



MÁSTER EN INGENIERÍA DE AUTOMOCIÓN

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ESTUDIO DE INESTABILIDADES Y CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN DE MEZCLAS DE METANO-HIDRÓGENO-AIRE EN CONDICIONES CELULARES

Autor: Dña. Eva Álvarez Pérez

Tutor: Dña. Miriam Reyes Serrano

Valladolid, febrero de 2019

Escuela Ingenierías Industriales

Depto. Ing^a Energética y Fluidomecánica

Paseo del Cauce 59

47011 Valladolid
(España)



Fundación Cidaut

Parque Tecnológico de Boecillo, 209

47151 Boecillo (Valladolid)

España



ESTUDIO DE INESTABILIDADES Y CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN DE MEZCLAS DE METANO-HIDRÓGENO-AIRE EN CONDICIONES CELULARES

RESUMEN BREVE

Palabras clave: Combustión, hidrógeno, metano, celularidad, parametrización.

La contaminación atmosférica sigue siendo uno de los principales problemas a los que se enfrenta la salud pública. A pesar de todo lo realizado para controlar y reducir las emisiones nocivas, aún queda mucho por hacer para alcanzar los valores recomendados por la Organización Mundial de la Salud. A raíz de este tema surge el presente trabajo fin de máster, en el que se ha estudiado el proceso de combustión para mezclas de metano-hidrógeno-aire en condiciones celulares, desarrollado en el laboratorio de Motores y Máquinas Térmicas del departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica de la Universidad de Valladolid. De esta forma, ha sido posible conocer la teoría del proceso de combustión, la metodología y experimentar con una bomba de combustión cilíndrica, variando el dosado, la temperatura, la presión inicial y el porcentaje de hidrógeno de las mezclas analizadas.

INSTABILITIES STUDY AND CHARACTERIZATION OF COMBUSTION PROCESS FOR METHANE-HYDROGEN-AIR MIXTURES UNDER CELLULARITY CONDITIONS

SHORT ABSTRACT

Keywords: Combustion, hydrogen, methane, cellularity, characterization.

One of the most important problems nowadays for public health is the atmospheric pollution. Beside all the efforts carried out to control and reduce damaging emissions, there is still a lot to do to achieve the recommended OMS values. As a result of that, this project is born, in which the combustion for methane-hydrogen-air mixtures in cellularity conditions has been studied, and developed in the Energetic Engineering and Fluidomechanics at the University of Valladolid. In this way, it has been possible to know the combustion process theory, the methodology and testing with a cylindrical combustion bomb, by varying the fuel rate in the mixture, the temperature, the initial pressure and the hydrogen content in the mixture.

ESTUDIO DE INESTABILIDADES Y CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN DE MEZCLAS DE METANO-HIDRÓGENO-AIRE EN CONDICIONES CELULARES

RESUMEN EJECUTIVO

La caracterización del proceso de combustión para la investigación de combustibles que difieren de los convencionales (diésel y gasolina), es algo que se ha llevado a cabo desde hace mucho tiempo. En concreto, para mezclas de hidrógeno y metano en aire (conocidas como HCNG), los primeros experimentos datan de los años ochenta.

Son muchos los autores que se han interesado por este ámbito, donde cabe destacar la importante labor realizada por el laboratorio de Ingeniería Energética y Fluidomecánica de la Universidad de Valladolid. Los primeros proyectos realizados dentro de la Escuela de Ingeniería hacen referencia a bombas de combustión esféricas con pequeño acceso óptico, por lo que no se podía ver con claridad lo que ocurría en su interior durante el proceso de combustión. Gracias a la continua investigación llevada a cabo, ha sido posible la construcción de una bomba de combustión cilíndrica con acceso óptico, por lo que, además del registro de la presión instantánea, también es posible un registro óptico del frente de llama durante la combustión. Este trabajo fin de máster está centrado en este tipo de instalaciones, analizando el comportamiento de las mezclas de hidrógeno-metano-aire en condiciones celulares, una de las alternativas futuras para los combustibles tradicionales, constituyendo el pilar fundamental de este trabajo. La capacidad de registro óptico de la combustión usando la técnica Schlieren, ha permitido visualizar y registrar el proceso de combustión para poder utilizar un programa de análisis y obtener la evolución del radio del frente de llama durante el transcurso del proceso, así como un estudio de las celdas celulares producidas en el frente de llama.

Por otro lado, también es importante estudiar las inestabilidades producidas durante los procesos de combustión para poder entender cómo se comportan las mezclas bajo diversas condiciones iniciales de dosado relativo, presión y temperatura. En este caso, se han tomado valores para estos parámetros recomendados en la bibliografía presentada a lo largo de este trabajo. Tras un amplio proceso de aprendizaje y experimentación, ha sido posible obtener una gran cantidad de datos para su análisis y comparación.

Uno de los principales objetivos recogidos en esta memoria es la posibilidad de comparar y caracterizar el comportamiento de las diferentes mezclas experimentadas, comparándolas y observando cómo varían su tendencia en función de la modificación de los parámetros comentados. Además, la realización de experimentos con diferentes porcentajes de hidrógeno y metano en aire ha permitido una categorización de éstos en tres categorías principales: región de hidrógeno dominante, donde el metano tiene muy poca (o ninguna) influencia; región de metano dominante, donde ocurre lo contrario; y región de transición, donde no está claro qué comportamiento domina en la mezcla. De las mezclas experimentadas, las correspondientes a hidrógeno-aire y aquellas constituidas por un 80% de hidrógeno y 20% de metano en aire forman parte de la primera región. Por otro lado, las mezclas de metano-aire y las constituidas por un 20% de hidrógeno y un 80% de metano conforman la segunda región. Por último, existe un grupo de mezclas que no se clasifican dentro de ninguno de los comentados, sino que conforman la llamada región de transición.

Cabe destacar que, los experimentos comprendidos en la región de hidrógeno dominante presentan un aumento de la presión instantánea, la fracción de masa quemada y la velocidad de combustión con el aumento del dosado relativo de la mezcla. Por el contrario, las arrugas del frente de llama no son tan significativas a medida que éste aumenta. Los parámetros analizados a lo largo de este trabajo también se ven incrementados significativamente a medida que aumenta la presión inicial de llenado de la cámara de combustión, mientras que variar la temperatura inicial no aporta una diferencia significativa.

Por otro lado, los experimentos categorizados en la región de metano dominante presentan un aumento de los parámetros de la combustión con el aumento del dosado relativo de la mezcla, pero, por el contrario que la región de hidrógeno dominante, presentan un descenso de los mismo al aumentar la presión inicial de llenado de la bomba de combustión.

Por último, los experimentos comprendidos en la región de transición no presentan un comportamiento claro, sino que unas veces se agrupan dentro de la primera región y otras, dentro de la segunda.

En este proyecto se ha validado la metodología para determinar las velocidades de combustión con el registro óptico basado en la técnica Schlieren.

EXPERIMENTAL STUDY OF INSTABILITIES AND CHARACTERIZATION OF COMBUSTION PROCESS FOR METHANE-HYDROGEN-AIR MIXTURES IN CELLULARITY CONDITIONS

EXECUTIVE ABSTRACT

The study and characterization of the combustion process to investigate fuels that differ from the conventional ones (diesel and gasoline), is something that has been studied for a long time. Specifically, for hydrogen-methane air mixtures (known as HCNG: Hydrogen Compressed Natural Gas), the first experiments date back to the eighties.

There are many authors who have been interested in this field, where it is worth mentioning the important work carried out by the Energy and Fluidomechanical Engineering laboratory at the University of Valladolid. The first works carried out within the School of Engineering refer to spherical combustion pumps without optical access, so that it was not possible to see clearly what was happening inside during the combustion process. Thanks to the continuous research developed, the construction of a cylindrical combustion pump with optical access has been possible. In addition to the instantaneous pressure recording, an optical recording of the flame front during combustion is also possible using the Schlieren technique.

This master's degree project is focused on this type of facilities, analyzing the behavior of hydrogen-methane-air mixtures in cellular conditions, one of the future alternatives for traditional fuels, being the aim pillar of this work. The optical recording capacity of the combustion has allowed to visualize and register the combustion process to be able to use an analysis program and to obtain the evolution of the flame front radius during the process, as well as a study of the cells produced in the flame front.

On the other hand, it is also important to study the instabilities produced during the combustion process in order to understand how the mixtures behave under different initial conditions of fuel rate in air, pressure and temperature. In this case, values have been taken for these recommended parameters in the bibliography presented throughout this work.

After an extensive process of learning and experimentation, it has been possible to obtain a large amount of data for analysis and comparison.

One of the main objectives collected in this report is the possibility of comparing and characterizing the behavior of the different mixtures experienced, comparing them and observing how their tendency varies depending on the modification of the commented parameters. In addition, conducting experiments with different percentages of hydrogen and methane in air has allowed to a categorization of these into three main groups: dominant hydrogen region, where methane has very little (or no) influence; dominant methane region, where the opposite occurs; and transition region, where it is not clear which behavior dominates the mix. Of the mixtures experienced, those corresponding to hydrogen-air and those constituted by 80% hydrogen and 20% methane in air are part of the first region. On the other hand, methane-air mixtures and those consisting of 20% hydrogen and 80% methane make up the second region. Finally, there is a group of mixtures that are not classified within any of the aforementioned, but that make up the so-called transition region.

It should be noted that the experiments included in the dominant hydrogen region show an increase in the instantaneous pressure and the speed of combustion with the increase in the relative fuel rate of the mixture. On the contrary, the wrinkles of the front flame are not as significant as it increases. The parameters analyzed throughout this work are also significantly increased as the initial filling pressure of the combustion chamber increases, while varying the initial temperature does not provide a significant difference.

On the other hand, the experiments categorized in the dominant methane region show an increase in the parameters of the combustion with the increase of the relative fuel rate of the mixture, but, on the contrary that the dominant hydrogen region, have a decrease of the same by increasing the initial filling pressure of the combustion pump.

Finally, the experiments included in the transition region do not show a clear behavior, but they are sometimes grouped within the first region and others within the second one.

In this project, the methodology has been validated to determine combustion velocities with the optical register based on the Schlieren technique.

AGRADECIMIENTOS

A mi tutora, *Miriam Reyes Serrano*, por haberme brindado esta oportunidad tan enriquecedora, transmitirme todos los conocimientos necesarios y ayudarme en todo momento para que fuese posible la publicación de este trabajo fin de máster.

A *Francisco Tinaut* y *Andrés Melgar* por aconsejarme y guiarme en todo momento en el laboratorio.

A *Alexandra*, *Alejandro* y *Jorge*, por todos los momentos compartidos en el departamento.

A mi familia y amigos, por haberme apoyado durante todo este tiempo.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Antecedentes y justificación del TFM	1
1.1.1	Antecedentes	2
1.1.2	Justificación	2
1.2	Objetivos	3
1.3	Alcance y desarrollo del TFM	4
2	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1	Estado del arte	5
2.2	Combustibles	6
2.2.1	Combustibles convencionales.....	6
2.2.2	Gas Natural	7
2.2.3	Hidrógeno	8
2.2.4	HCNG (Hydrogen Compressed Natural Gas)	10
2.3	El proceso de la combustión	12
2.4	Parámetros de la combustión.....	13
2.4.1	Parámetros obtenidos a partir del registro de la presión instantánea	13
2.4.2	Celularidad	13
2.4.3	Velocidad del frente de llama	15
2.4.4	Tasa de Stretch (α)	16
2.4.5	Números adimensionales.....	17
3	EXPERIMENTACIÓN.....	19
3.1	Descripción de la instalación.....	19
3.2	Metodología experimental	23
3.3	Modelo de diagnóstico	24
3.4	Formulación y análisis.....	25
3.4.1	Cálculo teórico de las presiones de llenado de la bomba	25
3.4.2	Cálculo real de parámetros tras el llenado de la bomba	26
3.4.3	Análisis del vídeo de la combustión en Matlab.....	28
3.4.4	Cálculo post-procesado	28
4	RESULTADOS.....	31
4.1	Introducción a los resultados.....	31
4.2	Estudio del efecto del dosado relativo	39
4.3	Estudio del efecto de la presión y temperatura	47
4.4	Estudio del efecto del porcentaje de hidrógeno en la mezcla	59
4.5	Longitud de Markstein	63
4.6	Comparación de resultados con la bibliografía	64

5	CONCLUSIONES	67
5.1	Conclusiones.....	67
5.2	Principales aportaciones del autor del TFM	68
5.3	Sugerencias para trabajos futuros	68
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71
	ANEXO 1: Parámetros teóricos de los experimentos.....	75
	ANEXO 2: Parámetros reales de los experimentos	77
	ANEXO 3: Matrices celulares.....	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig 1.	Evolución de la producción de petróleo hacia el agotamiento. Fuente: Boletín de ASPO, diciembre 2004.....	7
Fig 2.	Fotografías Schlieren de secuencias del proceso de combustión para mezclas estequiométricas de hidrógeno-aire a 298K, 1 bar (superior) y 2 bar (inferior) al mismo tiempo tras el encendido de la mezcla: 1ms, 1.4ms, 2.5ms y 3ms. (F. Liu, Bao, Gu, & Chen, 2012)	14
Fig 3.	Medidas de velocidad de propagación del frente de llama a distintas tasas de stretch en una combustión estequiométrica de CH ₄ -aire a 5 bar y 300K. Adaptada de (Lafuente, 2008) .	16
Fig 4.	Bomba de combustión cilíndrica y cámara de alta velocidad.	19
Fig 5.	Esquema de la instalación empleada.....	20
Fig 6.	Bombonas de metano e hidrógeno comprimidos.	20
Fig 7.	Ejemplo de una llama de propano utilizando la técnica Schlieren. (Reyes, 2008)	21
Fig 8.	Bomba de combustión cilíndrica y sistema de electrodos para el encendido.....	21
Fig 9.	Sensores de presión con válvulas de cierre.....	21
Fig 10.	Izquierda: controlador PID. Derecha: Resistencias colocadas en la bomba de combustión	22
Fig 11.	Diodo LED empleado en la instalación y características principales. (Calvete, 2018)	22
Fig 12.	Videocámara de alta velocidad Phantom V210.....	22
Fig 13.	Osciloscopio digital Yokogawa.....	23
Fig 14.	Metodología empleada para la obtención de los resultados.	24
Fig 15.	Extracto de la hoja de cálculo de las presiones requeridas para el llenado de la bomba de combustión.....	25
Fig 16.	Extracto de la hoja de cálculo de los parámetros reales de los experimentos.	27
Fig 17.	Interfaz del programa de Matlab para determinar el radio del frente de llama frente al tiempo.	28
Fig 18.	Comparación del radio obtenido con Matlab y el radio alisado (real) para una mezcla 50% hidrógeno-50% metano-aire Fr=0.7, P=1 bar, T=100°C.....	29
Fig 19.	Cálculo de la velocidad de propagación “unstretched” (SI ₀) a partir de la velocidad de propagación SI y la tasa de stretch (α) para una mezcla 80% hidrógeno-20% metano-aire Fr=0.8, P=1 bar, T=40°C.....	30
Fig 20.	Evolución del radio del frente de llama frente al tiempo. 100%H ₂ -Fr0.7-P=1bar-T=40°C..	32
Fig 21.	Evolución de la morfología de la llama. 100%H ₂ -Fr0.7-P=1bar-T=40°C.....	33
Fig 22.	Velocidad de propagación (SI) y tiempo en función de la tasa de stretch. Cálculo de la velocidad de propagación “unstretched” (SI ₀). 100%H ₂ -Fr=0.7-P=1bar-T=40°C.....	33
Fig 23.	Evolución del radio del frente de llama frente al tiempo. 100%CH ₄ -Fr0.6-P=1bar-T=40°C.	34
Fig 24.	Evolución de la morfología de la llama. 100%CH ₄ -Fr0.6-P=1bar-T=40°C.....	34
Fig 25.	Velocidad de propagación (SI) y tiempo en función de la tasa de stretch. Cálculo de la velocidad de propagación “unstretched” (SI ₀). 100%CH ₄ -Fr=0.6-P=1bar-T=40°C.....	34

Fig 26.	Evolución del radio del frente de llama frente al tiempo. 80%H ₂ -20%CH ₄ -Fr0.6-P=1bar-T=40°C.....	35
Fig 27.	Evolución de la morfología de la llama. 80%H ₂ -20%CH ₄ -Fr0.8-P=1bar-T=40°C	35
Fig 28.	Velocidad de propagación (SI) y tiempo en función de la tasa de stretch. Cálculo de la velocidad de propagación "unstretched" (SI0). 80%H ₂ -20%CH ₄ -Fr=0.8-P=1bar-T=40°C. 35	35
Fig 29.	Evolución del radio del frente de llama frente al tiempo. 50%H ₂ -50%CH ₄ -Fr=1-P=1bar-T=40°C.....	36
Fig 30.	Evolución de la morfología de la llama. 50%H ₂ -50%CH ₄ -Fr=1-P=1bar-T=40°C	36
Fig 31.	Velocidad de propagación (SI) y tiempo en función de la tasa de stretch. Cálculo de la velocidad de propagación "unstretched" (SI0). 50%H ₂ -50%CH ₄ -Fr=1-P=1bar-T=40°C. ...	37
Fig 32.	Evolución del radio del frente de llama frente al tiempo. 20%H ₂ -80%CH ₄ -Fr=0.8-P=1bar-T=40°C.....	37
Fig 33.	Evolución de la morfología de la llama. 20%H ₂ -80%CH ₄ -Fr=0.8-P=1bar-T=40°C.....	38
Fig 34.	Velocidad de propagación (SI) y tiempo en función de la tasa de stretch. Cálculo de la velocidad de propagación "unstretched" (SI0). 20%H ₂ -80%CH ₄ -Fr=1-P=1bar-T=40°C. ...	38
Fig 35.	Clasificación de los experimentos realizados en los tres regímenes principales.....	38
Fig 36.	Evolución de la presión instantánea y la fracción de masa quemada en función del tiempo. 100%H ₂ -80%H ₂ -50%H ₂ -20%H ₂ -100%CH ₄ respectivamente para una variación de Fr entre 0.5 y 1, p=1 bar, T=315 K.....	39
Fig 37.	Evolución de la velocidad de combustión laminar en función de la temperatura de la masa no quemada. 100%H ₂ -80%H ₂ -50%H ₂ -20%H ₂ -100%CH ₄ respectivamente para una variación de Fr entre 0.5 y 1, 1 bar de presión y 315 K de temperatura inicial.....	41
Fig 38.	Evolución del radio del frente de llama frente al tiempo. 100%H ₂ -80%H ₂ -50%H ₂ -20%H ₂ -100%CH ₄ respectivamente para una variación de Fr entre 0.5 y 1.	42
Fig 39.	Evolución de la velocidad de propagación del frente de llama frente a la tasa de stretch. 100%H ₂ -80%H ₂ -50%H ₂ -20%H ₂ -100%CH ₄ respectivamente para una variación de Fr entre 0.5 y 1, P=1 bar, T=40°C.....	45
Fig 40.	Evolución de la velocidad de propagación laminar "unstretched" en función del dosado relativo de la mezcla. 100%H ₂ -80%H ₂ -50%H ₂ -20%H ₂ -100%CH ₄ respectivamente para una variación de Fr entre 0.5 y 1, P=1 bar, T=40°C.	46
Fig 41.	Evolución de la velocidad de combustión laminar (UI) en función del radio del frente de llama. 100%H ₂ -80%H ₂ -50%H ₂ -20%H ₂ -100%CH ₄ respectivamente para una variación de Fr entre 0.5 y 1, P=1 bar, T=40°C.....	47
Fig 42.	Velocidad de combustión laminar "unstretched", UI ₀ [m/s] en función del dosado relativo Fr para distintos porcentajes de hidrógeno.....	47
Fig 43.	Evolución de la presión instantánea en función del tiempo. 100%H ₂ -80%H ₂ -50%H ₂ -20%H ₂ -100%CH ₄ respectivamente para una variación de presión inicial entre 1 y 3 bar, 315 K de temperatura y 0.7 de dosado.	48
Fig 44.	Evolución de la velocidad de combustión laminar en función de la temperatura de la masa no quemada. 100%H ₂ -80%H ₂ -50%H ₂ -20%H ₂ -100%CH ₄ respectivamente para una variación de presión inicial entre 1 y 3 bar, T=40°C, Fr=0.7.....	49
Fig 45.	Evolución del radio del frente de llama frente al tiempo. 100%H ₂ -80%H ₂ -50%H ₂ -20%H ₂ -100%CH ₄ respectivamente para una variación de presión inicial entre 1 y 3 bar, 315 K de temperatura y 0.7 de dosado.	50

Fig 46.	Evolución de la velocidad de propagación del frente de llama frente a la tasa de stretch. 100%H ₂ -80%H ₂ -50%H ₂ -20%H ₂ -100%CH ₄ respectivamente para una variación de presión inicial entre 1 y 3 bar.	53
Fig 47.	Evolución de la velocidad de combustión laminar “unstretched” (S_{l0}) en función del dosado relativo de la mezcla. 100%H ₂ -80%H ₂ -50%H ₂ -20%H ₂ -100%CH ₄ respectivamente para una variación de presión inicial entre 1 y 3 bar, T=40°C, Fr=0.7.	54
Fig 48.	Evolución de la velocidad de combustión laminar (UI) en función del radio del frente de llama. 100%H ₂ -80%H ₂ -50%H ₂ -20%H ₂ -100%CH ₄ respectivamente para una variación de presión inicial entre 1 y 3 bar, T=40°C, Fr=0.7.	55
Fig 49.	Evolución de la presión instantánea y la fracción de masa quemada en función del tiempo. 100%H ₂ -80%H ₂ -50%H ₂ -20%H ₂ -100%CH ₄ respectivamente para una variación de T entre 40 y 100°C, P=1 bar, Fr=0.7.	56
Fig 50.	Evolución de la velocidad de combustión laminar en función de la temperatura de la masa no quemada. 100%H ₂ -80%H ₂ -50%H ₂ -20%H ₂ -100%CH ₄ respectivamente para una variación de temperatura entre 40 y 100°C, P=1 bar, Fr=0.7.	57
Fig 51.	Evolución del radio del frente de llama frente al tiempo. 100%H ₂ -80%H ₂ -50%H ₂ -20%H ₂ -100%CH ₄ respectivamente para una variación de temperatura entre 40 y 100°C.	57
Fig 52.	Evolución de la velocidad de combustión laminar “unstretched” (S_{l0}) en de la temperatura inicial de la mezcla. 100%H ₂ -80%H ₂ -50%H ₂ -20%H ₂ -100%CH ₄ , P=1 bar, Fr=0.7.	59
Fig 53.	Velocidad de combustión laminar "unstretched", UI0 en función de la temperatura inicial para los diferentes porcentajes de hidrógeno en la mezcla, P=1 bar, Fr=0.7.	59
Fig 54.	Evolución de la presión instantánea y la fracción de masa quemada en función del tiempo. 100%H ₂ -80%H ₂ -50%H ₂ -20%H ₂ -100%CH ₄ . P=1 bar, Fr=0.7, T=40°C.	60
Fig 55.	Evolución de la velocidad de combustión laminar en función de la temperatura de la masa no quemada. 100%H ₂ -80%H ₂ -50%H ₂ -20%H ₂ -100%CH ₄ . P=1bar, Fr=0.7, T=40°C.	60
Fig 56.	Evolución del radio del frente de llama frente al tiempo. 100%H ₂ -80%H ₂ -50%H ₂ -20%H ₂ -100%CH ₄ . P=1bar, Fr=0.7, T=40°C.	61
Fig 57.	Evolución de la velocidad de propagación del frente de llama frente a la tasa de stretch. 100%H ₂ -80%H ₂ -50%H ₂ -20%H ₂ -100%CH ₄ . Fr=0.7, P=1 bar, T=40°C.	62
Fig 58.	Evolución de la velocidad de combustión laminar “unstretched” en función del dosado relativo de la mezcla. 100%H ₂ -80%H ₂ -50%H ₂ -20%H ₂ -100%CH ₄ . Fr=0.7, P=1 bar, T=40°C.	62
Fig 59.	Evolución de la velocidad de combustión laminar “unstretched” (UI) en función del radio del frente de llama. 100%H ₂ -80%H ₂ -50%H ₂ -20%H ₂ -100%CH ₄ . Fr=0.7, P=1bar, T=40°C.	63
Fig 60.	Longitud de Markstein en función del dosado relativo, presión inicial y temperatura inicial para diferentes porcentajes de hidrógeno.	64
Fig 61.	Comparación de la velocidad de combustión laminar para mezclas hidrógeno-aire. (Reyes et al., 2018)	65
Fig 62.	Comparación de la velocidad de combustión laminar para mezclas hidrógeno-metano-aire. P=1 bar, Fr=1, T=300K. Método de presión (CI). Método óptico (UI ₀). (Mayo Monge, 2015)	65
Fig 63.	Comparación de la velocidad de combustión laminar para mezclas metano-aire con la bibliografía.	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Composición y características principales del gas natural.	8
Tabla 2.	Propiedades del hidrógeno comparado con el metano y la gasolina. (F. V. Tinaut et al., 2011)	10
Tabla 3.	Morfología del frente de llama para una mezcla 100% hidrógeno-aire-P=1bar-T=40°C-Fr=0.5-1.	42
Tabla 4.	Morfología del frente de llama para una mezcla 50% hidrógeno-50%metano-aire-P=1bar-T=40°C-Fr=0.5-1.	43
Tabla 5.	Morfología del frente de llama para una mezcla 100%metano-aire-P=1bar-T=40°C-Fr=0.5-1.	43
Tabla 6.	Morfología del frente de llama para una mezcla 100%hidrógeno-aire-Fr0.7-T=40°C-P=1-3 bar.....	51
Tabla 7.	Morfología del frente de llama para una mezcla 50%hidrógeno-50%metano-aire-Fr0.7-T=40°C-P=1-3 bar.....	51
Tabla 8.	Morfología del frente de llama para una mezcla 100%metano-aire-Fr0.7-T=40°C-P=1-3 bar.	52
Tabla 9.	Morfología del frente de llama para una mezcla 20%hidrógeno-80%metano-aire-P=1bar-Fr0.7-T=40°C y T=100°C.....	58
Tabla 10.	Morfología del frente de llama para una mezcla 80%hidrógeno-20%metano-aire-P=1bar-Fr0.7-T=40°C y T=100°C.....	58
Tabla 11.	Morfología del frente de llama para mezclas con variación del porcentaje de hidrógeno, Fr=0.7, P=1 bar, T=40°C.....	61
Tabla 12.	Experimentos teóricos programados para experimentación.	75
Tabla 13.	Experimentos realizados con parámetros reales.....	77
Tabla 14.	Morfología del frente de llama para una mezcla 80% hidrógeno-20%metano-aire-P=1bar-T=40°C-Fr=0.5-1.	81
Tabla 15.	Morfología del frente de llama para una mezcla 20% hidrógeno-80%metano-aire-P=1bar-T=40°C-Fr=0.5-1.	82
Tabla 16.	Morfología del frente de llama para una mezcla 80%hidrógeno-20%metano-aire-Fr0.7-T=40°C-P=1-3 bar.....	83
Tabla 17.	Morfología del frente de llama para una mezcla 20%hidrógeno-80%metano-aire-Fr0.7-T=40°C-P=1-3 bar.....	83

NOMENCLATURA UNIFICADA	
Presión (inicial, aire, residual, CH ₄ , H ₂)	$p_i, p_{\text{residual}}, p_{\text{aire}}, p_{\text{H}_2}, p_{\text{CH}_4}$
Dosado, dosado relativo, dosado estequiométrico	F, Fr, Fest
Fracción de hidrógeno, fracción de metano	x, y
Masa de combustible, masa de aire, masa de hidrógeno, masa de metano	$m_{\text{COMB}}, m_{\text{AIRE}}, m_{\text{H}_2}, m_{\text{CH}_4}$
Índice de carbono, hidrógeno y oxígeno del combustible	n, m, p
Densidad de los quemados, densidad de los no quemados	ρ_b, ρ_{ub}
Radio del frente de llama, radio crítico del frente de llama	R, R _{CR}
Temperatura inicial, temperatura no quemados	T, Tsq
Tiempo	t
Tasa de stretch	α, K
Velocidad de propagación del frente de llama	Sl, Sl ^K , Vf
Velocidad de propagación del frente de llama "unstretched"	Sl ₀ , Sl _{k=0}
Velocidad de combustión laminar	Cc, Ul
Velocidad de combustión laminar "unstretched"	Cl, Ul ₀
Longitud de Markstein	Lb, L

Esesor del frente de llama	g_l, l_d
Número de Peclet crítico	Pe_{cr}
Número de Lewis del combustible, número de Lewis del oxidante	Le_f, Le_0
Número de Lewis efectivo	Le_{eff}
Inestabilidad de Darrieus-Landau	ω_{dl}
Número de Prandtl	Pr
Número de Markstein	Ma
Número de Karlovitz	Ka

1 INTRODUCCIÓN

“El Gobierno prohibirá la matriculación y venta de coches de combustión a partir de 2040” (Miranda, 2018) es uno de los titulares más recientes que se han podido encontrar en numerosos periódicos y diarios y, probablemente, han tenido un gran impacto en la venta de vehículos provistos de motores de combustión interna alternativos, sobre todo que empleen diésel y gasolina. Pero la pregunta que se puede plantear es, ¿realmente es necesario exterminar, de forma general, todos los motores de combustión o podemos confiar en las investigaciones y empezar a desarrollar motores de combustión con combustibles alternativos a los convencionales que reduzcan o supriman las emisiones de gases contaminantes?

Según datos de la Unión Europea, ésta deberá haber reducido, para 2050, sus emisiones de gases de efecto invernadero en un 80% en relación a los niveles de 1990 (Comisión Europea, 2018). Una de sus medidas, totalmente opuesta a lo expresado en el titular anterior, es concentrar los avances en motores de gasolina y diésel, ya que todavía pueden ser más eficientes en el consumo de combustible. Además, también se centrará en reducir las emisiones de los vehículos “enchufables” y emplear cada vez más los biocombustibles en aviación y transporte por carretera: **“No todos los vehículos pesados del futuro serán eléctricos”**.

A raíz de esta cuestión se expone el presente proyecto, el cual versa sobre la caracterización de la combustión para mezclas de hidrógeno-metano-aire, dos combustibles que son objeto de numerosas investigaciones en todo el mundo. Esto es principalmente debido a su particularidad de poder reducir o eliminar las emisiones contaminantes resultantes del proceso de combustión.

Este proyecto surge como ampliación de una beca de colaboración del Consejo Social de la Universidad de Valladolid concedida durante el curso 2017-2018 en el Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica, Laboratorio de Motores y Máquinas Térmicas, centrada en conocer la teoría del proceso de combustión, la metodología y experimentar con una bomba de combustión cilíndrica para caracterizar el proceso de combustión de distintos combustibles. De esta forma ha sido posible desarrollar una ardua tarea de investigación y aportar un poco más de conocimiento sobre el tema del proyecto.

Variando el dosado, la temperatura, la presión y el porcentaje de hidrógeno en la mezcla, ha sido posible obtener resultados y conclusiones que pueden contestar a la pregunta propuesta anteriormente. A lo largo de estas páginas se explicará el objetivo del proyecto y su justificación, el alcance, el estado actual del arte y la metodología empleada, así como los resultados obtenidos de la experimentación. Para finalizar se presentarán las conclusiones extraídas del estudio y el posible trabajo que sería interesante continuar en un futuro.

1.1 Antecedentes y justificación del TFM

La contaminación atmosférica sigue siendo uno de los principales escollos a los que se enfrenta la salud pública. A pesar de todo lo realizado para controlar y reducir las emisiones nocivas, aún queda mucho por hacer para alcanzar los valores recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS).¹ (Boldo & Querol, 2014)

El proyecto presentado forma parte de una importante línea de investigación que se desarrolla en el Grupo de Investigación Motores y Energías Renovables (GIR MYER) de la Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid, la cual analiza el comportamiento de combustibles alternativos a

¹ “Según la OMS, en 2012 se produjeron 3.7 millones de muertes prematuras atribuibles a la contaminación atmosférica en todo el mundo. Dependiendo de la ciudad, los medios de transporte suponen entre un 15% y un 70% de la contaminación atmosférica en zonas urbanas. La principal fuente de partículas finas (PM2.5) en los ambientes urbanos de la UE proviene de los vehículos, siendo los que emplean diésel de los que se ha demostrado su capacidad carcinógena” (de las Casas Cámara, 2015)

los convencionales² en motores térmicos. Además, estudia la modificación y regulación de dichos motores para adaptarlos a estos combustibles.³

1.1.1 Antecedentes

Los primeros proyectos realizados en este ámbito, dentro de la universidad, hacen referencia a bombas de combustión esféricas con pequeño acceso óptico, por lo que no se podía ver con claridad lo que ocurría en su interior durante la combustión.

La continua investigación en este aspecto ha llevado a la construcción de una bomba de combustión cilíndrica con acceso óptico, por lo que, además de registrar la presión y el tiempo durante la combustión (mediante un captador piezoeléctrico y haciendo uso de un osciloscopio), también es posible realizar un análisis óptico gracias a la instalación de una cámara de alta velocidad que emplea la técnica *Schlieren* para obtener pruebas gráficas de la combustión. (Esta terminología se explicará con más detalle en capítulos posteriores).

En el laboratorio se han llevado a cabo investigaciones muy diversas para analizar y caracterizar la combustión de diferentes mezclas, por ejemplo: combustiones de n-heptano y tolueno (F. V. Tinaut, 2012) o metano-aire e hidrógeno-aire (Reyes, Tinaut, Horrillo & Lafuente, 2018). Además, también se ha publicado un artículo acerca de combustiones de biomasa para producir gas en una bomba de combustión de volumen constante (F. V. Tinaut, Melgar, Giménez & Reyes, 2010) y se ha determinado una predicción del comportamiento y emisiones de un motor con gas natural e hidrógeno (F. V. Tinaut, Melgar, Giménez, & Reyes, 2011).

Pero son muchas las universidades y centros de investigación que están investigando en este ámbito, algunos de ellos se mencionan en el epígrafe “*Estado del arte*”.

