aumenta con la presión siendo mayor para la mezcla de 100% H<sub>2</sub>.

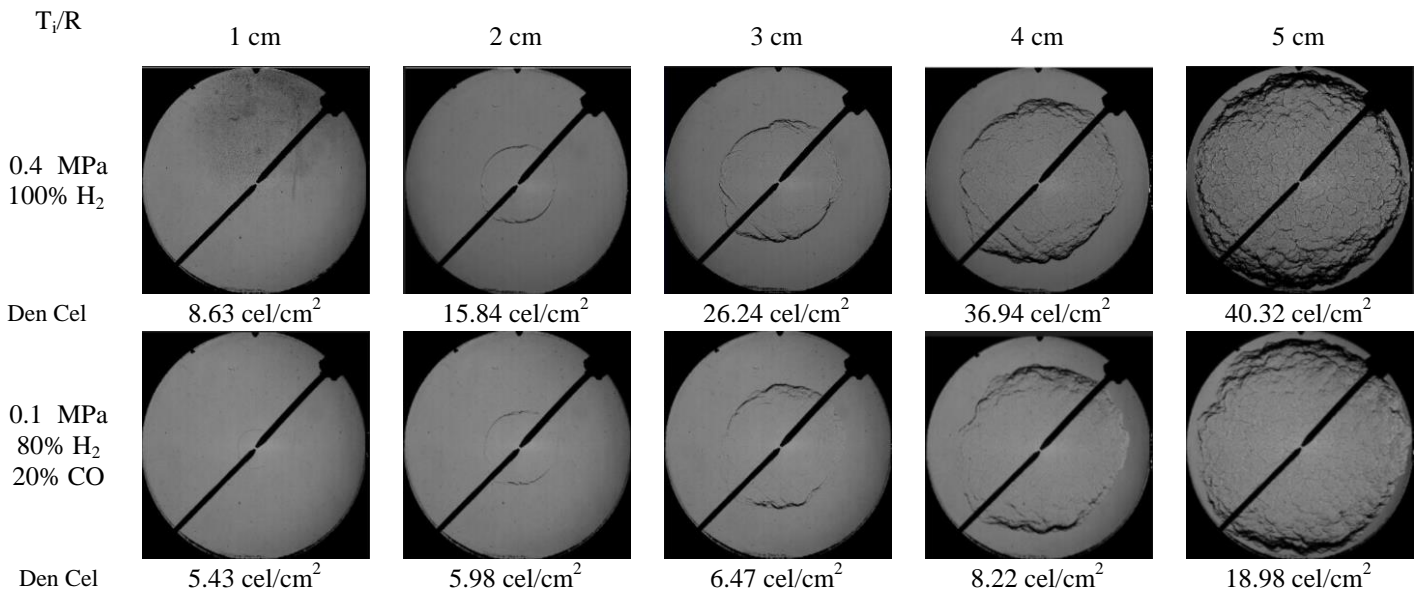


Figura 4.54: Imágenes Schlieren para mezclas H<sub>2</sub>/aire y H<sub>2</sub>/CO/aire para diferentes radios variando la composición de la mezcla  $\phi = 0.5$ , 0.1 MPa y 373 K



Caracterización de procesos de combustión de mezclas H<sub>2</sub>/aire e H<sub>2</sub>/CO/aire para su uso como combustibles en MCIA