1.1.2 Justificación

Como se ha expuesto anteriormente, la contaminación atmosférica sigue siendo uno de los principales problemas de la sociedad. A raíz de ello, en las últimas décadas, se han propuesto numerosas alternativas para los motores de combustión interna buscando un fin común de conseguir un uso de la energía más limpia y eficiente. Destacan las pilas de hidrógeno, las baterías eléctricas, los motores de combustión externa o los biocombustibles, entre otros. Aun así, ninguna de ellas ha conseguido desbancar a los motores convencionales, sobre todo cuando se habla de transporte pesado y largas distancias, donde los términos híbrido y eléctrico no ofrecen ningún beneficio. (Yan, Xu & Wang, 2018)

Pero, ¿qué pasaría con estas alternativas si, en vez de buscar los mismos beneficios que los combustibles convencionales, sacrificamos alguno de ellos? Esto se contempla en numerosas líneas de investigación, que buscan reducir las emisiones de gases contaminantes, mejorando el consumo de combustible y el funcionamiento del motor. (F. V. Tinaut et al., 2011)

En este proyecto se presenta una de las alternativas para estos combustibles: el gas natural (principalmente compuesto por metano). Gracias a su alta disponibilidad y bajas emisiones, es compatible con las dos formas de combustión interna alternativas (MEP y MEC). Por esta razón, el gas natural ya está siendo utilizado en cuantiosas aplicaciones dentro del sector transporte.

Por otro lado, numerosos estudios (Genovese, Contrisciani, Ortenzi, & Cazzola, 2011), (Mathai, Malhotra, Subramanian, & Das, 2012), (Mariani, Prati, Unich, & Morrone, 2013) también han revelado que **el hidrógeno puede aportar una gran ventaja a la hora de ahorrar combustible**⁴ si se añade junto al

² Derivados del petróleo: gasolina, diésel o combustible de aviación.

³ El estudio que se presenta se ha limitado íntegramente a la primera parte.

⁴ Mariani et al. observaron una reducción del consumo de combustible del 6% respecto a los combustibles convencionales en términos de MJ/km para un vehículo de pasajeros de HCNG en ciclo NEDC.

gas natural (HCNG⁵), por lo que, al reducir el consumo, se reducen de forma proporcional las emisiones de CO₂. Una de las explicaciones propuestas por los autores mencionados es el aumento del calor liberado dentro del cilindro al añadir hidrógeno, lo que hace el ciclo del motor más semejante al ciclo Otto e incrementa la eficiencia térmica.

En conclusión, ¿por qué desterrar los combustibles convencionales y emplear HCNG? En primer lugar, porque los combustibles convencionales no son permanentes ni ilimitados, algún día se agotarán. Además, tras la combustión producen gases contaminantes como CO, NOX y HC⁶. Por otro lado, tanto el hidrógeno como el gas natural son fuentes limpias de energía, abundantes y fáciles de obtener (Mehra, Duan, Juknelevičius, Ma, & Li, 2017). Ambos tienen características en común: se pueden almacenar como gases comprimidos o como líquidos criogénicos. Además, la mayor parte de los componentes necesarios para trabajar con gas natural (compresores, depósitos y colectores) (Yang, Zhang, Wang, Wang, & Zhang, 2018) son análogos a los necesarios para el hidrógeno. De esta forma, la respuesta a la pregunta anterior está, en cierto modo, resuelta.

1.2 **Objetivos**

Este trabajo fin de máster ha sido diseñado con el principal objetivo de investigar y caracterizar los procesos de combustión para mezclas de hidrógeno y metano en condiciones de celularidad.

Para ello, se pretenden alcanzar los siguientes objetivos:

- Caracterizar el comportamiento de dos combustibles *alternativos* y sus mezclas en una bomba de combustión a volumen constante y con acceso óptico, a través de la determinación de la velocidad de combustión (además de otros parámetros).
- Realizar un estudio de la morfología de las llamas e inestabilidades producidas durante dichos procesos, partiendo de la información obtenida mediante la técnica Schlieren.

Un amplio proceso de aprendizaje es necesario para conocer el funcionamiento de las instalaciones (bomba de combustión cilíndrica, modelos de diagnóstico y ecuaciones e hipótesis empleadas), así como el estado del arte actual, las leyes que rigen los procesos y el trabajo propuesto por otros investigadores.

Para cumplir este objetivo, en la elaboración de este proyecto se realiza una caracterización de la combustión y sus principales parámetros para cada uno de los ensayos realizados, los cuales se comentarán a lo largo de esta memoria. De esta forma, es posible establecer una comparación entre las diferentes mezclas empleadas y obtener conclusiones que podrían ser útiles a la hora de emplear dichas composiciones en aplicaciones reales, así como para futuras instalaciones similares.

Uno de los objetivos del presente trabajo es el estudio de las distintas metodologías empleadas anteriormente en el laboratorio para caracterizar la combustión: un método óptico basado en el avance del radio respecto al tiempo (técnica Schlieren) y un método de registro de presión respecto al tiempo. En lo que a este proyecto respecta, se ha decidido emplear el método óptico para así poder llevarlo un paso más allá del resto de investigaciones realizadas en el grupo de investigación y obtener parámetros de la combustión que, anteriormente, solo se obtenían con el método de la presión.

Además, es importante destacar que también ha sido necesario establecer las condiciones de los experimentos realizados. Éstos son derivados de la literatura, para poder comprobar y corroborar las hipótesis de otros autores y encontrar nuevas conclusiones. Para ello, se ha decidido variar el porcentaje de mezcla, el dosado, la temperatura y la presión según valores recomendados, obteniendo un total de 55 experimentos a analizar.

⁵ Gas natural comprimido con hidrógeno.

⁶ Tras la combustión de derivados del petróleo, en condiciones ideales, las principales emisiones son CO₂, H₂O y N₂, pero en condiciones reales de funcionamiento del motor, los principales contaminantes son CO, NOX y HC.

1.3 Alcance y desarrollo del TFM

Este trabajo fin de máster ha sido desarrollado en el laboratorio de Motores y Máquinas Térmicas del departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica de la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Valladolid.

La instalación empleada ha sido una bomba de combustión cilíndrica con acceso óptico y registro de presión, por lo que se han empleado resultados provenientes de ambos caminos.

El alcance está limitado al estudio y análisis de los principales parámetros que intervienen en la combustión para mezclas de hidrógeno-metano-aire: presión instantánea, fracción de masa quemada, estudio de la evolución del radio y morfología de la llama, velocidad de combustión y velocidad laminar obtenidas por los dos caminos comentados, tasa de stretch y aproximación del número de Lewis.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En el capítulo anterior se ha explicado de forma muy liviana el tema del proyecto, así como su objetivo y su alcance. En las próximas páginas se mostrará, de forma más detallada, por qué se ha decidido trabajar con los combustibles seleccionados, realizando un estudio de los trabajos previos realizados con dichos combustibles, describiendo también el proceso de combustión y los parámetros que caracterizan dicho proceso.

2.1 Estado del arte

Como se ha expuesto anteriormente, la Unión Europea busca utilizar los combustibles alternativos cada vez más en motores para transporte por carretera. Este proyecto se ha dedicado únicamente a abordar las mezclas HCNG, pero ¿han sido éstas investigadas lo suficiente como para poder introducir las en motores de combustión?

Los primeros estudios realizados datan de los años ochenta y, hoy, existe una amplia documentación acerca de este “nuevo” tipo de combustible. Numerosos experimentos muestran que al enriquecer metano (principal componente del gas natural) con hidrógeno se puede extender el rango de operación del motor con dosados pobres y disminuir la duración de la combustión, pero, en contra, se produce un aumento de las emisiones NOX. (Ma et al., 2007)

Nagalingam et al. (Nagalingam, Duebel, & Schmillen, 1983) realizaron experimentos con varias mezclas HCNG con distintos porcentajes de hidrógeno y estudiaron el funcionamiento del motor y las emisiones características. Por otro lado, Sagar et al. (Sagar & Agarwal, 2017) crearon un prototipo de motor usando mezclas de HCNG variando su composición para realizar un análisis de la combustión bajo distintas condiciones de operación. Demostraron así, que este combustible permite mejorar el funcionamiento del motor y la combustión. A pesar de esto, enriquecer con mucho hidrógeno puede aumentar también la tendencia a la autoinflamación.

Fukuda et al. (Fukuda M, Korematsu K, 1981) estudiaron experimentalmente la influencia de la fracción de hidrógeno en la distancia de apagado de la llama a la pared para mezclas de hidrógeno y metano, lo que se conoce con el término anglosajón “*Quenching Distance*” (distancia de apagado de la llama a la pared).

Herzler et al. (Herzler & Naumann, 2009) investigaron el proceso de combustión y mostraron que éste se aceleraba al incrementar el porcentaje de hidrógeno sobre mezclas de gas natural en un rango de 900-1800 K y 14-16 bar.

Sarli et al. (Di Sarli & Benedetto, 2007) dividieron el rango de porcentaje de hidrógeno en tres regímenes, basado en el grado en el que el porcentaje de hidrógeno afecta a la velocidad de combustión laminar: combustión dominada por el metano, régimen de transición y combustión dominada por el hidrógeno. Este aspecto también ha sido estudiado por Tadveer et al. (Hora & Agarwal, 2015) variando el contenido de hidrógeno para mezclas HCNG en un motor de velocidad constante (1500 rpm). Zareei et al. (Zareei, Rohani, & Wan Mahmood, 2018) demostraron con sus experimentos que la máxima potencia del motor se obtiene con una mezcla de HCNG al 5%.

El punto común para todas las investigaciones es la capacidad del hidrógeno para disminuir las emisiones de hidrocarburos sin quemar, provocando una mejora en la estabilidad de la combustión, pero con el problema de aumento de emisiones NOX (Collier k, Hoekstra RL, Muligan N, 1996). A pesar de esto, la mezcla de combustibles que aquí se presenta sigue siendo el punto clave para futuras aplicaciones, tanto es así que Frank Lynch del Hydrogen Components Inc. USA (Mehra et al., 2017) patentó el HYTANO, una mezcla compuesta por un 85% de gas natural y un 15% de hidrógeno.

En los últimos 15 años, el catedrático Ma Fanhua y su grupo de investigación (Universidad de Tsinghua, Beijing) han realizado importantes contribuciones en la investigación de motores de HCNG. Entre ellos es interesante un estudio de un autobús de HCNG con un aumento de la eficiencia térmica y la posibilidad

de reducción de emisiones NOX mediante el exceso de aire en la admisión y el avance al encendido. (Ma et al., 2007)

Cabe destacar, que el hidrógeno no solo se ha experimentado con metano. Por ejemplo, existen investigaciones acerca de gasolina enriquecida con hidrógeno para motores monocilíndricos de encendido provocado. (KS., 1981)

Hallazgos como éstos son los que ayudarán a cumplir el objetivo de la Unión Europea para 2050 de mejorar la eficiencia y el consumo de los motores de combustión tradicionales.

2.2 Combustibles

2.2.1 Combustibles convencionales

En el epígrafe anterior, uno ha podido percatarse que la experimentación con mezclas de metano e hidrógeno ha sido bastante explotada desde diferentes puntos de vista, pero, por el contrario, no ha acabado de cuajar en aplicaciones reales, donde los combustibles convencionales (gasolina y diésel) siguen monopolizando el mercado.

¿Cuál es el verdadero problema de los combustibles fósiles? Tanto la gasolina como el gasóleo son recursos que se están agotando. No es que la crisis de producción petrolífera fuese un conocimiento oculto o imprevisible; ya en 1971 el geofísico King Hubbert, publicó en Scientific American una proyección en ese sentido, y poco después, la primera gran crisis petrolera, provocada por la guerra del Yon Kipur en 1973, facilitó su posterior difusión en España cinco años después. (Ballenilla García de Gamarra, 2005)

“Cuando no resulta fácil predecirlo con precisión, en la comunidad científica, geológica y petrolera se está alcanzando un consenso que sitúa el punto de máxima producción mundial a finales de esta década, o a mediados de la siguiente. Los más optimistas, en general economistas, creen que puede alargarse algo más, quizá otra década, por la explotación de yacimientos atípicos que el alza de precios puede convertir en rentables.

Tengan razón unos u otros, lo cierto es que éste es un horizonte lo suficientemente próximo como para que nos afecte directamente, si no a nosotros, a nuestros hijos. Y también que, aún en el mejor de los supuestos – que la extracción de petróleos pesados de las arenas bituminosas de Venezuela o Canadá, de las regiones polares o de las profundidades marinas permitiera mantener una producción en aumento-, la tendencia al alza de los precios es inevitable por sus mayores costes de producción”

(Coderch, 2004)

Como bien expresa Coderch con sus palabras, el fin de los combustibles fósiles se acerca a pasos agigantados y es nuestro deber alcanzar una maduración tecnológica alternativa lo bastante importante como para poder sustituirlos o mejorarlos de una vez por todas y crear una economía mundial sostenible, devolviéndole la salud a la biosfera. Todo esto puede observarse en la **figura 1** que representa con claridad la evolución de la producción de petróleo hacia el agotamiento. (Zareei et al., 2018)

OIL AND GAS LIQUIDS 2004 Scenario

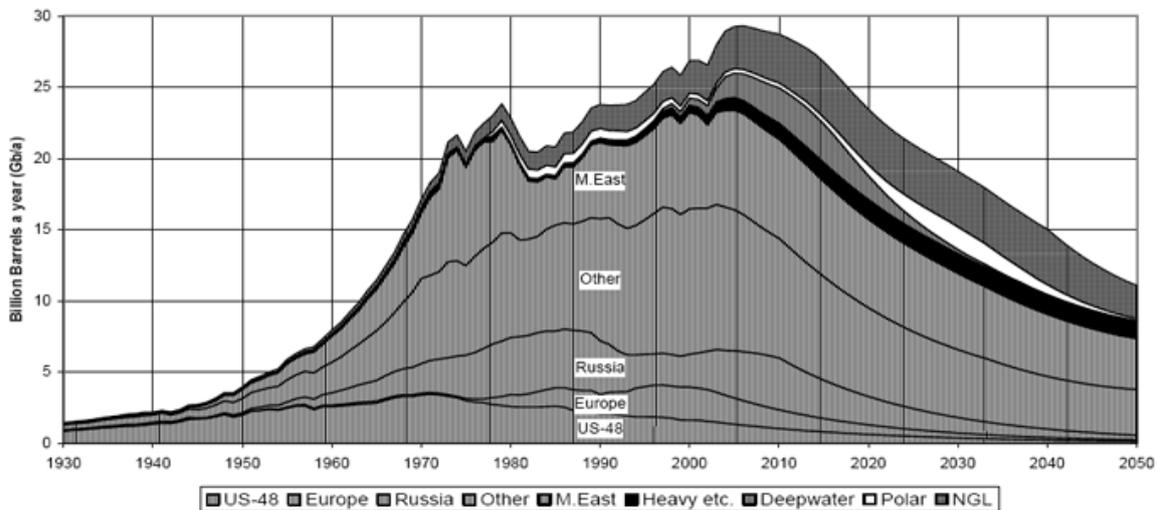


Fig 1. Evolución de la producción de petróleo hacia el agotamiento. Fuente: Boletín de ASPO, diciembre 2004

El principal problema reside, quizás, en la naturaleza humana: si ésta es tal y como indicaban los antiguos filósofos ilustrados, probablemente estemos condenados, ya que en nuestra esencia biológica somos agentes autónomos, egoístas y materialistas. ¿Podremos alcanzar la conciencia biosférica y proponer soluciones a tiempo de evitar el derrumbe planetario? (Rifkin, 2010)

2.2.2 Gas Natural

Los combustibles convencionales suponen un retraso tecnológico en el sector de la automoción, por lo que es necesario emplear nuevos combustibles y/o tecnologías más limpias, baratas y eficientes. Una de las soluciones propuestas es el gas natural que, debido a las grandes reservas disponibles, se está investigando cada vez más en motores de encendido provocado y motores de encendido por compresión. (Espinoza, 2007)

Para poder comprender mejor las características de este combustible es necesario conocer en primer lugar su origen. El gas natural comprimido surge de someter al gas natural (constituido en su mayor parte por metano⁷) bajo elevadas presiones. Por otro lado, también se conoce el gas natural licuado (GNL), el cual está considerado como el combustible de, aproximadamente, el 14% de vehículos pesados de larga distancia en 2035 según investigadores de la Universidad de California (Yang et al., 2018).

Algunos autores usan metano asimilándolo al gas natural, al igual que se ha realizado en el presente proyecto, ya que es su principal componente. Éste tiene la mayor proporción de hidrógeno-carbono de todos los hidrocarburos, lo que significa una ventaja de obtener unas menores emisiones específicas de CO₂, hidrocarburos sin quemar y CO. Esta característica es algo que inquieta a los investigadores, por lo que numerosos estudios han demostrado que, cambiando gasolina por gas natural, las emisiones de CO e hidrocarburos sin quemar pueden reducirse en un 30-35% y 20-30% respectivamente. Además, el gas natural tiene un mayor índice anti-detonación⁸, lo que hace posible obtener mayores ratios de compresión y, por tanto, una mayor eficiencia térmica que la gasolina y una condición “anti-knocking” muy interesante (Yan et al., 2018), (Reyes, Tinaut, Melgar, & Pérez, 2016).

⁷ El gas natural está considerado una alternativa posible a los combustibles convencionales debido a su elevado octanaje y propiedades. Éste está constituido por metano (CH₄) principalmente entre un 80% y un 99%.

⁸ Número de octano 120-130, que permite un gran potencial anti-inflamación y trabajar con ratios de compresión mayores. (Mayo Monge, 2015)

Este combustible no sufre evaporación, se mezcla completamente con el aire, por lo que hay menos zonas de dosado rico en el interior de la cámara de combustión y, por tanto, menos emisiones de CO.

El metano tiene algunas características que lo hacen más adecuado que otros combustibles gaseosos. La velocidad de combustión para mezclas estequiométricas de metano-aire en condiciones ambientales es relativamente alta (0.36 m/s), lo que implica que los efectos de flotabilidad debido a cambios de densidad son menos importantes y pueden ser despreciables. (Reyes et al., 2018)

A pesar de todas las ventajas propuestas, tiene una velocidad de combustión baja, si lo comparamos con combustibles líquidos, pero puede solucionarse mezclándolo con combustibles con una elevada velocidad de combustión como el hidrógeno (F. V. Tinaut et al., 2011). Además, si se trabaja en condiciones estequiométricas, la elevada temperatura de la llama puede derivar en elevadas emisiones NOX, por lo que es necesario un catalizador de tres vías⁹ para alcanzar los límites, cada vez más exigentes, que impone la normativa. (Yan et al., 2018)

Acerca de los vehículos de gas natural, la literatura se ha centrado mayoritariamente en vehículos ligeros de pasajeros. Éstos han sido exitosos en países como China, Irán, Pakistán, India, Argentina y Brasil. Kubi et al. (Kuby et al., 2009) demostraron en su estudio que los vehículos de gas natural comprimido (GNC) son más atractivos para aplicaciones comerciales incluyendo flotas de vehículos comerciales, que para vehículos de pasajeros.

En la **tabla 1** se describe la composición y principales características del gas natural, donde se puede observar que el metano es su principal componente (80-90%).

Tabla 1. Composición y características principales del gas natural.

<i>Metano (CH₄)</i>	91.332 %
<i>Etano (C₂H₆)</i>	5.363 %
<i>Propano (C₃H₈)</i>	2.136 %
<i>Iso-Butano (i-C₄H₁₀)</i>	0.459 %
<i>Normal-Butano (n-C₄H₁₀)</i>	0.476 %
<i>Iso-Pentano (i-C₅H₁₂)</i>	0.015 %
<i>Normal-Pentano (n-C₅H₁₂)</i>	0.002 %
<i>Nitrógeno (N₂)</i>	0.217 %
<i>Higher heating value</i>	43.54 MJ/Nm ³
<i>Lower heating value</i>	39.33 MJ/Nm ³
<i>Specific gravity</i>	0.6169
<i>Gas density</i>	0.7976 kg/Nm ³

2.2.3 Hidrógeno

Los motores alimentados con hidrógeno están considerados como los “salvadores del planeta en un futuro cero-emisiones” (S. Verhelst, C. T’Joen, J. Vancoillie, J. Demuyne, 2011). En epígrafes anteriores se han comentado algunas de las características principales del gas natural, pero ¿por qué enriquecer este combustible con hidrógeno?

⁹ El catalizador de 3 vías convierte tres contaminantes en gases menos nocivos: monóxido de carbono (CO) mediante oxidación, hidrocarburos (HC) mediante oxidación y óxidos de nitrógeno, mediante reducción (proceso contrario a la oxidación). (Automoción, 2016)

La respuesta es sencilla: el hidrógeno tiene una velocidad de combustión laminar siete veces mayor que el gas natural, lo que permite extender los límites de dosado en la combustión. (Yan et al., 2018)

El hidrógeno es un gas incoloro, inodoro, sin sabor y no venenoso en condiciones normales en la tierra. Existe típicamente como una molécula diatómica y es el elemento más abundante del universo, ocupando un 90% del peso total. A pesar de esto, no es posible encontrarlo en su forma pura (Zohra, Mounir, & Salah, 2017). Es una fuente limpia y renovable de energía, pero también conlleva una serie de inconvenientes: el único producto perjudicial de la combustión son los óxidos de nitrógeno (NOX). Además, existen dificultades en cuanto a su producción, almacenamiento, infraestructuras para repostaje y combustión anormal.

Una comparación entre metano e hidrógeno muestra que, aunque el menor valor de calor¹⁰ del hidrógeno es solo un tercio del de metano, el hidrógeno necesita un 50% menos de aire para una combustión completa. Además, el hidrógeno tiene un rango de inflamabilidad mucho mayor que el metano.

La mínima energía requerida para la ignición del hidrógeno es aproximadamente un orden de magnitud menor que la requerida por la gasolina. Esto permite a los motores de hidrógeno trabajar bien en condiciones pobres y asegurando una rápida combustión. Además, la distancia de apagado de la llama a la pared es menor, por lo que ésta puede acercarse más a la pared antes de extinguirse. Desafortunadamente, toda ventaja conlleva su inconveniente: gases calientes y punto calientes en el cilindro pueden actuar como fuentes de encendido, creando problemas de autoencendido. (Zohra et al., 2017)

Hasta el momento se han mostrado ventajas e inconvenientes del combustible, pero ¿Cuáles son las características que lo hacen tan interesante para los investigadores? A continuación, se presentan las más destacadas: (Mayo Monge, 2015)

- ❖ Reduce emisiones, sobre todo el CO₂ emitido (con excepción de NOX)
- ❖ Es el elemento más abundante del universo, pero debe ser producido utilizando otras fuentes de energía (se comentarán en párrafos posteriores)
- ❖ Es un potenciador de la combustión, se utiliza como agente activador en mezclas
- ❖ Tiene baja sensibilidad a la turbulencia
- ❖ Tiene alta velocidad de llama laminar
- ❖ Tiene baja densidad
- ❖ Tiene alto rango de inflamabilidad
- ❖ Requiere una baja energía para la bujía
- ❖ La combustión de hidrógeno es estable
- ❖ Tiene una mayor velocidad de propagación del frente de llama
- ❖ Permite una mayor cantidad de calor liberado por unidad de masa
- ❖ Tiene una pequeña distancia de apagado, interesante para reducir emisiones de hidrocarburos sin quemar cerca de la pared y en grietas
- ❖ Tiene mayor probabilidad de autoinflamación
- ❖ Tiene una mayor conductividad térmica que el gas natural, lo que puede aumentar la transferencia de calor al refrigerante en combustión

Para finalizar, es interesante comentar la producción de este combustible, ya que puede realizarse a partir de una gran variedad de fuentes primarias, a partir de procesos termoquímicos de los hidrocarburos

¹⁰ LHV: Lower Heating Value

(como gas natural o biomasa) o a partir de la electrólisis del agua usando alguna fuente de electricidad incluyendo alternativas renovables como la eólica, solar o nuclear. Aunque cabe destacar que, actualmente, la mayor parte de hidrógeno se produce comercialmente a partir de combustibles fósiles (gas natural principalmente).

Uno de los principales problemas en la logística del hidrógeno combinado con gas natural es que puede degradar y fragilizar materiales comúnmente usados para almacenar y transportar gas natural, por lo que requiere el uso de materiales diferentes y más caros (aceros inoxidable forrados de polímero). Además, las diferentes propiedades físicas del hidrógeno y el gas natural requieren diferentes diseños de compresores. (Yang et al., 2018)

En la **tabla 2** se muestran algunas de las propiedades del hidrógeno en comparación con el metano y la gasolina.

Tabla 2. Propiedades del hidrógeno comparado con el metano y la gasolina. (F. V. Tinaut et al., 2011)

FUEL	H ₂	Metano	Gasolina
Fórmula Química	H ₂	CH ₄	C _n H _{1.87n}
Peso molecular	2.02	16.04	114.24
Menor dosado equivalente para ignición en aire en c.n. ¹¹	0.1	0.53	0.70
Límites de inflamabilidad en aire en c.n. (%vol.)	4-75	5-15	1.4-7.6
Mínima energía para ignición en aire (MJ)	0.02	0.29	0.28
Densidad en c.s. ¹² . (kg/m ³)	0.0837	0.6511	750
Difusividad en aire (cm ² /s)	0.63	0.2	0.07
Número de octano	140	120	87
Velocidad de combustión laminar (m/s)	2.9	0.38	0.45
Velocidad de propagación laminar en aire en c.n. (cm/s)	265-325	37-45	37-43
"Quenching distance": Distancia de apagado de la llama a la pared en aire en c.n. (cm)	0.63	0.21	0.2

2.2.4 HCNG (Hydrogen Compressed Natural Gas)

En epígrafes anteriores se ha aportado información tanto del gas natural como del hidrógeno, así como las ventajas que aportan a la hora de su uso en motores de combustión. Pero ¿qué pasa si se combinan ambos combustibles?

¹¹ C.n. denota condiciones normales de presión y temperatura del aire: P=1atm y T=293.15 K

¹² C.s. denota condiciones standard de presión y temperatura del aire: P=1 bar y T=0°C

Enriquecer gas natural con hidrógeno puede extender el rango de operación con dosados pobres, mejorar la habilidad del motor para trabajar con combustión pobre y disminuir la duración de la combustión. (Ma et al., 2007)

Los motores de encendido provocado alimentados con HCNG muestran una serie de ventajas sobre los tradicionales motores de gasolina, hablando en términos de eficiencia energética del combustible y emisiones contaminantes. La fracción de hidrógeno es determinante sobre la eficiencia térmica y las emisiones características. En general, aumentando el porcentaje de hidrógeno se obtiene un aumento de la temperatura en el interior del cilindro y una disminución de la duración de la combustión. Esto contribuye a una combustión más completa, una mejora de la eficiencia térmica y menos emisiones de hidrocarburos sin quemar, así como emisiones de monóxido de carbono (CO). Como desventaja, un elevado porcentaje de hidrógeno puede desembocar en elevadas emisiones NOX. (Yan et al., 2018)

Los experimentos realizados con mezclas de gas natural e hidrógeno datan de los años 80, donde ya se estudiaba el funcionamiento del motor y las emisiones características con este tipo de combustible a diferentes porcentajes de hidrógeno. Los resultados mostraban que el funcionamiento del motor con HCNG se encontraba entre el funcionamiento como motor de gas natural puro y de hidrógeno puro, dependiendo de la fracción de este último en la mezcla. (Nagalingam et al., 1983)

La velocidad de combustión laminar es un parámetro importante del combustible y tiene profundas implicaciones en el proceso de propagación de la llama. Estudios numéricos y experimentales muestran que la velocidad de combustión laminar para mezclas HCNG tiende a incrementarse de forma no lineal con el aumento de la fracción de hidrógeno¹³. En general, existen dos regímenes que se pueden identificar según esta fracción: para porcentajes inferiores al 60% se observa un incremento lineal y pequeño en la velocidad de combustión laminar. Para porcentajes entre 60-80%, esta velocidad laminar crece exponencialmente. (Yan et al., 2018)

Sarli et al. dividieron el rango de fracción de hidrógeno (0%-100%) en tres regímenes, basado en el grado en el que el porcentaje de hidrógeno afecta a la velocidad de combustión laminar (Hu, Huang, He, Jin, & Zheng, 2009):

- Combustión dominada por metano (0%-50/60%) con pequeños incrementos de la velocidad laminar (aumenta linealmente con la fracción de hidrógeno)
- Régimen de transición (50/60%-80/90%) donde la velocidad de combustión disminuye exponencialmente con el aumento de la fracción de hidrógeno.
- Combustión dominada por el hidrógeno (80/90%-100%) gran incremento de la velocidad laminar, lineal con la fracción de hidrógeno

En este proyecto se buscará también una clasificación de la combustión en función del porcentaje de hidrógeno para los experimentos realizados en la bomba de combustión cilíndrica.

Debido a su naturaleza gaseosa, el hidrógeno y el metano tienen menores densidades en mezclas estequiométricas, y, por tanto, ocupan más espacio en el colector de admisión, lo que puede derivar en una menor admisión de aire y una menor eficiencia volumétrica. (Yan et al., 2018)

Como se ha comentado en el epígrafe anterior, al añadir hidrógeno en gas natural y, dependiendo de la fracción, hay una influencia clara en la distancia de apagado de la llama a la pared. Fukuda et al. (Fukuda M, Korematsu K, 1981) estudiaron experimentalmente este aspecto para mezclas HCNG. En sus estudios definieron la conocida "Quenching Distance" como la mínima distancia entre dos planos paralelos bajo la cual no hay propagación de la llama y se apaga. Al aumentar el porcentaje de hidrógeno, esta distancia decrece notablemente. En condiciones estequiométricas, se obtiene la mínima distancia

¹³ Aumentar el porcentaje de hidrógeno de 0% a 20% muestra un incremento de la velocidad laminar de 0.37 a 0.44 m/s, mientras que aumentar el porcentaje de hidrógeno de 80% a 100% produce un salto acerca de 1 m/s. (Yan et al., 2018)

de apagado de la llama, debido a que, bajo estas condiciones, las relaciones de la combustión son más exotérmicas.

Como curiosidad adicional, la mínima energía necesaria en la bujía para un combustible gaseoso para conseguir una combustión correcta con hidrógeno (0.02 MJ) es menor que con metano (0.28 MJ). Por lo general, este parámetro también decrece con el incremento de porcentaje de hidrógeno (Yan et al., 2018).

2.3 *El proceso de la combustión*

En el epígrafe anterior se han explicado algunas de las características principales de los combustibles afectados por este proyecto. A continuación, se explicará, brevemente, el proceso de la combustión y sus parámetros principales.

El motor de combustión interna alternativo es un motor endotérmico basado en el mecanismo pistón-biela-manivela, conocido como “tren alternativo” (Riesco-Ávila, J.M., Gallegos-Muñoz, A., Montefort-Sánchez & Martínez-Martínez, 2005). Éste funciona a partir del volumen variable que se genera en el recinto de combustión por el movimiento de un pistón guiado en el bloque motor y que ésta unido a la biela, articulada al cigüeñal, transformando un movimiento lineal alternativo en un movimiento rotativo, necesario para el movimiento del vehículo.

Su funcionamiento se puede dividir en dos fases: una fase cerrada (compresión-combustión-expansión) y una fase abierta (renovación de la carga y evacuación de los productos de la combustión). El funcionamiento de estos motores está caracterizado por la temperatura máxima y mínima entre las que opera el fluido motor, así como la velocidad con la que es capaz de realizar el ciclo (Flórez, 2005). A continuación, se describe más en detalle el proceso de la combustión, así como las tipologías de motores que existen en función de cómo se realice la misma.

Una reacción de combustión es aquella que incluye un combustible y un oxidante además de una liberación de energía en forma de calor y radiación. El oxígeno del aire actúa como oxidante y los productos primarios de la combustión son el dióxido de carbono y el agua.

Uno de los principales aspectos a considerar en los procesos de combustión es lo denominado como reacción estequiométrica o teórica. Ésta es aquella que ocurre cuando la reacción es completa, es decir, todo el carbono y el hidrógeno del combustible se convierten en dióxido de carbono y agua, sin oxígeno excedente.

El proceso de la combustión permite clasificar los motores en dos grandes grupos, en función de si se produce la combustión de una mezcla homogénea de aire y combustible mediante la ignición de ésta (MEP-Motores de Encendido Provocado- Beau de Rochas y Otto-Langen) o si la combustión se produce por autoignición de una mezcla heterogénea que se va formando al inyectar el combustible sobre el aire una vez ha sido comprimido (MEC-Motores de Encendido por Compresión- Diesel).

A lo largo del tiempo, las dos concepciones de combustión se han modelizado de distinto modo. La tipología de encendido provocado se ha asimilado a una aportación instantánea de calor, bajo una isocora, al fluido motor en el conocido ciclo Otto. Por otro lado, la combustión heterogénea o por compresión es mucho más lenta y progresiva, por lo que se ha asimilado a una aportación isobara, en el ciclo Diesel. (Flórez, 2005)

Desde su aparición hace ya más de 125 años¹⁴, el motor de combustión interna alternativo ha tenido que superar una serie de problemas y exigencias a lo largo de los años. Las dos condiciones más importantes hoy en día son, como se ha comentado en epígrafes anteriores, la emisión de contaminantes y el consumo de combustible (Riesco-Ávila, J.M., Gallegos-Muñoz, A., Montefort-Sánchez & Martínez-

¹⁴ El motor de combustión interna nace a finales del siglo XIX como alternativa a las máquinas de vapor para propulsar vehículos ligeros de transporte terrestre, sustituyendo a los carruajes y, en definitiva, a la tracción animal. (Flórez, 2005)

Martínez, 2005). Una de las alternativas que se han propuesto últimamente es la de modificar los motores de encendido provocado convirtiéndolos a gas natural.

Agudelo et al. (John Ramiro Agudelo Santamaría, Jaime N Gutiérrez Ibarra, Julio César González Romero, 2002) experimentaron con un motor Toyota 4.5 litros (gasolina) que convirtieron a gas natural comprimido. En su estudio determinaron que, tanto la potencia como el par motor, experimentaban una disminución cercana al 20% cuando el motor funcionaba con gas natural. Por otro lado, consiguieron menores emisiones gaseosas, a excepción de los NOX que mostraron un ligero incremento.