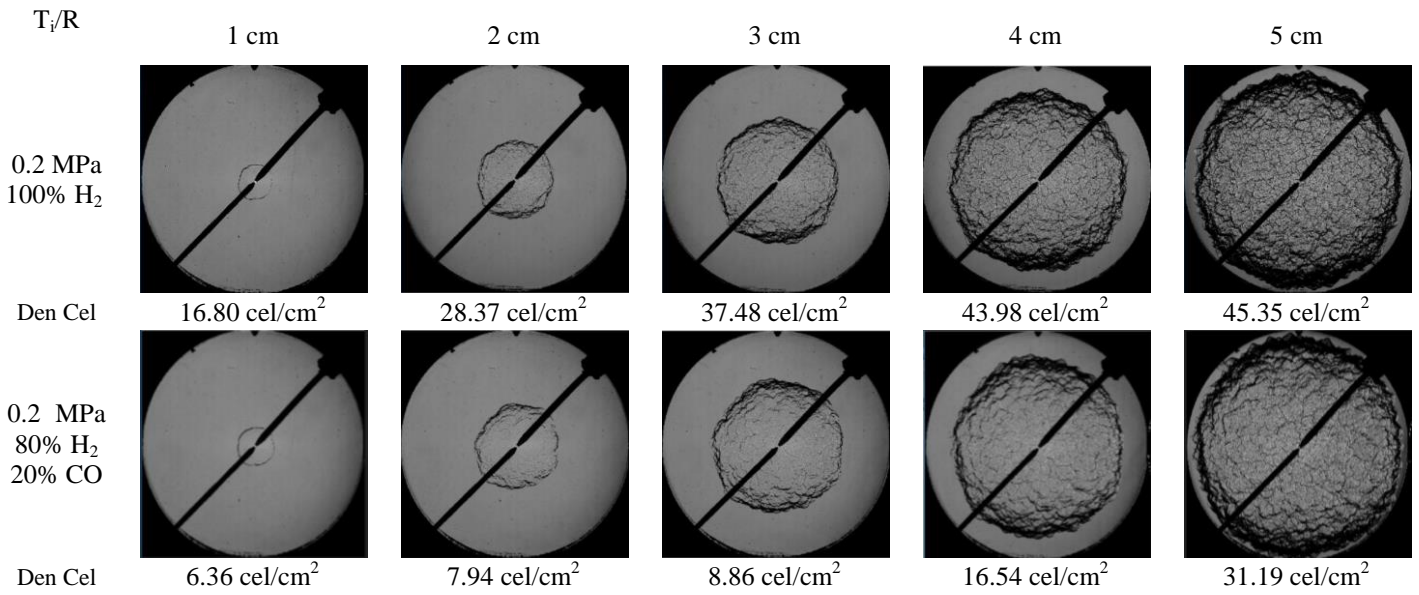


Figura 4.55: Imágenes Schlieren para mezclas H<sub>2</sub>/aire y H<sub>2</sub>/CO/aire para diferentes radios variando la composición de la mezcla  $\phi=0.5$ , 0.2 MPa y 373 K

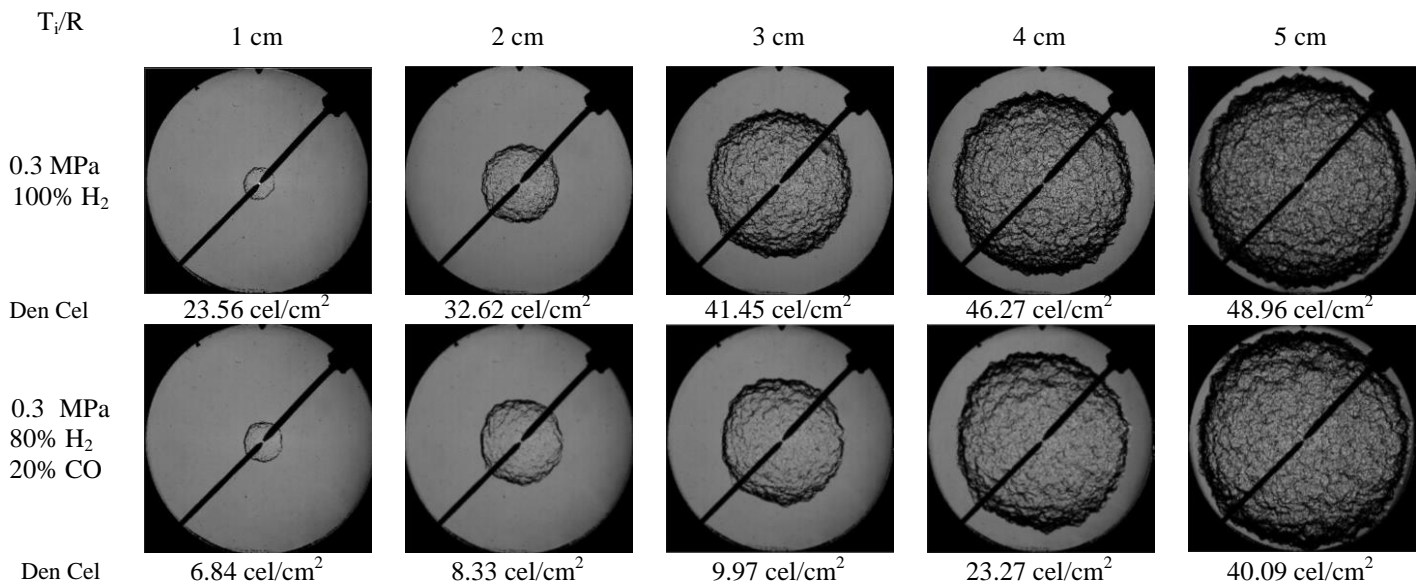


Figura 4.56: Imágenes Schlieren para mezclas H<sub>2</sub>/aire y H<sub>2</sub>/CO/aire para diferentes radios variando la composición de la mezcla  $\phi=0.5$ , 0.3 MPa y 373 K

En la Figura 4.57 se representa la evolución de dicha densidad celular obtenida anteriormente en función del radio variando la presión:

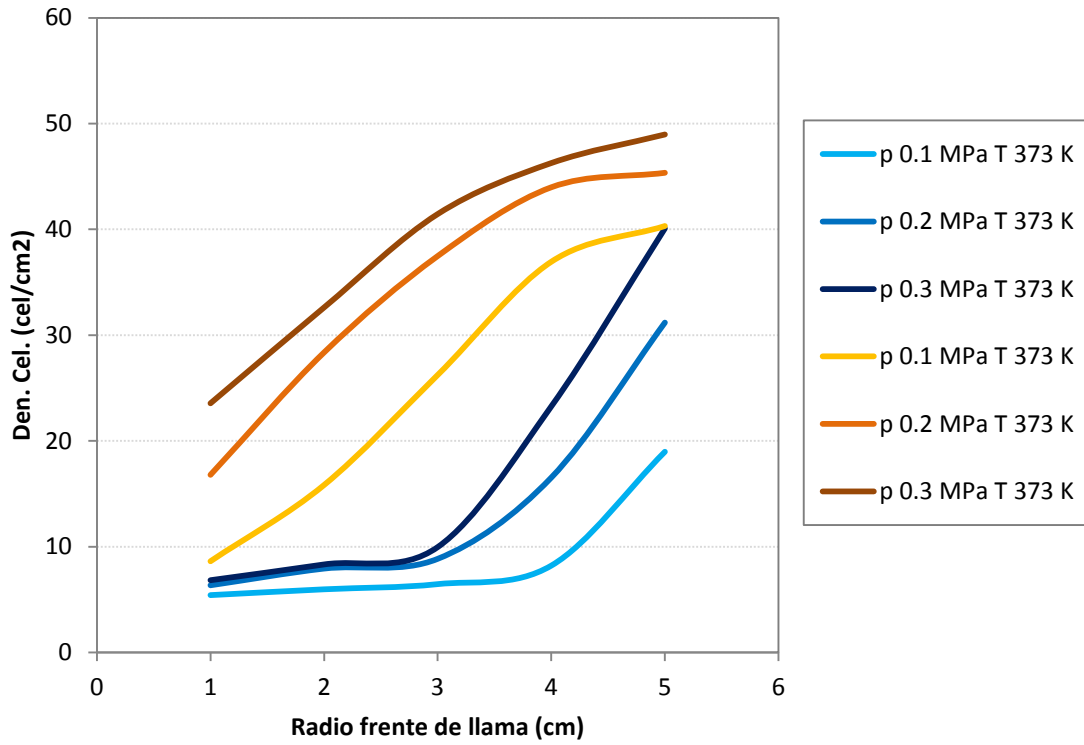


Figura 4.57: Evolución de la densidad celular en función del radio variando la presión para mezclas H<sub>2</sub>/aire (amarillo) y H<sub>2</sub>/CO/aire (azul) a  $\phi=0.5$  y 373 K

Como ya se ha dicho con el análisis en las imágenes Schlieren, las mezclas H<sub>2</sub>/CO/aire tienen menor densidad celular que las mezclas H<sub>2</sub>/aire.