Esto es debido a que el gas natural es menos que la gasolina, por lo que desplaza el aire en la admisión y, por tanto, menos aire por ciclo se induce dentro de los cilindros. La eficiencia volumétrica medida en plena admisión determina la potencia máxima que puede ser desarrollada por el motor y, por lo tanto, la reducción en la eficiencia volumétrica disminuye la potencia máxima disponible del motor. Esta pérdida de potencia es inherente con estos combustibles. El alto número de octano del gas natural es su mayor ventaja: permite incrementar la relación de compresión del motor para obtener aumentos de eficiencia y potencia. Sin embargo, las emisiones NOX aumentan con la temperatura de combustión, asociada a una mayor relación de compresión.

2.4 **Parámetros de la combustión**

2.4.1 **Parámetros obtenidos a partir del registro de la presión instantánea**

Gracias a la instalación de captadores de presión en la bomba de combustión, es posible obtener un registro de la presión instantánea en su interior. A partir de estos datos, es posible conocer la fracción de masa quemada (FMQ), que indica la relación entre la cantidad de masa que se ha transferido de la zona fresca a la zona de quemados y la velocidad de combustión laminar.

En la práctica, nunca es posible lograr una llama laminar unidimensional ideal ya que el frente de llama presenta una cierta curvatura que tiende a estirar la llama (explicado en el **epígrafe 2.4.4** como “stretch”).

Esta velocidad de combustión laminar es frecuente encontrarla en la bibliografía representada junto a la temperatura de la masa sin quemar, a partir de la cual se puede obtener, mediante el punto de corte con la temperatura inicial (aproximadamente 300K), la velocidad de combustión laminar sin tener en cuenta este estiramiento de la llama (conocida como “unstretched”, U_{l0}).

Esta velocidad de combustión laminar sin stretch (U_{l0}) se ha obtenido a partir de los dos métodos comentados en este trabajo fin de máster: por un lado, a partir de los datos obtenidos del registro de la presión instantánea en el interior de la cámara de combustión y, por otro, a partir del registro óptico de la combustión (S_{l0}).

2.4.2 **Celularidad**

En el proceso de combustión aparece un fenómeno curioso que ha estado en boca de una gran multitud de investigadores en los últimos tiempos: la celularidad.

Se denominan células a las secciones arrugadas que aparecen en el frente de llama, también conocidas como irregularidades o inestabilidades, que provocan un arrugamiento del frente de llama y turbulencia, debido principalmente al gradiente de velocidad de combustión del proceso. (Y. Liu, 1992) En otras palabras, la celularidad también puede ser explicada con un origen a partir de las inestabilidades del frente de llama. En la **figura 2** puede observarse la evolución de la combustión para una mezcla de hidrógeno-aire y cómo aparece el arrugamiento del frente de llama.

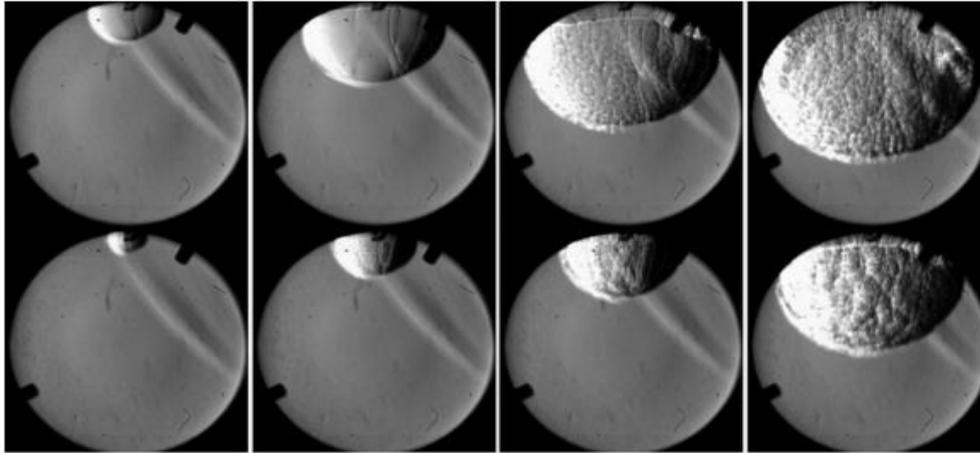


Fig 2. Fotografías Schlieren de secuencias del proceso de combustión para mezclas estequiométricas de hidrógeno-aire a 298K, 1 bar (superior) y 2 bar (inferior) al mismo tiempo tras el encendido de la mezcla: 1ms, 1.4ms, 2.5ms y 3ms. (F. Liu, Bao, Gu, & Chen, 2012)

Existen tres tipos de fenómenos que causan las inestabilidades en el frente de llama: fenómeno debido a fuerzas de volumen, el de origen hidrodinámico y el de origen térmico-difusivo. En el primer caso, se trata de una inestabilidad conocida como “Rayleigh-Taylor”, debido a la diferencia de densidades entre la masa quemada y la masa sin quemar. La segunda de las inestabilidades numeradas es la hidrodinámica, conocida como inestabilidad de “Darrieus y Landau”, debida principalmente a la expansión térmica que sufren los gases al atravesar el frente de llama. Por último, la inestabilidad de origen térmico-difusivo depende de la relación que exista entre la difusividad térmica de la mezcla y la difusividad másica del reactivo en defecto de la mezcla. (Lafuente, 2008)

La inestabilidad hidrodinámica está siempre presente: es la responsable de la rugosidad observada en el frente de llama, así como del continuo arrugamiento de este. (Matalon, 2007)

Como existencia de las inestabilidades, en determinadas condiciones, el frente de llama no es siempre liso, sino que puede adoptar una forma más o menos rugosa. El grado de rugosidad puede variar desde la simple aparición de grietas en la superficie del frente hasta el estado que se conoce como llama celular, donde la superficie del frente de llama está formada por una sucesión de células. Cabe destacar que, la velocidad de combustión de una mezcla que presenta un frente de llama celular es mayor que la que correspondería si el frente fuera liso.

En la propagación de un frente de llama esférico se ilustra con claridad la diferencia entre inestabilidades hidrodinámicas y las debidas a difusividad térmica. Además, pueden distinguirse cuatro etapas: propagación laminar estable con frente de llama liso, agrietamiento del frente de llama, propagación con frente de llama celular y régimen de propagación similar a uno turbulento.

Es importante tener en consideración que la inestabilidad resulta cuando una perturbación crece más rápidamente que el frente de llama, de lo contrario resultaría una estabilidad en el frente. Según *Moshe Matalon*, las arrugas de una corta longitud de onda crecen más rápido que las de una longitud de onda larga. Esto no es válido para longitudes de onda cortas comparables al espesor del frente, porque introduce una distorsión en la estructura del frente. (Matalon, 2007)

Muchos investigadores han medido la celularidad a partir del tamaño de las celdas que aparecen en el frente de llama, obteniendo la hipótesis de que las celdas debido a la inestabilidad hidrodinámica son mayores que las debidas a la difusividad térmica. Las inestabilidades del frente pueden causar el aumento en la velocidad del frente y, de este modo, una fuerte onda explosiva, resultando en daños considerables. (Kim, Imamura, Mogi, & Dobashi, 2017)

Además, como dice *Moshe*, la celularidad aumenta con la disminución del espesor de la llama y puede empezar cuando ésta alcanza un radio suficientemente mayor que su espesor. El radio para el cual la

inestabilidad celular empieza a aparecer es conocido como el radio de llama crítico. (Okafor, Hayakawa, Nagano, & Kitagawa, 2014)

Cambios en algunos parámetros pueden retrasar la aparición de estas arrugas en el frente de llama, pero no eliminarla por completo. La formación de celularidad tiene una relación positiva con la presión, el dosado relativo y la concentración de hidrógeno en la mezcla, pero tiene una relación negativa con la temperatura.

En concreto, analizando el dosado relativo, si éste aumenta, el espesor de la llama disminuye y aparece lo que se conoce como inestabilidad hidrodinámica. (Askari, Elia, Ferrari, & Metghalchi, 2017) El frente de llama tiende a perder estabilidad antes bajo condiciones de dosado pobre y se vuelve progresivamente más estable a medida que el dosado se acerca al estequiométrico. Sobre todo, cuando el dosado relativo es, aproximadamente, 0,2 la desestabilización es tan grande que la superficie de la llama pierde uniformidad muy cerca del inicio de la combustión. (F. Liu et al., 2012) El principal problema es tratar de conseguir un encendido adecuado para un dosado tan pobre.

Por otro lado, el aumento de la temperatura tiene un fuerte efecto retardante en la aparición de esta celularidad, sobre todo cuando se trata de llamas pobres. Una de las razones que explican esta singularidad es el refuerzo de la combustión y el aumento de la velocidad de la llama, lo que permite menos tiempo de aparición y crecimiento de las células. Cuando se trata de llamas estequiométricas, el aumento de la temperatura reduce la variación de densidad y debilita la inestabilidad hidrodinámica.

En cambio, aumentar la presión implica desestabilizar el frente de llama, haciéndolo más vulnerable a la aparición de la celularidad. Cuanto mayor sea la presión, mayor es el número de células inducidas en el frente, pero de un tamaño más pequeño. (F. Liu et al., 2012)

Los experimentos llevados a cabo para la realización de este proyecto muestran que, al añadir hidrógeno al gas natural, se produce un aumento de la velocidad de propagación, de tal forma que permitirían reducir las emisiones de CO₂ si se emplean en motores. Esto es considerado por los investigadores como una forma de mejora de los motores de gas natural de encendido provocado. (Okafor et al., 2014)

Es importante tener en cuenta que la aparición de arrugas está muy influenciada por el nivel de ruido y el denominado efecto de "aliasing", donde la respuesta del frente se ve contaminada por modos de alta frecuencia. El número de arrugas que aparecen en el frente se reduce si se elimina el efecto de aliasing.

Cuando la dimensión de la célula es lo suficientemente grande, un bajo nivel de ruido exterior provoca pequeñas perturbaciones que se magnifican rápidamente debido a la inestabilidad hidrodinámica, resultando en pequeñas arrugas del frente de llama. La aparición de arrugas provoca que el frente de llama se acelere, aumentando así su velocidad de propagación hasta que las arrugas emergen a la superficie. La velocidad de propagación de la llama se va a ver aumentada significativamente por la presencia de ruido. (Matalon, 2007)

2.4.3 Velocidad del frente de llama

La velocidad de combustión laminar de una mezcla gaseosa, combustible, premezclada y homogénea de una composición determinada, para unas condiciones iniciales de temperatura y presión, se define como la velocidad de propagación, relativa a la mezcla sin quemar, de un frente de llama unidimensional, plano, adiabático y estable. (Lafuente, 2008) En este trabajo de fin de máster se presentan dos tipos de velocidades en el frente de llama, la velocidad de propagación y la velocidad de combustión laminar.

La velocidad de propagación se obtiene derivando el radio respecto al tiempo. Puede definirse también como una tasa de crecimiento del frente de llama. (Lafuente, 2008) Como en los experimentos realizados para este proyecto se han considerado intervalos de tiempo lo suficientemente pequeños, pueden discretizarse los valores y realizar el cálculo con valores incrementales tal y como indica la ecuación 2.1:

$$S_l = \frac{\partial \text{Radio}_{real}}{\partial \text{Tiempo}} \sim \frac{\Delta \text{Radio}_{t_1 \rightarrow t_0}}{\Delta \text{Tiempo}_{t_1 \rightarrow t_0}} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

En este proyecto, se ha medido la velocidad de combustión laminar de todos los experimentos realizados con un método empleando una bomba cilíndrica de volumen constante, en el que se registra la evolución del radio del frente de llama frente al tiempo y la presión en el interior de la cámara de combustión. Gracias a estos datos, la velocidad de propagación del frente de llama (S_l) y la velocidad de combustión laminar (U_l , teniendo en cuenta el registro de la presión instantánea en el interior de la cámara de combustión) pueden obtenerse para su posterior análisis.

Tal y como se ha explicado, la velocidad de combustión laminar hace referencia a un frente de llama unidimensional, plano, adiabático y estable. Debido a la geometría esférica de la llama, esta velocidad no es realista, sino que existe una relación con la tasa de Stretch que indica la influencia de la curvatura del frente. (Lafuente, 2008)

Gracias a este método no solo es posible determinar esta velocidad, sino también tener una visualización del frente de llama y comprobar si, durante la combustión, se ha producido alguna distorsión en la geometría del frente de llama o si se ha desarrollado celularidad. Por estos motivos, este método es considerado como uno de los más completos en el estudio de la combustión laminar.

2.4.4 Tasa de Stretch (α)

Toda llama está sujeta a componentes de velocidad transversal y curvatura que “estiran” la misma. (Hoyos, 2015) La tasa de Stretch (α) hace referencia a la curvatura de la llama, de tal forma que una llama plana tiene una tasa de Stretch de 0. Ésta permite cuantificar la deformación que presenta el conjunto formado por la llama y el campo fluido en el que se propaga. Se define como la derivada lagrangiana del logaritmo del área A de un elemento diferencial de superficie del frente de llama.

Si el área del frente de llama sufre estiramiento o expansión, entonces la tasa de stretch es mayor que cero, mientras que si el frente sufre contracción o compresión es negativo.

La tasa de Stretch puede definirse según la ecuación 2.3:

$$\alpha = \frac{1}{A} \times \frac{dA}{dt} = \frac{2}{r_{real}} \times S_l \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Al someter a una llama ideal unidimensional a una cierta tasa de stretch, se origina una deformación en su estructura, cuya consecuencia es una variación en el comportamiento de la llama. De esta forma, puede definirse lo que se denomina “Unstretched Flame Speed (S_{l0})”. (Lafuente, 2008)

Para ello, es necesario representar en una gráfica los dos parámetros comentados: la velocidad de propagación (S_l) en función de la tasa de Stretch (α) y obtener la curva que mejor se aproxime a los datos. El valor de la velocidad de propagación denominada “Unstretched” es el punto de corte de esta curva con el origen de coordenadas tal como indica la **figura 3**.

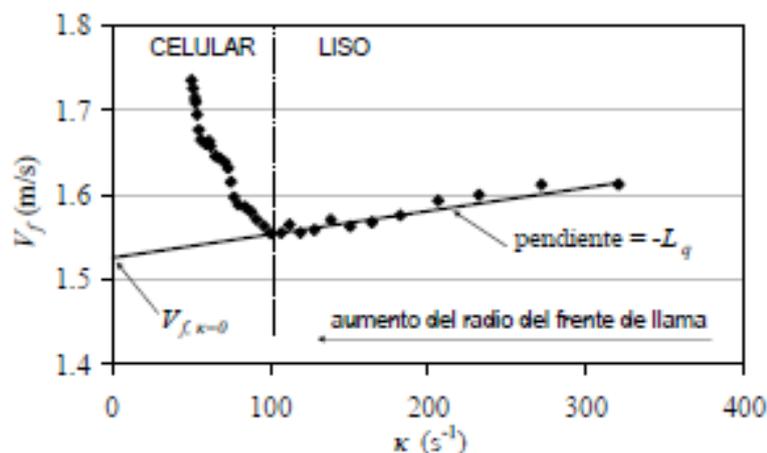


Fig 3. Medidas de velocidad de propagación del frente de llama a distintas tasas de stretch en una combustión estequiométrica de CH_4 -aire a 5 bar y 300K. Adaptada de (Lafuente, 2008)

2.4.5 Números adimensionales

En la bibliografía es frecuente encontrar la tasa de Stretch expresada de forma adimensional, dando lugar al conocido número de Karlovitz (Ka) (ec.2.2), quien introdujo el concepto de Stretch en la llama para describir el fenómeno de apagado de ciertas llamas en un flujo con fuertes gradientes de velocidad.

$$Ka = \tau_d \times \alpha \approx \frac{l_d}{Sl} \times \alpha \quad (\text{Ec.2.2})$$

Donde τ_d es el tiempo característico de la llama y α es la tasa de Stretch. Sl y l_d hacen referencia a la velocidad de propagación laminar de la llama sin Stretch y el espesor del frente de llama respectivamente (Lafuente, 2008).

Por otro lado, la longitud de Markstein (L_b) expresa la sensibilidad de la velocidad de combustión con la tasa de stretch. Ésta suele presentar valores similares al espesor del frente de llama, siendo dependiente de parámetros como la energía de activación, el coeficiente de expansión y el número de Lewis (Lafuente, 2008).

Puesto que la longitud de Markstein puede ser positiva o negativa, el stretch puede tener un carácter potenciador o retardador de la velocidad de llama frente al valor de la velocidad de llama sin stretch (Hoyos, 2015). Por lo general, para mezclas de hidrocarburos con aire, la longitud de Markstein es generalmente positiva y decrece progresivamente a medida que la mezcla varía desde dosados pobres a ricos. Cuando se trata de mezclas con combustibles ligeros (como el hidrógeno) ocurre justo lo contrario: la longitud de Markstein decrece a medida que la mezcla varía de dosados ricos a pobres, pudiendo llegar a ser negativo para mezclas lo suficientemente pobres (S., L., & G.M., 1992).

$$s_L^k = s_L^{k=0} - L \cdot \kappa \quad (\text{Ec.2.3})$$

A partir de la longitud recientemente definida, se puede obtener un número adimensional denominado número de Markstein (Ma), el cual se expresa como la relación entre la longitud de Markstein y el espesor del frente de llama. (Hoyos, 2015)

$$Ma = \frac{L}{l_D} \quad (\text{Ec.2.4})$$

También suele expresarse el producto entre los dos números comentados anteriormente: Markstein y Karlovitz. Este producto expresa el déficit en la velocidad de combustión de una llama debido al stretch en la misma (Bradley, Gaskell, & Gu, 1996).

$$\frac{s_L^{k=0} - s_L^k}{s_L^{k=0}} = Ma \cdot Ka \quad (\text{Ec.2.5})$$

Por último, es interesante comentar el número de Lewis (Le), el cual representa la relación entre la difusividad térmica, molecular y viscosa para conocer la tasa de crecimiento de la llama (Matalon, 2007). En concreto, el número de Lewis se define como el ratio entre el número de Schmidt y el de Prandtl (Bouvet, Halter, Chauveau, & Yoon, 2013).

Teóricamente, este parámetro adimensional puede definirse según como indica la ecuación 2.6.

$$Le = \frac{\alpha}{D} = \frac{\text{Difusividad térmica}}{\text{Difusividad molecular}} \quad (\text{Ec.2.6})$$

En concreto, cuando en una mezcla existen un combustible y un oxidante, existen dos números de Lewis (uno para cada uno), de tal forma que el parámetro que se emplea es una media entre ambos denominado Lewis efectivo, que depende del dosado relativo.

$$Le_F = \frac{\alpha_{mezcla}}{D_F} \quad (\text{Ec.2.7})$$

$$Le_O = \frac{\alpha_{mezcla}}{D_O} \quad (\text{Ec.2.8})$$

$$Le_{eff} = f(Pr) \quad (\text{Ec.2.9})$$

En la ecuación 2.10 se representa la fórmula que define la tasa de crecimiento de la llama, la cual depende de tres factores: la difusividad térmica, la difusividad molecular y la difusividad viscosa.

$$\text{Tasa de crecimiento} = \frac{1}{A} \times \frac{dA}{dt} = \frac{1}{R} \times \frac{dR}{dt} \times \left(\omega_{dl} - \frac{l_f}{R} [B_1 + \beta(Le_{eff-1})B_2 + Pr \times B_3] \right) \quad (\text{Ec.2.10})$$

Donde R hace referencia al radio del frente de llama, ω_{dl} a la inestabilidad de Darrieus-Landau y B1 es el coeficiente que corresponde a la difusividad térmica (con un efecto estabilizante de las inestabilidades del frente de llama y, por tanto, retardante de su crecimiento). $\beta(Le_{eff-1})B_2$ corresponde al término de la difusividad molecular, por lo que podrá tener un efecto diferente en función del número de Lewis efectivo. Por último, $Pr \times B_3$ incluye el efecto de la difusividad viscosa, presente mediante el número de Prandtl.

La difusividad molecular depende del número de Lewis y, en función del signo que adopte éste, tendrá un efecto retardante o amplificante de la tasa de crecimiento de la llama. En primer lugar, si $Le_{eff} < 1$ la difusividad molecular adquiere un símbolo positivo en la ecuación, por lo que la inestabilidad se crea al principio. Esta es una característica de las combustiones de hidrocarburos con dosados ricos o hidrógeno con dosados pobres. En segundo lugar, si $Le_{eff} > 1$, la difusividad molecular tiene un efecto negativo sobre la tasa de crecimiento, estabilizando la llama, siendo estable al principio. Es importante destacar que, para éste último caso, cuando el radio alcanza el radio crítico, la llama comienza a ser celular. Esta característica es habitual en combustiones de hidrocarburos a dosados pobres o hidrógenos a dosados ricos. (Matalon, 2007)

En este proyecto, debido a la elevada complejidad de obtener el número de Lewis, se ha optado por determinar su signo en función del análisis visual de la combustión. De todas formas, la obtención de éste índice es algo que resultaría muy interesante y educativo en el ámbito de la investigación, por lo que se ha propuesto como un posible trabajo futuro.

Otro parámetro muy importante a la hora de estudiar el inicio de la celularidad en la llama es el número adimensional de Peclet, el cual se define tal y como expresa la ecuación 2.11, donde R_{cr} es el radio crítico del frente de llama que indica el paso de laminar a celular y δ_l corresponde al espesor del frente de llama.

$$Pe_{cr} = \frac{R_{cr}}{\delta_l} \quad (\text{Ec.2.11})$$

El radio crítico del frente de llama representa el instante en el que la llama pasa de tener pequeñas arrugas debidas a perturbaciones (pero siendo laminar) a ser considerada una llama celular. Este parámetro no es fácil de obtener y no se ha visto en todas las curvas obtenidas, por lo que el cálculo de este parámetro no se ha considerado en la redacción de este trabajo. De todas formas, es importante considerarlo como un interesante trabajo futuro, calculando una forma más precisa de obtener el radio del frente de llama para poder establecer el valor de este parámetro.

3 EXPERIMENTACIÓN

3.1 Descripción de la instalación

En capítulos anteriores se realizaba un breve recorrido cultural por los distintos tipos de combustibles y parámetros de la combustión que conciernen este proyecto, así como un pequeño resumen de las principales líneas de investigación que se han abierto sobre este ámbito.

En las próximas páginas se llevará a cabo una explicación de la instalación utilizada, así como de la metodología necesaria para utilizarla y, de forma muy liviana, un poco de la formulación sobre la que versa su funcionamiento.

En primer lugar, la instalación consta de una bomba de combustión a volumen constante (BVC) cilíndrica, tal y como puede observarse en la **figura 4**. Ésta puede encontrarse en el laboratorio del Área de Máquinas y Motores Térmicos del departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica de la Universidad de Valladolid.



Fig 4. Bomba de combustión cilíndrica y cámara de alta velocidad.

El laboratorio cuenta con un conjunto de bombonas de diferentes gases, de las cuales se han empleado únicamente la de metano y la de hidrógeno. Estas bombonas están conectadas a un sistema de conductos y válvulas, mediante las que se controla el paso de combustible y aire en la bomba, gracias a los sensores de presión (en epígrafes posteriores se explicará la metodología y la formulación necesaria para ello).

Por otro lado, una fuente luminosa emite un haz de luz que se refleja en dos espejos (primario y secundario), uno a cada lado de la bomba de combustión, hasta que es capturado por la cámara de alta velocidad.

Por último, los datos, en forma de vídeo, se registran en el ordenador para cada experimento, donde serán analizados y post-procesados (ver epígrafes siguientes). En la **figura 5** puede verse un esquema de la instalación. En la **figura 6**, las bombonas empleadas de hidrógeno y metano para la experimentación.

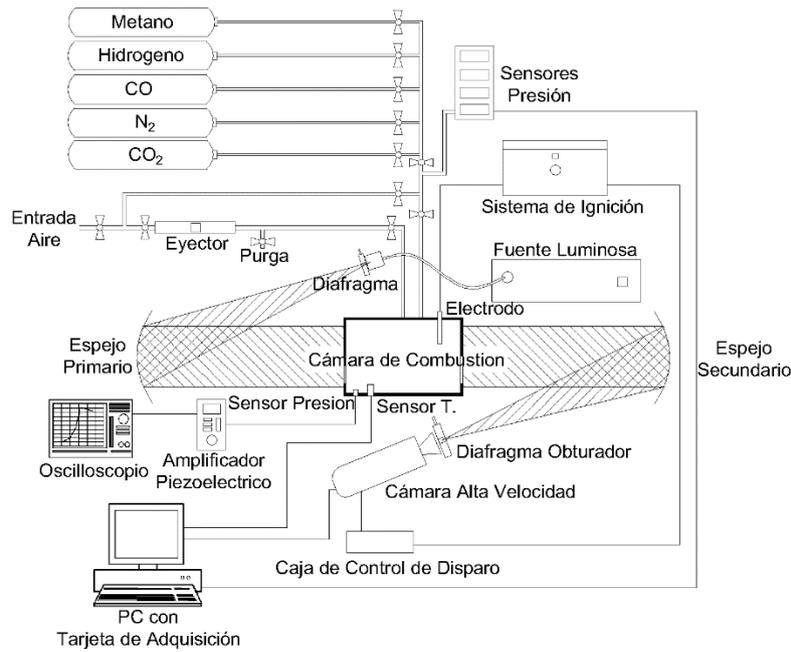


Fig 5. Esquema de la instalación empleada.



Fig 6. Bombonas de metano e hidrógeno comprimidos.

Gracias a esta compleja instalación es posible obtener un registro óptico de la combustión, así como un registro de la presión respecto al tiempo. Para la realización del presente proyecto se ha decidido llevar a cabo el análisis óptico y avanzar un poco más en esa línea de investigación. Los datos de la presión también han sido registrados y guardados, algunos de los cuales se mostrarán y explicarán en el capítulo 4 de resultados.

Esta instalación está basada en el método de diagnóstico óptico de la combustión denominado “Técnica Schlieren”, gracias a la cual es posible obtener información más detallada de la llama para cada experimento. La principal ventaja de este método en comparación con otros métodos de diagnóstico óptico es la eliminación de la luz de fondo, permitiendo detectar los rayos de luz desviados al atravesar el medio y apreciando más detalles del objeto (Reyes, 2008). En la **figura 7** se puede observar un ejemplo de una fotografía de una llama de propano utilizando la técnica Schlieren.

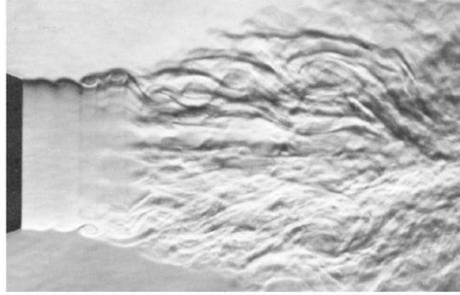


Fig 7. Ejemplo de una llama de propano utilizando la técnica Schlieren. (Reyes, 2008)

La bomba de combustión a volumen constante (BCVC) es el elemento central de la instalación. Tiene una geometría cilíndrica y el encendido en su interior se realiza por medio de dos electrodos colocados en la parte central. Con una longitud de 135 mm y un radio de 114.3 mm permite un volumen en su interior de 1.385 L (Reyes et al., 2018). En la **figura 8** puede observarse más de cerca la bomba de combustión cilíndrica, así como los dos electrodos colocados en la parte central.

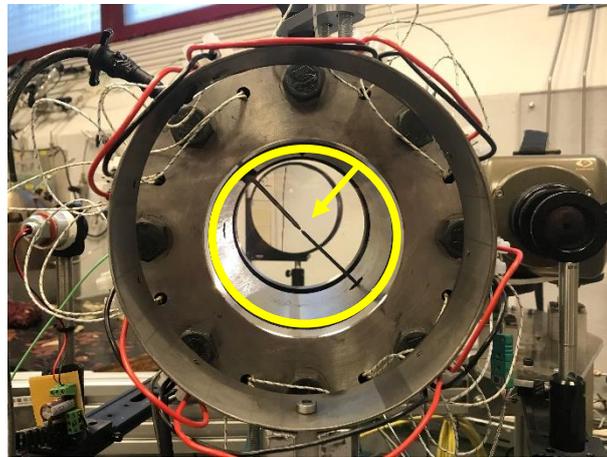


Fig 8. Bomba de combustión cilíndrica y sistema de electrodos para el encendido.

En cualquier instalación experimental existen una serie de elementos de medida que permiten obtener los datos para poder analizarlos. En la **figura 9** pueden observarse, como medida de la presión, cuatro transductores piezorresistivos para diferentes rangos de presión (1 bar, 4 bares, 10 bares, 20 bares).



Fig 9. Sensores de presión con válvulas de cierre.

Además, es muy importante tener un cierto control de la temperatura en el interior de la bomba. Por ello, se emplea un controlador PID para alcanzar la temperatura requerida por los experimentos y un conjunto de resistencias colocadas en la bomba, como puede verse en la **figura 10**.

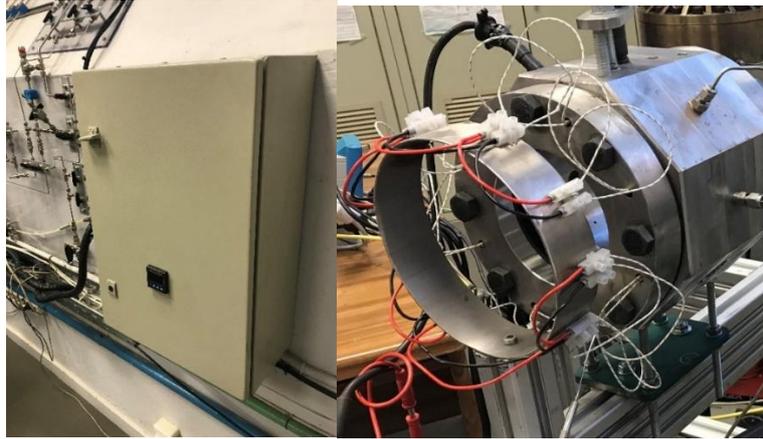


Fig 10. Izquierda: controlador PID. Derecha: Resistencias colocadas en la bomba de combustión

El sistema de iluminación representado en el esquema de la **figura 11**, está constituido por una fuente luminosa y un diafragma que limita el haz de luz que refleja el espejo hacia la cámara de combustión.

Debido a la existencia de grandes gradientes de densidad por culpa del proceso de combustión, parte del haz de luz se desvían a su eje paralelo, por lo que hay un haz de luz diferente que llega al segundo espejo (espejo secundario). En la figura 3.6 puede observarse el diodo led mediante el cual emite la fuente luminosa, así como sus características principales.

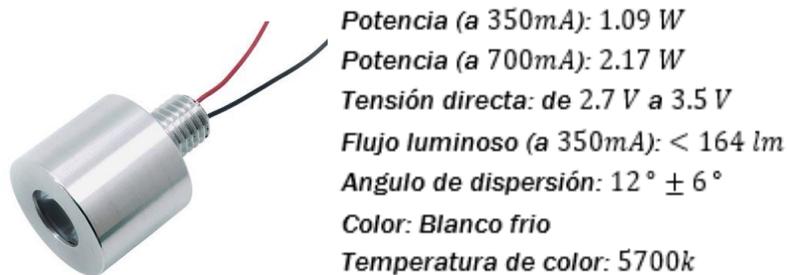


Fig 11. Diodo LED empleado en la instalación y características principales. (Calvete, 2018)

El elemento que permite grabar los datos para poder procesarlos es la cámara de alta velocidad (CCD- Charge Coupled Device), la cual puede observarse en la **figura 12**. Se trata de una videocámara Phantom v210 a 7000 fps, con una resolución máxima de 1280 x 800 y una velocidad de captura máxima de 300000 fps. La cámara consta de un dispositivo de carga acoplada (CCD), un sensor formado por una matriz de células fotovoltaicas que permite captar las imágenes.



Fig 12. Videocámara de alta velocidad Phantom V210.

Por último, la instalación cuenta con un osciloscopio digital de Yokogawa de ocho canales (**figura 13**), de los cuales tres serán necesarios para la realización de los experimentos: un canal para la señal del captador de presión piezoeléctrico, un canal para la señal de la chispa entre los electrodos y otro canal para la señal del trigger (botón de encendido).

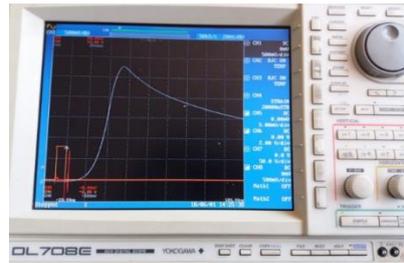


Fig 13. Osciloscopio digital Yokogawa.

3.2 Metodología experimental

Con la instalación experimental, descrita en el epígrafe anterior, es necesario seguir una adecuada metodología para la realización de los experimentos. La decisión de los parámetros de cada experimento, el llenado de la bomba y la adquisición de los datos es algo que requiere de un orden y control para conocer lo que se está haciendo y entender los resultados que se obtendrán del análisis.

En primer lugar, antes de comenzar a utilizar la instalación, es necesario conocer los parámetros (porcentaje de cada combustible en la mezcla, dosado, temperatura inicial y presión inicial) de cada experimento a realizar y representarlos en una tabla para tener la trazabilidad de todos los datos que se obtienen de la bomba y poder compararlos y establecer conclusiones.

Debido a que este proyecto está centrado en mezclas de hidrógeno y metano, y basándose en la bibliografía e investigaciones realizadas por otros autores, se ha decidido llevar a cabo mezclas con un porcentaje de hidrógeno en metano de 0%, 20%, 50%, 80% y 100%. De esta forma se pueden comparar los resultados obtenidos y determinar en qué casos se obtiene el metano dominante de la combustión y en qué otros el hidrógeno.

Por otro lado, se ha decidido realizar un barrido de dosado relativo entre 0.5 y 1. Dosados inferiores tendrían dificultades en el encendido, sobre todo cuando se trata de combustiones de metano puro¹⁵. Dosados superiores al estequiométrico (dosado relativo 1) no resultarían ventajosas a la hora de utilizar hidrógeno, ya que, uno de los objetivos que se buscan con éste es el posible ahorro de combustible si se utiliza en motores de combustión interna para aplicaciones en automoción.

Teóricamente, la bomba alcanza presiones de llenado de 20 bar, pero en experimentos realizados previamente se ha observado que las mezclas de hidrógeno son tan rápidas, que producen un incremento muy elevado de la presión en muy poco tiempo, por lo que causaban daños en los cristales de la bomba, llegando incluso a su rotura. Es por este motivo por el que se ha decidido realizar un barrido de presión de 1 a 3 bares, al principio de la combustión. Debido a la compresión producida por el avance del frente de llama en el interior de la bomba de combustión, la presión y la temperatura de la zona fresca aumentan, alcanzándose presiones, en algunos casos, de casi 20 bares.