# **CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES**



## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha realizado un estudio experimental con distintas mezclas combustibles: metano/aire, hidrógeno/aire y mezclas hidrógeno/monóxido de carbono/aire. Las conclusiones obtenidas se pueden dividir en los siguientes puntos:

1. Validación de la metodología experimental en una bomba de combustión cilíndrica para el cálculo de la velocidad de combustión con dos combustibles diferentes: metano e hidrógeno. Se ha realizado una comparación con diferentes autores y se ha comprobado que los valores obtenidos concuerdan con los obtenidos por dichos autores.
2. Tras la validación de la metodología se ha llevado a cabo un estudio paramétrico del proceso de combustión de mezclas hidrógeno/aire, para ver la influencia del dosado, presión y temperatura inicial en el proceso de combustión. Del estudio paramétrico se puede concluir lo siguiente:
  - a. Se ha determinado la velocidad de combustión mediante el registro de la presión y la posterior utilización de un modelo de diagnóstico de dos zonas
    - i. Un aumento de la presión inicial provoca un aumento en la velocidad de combustión de hidrógeno, al contrario de lo que ocurre con metano.
    - ii. Un incremento de la temperatura inicial se traduce en un aumento en la velocidad de combustión del hidrógeno, al igual que ocurre con otros combustibles.
    - iii. El dosado favorece la velocidad de combustión, obteniéndose un máximo cuando el dosado es 1.1 y luego comienza a disminuir.
  - b. Se ha registrado, adquirido y tratado las imágenes del proceso de combustión a través de la técnica óptica Schlieren, descrita en el Capítulo 3. Y estas imágenes han sido tratadas a través de un modelo de procesado de imágenes para la obtención de la evolución del radio frente al tiempo y la densidad celular (definida como el número de celdas por centímetro cuadrado que aparecen en el proceso de combustión como resultado de las inestabilidades presentes en el proceso), y a partir de ellas parámetros como la tasa de Stretch y la velocidad de propagación de la llama
    - i. La densidad celular en las combustiones de hidrógeno aumenta al disminuir el dosado, al aumentar la presión inicial y al aumentar la temperatura inicial.
    - ii. La tasa de stretch : aumenta con el incremento del dosado, además de que el punto máximo se alcanza a diferentes radios y se mantiene constante.
    - iii. La velocidad de propagación: aumenta con el incremento de dosado.

3. Se ha realizado un estudio paramétrico del proceso de combustión de mezclas  $H_2/CO$ /aire con un porcentaje en  $H_2$  del 80% y un porcentaje en  $CO$  del 20%, en las cuales se ha realizado los mismos procesos que para las mezclas  $H_2$ /aire:
  - a. Se ha determinado la velocidad de combustión de la mezcla. Tanto la presión inicial como el dosado tiene un efecto positivo en la velocidad de combustión, al igual que ocurre con hidrógeno puro.
  - b. Se han caracterizado las imágenes del proceso de combustión de la mezcla  $H_2/CO$ /aire:
    - i. La densidad celular: aumenta al disminuir el dosado y al aumentar la presión
    - ii. La tasa de stretch : aumenta con el incremento del dosado, además de que el punto máximo se alcanza a diferentes radios y va disminuyendo
    - iii. La velocidad de propagación: aumenta con el incremento de dosado.
4. Comparación de los resultados de las mezclas  $H_2$ /aire y  $H_2/CO$ /aire para observar como varia:
  - a. La velocidad de combustión de las mezclas  $H_2$ /aire tienen una mayor velocidad de combustión que las mezclas  $H_2/CO$ /aire debido a su mayor cantidad en  $H_2$ .
  - b. Las combustiones de  $H_2$ /aire tienen una densidad celular más elevada que las mezclas  $H_2/CO$ /aire debido a su mayor cantidad en  $H_2$ .

Finalmente, se puede decir que el hidrógeno es un combustible con una velocidad de combustión muy elevada, que permite mezclarlo con otros combustibles y mejorar su velocidad. Además, durante su combustión aparecen numerosas inestabilidades, por lo que la combustión de hidrógeno es muy celular, lo cual tiende a aumentar también la velocidad de combustión del mismo.

# **CAPÍTULO 6: TRABAJOS FUTUROS**





## 6. TRABAJOS FUTUROS

A partir de la metodología y modelos de diagnóstico utilizados desarrollados en el TFM, algunos de los trabajos que se pueden llevar a cabo en el futuro son:

- Continuar con el estudio del proceso de combustión para mezclas H<sub>2</sub>/CO/aire variando la composición de la mezcla, por ejemplo sería interesante el estudio de mezclas:
  - 60% H<sub>2</sub> y 40% CO
  - 40% H<sub>2</sub> y 60% CO
  - 80% H<sub>2</sub> y 20% CO
  - 0% H<sub>2</sub> y 100% CO

Y ver cómo influye esta variación de la composición de la mezcla en la velocidad de combustión, en la densidad celular, tasa de stretch y velocidad de propagación de llama.

- Combinar el hidrógeno con otros combustibles como el metano para estudiar su comportamiento en los procesos de combustión
- Y también utilizar combustibles líquidos como el metanol y el etanol para estudiar y conocer su comportamiento ya que la instalación también está preparada para realizar combustiones con combustibles líquidos.



# **CAPÍTULO 7: BIBLIOGRAFÍA**



## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. Flood, "Laminar burning velocities of methanol mixed with formaldehyde and statistical examination of the heat flux burners," 2011.
- [2] P. Bielaczyc, J. Woodburn, and A. Szczotka, "An assessment of regulated emissions and CO<sub>2</sub> emissions from a European light-duty CNG-fueled vehicle in the context of Euro 6 emissions regulations," *Appl. Energy*, vol. 117, pp. 134–141, 2014.
- [3] L. Sileghem, V. A. Alekseev, J. Vancoillie, E. J. K. Nilsson, S. Verhelst, and A. A. Konnov, "Laminar burning velocities of primary reference fuels and simple alcohols," *Fuel*, vol. 115, pp. 32–40, 2014.
- [4] C. Bae and J. Kim, "Alternative fuels for internal combustion engines," *Proc. Combust. Inst.*, vol. 36, no. 3, pp. 3389–3413, 2017.
- [5] X. Zhen, *Methanol As An Internal Combustion on Engine Fuel*. Elsevier B.V., 2018.
- [6] C. Ligeros, "Nuevo reglamento Euro5 y Euro6," no. 2, pp. 48–51, 2009.
- [7] D. W. Dockery and C. A. Pope, "Fact Check: are diesel cars really more polluting than petrol cars?," *Annual Review of Public Health*, May-1994. [Online]. Available: <http://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev.pu.15.050194.000543>. [Accessed: 02-Apr-2018].
- [8] X. Zhen and Y. Wang, "An overview of methanol as an internal combustion engine fuel," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 52, pp. 477–493, 2015.
- [9] T. Katsumi, T. Aida, K. Aiba, and S. Kadowaki, "Outward propagation velocity and acceleration characteristics in hydrogen-air deflagration," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 11, pp. 7360–7365, 2017.
- [10] F. Liu, X. Bao, J. Gu, and R. Chen, "Onset of cellular instabilities in spherically propagating hydrogen-air premixed laminar flames," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 15, pp. 11458–11465, 2012.
- [11] H. Li, G. Li, Z. Sun, Y. Yu, Y. Zhai, and Z. Zhou, "Experimental investigation on laminar burning velocities and flame intrinsic instabilities of lean and stoichiometric H<sub>2</sub>/CO/air mixtures at reduced, normal and elevated pressures," *Fuel*, vol. 135, pp. 279–291, 2014.
- [12] B. Gime, "Author's personal copy Study of the cycle-to-cycle variations of an internal combustion engine fuelled with natural gas / hydrogen blends from the diagnosis of combustion pressure."
- [13] Y. H. Jiang, G. X. Li, F. S. Li, Z. Y. Sun, and H. M. Li, "Experimental investigation of correlation between cellular structure of the flame front and pressure," *Fuel*, vol. 199, pp. 65–75, 2017.
- [14] F. V. Tinaut, A. Melgar, B. Giménez, and M. Reyes, "Prediction of performance and emissions of an engine fuelled with natural gas/hydrogen blends," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 1, pp. 947–956, 2011.
- [15] C. Clanet and G. Searby, "First experimental study of the darrieus-landau instability," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 80, no. 17, pp. 3867–3870, 1998.
- [16] E. Hu, Z. Huang, J. He, and H. Miao, "Experimental and numerical study on laminar burning velocities and flame instabilities of hydrogen-air mixtures at elevated