Por último, se ha comprobado que pequeños incrementos de temperatura no tienen un efecto claro sobre la combustión, por lo que se ha decidido tomar dos rangos de temperatura principales: entre 40°C y 100°C.

Combinando todos los parámetros comentados se obtienen un total de 55 experimentos, los cuales se reflejan en el **Anexo 1**.

En segundo lugar, se lleva a cabo el llenado de la bomba. Debido a que el parámetro que mejor puede ser controlado es la presión, la cantidad de combustible y aire introducido en la bomba se controla a partir de la presión parcial de cada componente registrada con los captadores. Para conocer cuál es la presión exacta a la que tiene que llegar cada componente, es necesario realizar unos cálculos previos, los cuales serán explicados en el **epígrafe 3.4.1**. La elaboración de la mezcla en la cámara de combustión consta de tres fases principales: una primera etapa de preparación y limpieza, una segunda de preparación de

¹⁵ Uno de los experimentos realizados con metano puro (100%CH₄, Fr0,5, P1 bar y T40°C) no ha encendido.

la mezcla en el interior de la bomba de combustión y una tercera etapa de reposo y homogeneización de la mezcla. (Lafuente, 2008)

En la primera etapa es imprescindible dejar pasar aire a través de la bomba para que limpie cualquier residuo de combustiones anteriores que haya podido quedar atrapado en el interior y actúe como inerte reduciendo la temperatura en la bomba a la hora de la combustión. Además, es importante realizar varios procesos de vaciado, llegando a presiones de 0,080-0,090 bar. Tras este proceso, la bomba puede llenarse con el combustible y aire correspondiente hasta las presiones adecuadas.

Una vez que se ha procedido al llenado de la bomba mediante el método de las presiones parciales de cada elemento (segunda etapa), es necesario un tiempo de reposo (tercera etapa: suele tomarse alrededor de 4 minutos y constante para todos los experimentos) para que la mezcla de combustible y aire sea homogénea antes del salto de la chispa entre los electrodos y así asegurar la repetitividad de los experimentos.

Antes de proceder al salto de la chispa, es adecuado revisar que todos los aparatos de adquisición y procesamiento de datos funcionan correctamente: osciloscopio, amplificador y registro del vídeo de la combustión mediante el ordenador.

Cabe destacar que la metodología es más extensa, conlleva un juego de apertura y cierre de válvulas adecuado. Con este proceso, se obtiene como salida un vídeo en formato CINE y AVI que podrán ser analizados posteriormente con un programa diseñado para MATLAB, que permite detectar la evolución del radio frente al tiempo (obtener el radio del frente de llama en función del tiempo) que servirá para calcular los parámetros comentados anteriormente: velocidad de combustión laminar, tasa de stretch y números adimensionales.

3.3 Modelo de diagnóstico

Como se ha comentado en el epígrafe 3.1 la instalación constituida por la bomba de combustión cilíndrica permite un diagnóstico óptico de la combustión basado en la técnica Schlieren (el empleado para el desarrollo de este proyecto) y un registro de la presión respecto al tiempo. En la **figura 14** se presenta un breve esquema de las entradas y salidas para ambos métodos de adquisición de datos.

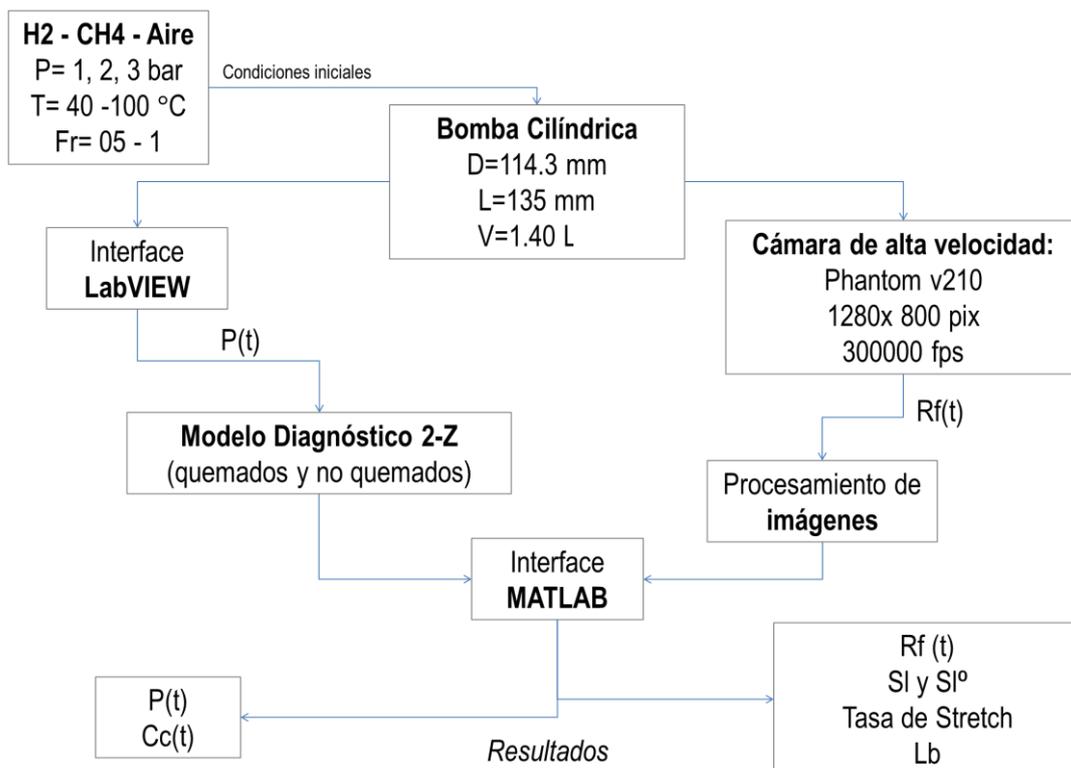


Fig 14. Metodología empleada para la obtención de los resultados.

En el **apartado 4** se presentan los resultados detallados obtenidos por los dos caminos posibles. Tal y como se ha comentado anteriormente, se ha decidido desarrollar más en profundidad los datos obtenidos por el método óptico, basados en el avance del radio respecto al tiempo y el diagnóstico visual de la combustión. De todas formas, se presentan también los resultados de presión obtenidos por los captadores de la bomba de combustión, así como la velocidad de combustión laminar obtenida por este método, lo que permitirá conocer más en detalle el funcionamiento de la instalación, así como establecer una comparativa entre los resultados obtenidos por un método y por el otro.

Cabe destacar que la presión teórica a la que debería llegar la combustión en la bomba cilíndrica es inferior a la teórica y la de la bomba de combustión esférica (ideal). Esto es debido, en gran parte, a que, al tratarse de una cámara cilíndrica, el frente de llama deja de ser esférico para un determinado radio del frente de llama. Esto genera una distorsión de la geometría del frente de llama imposible de detectar mediante el método óptico, por lo que se desconoce el radio para el cual las presiones dejan de ajustarse a las teóricas y difieren de estas. Es por este motivo, y tras una ardua investigación, por el que se ha decidido ahondar en el método óptico.

3.4 Formulación y análisis

La metodología comentada en epígrafes anteriores requiere de una formulación y un análisis de los datos que se explicará de la forma más clara posible en los epígrafes siguientes. En primer lugar, es necesario una serie de cálculos para conocer las presiones de llenado de la bomba de combustión. Además, resulta interesante determinar los parámetros realmente introducidos y los requeridos teóricamente, para poder compararlos y afirmar si el experimento resulta válido o es necesario repetirlo. Por último, es necesario familiarizarse con el análisis de los resultados en Matlab, así como el cálculo de post-procesado para calcular los parámetros que conciernen este proyecto.

3.4.1 Cálculo teórico de las presiones de llenado de la bomba

La bomba de combustión cilíndrica disponible en el laboratorio consta de conductos y válvulas mediante las cuales se regula el paso de combustible y aire a su interior. Es por este motivo, por el cual la forma más sencilla y exacta de realizar el llenado de la bomba es mediante lo que se conoce como *presiones parciales*, tal y como se ha explicado en el epígrafe anterior.

Gracias a una aplicación desarrollada en lenguaje C (Labview) para la instalación, es posible conocer la información de los sensores en tiempo real (por medio de una tarjeta de adquisición de datos) y realizar el llenado de la forma más ajustada posible.

Conocido el volumen de la bomba, las presión inicial que se desea alcanzar, la temperatura a la que se realizará la combustión, el porcentaje de hidrógeno-metano-aire, así como el dosado de la mezcla, es posible, gracias a una serie de ecuaciones, conocer las presiones parciales para el llenado. Para facilitar la correcta realización de los experimentos, se ha creado una hoja Excel que, al introducir los parámetros de cada uno se obtienen las presiones de llenado necesarias. En la **figura 15** puede observarse un extracto de esta hoja de cálculo.

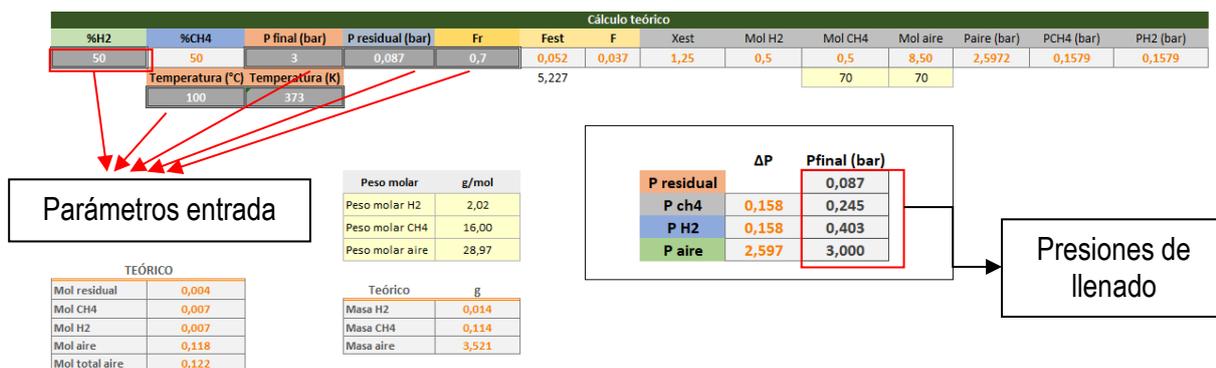
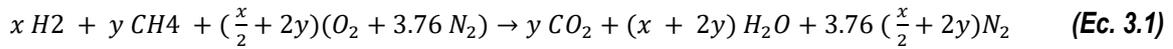
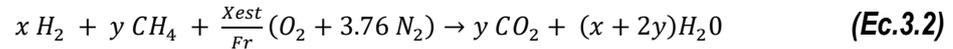


Fig 15. Extracto de la hoja de cálculo de las presiones requeridas para el llenado de la bomba de combustión.

Los siguientes párrafos explican, un poco más en detalle, las ecuaciones en las que se basa la hoja de cálculo realizada. La **ecuación 3.1** representa la fórmula estequiométrica de combustión del hidrógeno y metano, donde “x” es la fracción de hidrógeno e “y” es la fracción de metano correspondiente. Además, se ha considerado el aire como una mezcla mayoritariamente compuesta por oxígeno y nitrógeno.



Si se tiene en cuenta el dosado relativo (Fr) y el estequiométrico (Xest) se obtendría lo indicado en la **ecuación 3.2**.



$$X_{est} = \frac{x}{2} + 2y \quad (\text{Ec.3.3})$$

De esta forma, considerando los pesos molares del hidrógeno, gas natural y aire, se puede obtener la expresión para el cálculo del dosado estequiométrico de la siguiente manera:

$$1 \text{ mol } H_2 \rightarrow 2,02 \text{ g/mol}$$

$$1 \text{ mol } CH_4 \rightarrow 16 \text{ g/mol}$$

$$1 \text{ mol aire} \rightarrow 28,97 \text{ g/mol}$$

$$F_e = \frac{m_{combustible}}{m_{aire}} = \frac{12n+m+16p}{\left(n+\frac{m}{4}-\frac{p}{2}\right)(32+3.76 \times 28)} = \frac{2x+16y}{\left(\frac{x}{2}+2y\right) \times 28.97} \quad (\text{Ec.3.4})$$

Considerando las fracciones molares de hidrógeno y metano, así como el dosado relativo, se pueden calcular el número de moles de hidrógeno, metano y aire, respectivamente. Es importante tener en cuenta, para el caso del aire, los 3.76 moles de nitrógeno por cada mol de oxígeno, por lo que hacen un total de 4.76 moles.

$$Mol_{H_2} = \frac{\%H_2}{100} \quad (\text{Ec.3.5})$$

$$Mol_{CH_4} = \frac{\%CH_4}{100} \quad (\text{Ec.3.6})$$

$$Mol_{aire} = \frac{X_{est}}{Fr} \times 4.76 \quad (\text{Ec.3.7})$$

Para calcular las presiones de llenado se emplea el método de las presiones parciales. Para ello, una vez calculado el número de moles, se fija una presión final de llenado de la bomba de combustión.

$$P_{aire} = \frac{mol_{aire} \times P_{final}}{mol_{aire} \times mol_{H_2} \times mol_{CH_4}} \quad (\text{Ec.3.8})$$

$$P_{H_2} = \frac{mol_{H_2} \times P_{final}}{mol_{aire} \times mol_{H_2} \times mol_{CH_4}} \quad (\text{Ec.3.9})$$

$$P_{CH_4} = \frac{mol_{CH_4} \times P_{final}}{mol_{aire} \times mol_{H_2} \times mol_{CH_4}} \quad (\text{Ec.3.10})$$

Es necesario considerar una presión residual en el interior de la bomba de combustión debido a que el proceso de vacío no es exacto y alcanza alrededor de 0.090 o 0.080 bar, por lo que la presión de aire finalmente resulta:

$$P_{aire} = \frac{mol_{aire} \times P_{final}}{mol_{aire} \times mol_{H_2} \times mol_{CH_4}} - P_{residual} \quad (\text{Ec.3.11})$$

3.4.2 Cálculo real de parámetros tras el llenado de la bomba

El cálculo teórico de las presiones parciales de cada componente introducido en la bomba puede resultar una buena aproximación para la realización de los experimentos, pero hay que tener en cuenta que el

llenado se realiza de forma manual, mediante el manejo de válvulas, por lo que el resultado final no va a ser exactamente el obtenido en el cálculo anterior.

Por ello, es necesario realizar un cálculo inverso mediante el que podamos obtener las fracciones reales de hidrógeno y metano, así como el dosado relativo de la mezcla realizada, a partir de los datos de las presiones parciales. En la **figura 16** puede observarse un extracto de la hoja de cálculo mencionada en el epígrafe anterior. Ésta devuelve los parámetros reales de la combustión realizada tras introducir las presiones reales que se han alcanzado. Cabe destacar que, las presiones reales de llenado pueden diferir de las teóricas ya que se trata de una metodología manual en la que hay errores inherentes debido al factor humano.

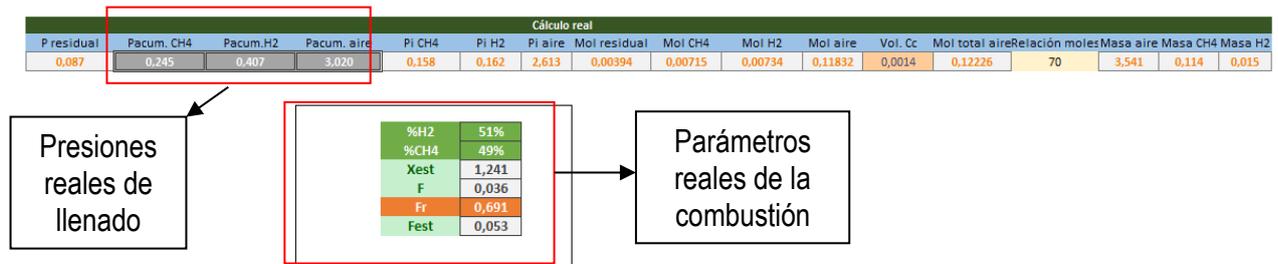


Fig 16. Extracto de la hoja de cálculo de los parámetros reales de los experimentos.

Para calcular los moles realmente introducidos en la bomba de combustión, es necesario calcular el volumen de la bomba, el cual se ha calculado en 0.0014 m³.

$$mol_{residual} = \frac{P_{residual} \times Vol_{cám.comb}}{8.314 \times T^{\circ}} \quad (\text{Ec.3.12})$$

$$mol_{CH_4} = \frac{P_{CH_4} \times Vol_{cám.comb}}{8.314 \times T^{\circ}} \quad (\text{Ec.3.13})$$

$$mol_{H_2} = \frac{P_{H_2} \times Vol_{cám.comb}}{8.314 \times T^{\circ}} \quad (\text{Ec.3.14})$$

Con estos valores se puede obtener la masa real introducida en la bomba de combustión, así como las fracciones de hidrógeno y metano consideradas y los dosados relativo y estequiométrico.

$$x_{real} = \%H_2_{real} \quad (\text{Ec.3.15})$$

$$y_{real} = \%CH_4_{real} \quad (\text{Ec.3.16})$$

$$Xest = \frac{x_{real}}{2} + 2y_{real} \quad (\text{Ec.3.17})$$

$$F = \frac{m_{comb}}{m_{aire}} = \frac{m_{H_2} + m_{CH_4}}{m_{aire}} \quad (\text{Ec.3.18})$$

Relación molar = Factor multiplicador molar

$$F_r = \frac{Xest \times 4,76}{m_{aire} \times \text{Relación molar}} \quad (\text{Ec.3.19})$$

$$Fest = \frac{F}{F_r} \quad (\text{Ec.3.20})$$

En el **Anexo 2** se puede encontrar una comparación entre los valores teóricos y reales de los experimentos realizados. Cabe destacar la importancia de realizar un estudio de los parámetros reales de la combustión, ya que, en algunos casos una pequeña variación de la presión introducida puede provocar grandes cambios en cuanto a porcentaje de mezcla o dosado introducido. Gracias a ello ha sido posible determinar, en una etapa temprana, los experimentos mal realizados y volver a realizarlos.¹⁶

¹⁶ Para la realización de este proyecto, se han realizado un total de 88 experimentos, de los cuales solamente han sido útiles 54.

3.4.3 Análisis del vídeo de la combustión en Matlab

En los epígrafes anteriores se explica la metodología para experimentar en la bomba cilíndrica, pero es importante conocer cómo se realiza el análisis de los resultados.

Este proyecto se ha centrado únicamente en el análisis óptico de la combustión, por lo que el archivo de salida es el vídeo grabado por la cámara de alta velocidad Phantom en formato *.cine* y *.avi*. La técnica Schlieren, comentada anteriormente, permite obtener más detalles de la combustión gracias a la eliminación de la luz de fondo.

Gracias a un programa diseñado en el software Matlab (González, 2018), es posible descomponer el video obtenido en una matriz numérica que representa el radio del frente de llama frente a cada paso temporal. **La figura 17** representa la interfaz de este programa con el cálculo del radio del frente de llama, así como el cálculo de las celdas por unidad de superficie. Este parámetro se ha desestimado utilizar en este proyecto debido a la inexactitud del método realizado en Matlab.

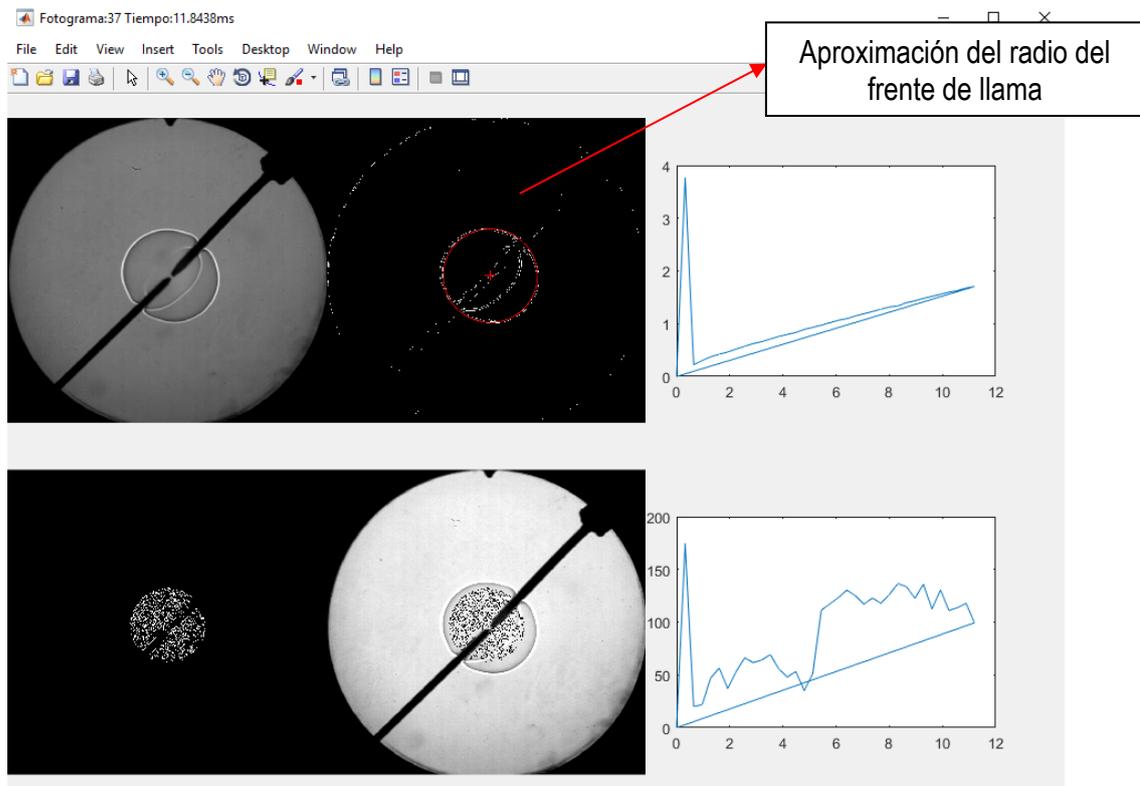


Fig 17. Interfaz del programa de Matlab para determinar el radio del frente de llama frente al tiempo.

3.4.4 Cálculo post-procesado

Gracias a los captadores de presión colocados en la cámara de combustión es posible representar la presión frente al tiempo para cada uno de los experimentos (teniendo en cuenta que no llegan a las presiones teóricas ni a las obtenidas con una bomba de combustión esférica, debido a la “desesferificación” del frente de llama) así como la velocidad de combustión laminar, U_l , resultante de considerar la velocidad de combustión laminar “unstretched” (S_{l0}) y la relación de densidades entre la mezcla quemada y sin quemar.

En el epígrafe anterior se explica brevemente cómo se obtienen los valores del radio del frente de llama (cm) en función del tiempo (ms). Debido a oscilaciones y errores inherentes al propio programa, es necesario realizar un filtrado previo del radio del frente de llama antes de procesar los datos, para que los resultados sean coherentes con los estudios. Para ello, se representa en una gráfica el radio (cm) frente al tiempo (ms), eliminando las oscilaciones y dejando solo la parte de la curva creciente con el tiempo, tal y como se puede observar en la **figura 18**.

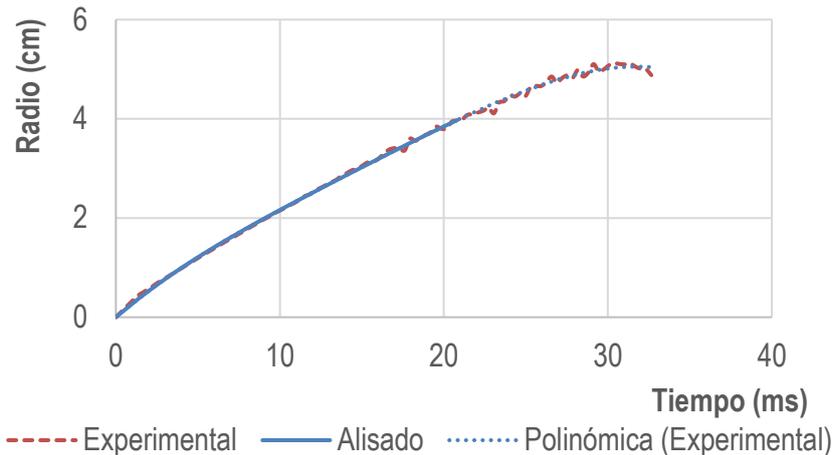


Fig 18. Comparación del radio obtenido con Matlab y el radio alisado (real) para una mezcla 50% hidrógeno-50% metano-aire $Fr=0.7$, $P=1$ bar, $T=100^{\circ}C$.

Por lo general, todos los experimentos mantienen una primera zona lineal ascendente y de pendiente constante que concuerda con el radio alisado. Se ha extrapolado la curva a una parábola de cuarto grado, al ser ésta la que mejor aproximación ofrece.

A partir de un cierto radio (aproximadamente 4 cm), las perturbaciones del frente de llama hacen que el programa en Matlab no sea capaz de definir de forma precisa el radio del frente y se producen las oscilaciones entre el radio obtenido de Matlab y el alisado. Estas perturbaciones también pueden ser resultado de la “desesferificación” del frente de llama al no tratarse de una bomba de combustión esférica, sino cilíndrica. Es por este motivo por el que se ha decidido analizar los datos obtenidos de la experimentación hasta un radio máximo de 4 cm.

A partir del radio alisado, puede obtenerse la velocidad de propagación, tal y como se ha explicado en el **capítulo 2**. La velocidad de propagación del frente de llama se puede obtener derivando el radio respecto al tiempo. Como se han considerado intervalos de tiempo lo suficientemente pequeños, pueden discretizarse los valores y realizar el cálculo con valores incrementales.

El siguiente parámetro que se puede calcular con los datos obtenidos es la tasa de Stretch (α), que, para recordar, hace referencia a la curvatura de la llama. De esta forma, una llama plana tiene una tasa de stretch igual a cero. Todas las ecuaciones se han representado en el **capítulo 2**.

Cuando se somete una llama unidimensional a una cierta tasa de stretch, se origina una deformación en su estructura, cuya consecuencia es una variación en el comportamiento de la llama. Por tanto, puede definirse la velocidad de propagación “Unstretched” (Sl_0), representando en una gráfica la velocidad de propagación “Stretched” (Sl) en función de la tasa de stretch (α) (parámetros calculados anteriormente) para obtener la curva que mejor se aproxime a los datos en su zona lineal. La **figura 19** representa como se solucionaría el cálculo de la velocidad de propagación Unstretched (Sl_0).

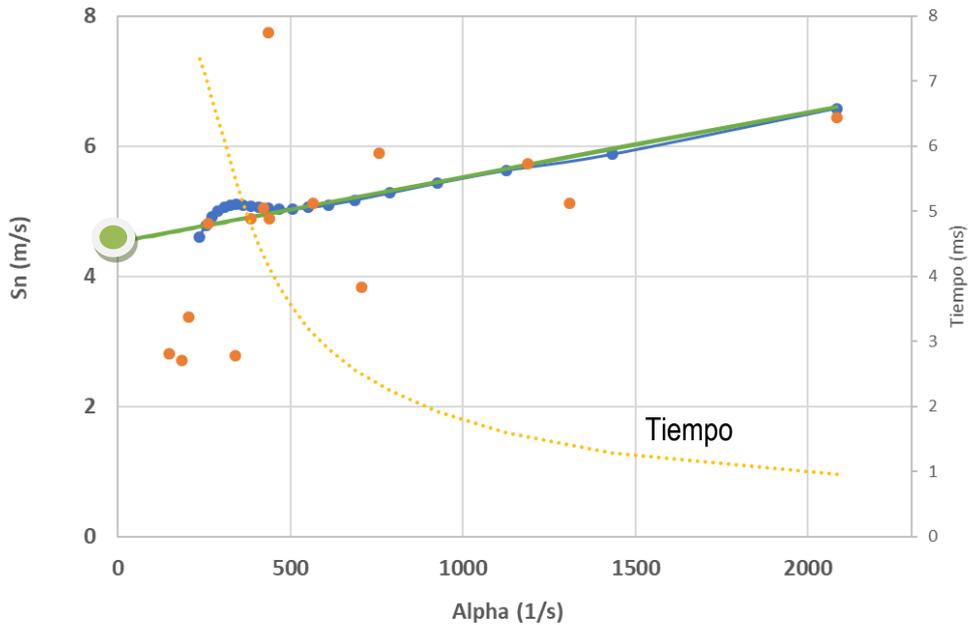


Fig 19. Cálculo de la velocidad de propagación “unstretched” (Sl_0) a partir de la velocidad de propagación Sl y la tasa de stretch (α) para una mezcla 80% hidrógeno-20% metano-aire $Fr=0.8$, $P=1$ bar, $T=40^\circ\text{C}$.

La **ecuación 3.21** representa la forma de obtener la velocidad de combustión laminar “unstretched” (U_l) a partir del modelo de diagnóstico de los datos de presión respecto al tiempo. Sl_0 es la velocidad de propagación sin stretch, explicada en la imagen anterior, y ρ_b , ρ_{ub} son las densidades de la masa quemada y sin quemar, respectivamente.

$$U_l = Sl_0 \times \frac{\rho_b}{\rho_{ub}} \quad (\text{Ec.3.21})$$

Por último, es posible calcular los números adimensionales comentados en el **capítulo 2**: longitud de Markstein y aproximación del signo del número de Lewis¹⁷, según las ecuaciones presentadas en el mismo capítulo.

Una vez que se han calculado todos los parámetros para todos los experimentos válidos, es posible realizar comparaciones entre ellos y establecer conclusiones. Tanto los resultados obtenidos como las conclusiones establecidas se presentan en los próximos capítulos de este proyecto.

¹⁷ Debido a la complejidad para obtener un valor numérico del número de Lewis, se ha decidido expresar su símbolo en función del comportamiento del frente de llama.

4 RESULTADOS

Llegando a la parte final de este proyecto y, tras realizar un recorrido por el estado del arte, la metodología empleada y las principales teorías en las que se sustenta la experimentación es necesario presentar los resultados obtenidos de tan exhaustiva investigación.

Como se ha comentado anteriormente, se han fijado los parámetros para la realización de 55 experimentos, con una cuantía total de 88 experimentos realizados debidos a repeticiones necesarias y errores detectados en la preparación y análisis de datos.

Este capítulo se ha dividido en cuatro bloques principales. En el primero de ellos se presenta una breve introducción de los resultados, explicando en detalle cinco de los experimentos realizados para poder entender de forma visual toda la teoría anteriormente explicada. Se ha elegido un experimento significativo para cada porcentaje de hidrógeno en la mezcla y de esta forma, exponer y observar, con claridad, el diferente comportamiento de los dos combustibles utilizados en este TFM: hidrógeno y metano, así como el comportamiento de sus mezclas.

Los siguientes epígrafes presentan los resultados en función de la variación de dosado relativo, la presión y temperatura y el porcentaje de hidrógeno en la mezcla.

Cabe destacar que, tal y como se ha comentado en capítulos anteriores, hay un experimento que ha experimentado fallos en el proceso de encendido: 100%CH₄-0%H₂ con Fr0.5, P=1 bar y T=40°C, por lo que cuando se hable de metano-aire, solo se representan cinco posibles dosados relativos: 0.6-1.

4.1 *Introducción a los resultados*

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para los experimentos de hidrógeno-aire, metano-aire (simulando gas natural) y mezcla de metano e hidrógeno, estableciendo una comparación al variar el dosado en la mezcla, la presión, la temperatura y el porcentaje de hidrógeno y metano según los valores establecidos al inicio de este proyecto.

Los resultados presentados se obtienen, por un lado, del diagnóstico de la presión instantánea en el interior de la cámara de combustión y, por otro, del registro de las imágenes de la combustión. Del primero de ellos se presentarán las gráficas de variación de la presión (P) junto a la fracción de masa quemada (FMQ) en función del tiempo y la velocidad de combustión de la llama (C_c) respecto a la temperatura de la masa no quemada (T_{sq}). Del segundo, la variación del radio del frente de llama ϕ y la velocidad de propagación del frente (S_I) en función de la tasa de stretch (α). Por último, se presenta la velocidad de propagación laminar (S_{I0}) obtenida por los dos caminos comentados. Algunos de los resultados obtenidos se han comparado con la bibliografía disponible para comprobar la dispersión de los resultados.

Tal y como se muestra en la revisión bibliográfica de este trabajo fin de máster, los comportamientos del hidrógeno y del metano son muy diferentes, pero ¿qué ocurre cuando se añade una cierta cantidad de hidrógeno en metano?

En función de la cantidad de hidrógeno que se añada en la mezcla, el comportamiento será muy similar al del hidrógeno (conocido como mezcla de hidrógeno dominante), muy similar al del metano (metano dominante) o puede estar comprendido en lo que se conoce como “zona de transición”, donde no siguen una tendencia claramente definida y no es evidente qué comportamiento domina.

En llamas esféricas, el instante inicial del crecimiento de las perturbaciones del frente no tiene por qué coincidir necesariamente con el tiempo para el que la inestabilidad se observa experimentalmente. Esto explica por qué las perturbaciones pueden no detectarse hasta que su amplitud alcanza un tamaño significativo. La tasa de crecimiento del frente de llama depende de tres factores principales: difusividad térmica, molecular y viscosa. La difusividad térmica siempre tiene un efecto estabilizador de las inestabilidades producidas por la variación de temperatura. La difusividad debido a la viscosidad también tiene un efecto estabilizador, debido a la importante variación de viscosidad a través de toda la superficie

del frente de llama. Por otro lado, el efecto de la difusividad molecular está íntimamente ligado al número de Lewis, por lo que puede tener un efecto estabilizador del frente o, todo lo contrario. (Matalon, 2007)

Generalmente, para mezclas constituidas por hidrocarburos con dosados ricos ($Fr > 1$) o mezclas de hidrógeno-aire con dosados pobres ($Fr < 1$), este número de Lewis es menor que uno, por lo que la celularidad aparece poco después del salto de la chispa para ignición. Cuando se trata de hidrocarburos en dosados pobres o mezclas de hidrógeno-aire en dosados ricos ocurre todo lo contrario: el número de Lewis adopta valores superiores a la unidad, por lo que la llama permanece estable durante un tiempo tras la ignición, pero puede llegar a adquirir una apariencia celular una vez que se alcanza un tamaño crítico del radio del frente. En este último caso, la inestabilidad es hidrodinámica por naturaleza, desencadenada por efectos de expansión térmica. (Matalon, 2007)

Como se ha comentado en el **capítulo 2**, el hidrógeno es un elemento que tiene una velocidad de combustión laminar siete veces mayor que el metano, por lo que, al mezclar ambos, se pueden extender los límites de dosado. La bibliografía incide en que al introducir hidrógeno en gas natural implica un aumento de la celularidad de la llama y, por tanto, una intensificación de la formación de arrugas en el frente, aumentando la velocidad de propagación de la llama y extendiendo los límites de inflamabilidad, así como reduciendo la formación de óxidos de nitrógeno. Esta propiedad aumenta cuanto mayor sea la presión inicial¹⁸ de la mezcla, mayor el dosado, mayor el porcentaje de hidrógeno en la mezcla o menor la temperatura inicial (aumentar la temperatura desemboca en un mayor porcentaje de formación de óxidos de nitrógeno). (**Ver capítulo 2: Estado del arte**).

Antes de la presentación de los resultados cabe destacar que, debido a las oscilaciones que presentan los datos obtenidos del análisis en Matlab para el análisis de las imágenes de la combustión, se ha decidido presentar los resultados hasta un radio de 4 cm (zona de mejor ajuste). Estas oscilaciones en el análisis se deben, principalmente, a que la geometría del frente de llama está excesivamente distorsionada por efecto de la celularidad que a la hora de realizar un post-procesado en Matlab, no se alcanza un radio concretamente real.

En primer lugar, se ha escogido una mezcla de hidrógeno-aire (100% de hidrógeno) de dosado relativo 0.7, $P=1$ bar y $T=40^\circ\text{C}$. En la **figura 20** y **figura 21** se presenta la evolución del radio del frente de llama (cm) frente al tiempo (ms): en color naranja los resultados obtenidos directamente del análisis de las imágenes de la combustión en Matlab y en color azul, el ajuste mediante un polinomio de cuarto grado para evitar las desviaciones. Como se ha comentado en párrafos anteriores, se ha establecido un punto de corte a partir del cual el radio no es considerado en este estudio: 4 cm.

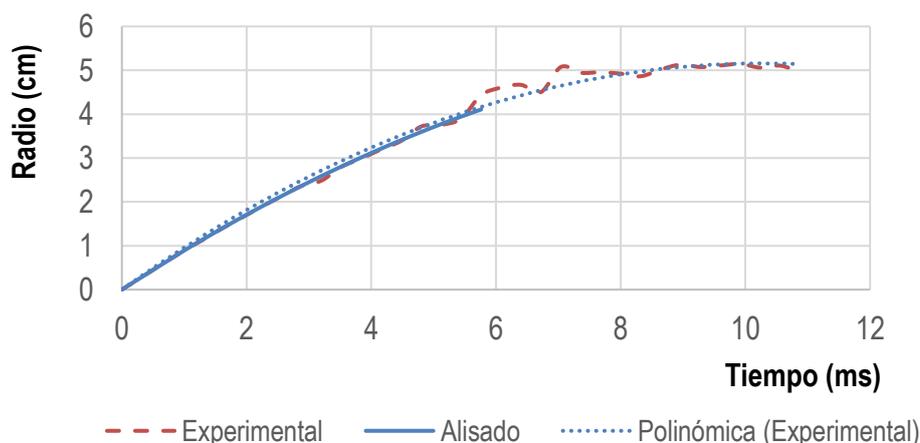


Fig 20. Evolución del radio del frente de llama frente al tiempo. 100% H_2 - $Fr_{0.7}$ - $P=1\text{bar}$ - $T=40^\circ\text{C}$.

¹⁸ Aumentar la presión inicial de la mezcla permite reducir la contaminación y aumentar la eficiencia energética.

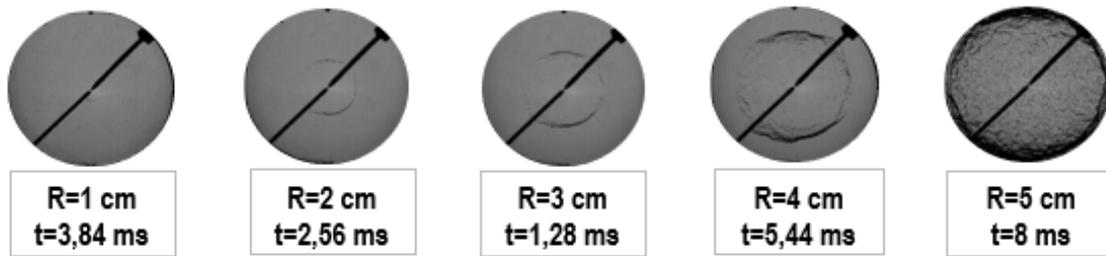


Fig 21. Evolución de la morfología de la llama. 100% H_2 - $Fr=0.7$ - $P=1bar$ - $T=40^\circ C$.

Una vez que se ha realizado un alisado del radio obtenido experimentalmente con el registro de las imágenes de la combustión, se puede obtener la velocidad de propagación del frente de llama (SI), derivando esta curva respecto al tiempo, tal y como puede observarse en la **figura 22**.

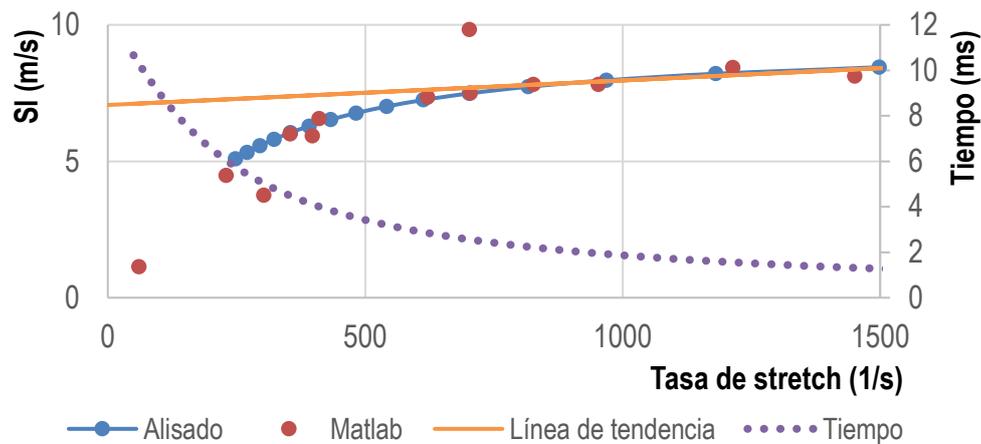


Fig 22. Velocidad de propagación (SI) y tiempo en función de la tasa de stretch. Cálculo de la velocidad de propagación “unstretched” (SI_0). 100% H_2 - $Fr=0.7$ - $P=1bar$ - $T=40^\circ C$.

En color naranja se presentan los resultados de la velocidad (SI) obtenidos según los datos del radio experimental sin alisado y, en color azul, se presenta la curva de la velocidad (SI) obtenida al derivar la curva alisada presentada en la **figura 22**. Además, se ha representado la evolución del tiempo en función de la tasa de stretch (color amarillo), lo que ayuda a comprender los errores entre ambas velocidades: los puntos naranjas tienden a desviarse del alisado al inicio y al final de la combustión, cuando se produce el salto de chispa y cuando el radio empieza a presentar oscilaciones (4cm).

A partir de estos datos es posible obtener la velocidad de propagación laminar (SI_0) gracias a una línea de tendencia en la primera parte de la combustión ($SI_0=7.0619$).

Visualmente, la llama evoluciona de la forma indicada en la **figura 21**, donde se recogen las fotografías de la morfología del frente de llama para los radios indicados. El frente de llama de hidrógeno presenta inestabilidades y arrugas desde el inicio de la combustión (mezcla hidrógeno-aire a dosado pobre), que crecen deformando la superficie del frente de llama y, por tanto, retardando su velocidad de propagación (pendiente negativa). La celularidad es resultado de una mayor tasa de crecimiento de las arrugas que del frente de llama, por lo que, desde su inicio, es celular. Por este motivo, el número de Lewis supuesto debe ser menor que la unidad, tal y como se indica para hidrocarburos ricos y mezclas de hidrógeno-aire pobres.

Una vez analizado el comportamiento para el hidrógeno, es curioso compararlo con el presentado para el metano. Para ello, se ha elegido una mezcla de metano-aire (100% CH_4) $Fr=0.6$, $P=1 bar$ y $T=40^\circ C$. En la **figura 23** se observa la evolución del radio frente al tiempo. Al tratarse de una llama completamente laminar (no presenta celularidad ni siquiera al final de la combustión, solo inestabilidades que crecen sin propagarse), el radio alisado se ajusta mejor al radio obtenido por post-procesado en Matlab. De todas

formas, para seguir una misma metodología de resultados, se ha decidido establecer el mismo punto de corte para un radio de 4 cm.

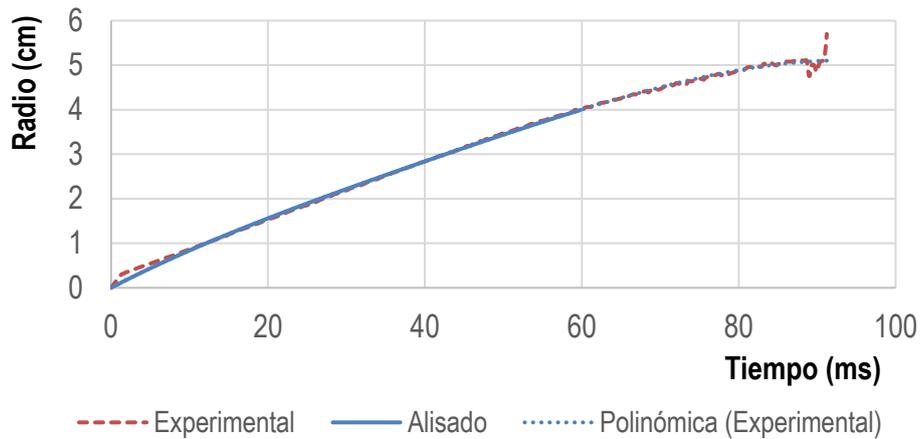


Fig 23. Evolución del radio del frente de llama frente al tiempo. 100%CH₄-Fr0.6-P=1bar-T=40°C.

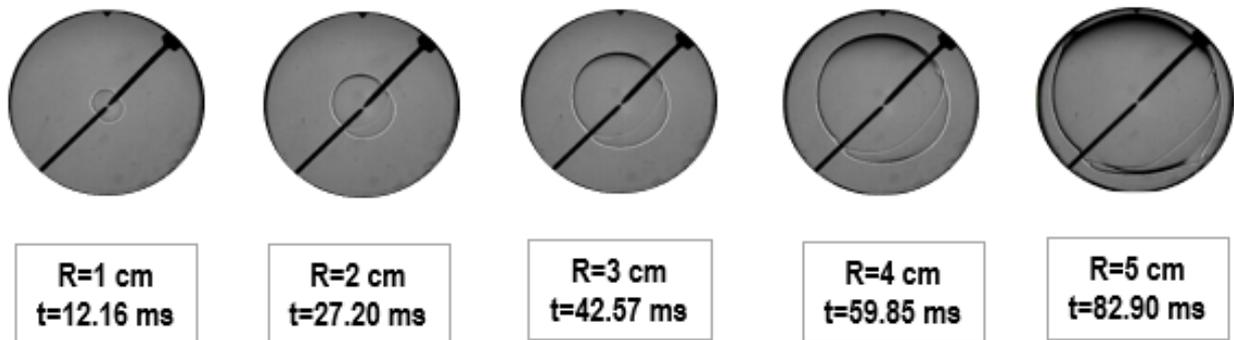


Fig 24. Evolución de la morfología de la llama. 100%CH₄-Fr0.6-P=1bar-T=40°C

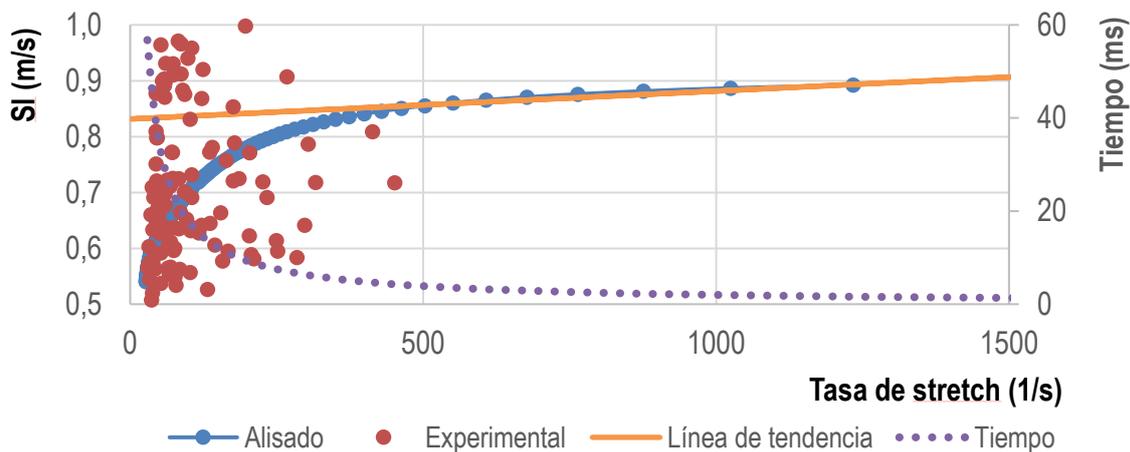


Fig 25. Velocidad de propagación (SI) y tiempo en función de la tasa de stretch. Cálculo de la velocidad de propagación "unstretched" (SI₀). 100%CH₄-Fr=0.6-P=1bar-T=40°C.

En este caso, la velocidad de propagación (*figura 25*) permanece prácticamente constante en las primeras etapas de la combustión hasta alcanzar un radio a partir del cual se produce un descenso definido. La velocidad de combustión "unstretched" (SI₀) se ha aproximado con una línea de tendencia para un valor de 0.83m/s.

La tasa de stretch es muy significativa al inicio de la combustión durante un breve periodo de tiempo, pero a medida que se propaga el frente, la tasa de stretch se reduce notablemente. Las grietas observadas en el frente corresponden a inestabilidades que comienzan, pero no se desarrollan,

principalmente debido a que la velocidad de crecimiento de la perturbación es inferior a la del frente de llama. Tal y como se explicaba anteriormente, el metano presenta un número de Lewis superior a la unidad, provocando un efecto estabilizador de las inestabilidades del frente.

Una vez definidos el comportamiento del metano y del hidrógeno cuando se emplean por separado, es interesante conocer cómo se comportan cuando se mezclan. Para ello, se presentan a continuación los resultados de tres experimentos: 80%H₂-20%CH₄, 50%H₂-50%CH₄ y 20%H₂-80%CH₄.

Para una mezcla de 80% H₂ – 20% CH₄ (Fr=0.8, P=1 bar y T=40°C) se obtiene la evolución del radio según la **figura 26** Como se puede observar, tiene un comportamiento oscilatorio similar al de una llama puramente de hidrógeno-aire, con la presencia de inestabilidades desde el comienzo de la combustión, inestabilidades que progresan rápidamente formando una llama celular desde el principio, ver figura 4.8.

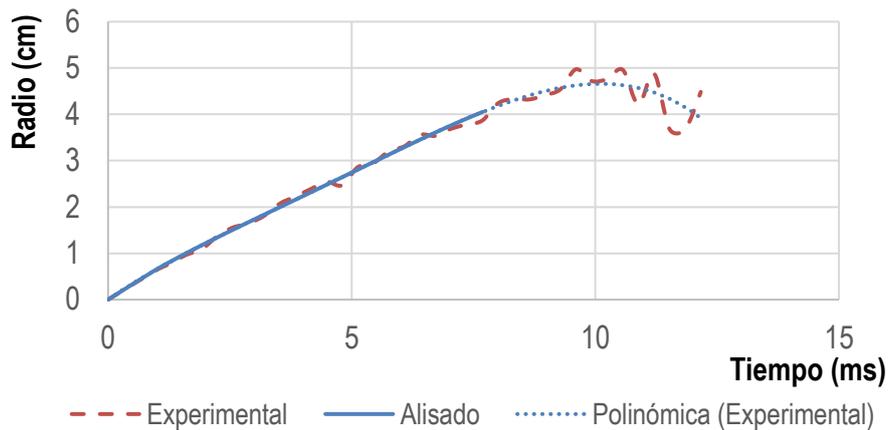


Fig 26. Evolución del radio del frente de llama frente al tiempo. 80%H₂-20%CH₄-Fr0.6-P=1bar-T=40°C.

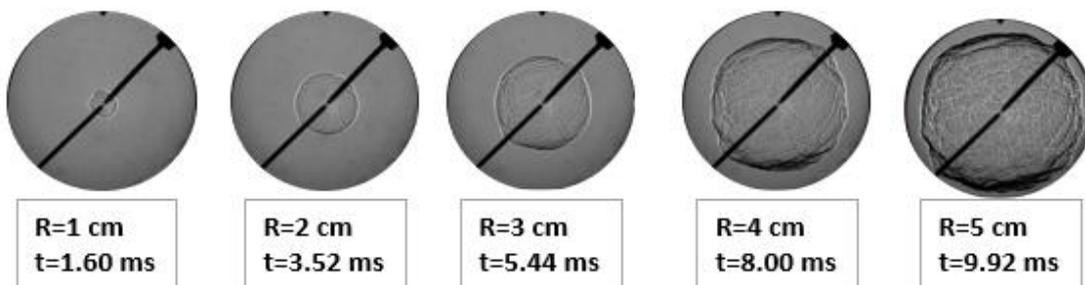


Fig 27. Evolución de la morfología de la llama. 80%H₂-20%CH₄-Fr0.8-P=1bar-T=40°C

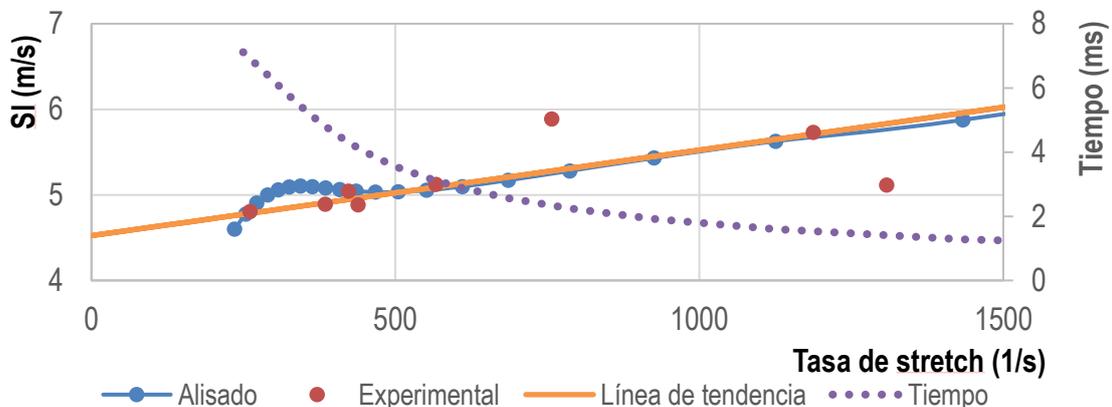


Fig 28. Velocidad de propagación (SI) y tiempo en función de la tasa de stretch. Cálculo de la velocidad de propagación "unstretched" (SI₀). 80%H₂-20%CH₄-Fr=0.8-P=1bar-T=40°C.

En la **figura 28**, destaca el descenso en la velocidad de propagación del frente de llama en los primeros instantes de la combustión para después volver a crecer de forma significativa. Esto puede deberse a que las perturbaciones del frente no se consideran celulares desde el principio, sino que son inestabilidades que crecen hasta que la velocidad de propagación del frente de llama es superior a la tasa de crecimiento de las perturbaciones y se fragmentan, multiplicando su número y creando la estructura celular. Por tanto, este comportamiento encaja dentro del comportamiento del hidrógeno: puede hablarse de una mezcla de hidrógeno dominante, con un número de Lewis inferior a la unidad.

Cuando el porcentaje de hidrógeno se reduce del 80% al 50% ya existen más discrepancias respecto al comportamiento anterior. Para este supuesto se ha elegido un experimento de 50% H_2 -50% CH_4 -aire a $Fr=1$, $P=1$ bar y $T=40^\circ C$. Como se puede observar en la **figura 29** la evolución del radio es mucho más lenta que cuando se trata de llamas con un porcentaje dominante de hidrógeno.

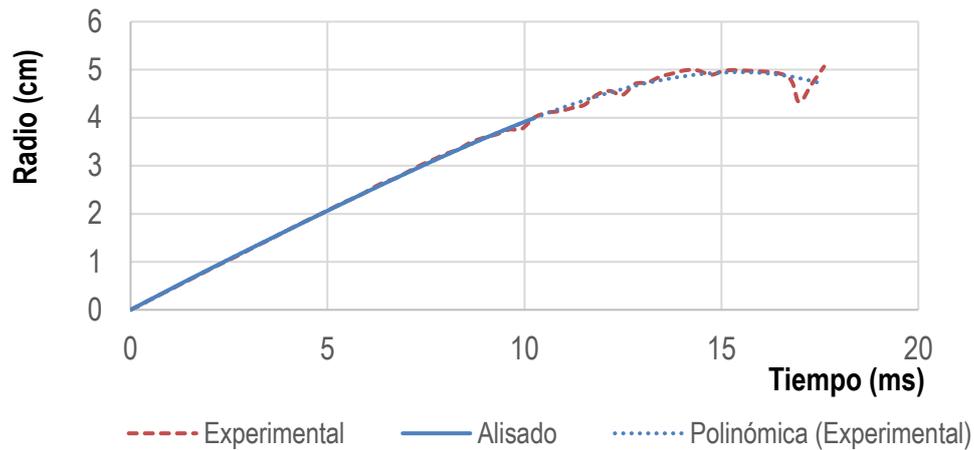


Fig 29. Evolución del radio del frente de llama frente al tiempo. 50% H_2 -50% CH_4 - $Fr=1$ - $P=1$ bar- $T=40^\circ C$.

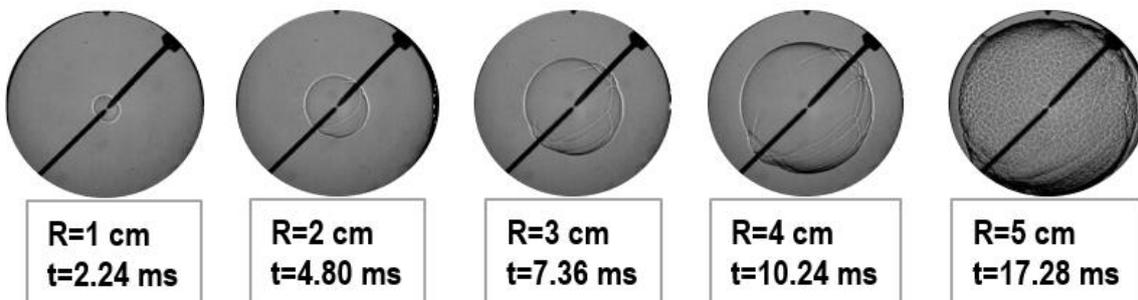


Fig 30. Evolución de la morfología de la llama. 50% H_2 -50% CH_4 - $Fr=1$ - $P=1$ bar- $T=40^\circ C$

En las imágenes de evolución del frente de llama representadas en la **figura 30**, se puede observar con claridad que la llama comienza siendo completamente lamiar, con pequeñas inestabilidades y grietas en su superficie que se propagan. Una vez que la llama pasa de un radio entre 4 y 5 cm, la velocidad de propagación de las grietas aumenta, se fragmentan y se multiplican, dando lugar a un frente de llama completamente celular.

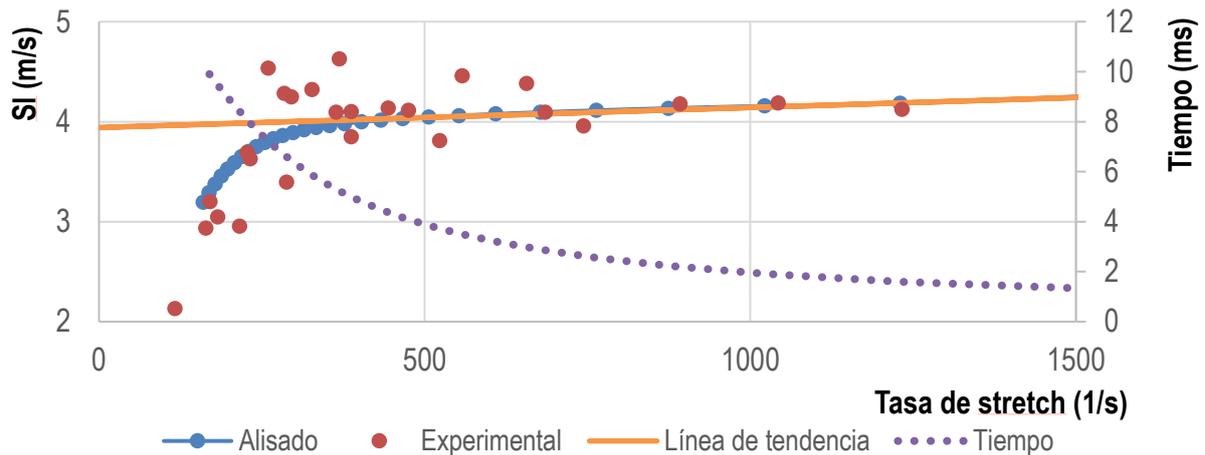


Fig 31. Velocidad de propagación (SI) y tiempo en función de la tasa de stretch. Cálculo de la velocidad de propagación “unstretched” (SI0). 50%H₂-50%CH₄-Fr=1-P=1bar-T=40°C.

En la **figura 31** se representa la variación de la velocidad de propagación del frente de llama y el tiempo en función de la tasa de stretch. Existe una primera zona de la combustión donde la velocidad se mantiene relativamente constante y a partir de la cual se obtiene la velocidad “unstretched” SI0. Una segunda parte de la combustión, cerca del final, existe una disminución considerable de esta velocidad, posiblemente debido al inicio de la celularidad y el aumento de la tasa de crecimiento de las inestabilidades. La llama no es celular desde el inicio de la combustión (comportamiento típico del hidrógeno) ni totalmente laminar durante toda ella (comportamiento típico del metano), por lo que se categoriza en una zona intermedia denominada región de transición.

Por último, se ha elegido un experimento en el cual se reduce todavía más el porcentaje de hidrógeno en la mezcla, pasando de un 50% a un 20%. En este caso, se trata de una mezcla 20%H₂-80%CH₄-aire para Fr=0.8, P=1 bar y T=40°C. En la **figura 32** se muestra la evolución del radio del frente respecto al tiempo (todavía más lenta que la analizada anteriormente).

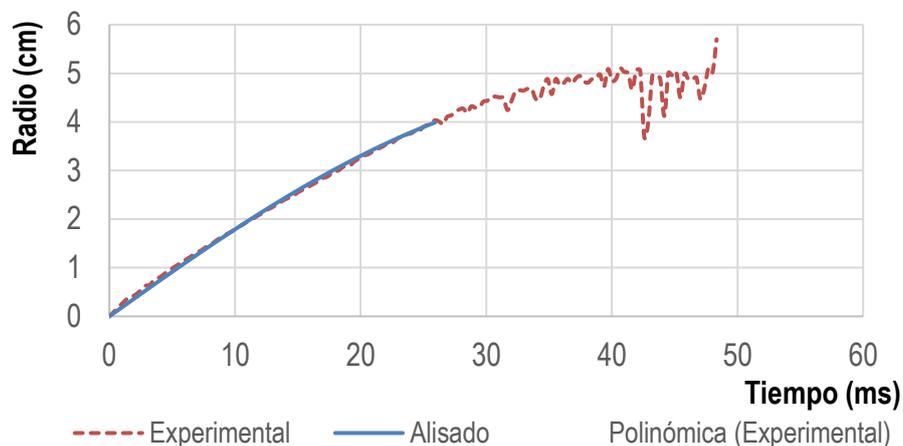


Fig 32. Evolución del radio del frente de llama frente al tiempo. 20%H₂-80%CH₄-Fr=0.8-P=1bar-T=40°C.

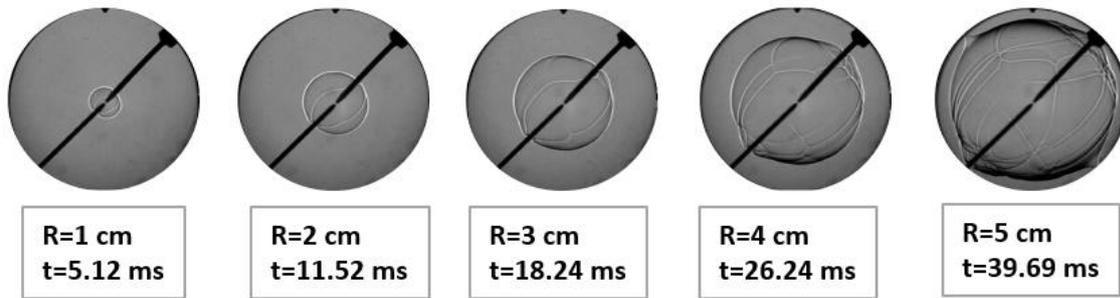


Fig 33. Evolución de la morfología de la llama. 20%H₂-80%CH₄-Fr=0.8-P=1bar-T=40°C

En este caso, **figura 33**, la llama inicialmente es laminar, aparecen unas inestabilidades que agrietan el frente de llama, pero no progresan, comportamiento similar al del metano: se trata de una llama laminar, con pequeñas perturbaciones en el frente de llama que aumentan de tamaño, pero con una tasa de multiplicación muy pequeña, por lo que no llega a conseguirse un arrugamiento del frente de llama celular típico de una mezcla de hidrógeno-aire.

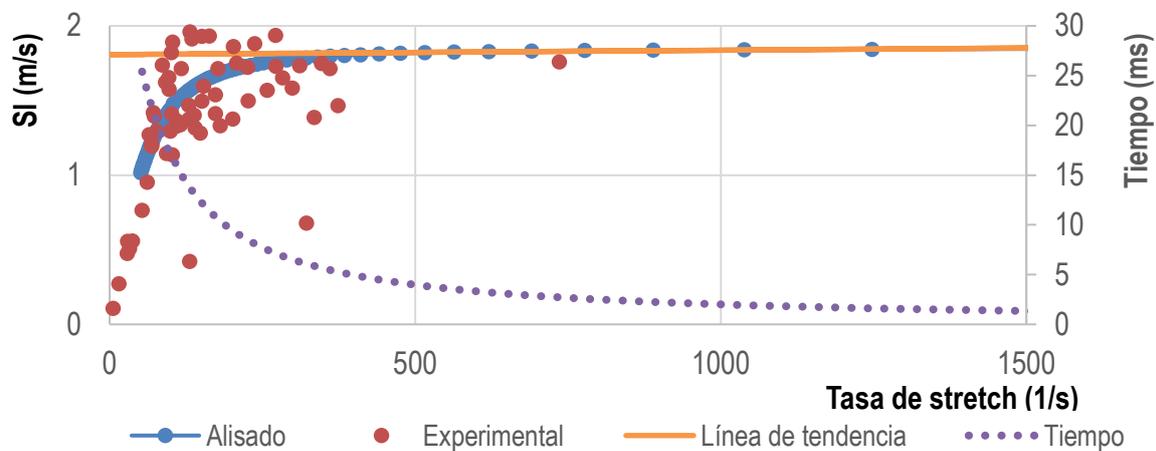


Fig 34. Velocidad de propagación (SI) y tiempo en función de la tasa de stretch. Cálculo de la velocidad de propagación “unstretched” (SI0). 20%H₂-80%CH₄-Fr=1-P=1bar-T=40°C.

En este caso, tal y como representa la **figura 34**, la velocidad de propagación de la llama se mantiene constante en los primeros instantes de la combustión (hasta, aproximadamente, unos 10 o 15 milisegundos) por lo que se ha tomado como referencia de cálculo de la velocidad de propagación “unstretched” (SI0). En la segunda mitad de la combustión, la velocidad de propagación del frente sufre un descenso, debido a esas perturbaciones que crecen en su superficie y se propagan, sin llegar a constituir un frente celular. En este caso, y como se ha indicado para casos de hidrocarburos pobres, el número de Lewis es superior a uno (comportamiento de metano dominante).

Por tanto, de este primer análisis se puede concluir que existen tres zonas principales en los experimentos realizados en función del porcentaje de hidrógeno en la mezcla: hidrógeno dominante, metano dominante y zona de transición. No se puede establecer con claridad qué porcentaje provoca el salto de una a otra zona, pero si se puede decir que nuestros experimentos se pueden categorizar en estas regiones, tal y como indica la **figura 35**.



Fig 35. Clasificación de los experimentos realizados en los tres regímenes principales.

4.2 Estudio del efecto del dosado relativo

Una vez que se han categorizado todos los experimentos realizados en función de su comportamiento, es importante conocer como varían los parámetros de la combustión en función del dosado relativo para cada mezcla de hidrógeno-metano-aire.

La variación de dosado relativo en este proyecto se ha fijado entre 0.5 y 1. Conocer como varían los parámetros con el dosado relativo es muy importante para determinar cuáles son las condiciones óptimas de funcionamiento del motor, así como para establecer un dosado lo suficientemente pequeño para garantizar una buena combustión y poder hablar en términos de ahorro de combustible.