- pressures and temperatures," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 20, pp. 8741–8755, 2009.
- [17] E. Hu, Z. Huang, J. He, C. Jin, and J. Zheng, "Experimental and numerical study on laminar burning characteristics of premixed methane-hydrogen-air flames," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 11, pp. 4876–4888, 2009.
- [18] Z. Huang, Y. Zhang, K. Zeng, B. Liu, Q. Wang, and D. Jiang, "Measurements of laminar burning velocities for natural gas-hydrogen-air mixtures," *Combust. Flame*, vol. 146, no. 1–2, pp. 302–311, 2006.
- [19] J. Steven and J. Alvarez, "estudio de las inestabilidades de combustión de un motor de encendido provocado trabajando con altas relaciones de compresión " Director :," 2017.
- [20] K. Liang, "Biomass and Bioenergy Numerical study of water effects on the laminar burning velocity of methanol," *Biomass and Bioenergy*, vol. 108, no. November 2017, pp. 307–311, 2018.
- [21] S. Y. Liao, "Laminar burning velocities for mixtures of methanol and air at elevated temperatures," vol. 48, pp. 857–863, 2007.
- [22] A. Katoch, M. Asad, S. Minaev, and S. Kumar, "Measurement of laminar burning velocities of methanol – air mixtures at elevated temperatures," *Fuel*, vol. 182, pp. 57–63, 2016.
- [23] J. Beeckmann, L. Cai, and H. Pitsch, "Experimental investigation of the laminar burning velocities of methanol , ethanol , n -propanol , and n -butanol at high pressure," *Fuel*, vol. 117, pp. 340–350, 2014.
- [24] Á. Lafuente. "Metodología para el diagnóstico de la velocidad de combustión laminar de mezclas de gases combustibles a partir de la medida de la presión instantánea en una bomba de combustión a volumen constante", 2008.
- [25] Z. Zhang, Z. Huang, X. Wang, J. Zheng, H. Miao, and X. Wang, "Combustion characteristics of methanol – air and methanol – air – diluent premixed mixtures at elevated temperatures and pressures," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 29, no. 13, pp. 2680–2688, 2009.
- [26] F. V Tinaut, M. Reyes, A. Melgar, and M. Rodríguez, "Optical characterization of hydrogen-air laminar combustion under cellularity conditions," pp. 7–8, 2018.
- [27] W. Kim, Y. Sato, T. Johzaki, T. Endo, D. Shimokuri, and A. Miyoshi, "Experimental study on self-acceleration in expanding spherical hydrogen-air flames," *Int. J. Hydrogen Energy*, pp. 1–9, 2018.
- [28] J. C. Keck, "Turbulent Flame Structure and Speed in Spark-Ignition Engines," *Ninet. Symp. Combust. Combust. Inst.*, pp. 1451–1466, 1982.
- [29] M. Rodriguez. "Visualización de procesos de combustión con cámara de alta velocidad".
- [30] M. Metghalchi and J. C. Keck, "Burning Velocities of Mixtures of Air with Methanol , Isooctane , and Indolene at High Pressure and Temperature," vol. 210, pp. 191–210, 1982.
- [31] K. T. Aung, L. K. Tseng, M. a. Ismail, and G. M. Faeth, "Response to Comment by S. C. Taylor and D. B. Smith on 'Laminar Burning Velocities and Markstein Numbers

- of Hydrocarbon / Air Flames,” *Combust. Flame*, vol. 102, no. 1, pp. 526–530, 1995.
- [32] C. M. Vagelopoulos and F. N. Egolfopoulos, “Direct experimental determination of laminar flame speeds,” *Symp. Combust.*, vol. 27, no. 1, pp. 513–519, 1998.
- [33] M. Reyes, F. V. Tinaut, A. Horrillo, and A. Lafuente, “Experimental characterization of burning velocities of premixed methane-air and hydrogen-air mixtures in a constant volume combustion bomb at moderate pressure and temperature,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 130, pp. 684–697, 2018.
- [34] K. T. Aung, M. I. Hassan, and G. M. Faeth, “Flame stretch interactions of laminar premixed hydrogen/air flames at normal temperature and pressure,” *Combust. Flame*, vol. 109, no. 1–2, pp. 1–24, 1997.
- [35] S. C. Taylor, “Burning velocity and the influence of flame stretch,” 1991.