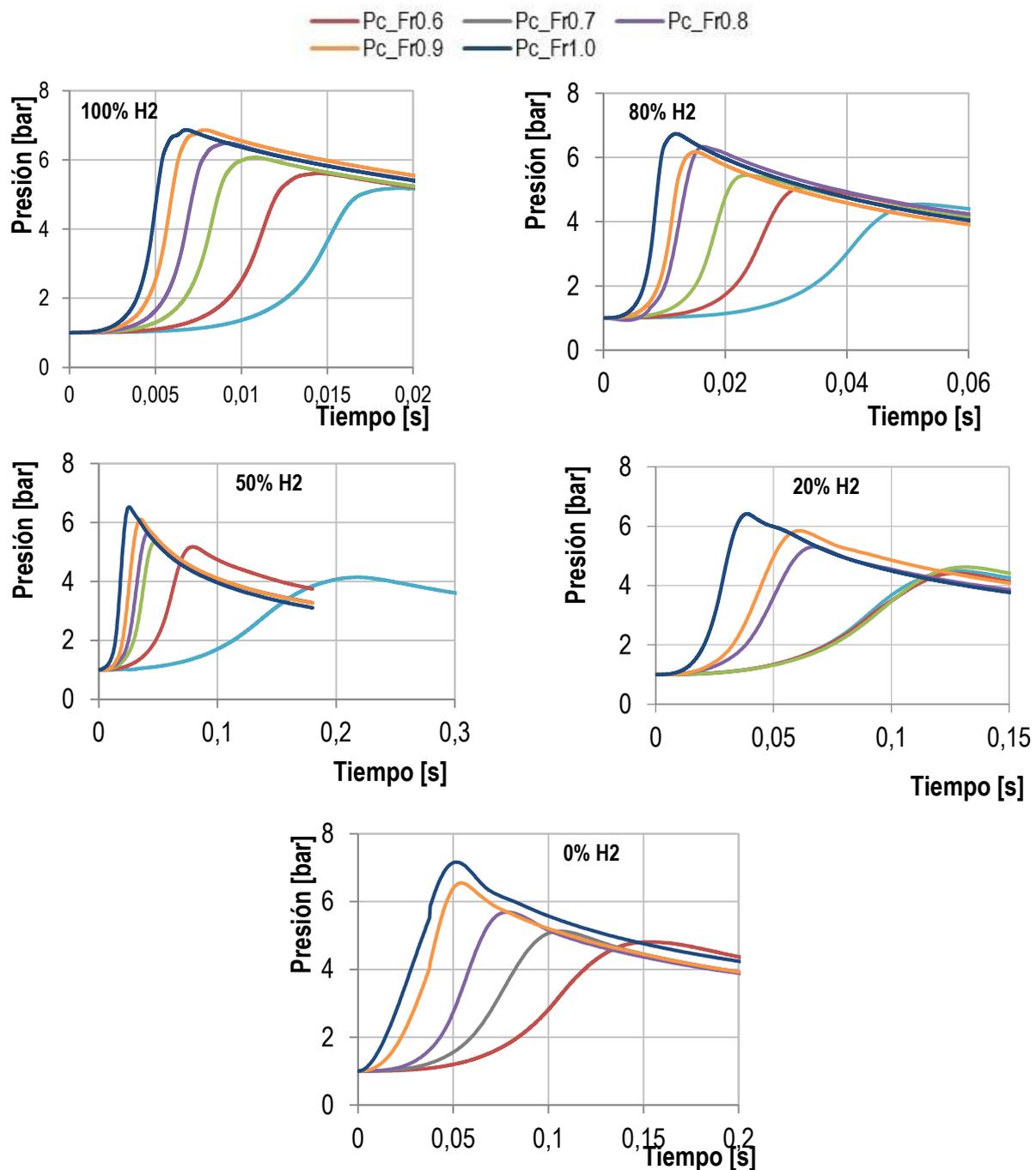
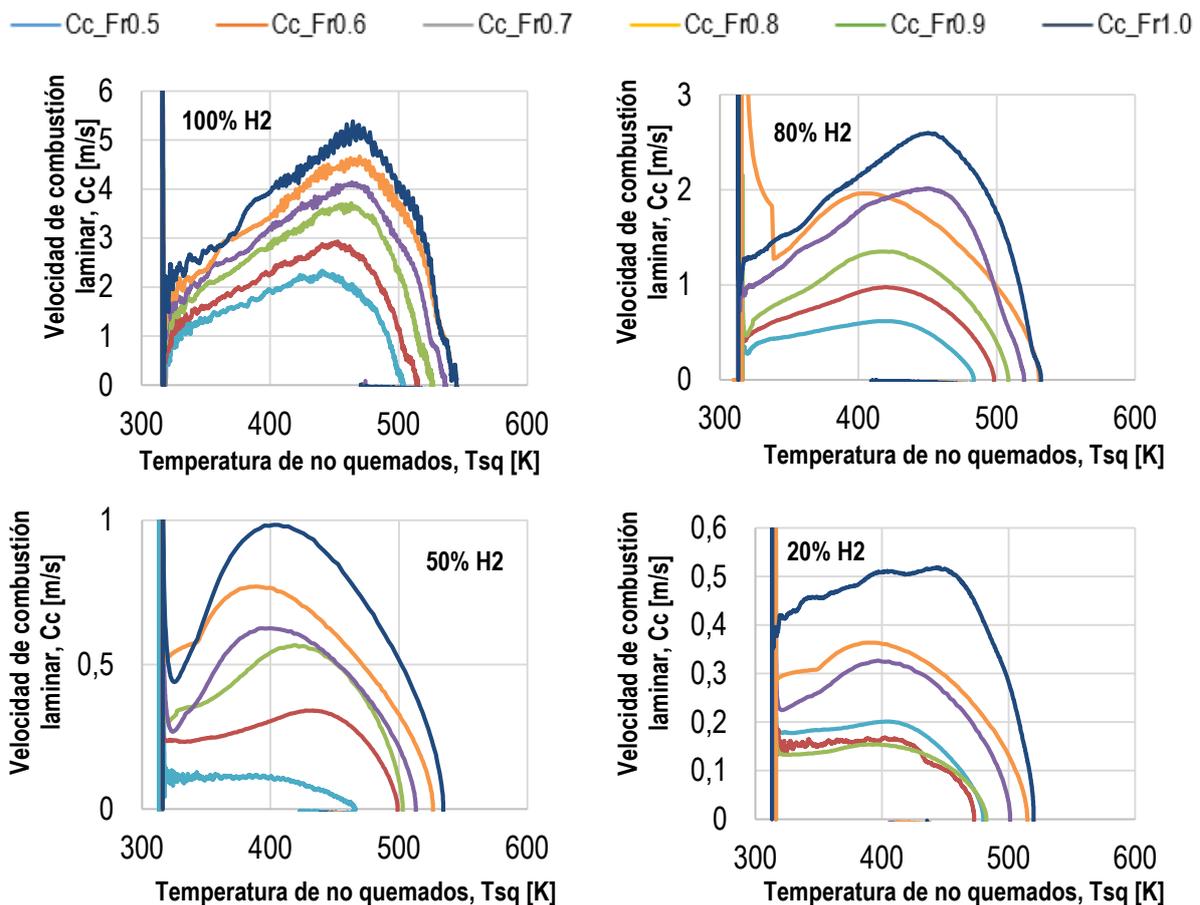


Fig 36. Evolución de la presión instantánea y la fracción de masa quemada en función del tiempo. 100%H₂-80%H₂-50%H₂-20%H₂-100%CH₄ respectivamente para una variación de Fr entre 0.5 y 1, p=1 bar, T=315 K.

Una de las ventajas del hidrógeno, tal y como se ha explicado en el **capítulo 2**, es la capacidad para reducir el dosado necesario en la mezcla y aumentar la velocidad de combustión. Es por lo que, al utilizar este combustible, siempre se buscan dosados inferiores al estequiométrico (dosados pobres). Esto permite un ahorro de combustible lo suficientemente interesante como para ser aplicado en motores de automoción, con una reducción de emisión de contaminantes y una posible descarbonización del combustible. Lo contrario sucede con el metano puro, que tiende a ofrecer unas condiciones óptimas de la combustión con dosados superiores al estequiométrico (dosados ricos).

El conjunto de gráficas representado en la **figura 36** simboliza, en línea continua, la evolución de la presión instantánea registrada en el interior de la cámara de combustión por medio de los captadores. Tras su observación es posible concluir que, a medida que aumenta la fracción de hidrógeno en la mezcla, la presión máxima se alcanza en un menor periodo de tiempo, produciéndose una variación de presión excesivamente brusca en muy poco tiempo. Por otro lado, analizando la tendencia de las curvas de trasladarse hacia la esquina superior izquierda a medida que va aumentando el dosado relativo para cada uno de los porcentajes presentados, se puede concluir que la presión instantánea máxima alcanzada es mayor y la combustión más rápida.

En la **figura 37** se expone la evolución de la velocidad de combustión laminar C_c (m/s) obtenida a partir del registro de la presión instantánea en el interior de la cámara de combustión, en función de la temperatura de la masa no quemada, un parámetro muy habitual a la hora de caracterizar la combustión, denominado T_{sq} (K). Por lo general, la velocidad de combustión laminar tiende a crecer a medida que aumenta el porcentaje de hidrógeno y el dosado relativo, por lo que los mayores valores de velocidad de combustión laminar se obtienen para mezclas 100% H_2 -aire a dosado relativo 1. Cabe resaltar la aparición de mayores oscilaciones en la medida con el aumento del porcentaje de hidrógeno en la mezcla: esto puede indicarnos una celularidad en la llama que provoca inestabilidades a la hora del registro de la presión, una mayor presión instantánea alcanzada en un corto periodo de tiempo que conlleva a un aumento del ruido en la medida



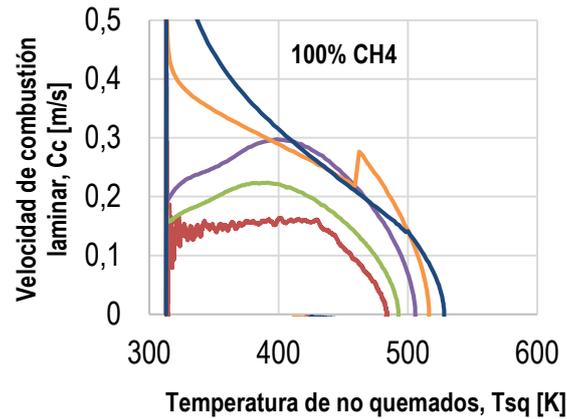
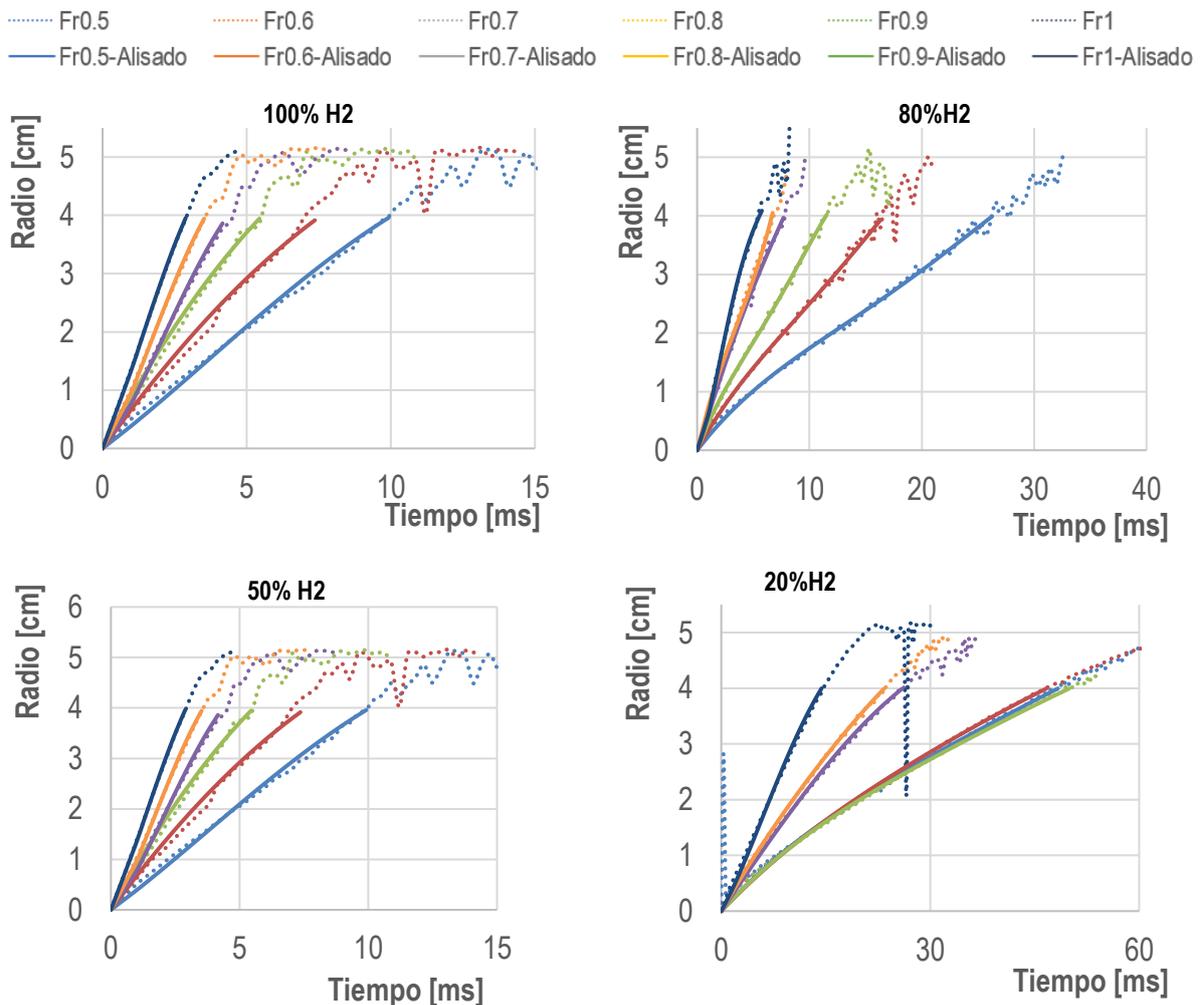


Fig 37. Evolución de la velocidad de combustión laminar en función de la temperatura de la masa no quemada. 100%H2-80%H2-50%H2-20%H2-100%CH4 respectivamente para una variación de Fr entre 0.5 y 1, 1 bar de presión y 315 K de temperatura inicial.

A continuación, se presentan y analizan los resultados del método óptico. En la **figura 38** se representa la variación del radio respecto al tiempo para los porcentajes de 100%-80%-50%-20%-0% de hidrógeno en la mezcla (mismos porcentajes evaluados anteriormente). Tal y como muestran las gráficas, y acorde a los resultados anteriores, la velocidad de crecimiento del frente de llama es superior cuanto mayor es el porcentaje de hidrógeno añadido al metano y el aumento del dosado relativo.



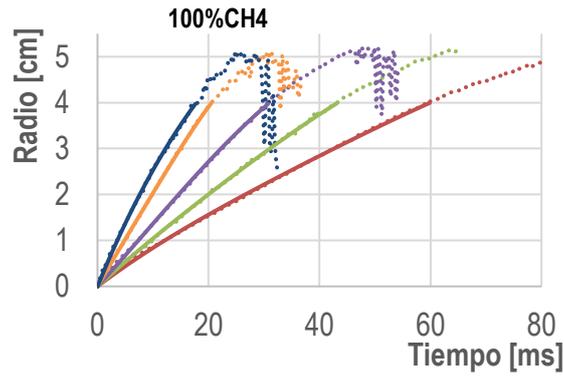


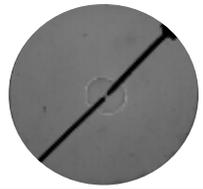
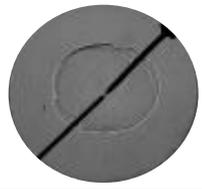
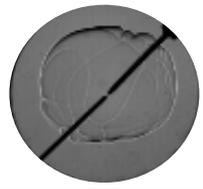
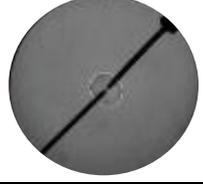
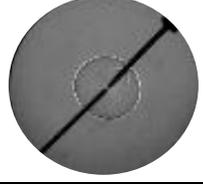
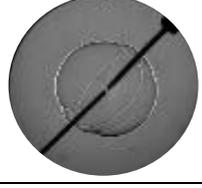
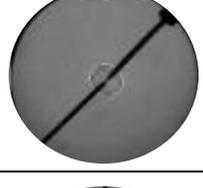
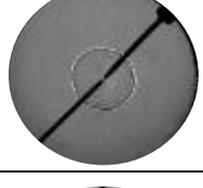
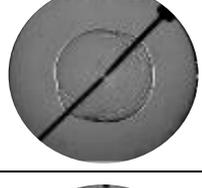
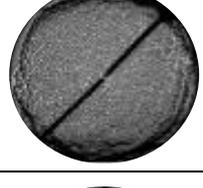
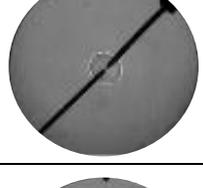
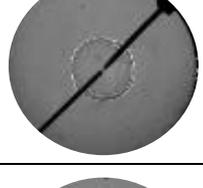
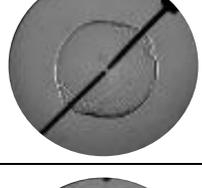
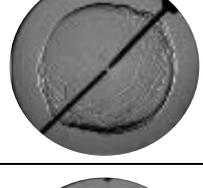
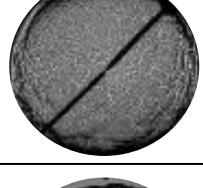
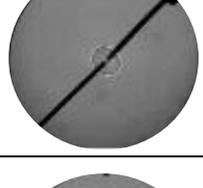
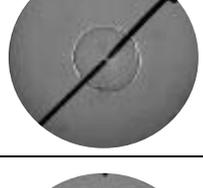
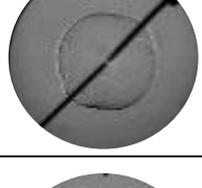
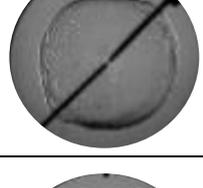
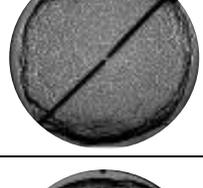
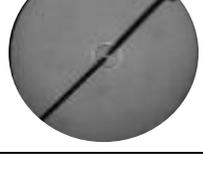
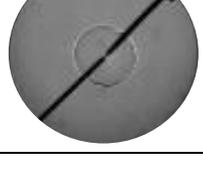
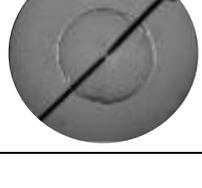
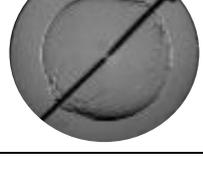
Fig 38. Evolución del radio del frente de llama frente al tiempo. 100% H_2 -80% H_2 -50% H_2 -20% H_2 -100% CH_4 respectivamente para una variación de Fr entre 0.5 y 1.

A continuación, en las **tablas 3 a 5**, se presenta en forma de matriz, la morfología del frente de llama para cada uno de los porcentajes de hidrógeno en la mezcla. Las matrices correspondientes al resto de porcentajes de hidrógeno pueden observarse en **las tablas 14 y 15** en anexo.

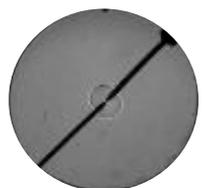
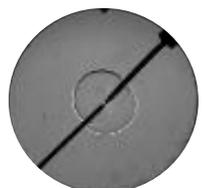
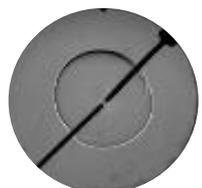
Tabla 3. Morfología del frente de llama para una mezcla 100% hidrógeno-aire- $P=1\text{bar}$ - $T=40^\circ\text{C}$ - $Fr=0.5-1$.

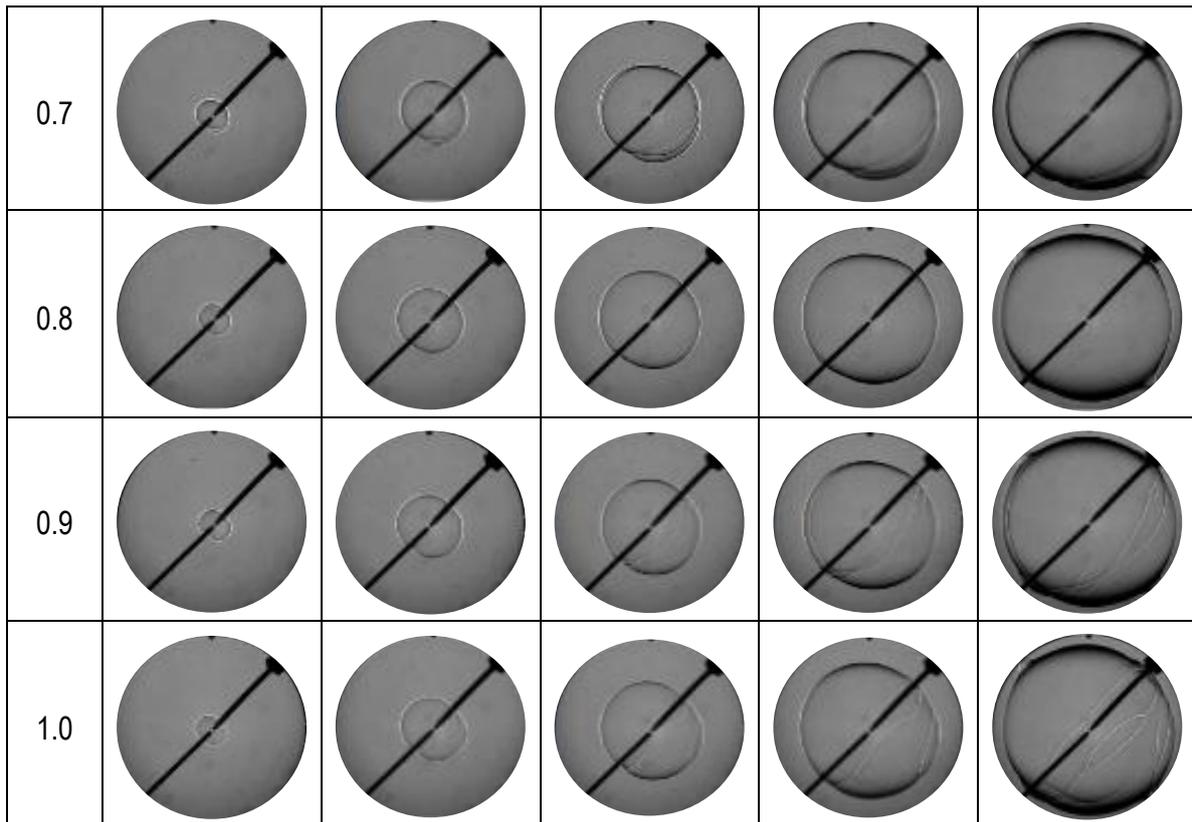
Fr/R	1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm
0.5					
0.6					
0.7					
0.8					
0.9					
1.0					

**Tabla 4. Morfología del frente de llama para una mezcla 50% hidrógeno-50%metano-aire-
P=1bar-T=40°C-Fr=0.5-1.**

Fr/R	1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm
0.5					
0.6					
0.7					
0.8					
0.9					
1.0					

**Tabla 5. Morfología del frente de llama para una mezcla 100%metano-aire-P=1bar-T=40°C-
Fr=0.5-1.**

Fr/R	1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm
0.6					



Como se puede apreciar en la **tabla 3** relativa a los experimentos de hidrógeno-aire, hay un comportamiento claramente definido de aumento de la celularidad en la llama a medida que disminuye el dosado relativo de la mezcla. Este comportamiento corresponde a números de Lewis inferiores a la unidad. Por otro lado, en la **tabla 5** correspondiente a experimentos realizados con metano-aire, se pueden observar llamas completamente laminares, pero, a medida que aumenta el dosado relativo, aparecen mayores perturbaciones en la superficie del frente (sin llegar a propagarse y generar celularidad).

El comportamiento de los experimentos con un 80% de hidrógeno y 20% de metano en aire (**tabla 0.3 Anexo**), se agrupan dentro del comportamiento del hidrógeno: el metano apenas tiene una clara influencia en la combustión. Por otro lado, los experimentos opuestos (20% de hidrógeno y 80% de metano en aire) (**tabla 0.4 Anexo**), se agrupan dentro del comportamiento del metano: el hidrógeno añadido tiende a generar mayores perturbaciones en el frente, pero nunca saliendo de un estado laminar. Por último, los experimentos de 50% de hidrógeno y 50% de metano en aire (**tabla 4**) se clasifican dentro de la conocida como “región de transición” explicada anteriormente: no siguen ninguna tendencia clara, no hay una dominación clara ni del metano ni del hidrógeno en la combustión.

Una vez conocida la morfología del radio para cada porcentaje de hidrógeno en función del dosado relativo, es interesante conocer la evolución de la velocidad de propagación del frente de llama (SI) en función de la tasa de *stretch* (α), tal y como representa la **figura 39**. Esta velocidad crece con la misma tendencia que la velocidad de combustión comentada anteriormente: para mayores dosados relativos y mayor porcentaje de hidrógeno en la mezcla, los valores aumentan significativamente. En los experimentos realizados para una mezcla de hidrógeno en metano del 20%, se observa cómo no existe una diferenciación de esta velocidad hasta alcanzar un dosado relativo de 0.8.

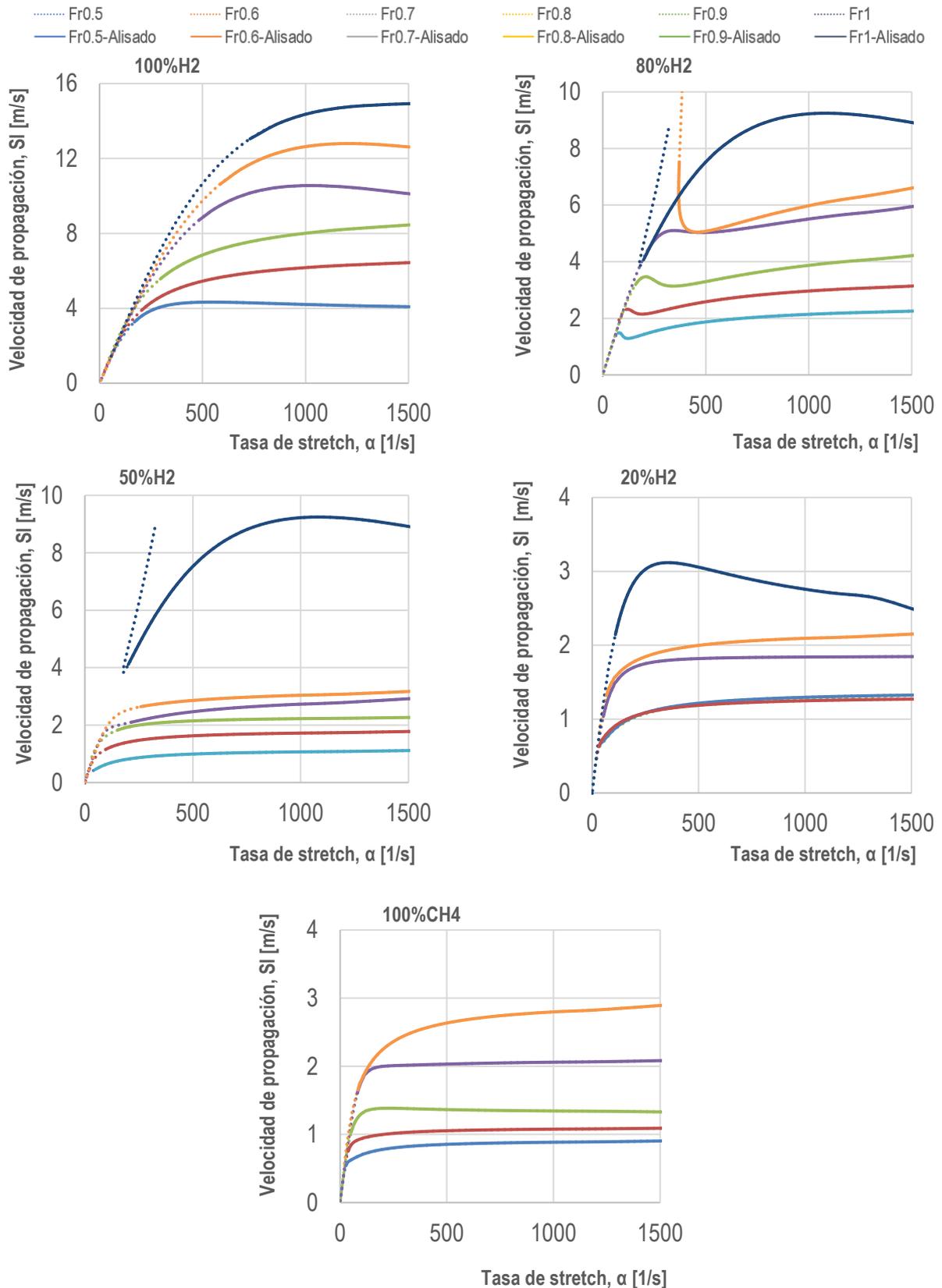


Fig 39. Evolución de la velocidad de propagación del frente de llama frente a la tasa de stretch. 100%H2-80%H2-50%H2-20%H2-100%CH4 respectivamente para una variación de Fr entre 0.5 y 1, P=1 bar, T=40°C.

Por último, una vez obtenida la evolución de la velocidad de propagación de la llama frente a la tasa de stretch y se ha visto cómo influye el “stretch” en la evolución de la llama, se presentan los resultados de

la velocidad de propagación “unstretched” (S_{I0}) obtenidos a partir de una línea de tendencia con S_I (presentada anteriormente). En la **figura 40** se puede concluir que, esta velocidad sin efecto del stretch de la llama, tiene una clara tendencia a aumentar a medida que aumenta el porcentaje de hidrógeno en la mezcla, así como el dosado relativo.

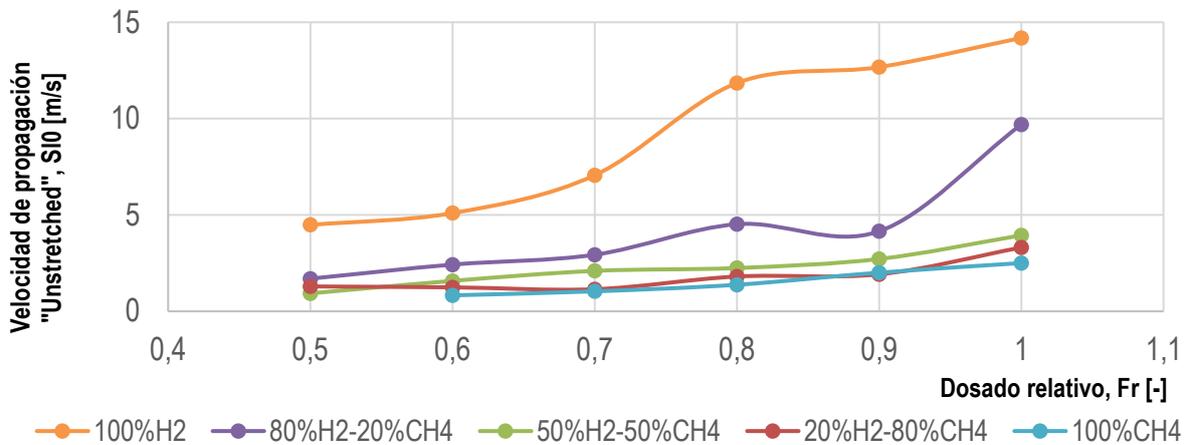
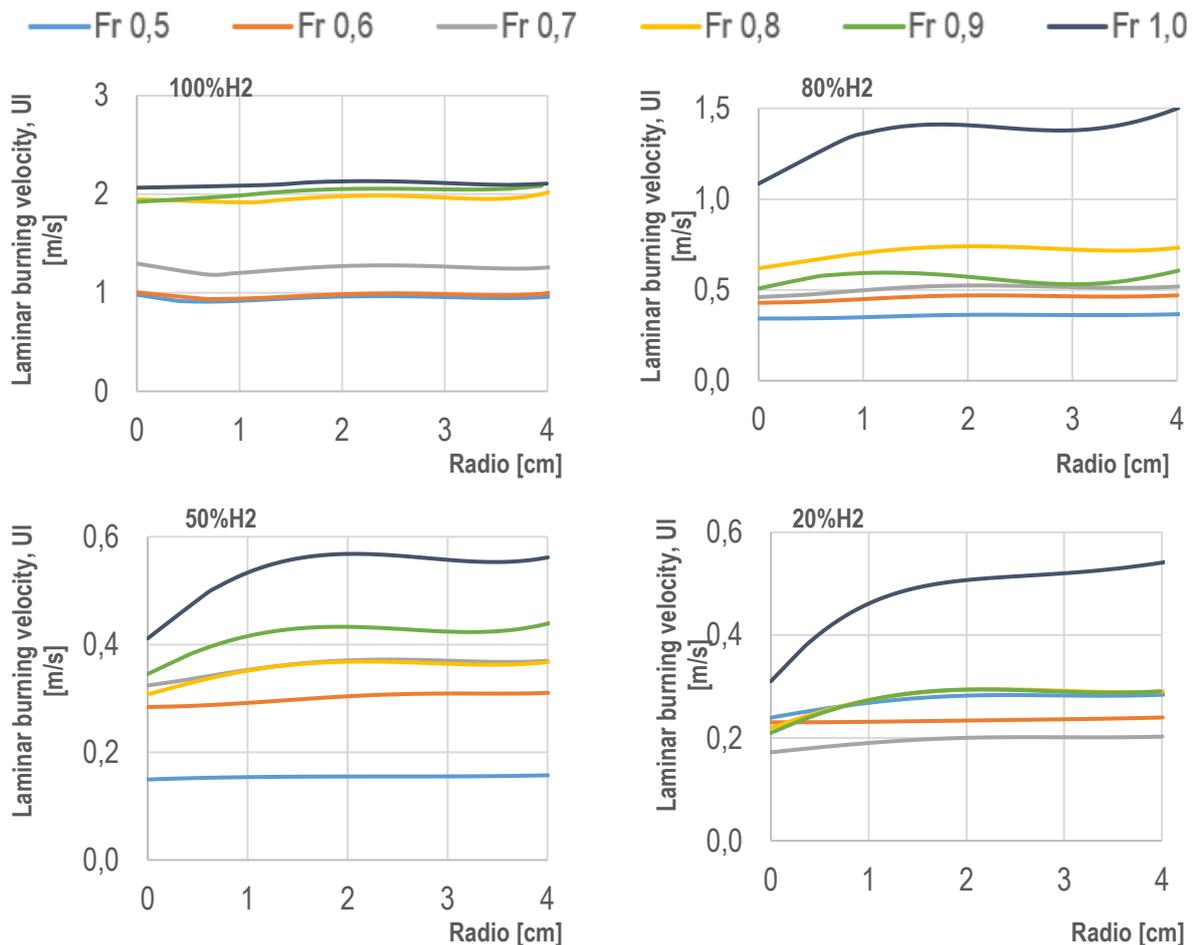


Fig 40. Evolución de la velocidad de propagación laminar “unstretched” en función del dosado relativo de la mezcla. 100%H2-80%H2-50%H2-20%H2-100%CH4 respectivamente para una variación de Fr entre 0.5 y 1, P=1 bar, T=40°C.

Por último, para este primer análisis de variación del frente de llama en función del dosado relativo, es necesario representar la velocidad de combustión laminar (laminar burning velocity, U_l) obtenida por el método del registro de la presión instantánea, combinando el cociente de densidades de la masa quemada y sin quemar, así como la velocidad de propagación sin stretch (S_{I0}). Como representa la **figura 41**, esta velocidad es mayor cuanto mayor sea el dosado relativo de la mezcla.



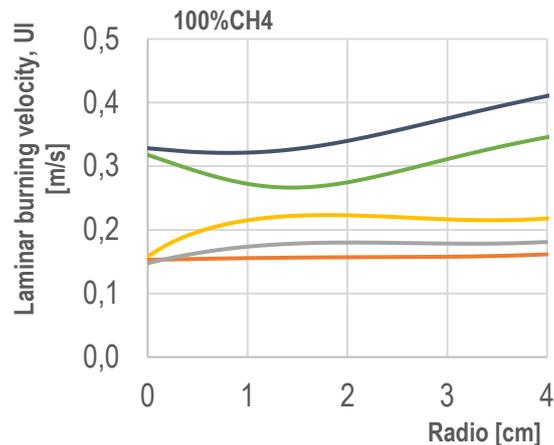


Fig 41. Evolución de la velocidad de combustión laminar (U_l) en función del radio del frente de llama. 100% H_2 -80% H_2 -50% H_2 -20% H_2 -100% CH_4 respectivamente para una variación de Fr entre 0.5 y 1, $P=1$ bar, $T=40^\circ C$.

Los diferentes puntos obtenidos para la velocidad de combustión laminar "Unstretched" obtenida por el método de la presión y derivados de la figura anterior (**figura 41**) se representan en la **figura 42**.

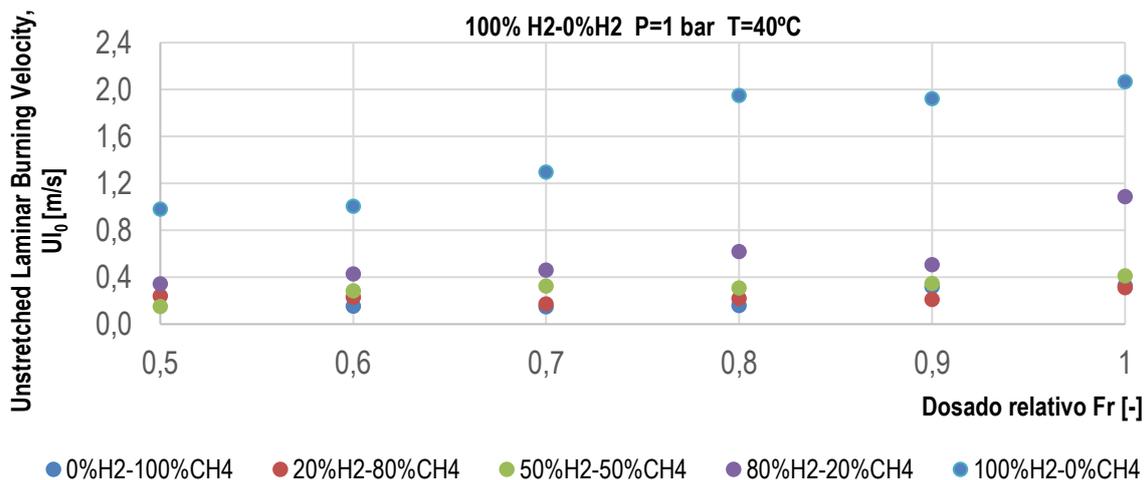


Fig 42. Velocidad de combustión laminar "unstretched", U_{l0} [m/s] en función del dosado relativo Fr para distintos porcentajes de hidrógeno.

4.3 Estudio del efecto de la presión y temperatura

En el epígrafe anterior se han presentado gráficas y tablas que representan la evolución de los parámetros que definen la combustión en función del dosado relativo en la mezcla, teniendo en cuenta todos los porcentajes de hidrógeno. Otros factores que también pueden resultar interesantes a la hora de caracterizar la combustión son la presión y la temperatura. Analizar como varían los parámetros en función de estos factores es determinante para conocer el comportamiento de la combustión en distintos escenarios.

En primer lugar, se presentan los resultados obtenidos a partir del registro de la presión instantánea en el interior de la cámara para después presentar aquellos datos obtenidos del análisis del post-procesado del registro óptico de la combustión.

En la **figura 43** se presenta la evolución de la presión instantánea en función del dosado relativo para cada uno de los porcentajes estudiados. Como resultado se obtienen mayores presiones cuanto mayor es el porcentaje de hidrógeno en la mezcla, así como la presión inicial de llenado de la cámara de combustión.

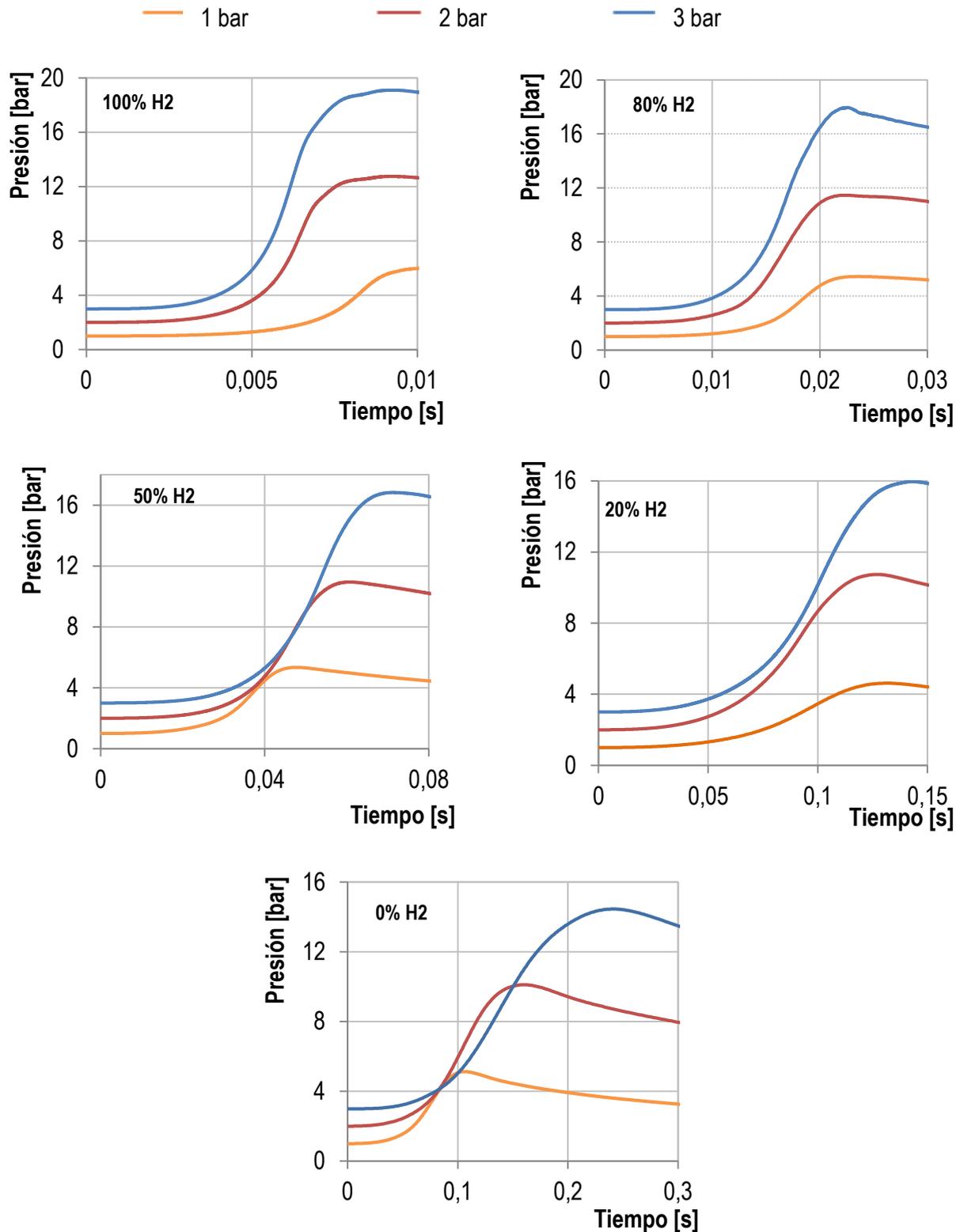


Fig 43. Evolución de la presión instantánea en función del tiempo. 100% H_2 -80% H_2 -50% H_2 -20% H_2 -100% CH_4 respectivamente para una variación de presión inicial entre 1 y 3 bar, 315 K de temperatura y 0.7 de dosado.

A continuación (**figura 44**), se presentan las gráficas de la velocidad de combustión (C_c) en función de la temperatura de la masa no quemada (T_{sq}). Esta velocidad también aumenta a medida que aumenta el porcentaje de hidrógeno en la mezcla. Por otro lado, se observa una tendencia diferente entre los experimentos correspondientes a un comportamiento de hidrógeno dominante (100% H_2 y 80% H_2), que alcanzan mayores velocidades a medida que aumenta la presión, y los experimentos correspondientes

a un comportamiento de metano dominante (100% CH₄ y 20% H₂), donde se observa lo contrario. En este caso, los experimentos catalogados dentro de la zona de transición (50%H₂) presentan un comportamiento similar al de metano dominante.

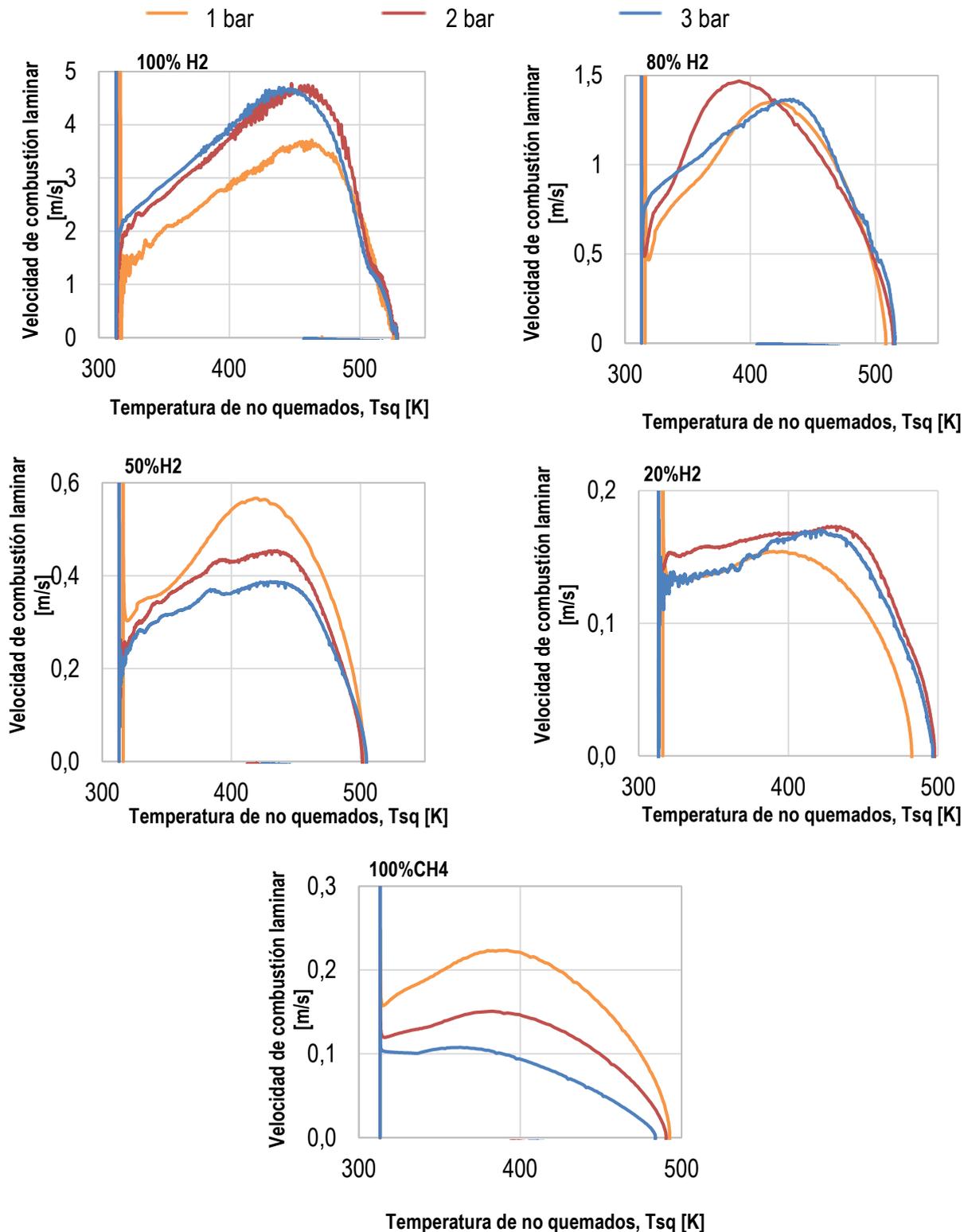


Fig 44. Evolución de la velocidad de combustión laminar en función de la temperatura de la masa no quemada. 100%H₂-80%H₂-50%H₂-20%H₂-100%CH₄ respectivamente para una variación de presión inicial entre 1 y 3 bar, T=40°C, Fr=0.7.

Es importante conocer cómo varía el radio del frente de llama en función de la presión inicial de llenado de la cámara de combustión. Los resultados se observan en la **figura 45**, donde se puede apreciar de

forma muy clara como la presión no tiene ningún efecto claro sobre los experimentos catalogados de hidrógeno dominante, mientras sí que presenta un efecto acelerador sobre los experimentos de metano dominante y zona de transición (50%H₂).

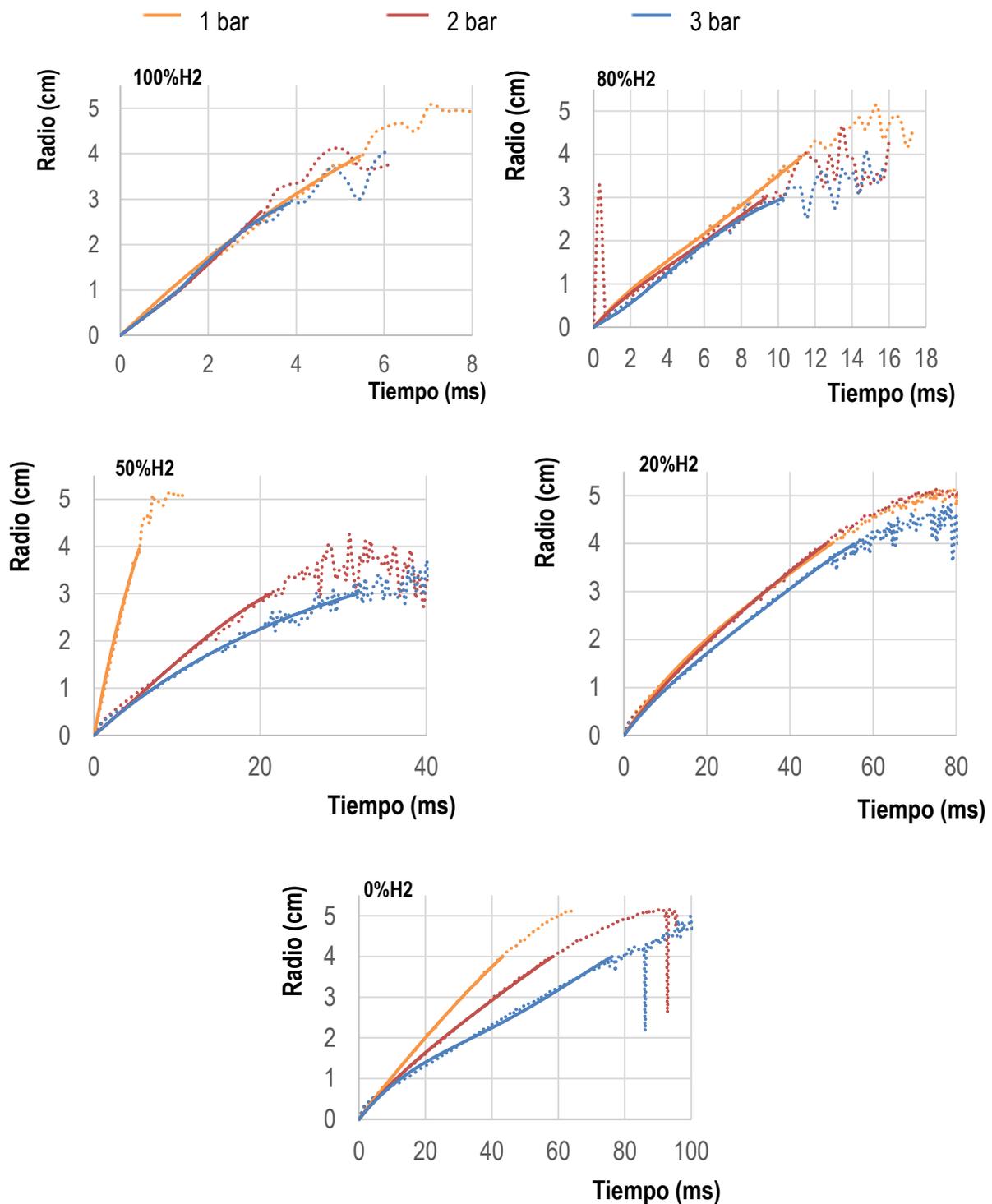


Fig 45. Evolución del radio del frente de llama frente al tiempo. 100%H₂-80%H₂-50%H₂-20%H₂-100%CH₄ respectivamente para una variación de presión inicial entre 1 y 3 bar, 315 K de temperatura y 0.7 de dosado.

A continuación, se presentan varias tablas (**tabla 6 a 8**) que describen la variación de la morfología del frente de llama en función de la presión inicial para mezclas 100% hidrógeno, 100% metano y 50%hidrógeno (cada una correspondiente a una región diferente). Estas imágenes ayudan a entender

de forma más clara la imagen anterior de variación del radio frente al tiempo. El resto de los porcentajes se encuentran en el **Anexo 3**.

Tabla 6. Morfología del frente de llama para una mezcla 100%hidrógeno-aire-Fr0.7-T=40°C-P=1-3 bar.

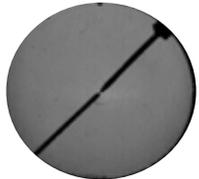
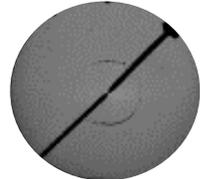
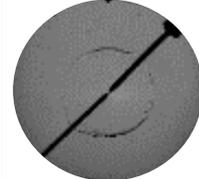
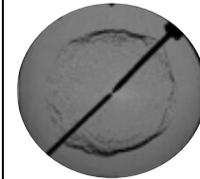
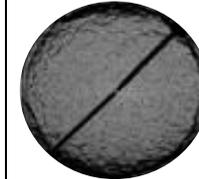
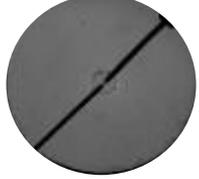
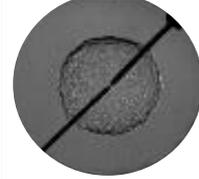
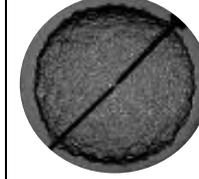
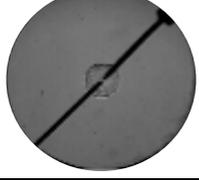
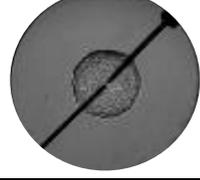
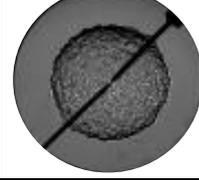
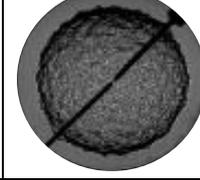
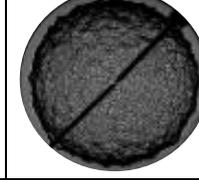
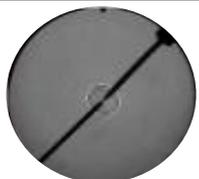
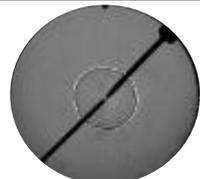
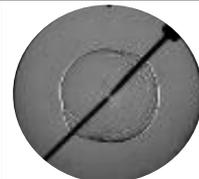
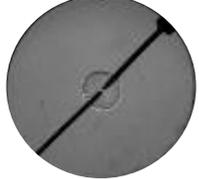
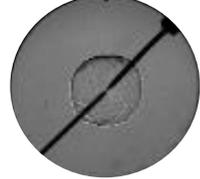
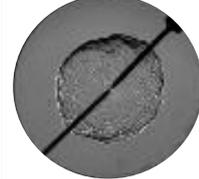
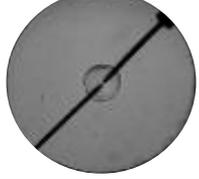
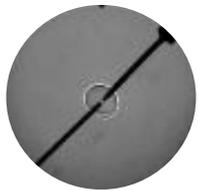
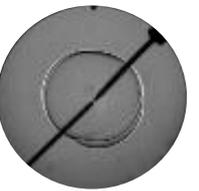
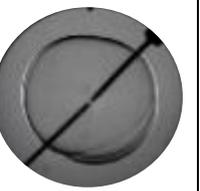
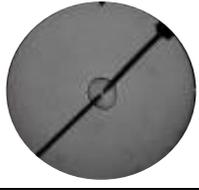
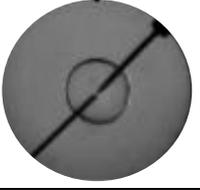
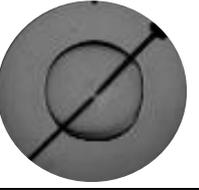
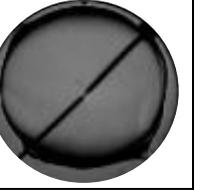
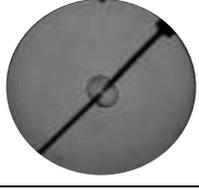
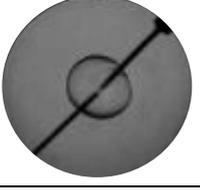
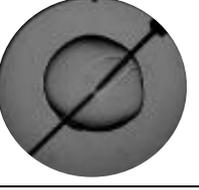
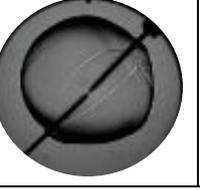
P/R	1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm
1 bar					
2 bar					
3 bar					

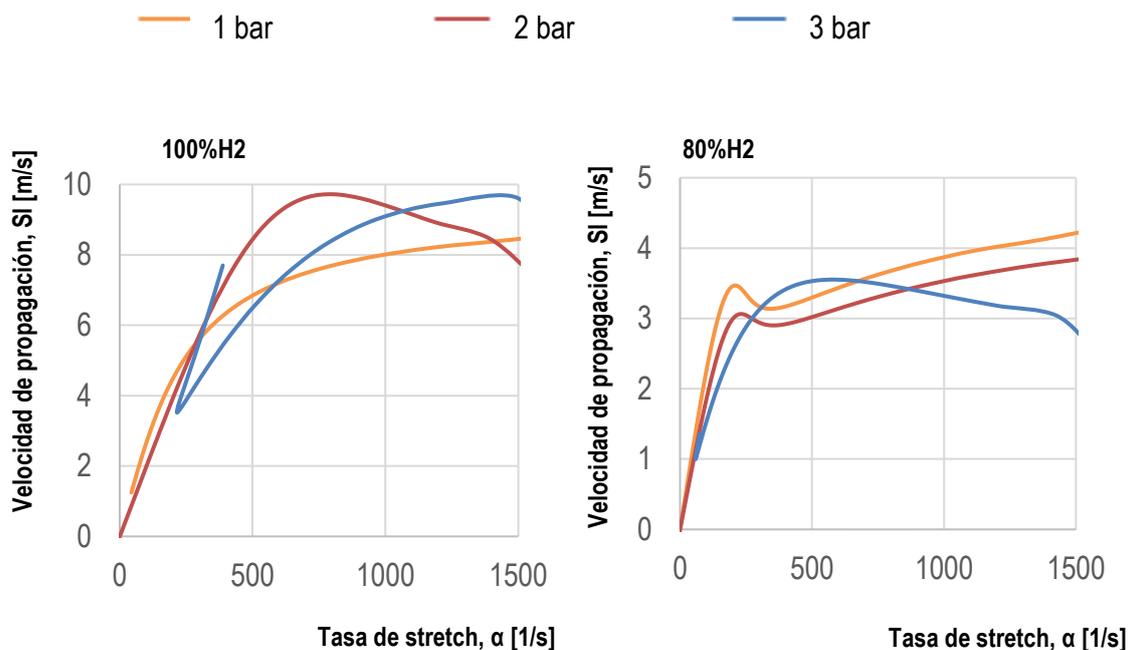
Tabla 7. Morfología del frente de llama para una mezcla 50%hidrógeno-50%metano-aire-Fr0.7-T=40°C-P=1-3 bar.

P/R	1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm
1 bar					
2 bar					
3 bar					

**Tabla 8. Morfología del frente de llama para una mezcla 100%metano-aire-Fr0.7-T=40°C-
P=1-3 bar.**

P/R	1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm
1 bar					
2 bar					
3 bar					

Una vez conocido cómo evoluciona el radio respecto al tiempo, se puede obtener la variación de la velocidad de propagación de la llama en función de la tasa de *stretch*. La **figura 46** muestra esta variación de la misma forma que el radio: los experimentos de hidrógeno dominante no tienen una tendencia clara en función de la presión inicial, al contrario que los experimentos en la zona de transición y de metano dominante, donde esta velocidad decrece a medida que aumenta la presión inicial de llenado.



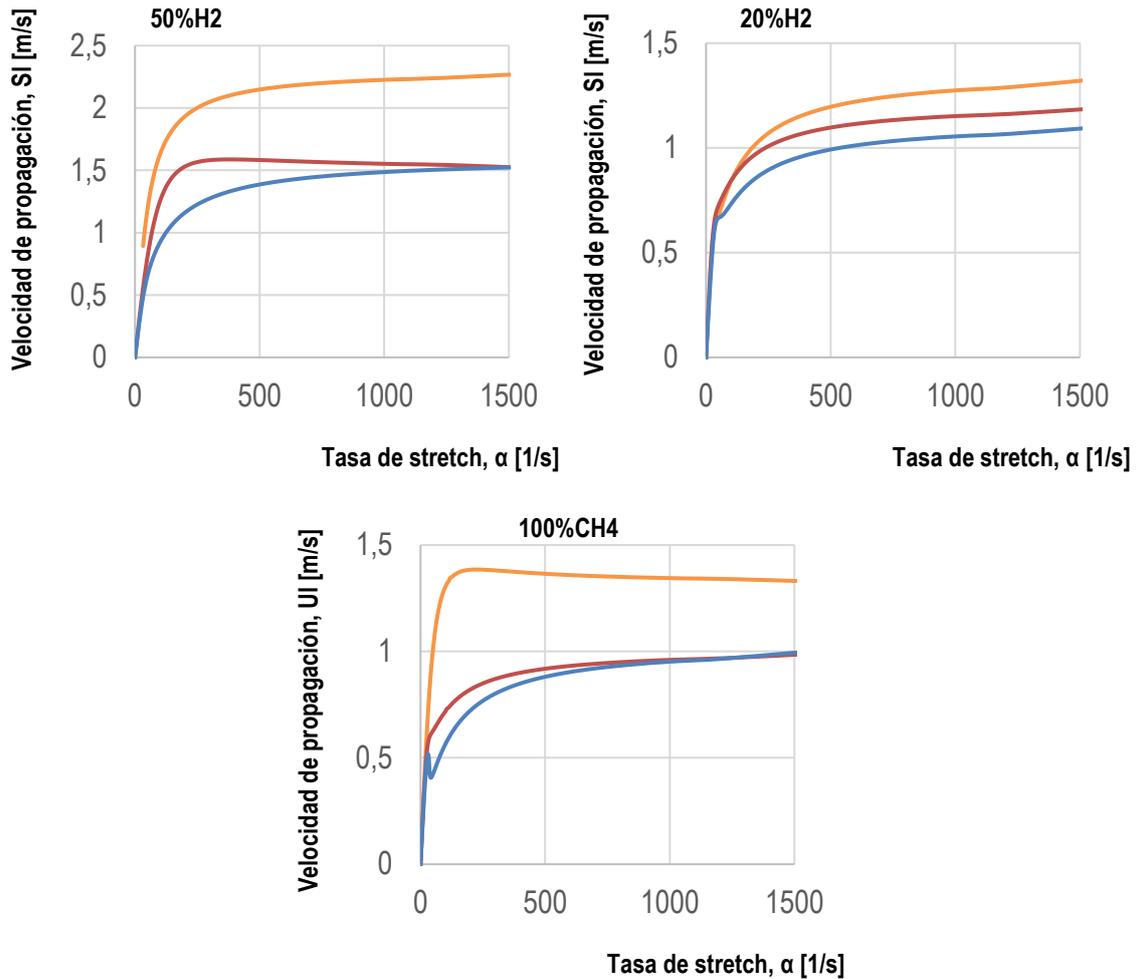


Fig 46. Evolución de la velocidad de propagación del frente de llama frente a la tasa de stretch. 100%H2-80%H2-50%H2-20%H2-100%CH4 respectivamente para una variación de presión inicial entre 1 y 3 bar.

La **figura 47** representa la variación de la velocidad de propagación laminar “unstretched” (S_{I0}) para los 3 puntos de presión elegidos: 1 bar, 2 bar y 3 bar, obteniendo como conclusión un aumento de ésta a medida que aumenta el porcentaje de hidrógeno en la mezcla, pero manteniéndose prácticamente constante (a excepción del punto de presión 2 bar para la mezcla de 100% de hidrógeno-aire) con la variación de la presión inicial.

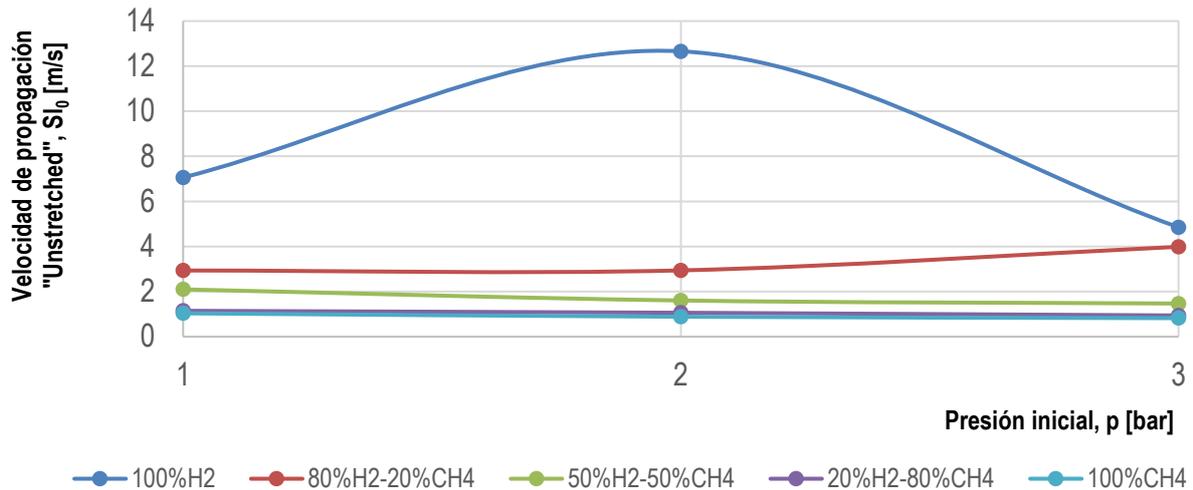
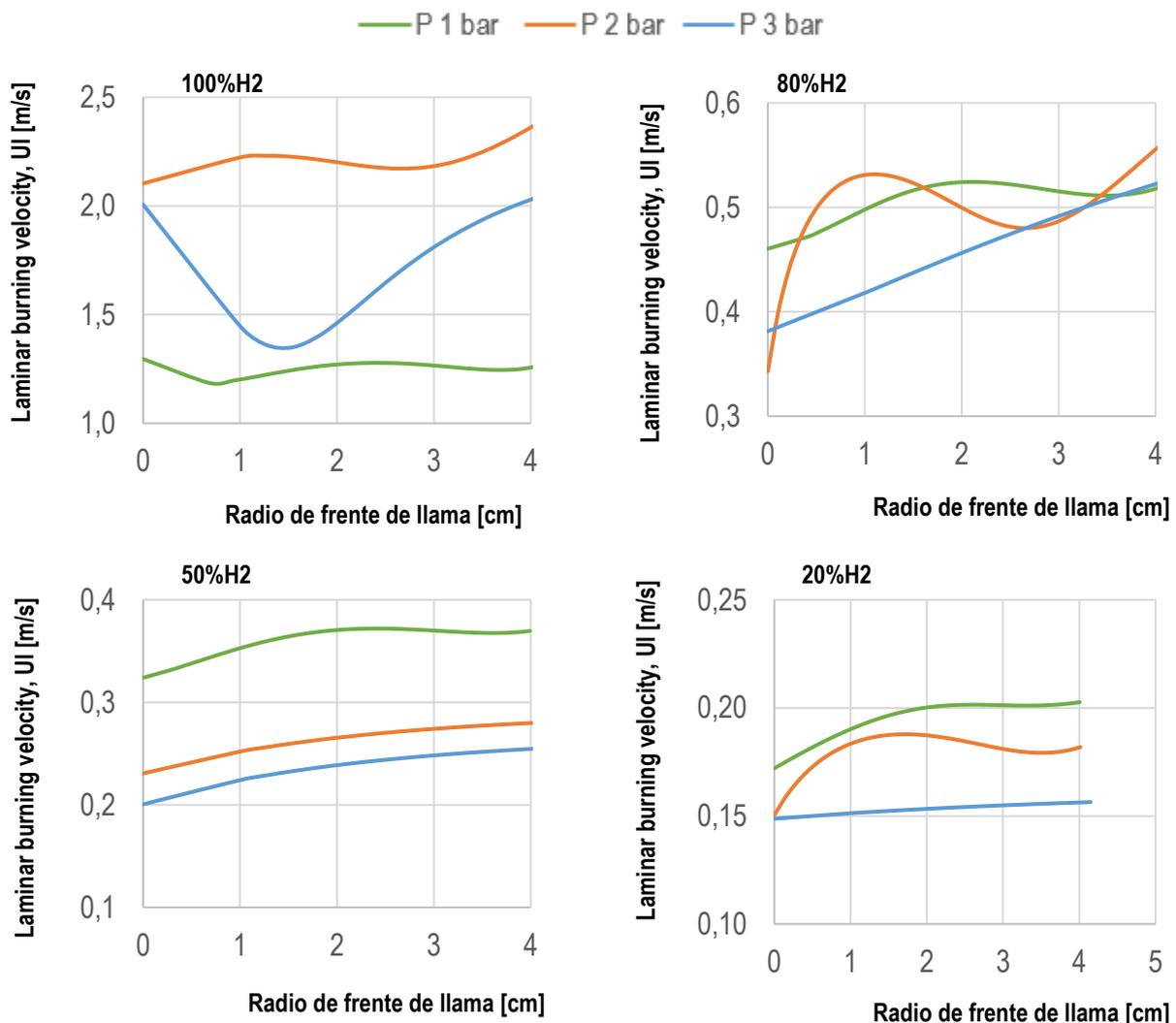


Fig 47. Evolución de la velocidad de combustión laminar “unstretched” (S_{l0}) en función del dosado relativo de la mezcla. 100% H₂-80% H₂-50% H₂-20% H₂-100% CH₄ respectivamente para una variación de presión inicial entre 1 y 3 bar, $T=40^{\circ}\text{C}$, $Fr=0.7$.

Por último, la **figura 48** muestra la variación de la velocidad de combustión laminar (UI) en función del radio del frente de llama. A excepción del experimento constituido por la mezcla de 100% hidrógeno-aire (que no muestra una tendencia clara), esta velocidad tiende a disminuir a medida que aumenta la presión inicial de llenado de la cámara de combustión. Reyes et.al en el que se muestran correlaciones de la velocidad de combustión con la presión y la temperatura.



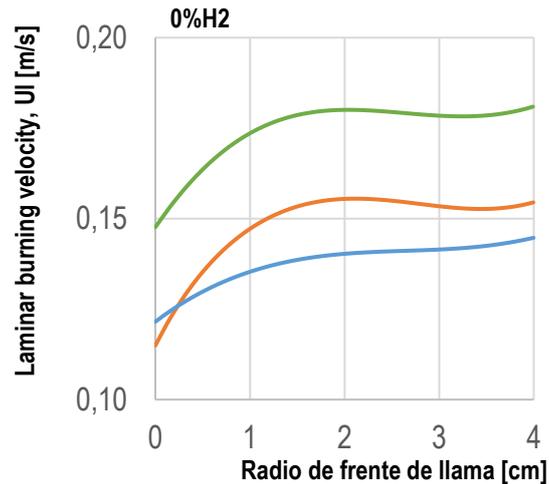
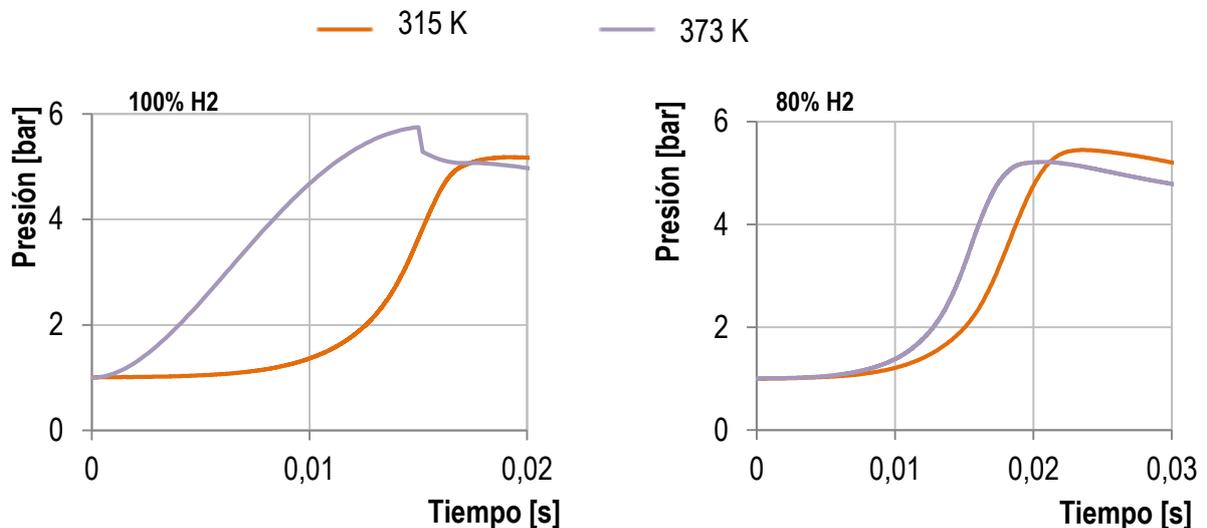


Fig 48. Evolución de la velocidad de combustión laminar (UI) en función del radio del frente de llama. 100%H2-80%H2-50%H2-20%H2-100%CH4 respectivamente para una variación de presión inicial entre 1 y 3 bar, $T=40^{\circ}\text{C}$, $Fr=0.7$.

La variación de los parámetros de la combustión en función de la temperatura es prácticamente nula, por lo que ésta no tiene un efecto importante sobre ellos (cuando se habla de variaciones prácticamente pequeñas tal y como se han llevado a cabo en este proyecto). A lo largo de la experimentación, se han realizado los experimentos divididos en dos temperaturas principales: 40°C y 100°C . A continuación, se presentan algunos de los resultados obtenidos.

En primer lugar, la **figura 49** presenta la variación de la presión instantánea en el interior de la cámara de combustión en función del tiempo.



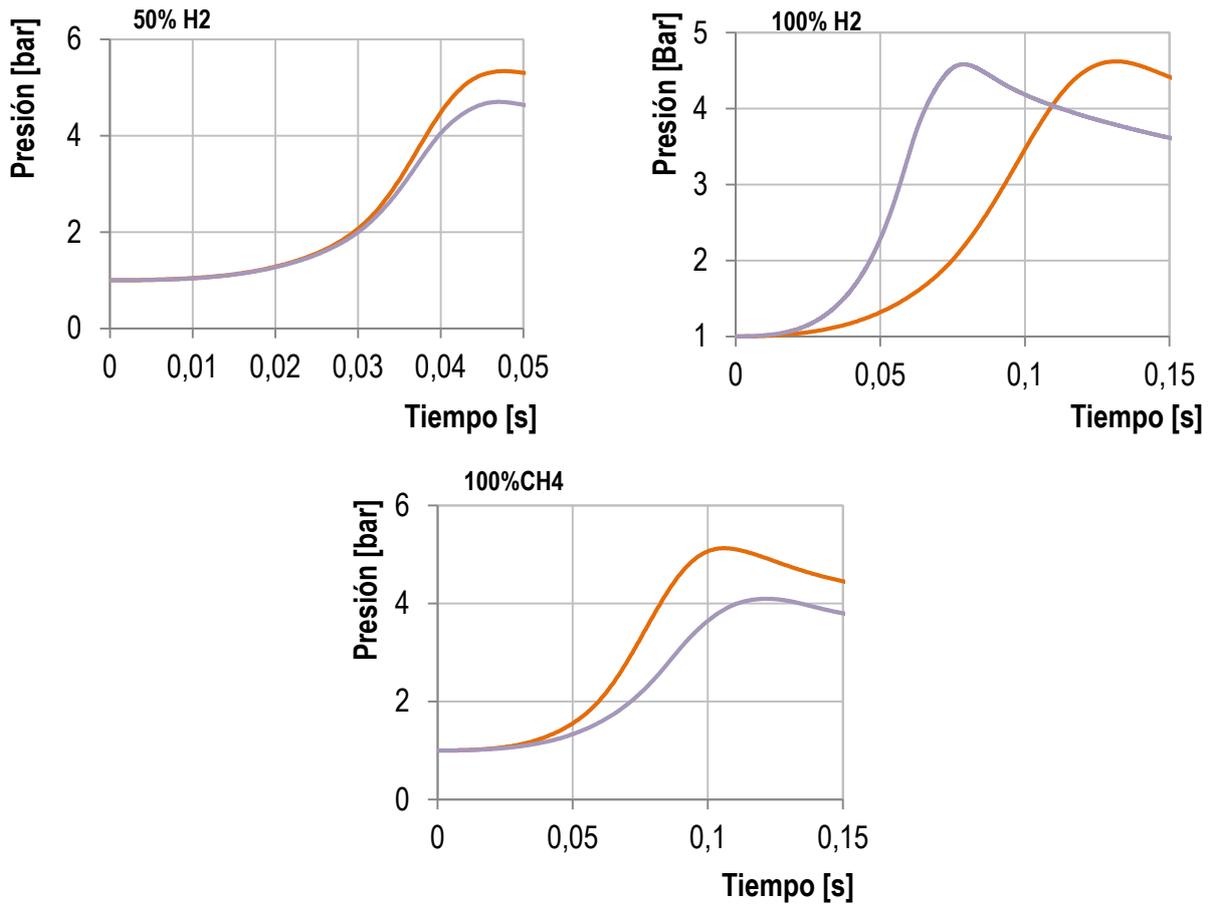
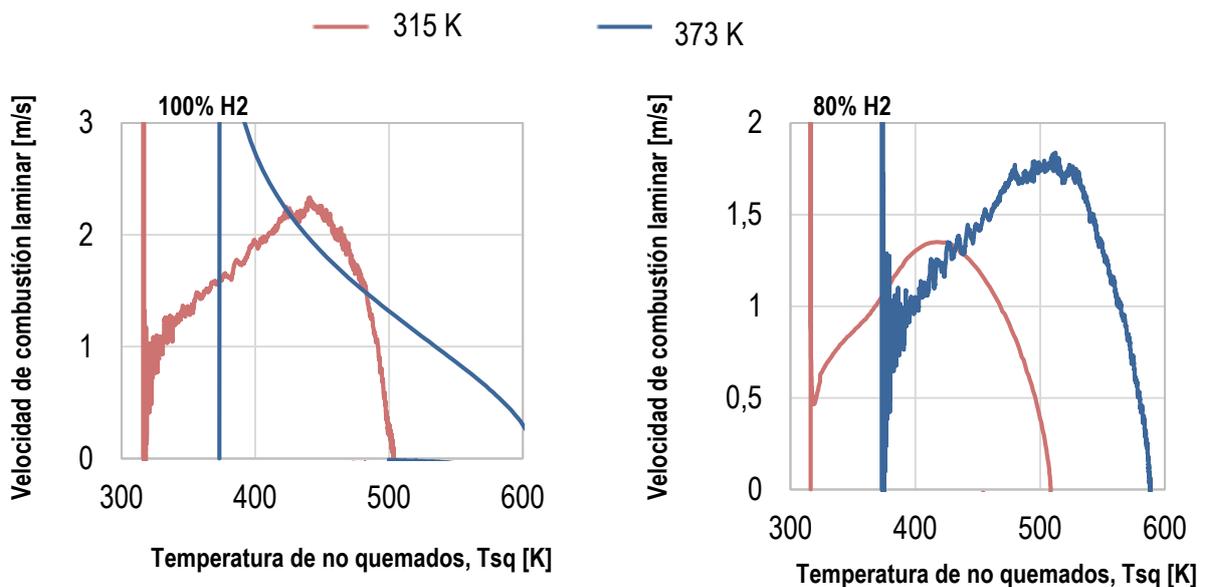


Fig 49. Evolución de la presión instantánea y la fracción de masa quemada en función del tiempo. 100%H2-80%H2-50%H2-20%H2-100%CH4 respectivamente para una variación de T entre 40 y 100°C, $P=1$ bar, $Fr=0.7$.

En segundo lugar, la **figura 50** representa la variación de la velocidad de combustión laminar.



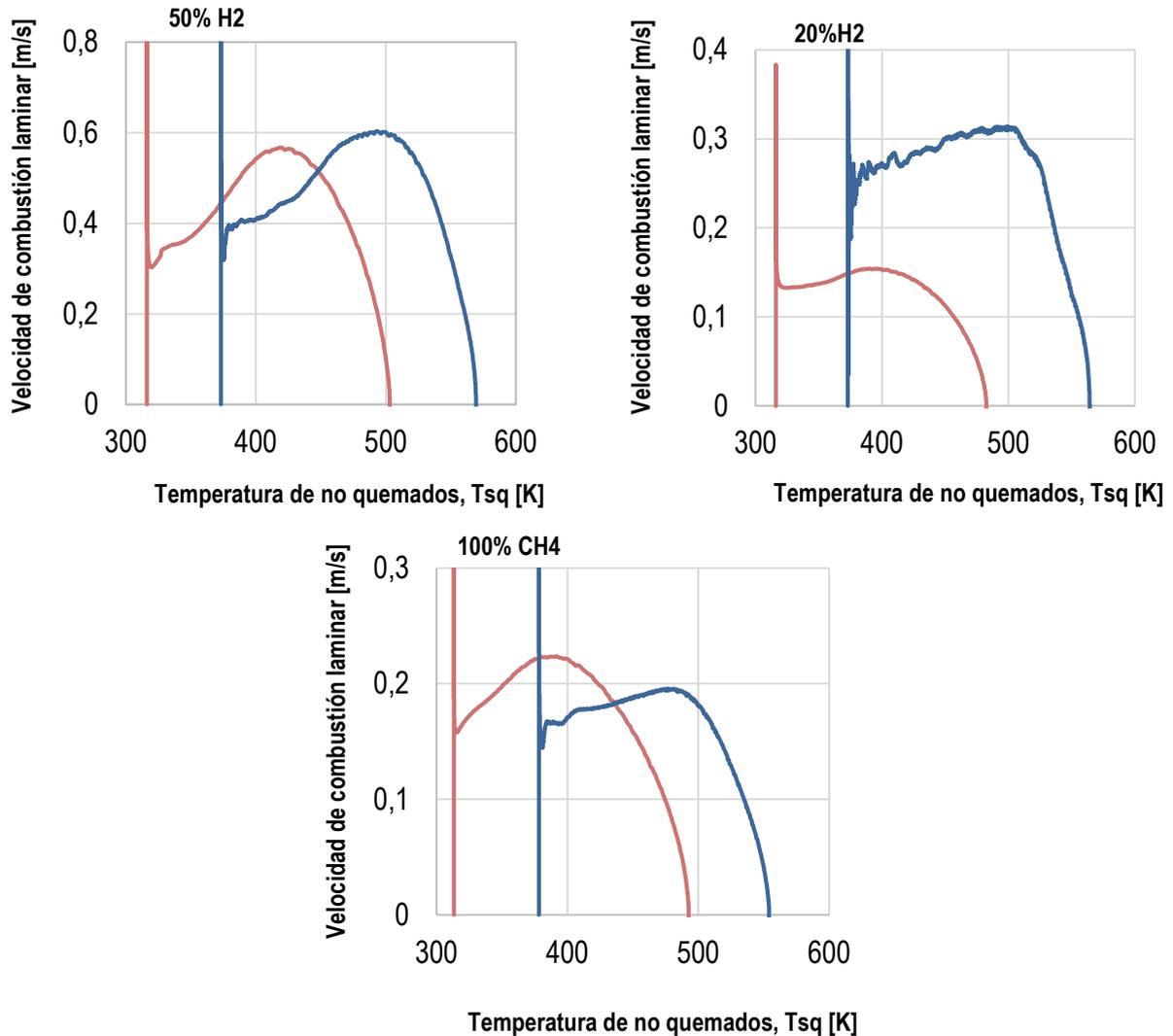


Fig 50. Evolución de la velocidad de combustión laminar en función de la temperatura de la masa no quemada. 100%H2-80%H2-50%H2-20%H2-100%CH4 respectivamente para una variación de temperatura entre 40 y 100°C, P=1 bar, Fr=0.7.

Para representar la evolución del radio frente al tiempo se han elegido dos mezclas opuestas: 100% hidrógeno-aire y 100% metano-aire, de esta forma la comparación de ambos comportamientos es más sencilla (**figura 51**). Ambas gráficas muestran como no existe una diferenciación clara del radio a medida que varía la temperatura.

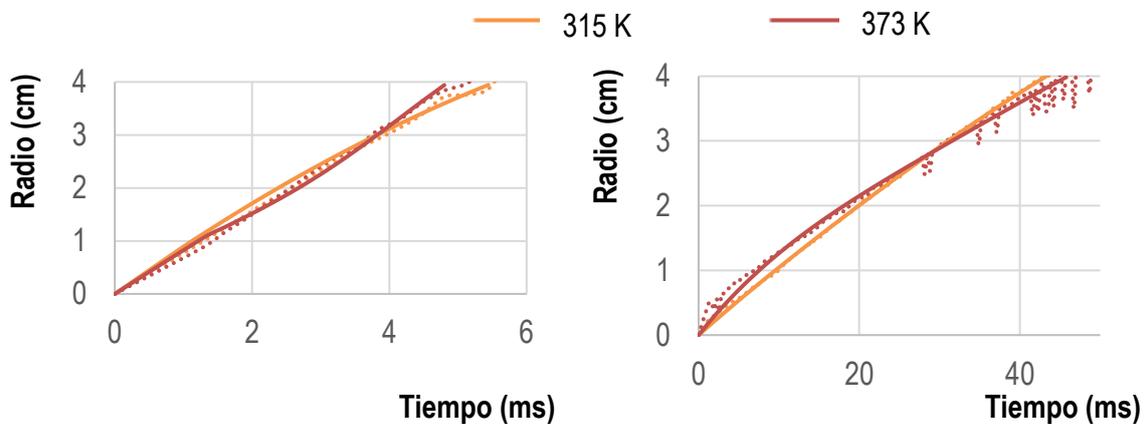
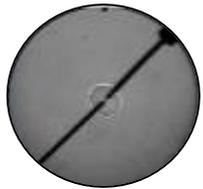
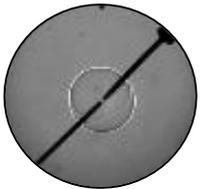
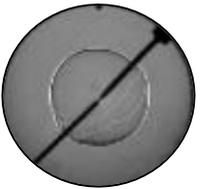
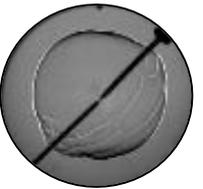
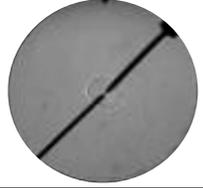
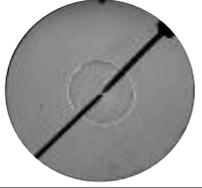
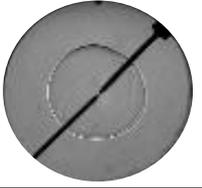
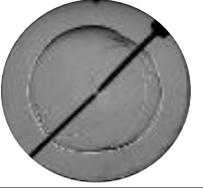


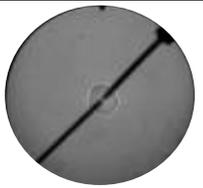
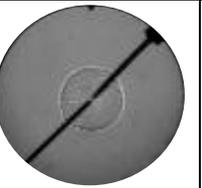
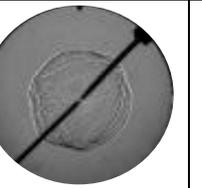
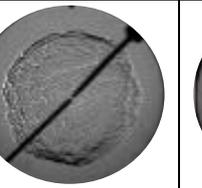
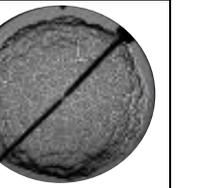
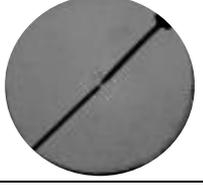
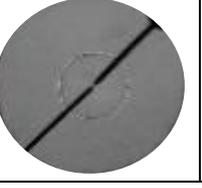
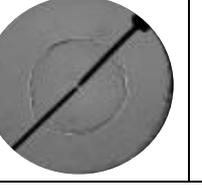
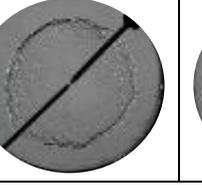
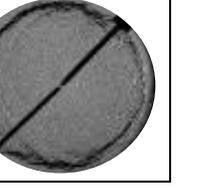
Fig 51. Evolución del radio del frente de llama frente al tiempo. 100%H2-80%H2-50%H2-20%H2-100%CH4 respectivamente para una variación de temperatura entre 40 y 100°C.

La **tabla 9** muestra la morfología del frente de llama para una mezcla constituida por un 20% de hidrógeno y un 80% de metano en aire. Por otro lado, la **tabla 10** muestra la morfología del frente de llama para una mezcla constituida por un 80% de hidrógeno y un 20% de metano en aire.

**Tabla 9. Morfología del frente de llama para una mezcla 20%hidrógeno-80%metano-aire-
P=1bar-Fr0.7-T=40°C y T=100°C.**

T / R	1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm
T 40°C					
T 100°C					

**Tabla 10. Morfología del frente de llama para una mezcla 80%hidrógeno-20%metano-aire-
P=1bar-Fr0.7-T=40°C y T=100°C.**

T / R	1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm
T 40°C					
T 100°C					

La **figura 52** muestra cómo es la evolución de la velocidad de propagación “unstretched” (Sl_0) para los dos puntos de temperatura experimentados, mientras que la **figura 53** representa el mismo concepto para la velocidad de combustión “unstretched” (U_0).

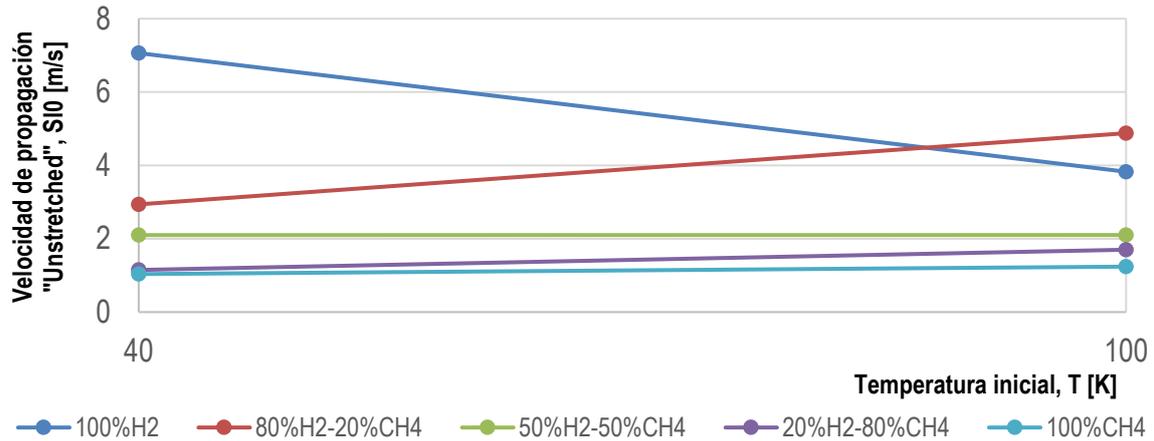


Fig 52. Evolución de la velocidad de combustión laminar “unstretched” (Sl_0) en de la temperatura inicial de la mezcla. 100%H2-80%H2-50%H2-20%H2-100%CH4, $P=1$ bar, $Fr=0.7$.

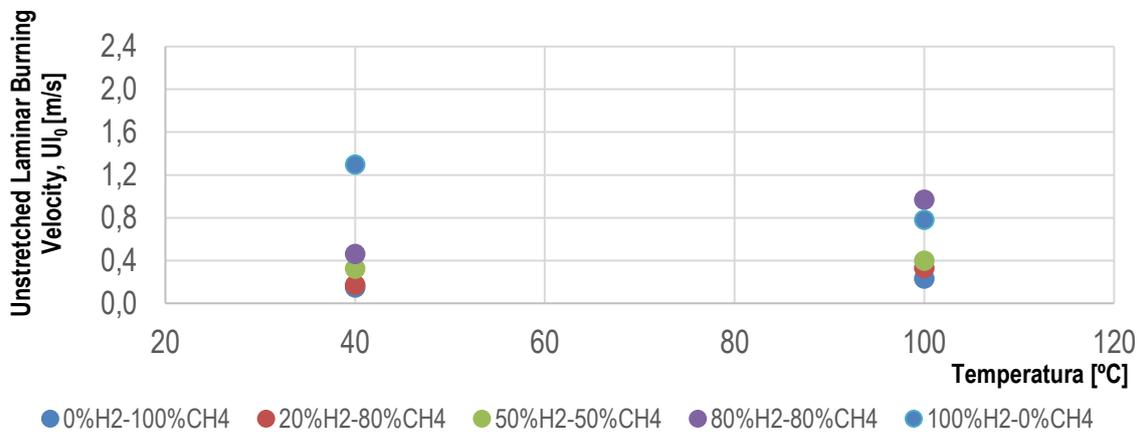


Fig 53. Velocidad de combustión laminar “unstretched”, Uf_0 en función de la temperatura inicial para los diferentes porcentajes de hidrógeno en la mezcla, $P=1$ bar, $Fr=0.7$.

4.4 Estudio del efecto del porcentaje de hidrógeno en la mezcla

Por último, aunque ya se ha hablado en los epígrafes anteriores acerca de cómo cambia la combustión con la variación del porcentaje de hidrógeno en la mezcla, es interesante representar en forma de resumen, las gráficas de los principales parámetros para ver las diferencias entre las mezclas que se han llevado a cabo. Para no saturar este trabajo con demasiadas gráficas, se han decidido representar los resultados para un dosado relativo de 0.7 así como presión y temperatura constantes de 1 bar y 40°C respectivamente.

En primer lugar, la **figura 54** representa la evolución de la presión instantánea registrada por los captadores en el interior de la cámara de combustión, así como la fracción de masa quemada (FMq) en función del tiempo. Como se puede observar y, acorde a los resultados obtenidos anteriormente, la presión y la fracción de masa quemada aumentan a medida que aumenta el porcentaje de hidrógeno en la mezcla, llegando a sus valores máximos en periodos de tiempo cada vez más pequeños.

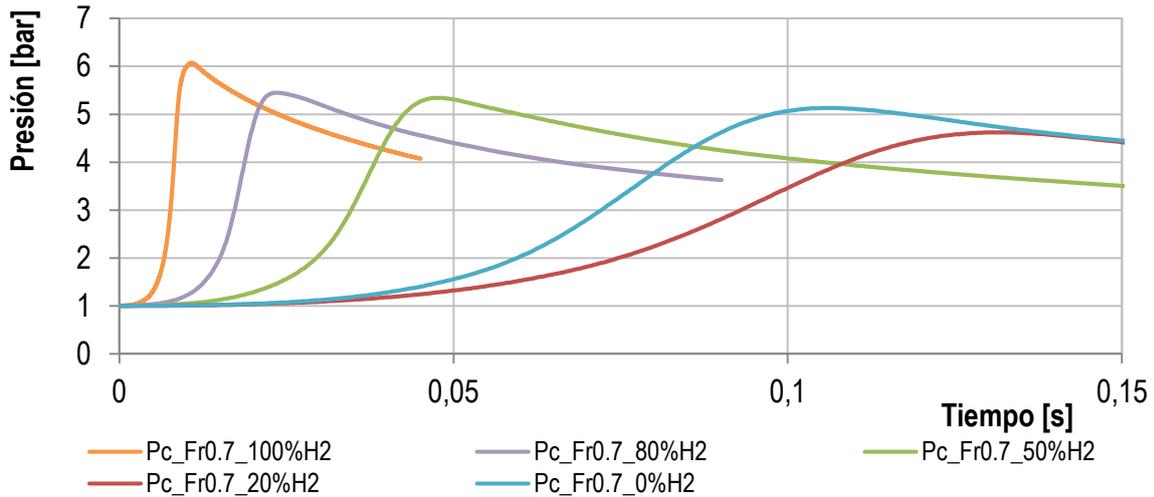


Fig 54. Evolución de la presión instantánea y la fracción de masa quemada en función del tiempo. 100%H2-80%H2-50%H2-20%H2-100%CH4. $P=1$ bar, $Fr=0.7$, $T=40^{\circ}\text{C}$.

Con la velocidad de combustión (C_c) ocurre prácticamente lo mismo, ésta aumenta a medida que aumenta el porcentaje de hidrógeno en la mezcla, llegando a un máximo cuando se trata de una mezcla de 100% H2-aire (véase la **figura 4.55**).

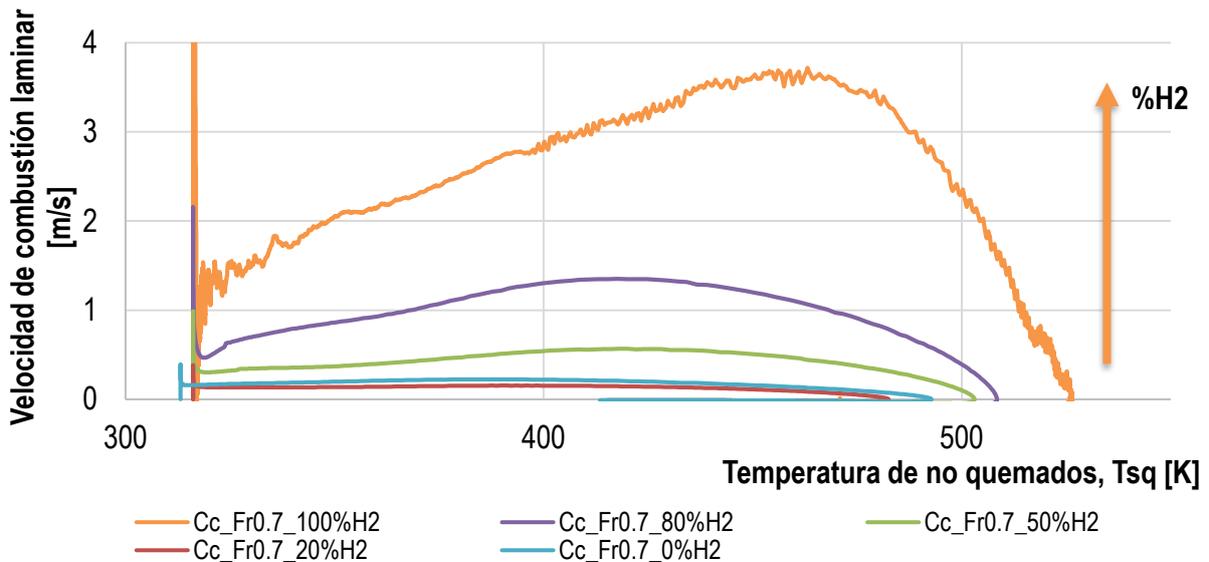


Fig 55. Evolución de la velocidad de combustión laminar en función de la temperatura de la masa no quemada. 100%H2-80%H2-50%H2-20%H2-100%CH4. $P=1$ bar, $Fr=0.7$, $T=40^{\circ}\text{C}$.

La clasificación dentro de las tres categorías comentadas (hidrógeno dominante, metano dominante y región de transición) puede verse con más claridad en la **figura 56**. El radio evoluciona más rápidamente cuando el hidrógeno domina, en cambio, muestra una evolución más lenta cuando se trata de mezclas de metano dominante.

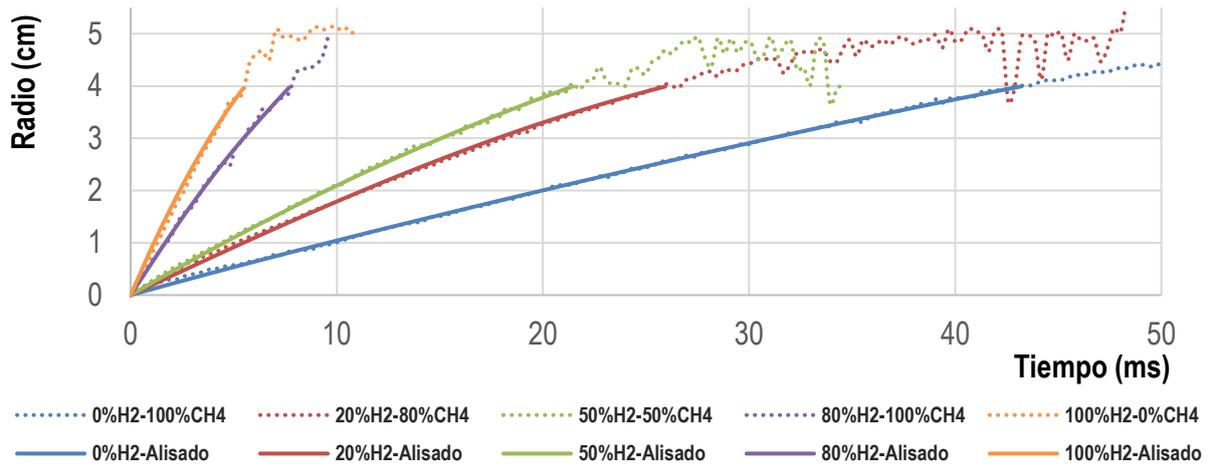


Fig 56. Evolución del radio del frente de llama frente al tiempo. 100%H2-80%H2-50%H2-20%H2-100%CH4. $P=1\text{bar}$, $Fr=0.7$, $T=40^\circ\text{C}$.

La celularidad en las llamas también afirma esta clasificación. Esto puede ser observado en las matrices morfológicas de la llama presentadas en la **tabla 11**.

Tabla 11. Morfología del frente de llama para mezclas con variación del porcentaje de hidrógeno, $Fr=0.7$, $P=1\text{ bar}$, $T=40^\circ\text{C}$.

%H2/R	1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm
100					
80					
50					
20					
0					

La velocidad de propagación del frente de llama (S_I) evoluciona de la misma manera con el porcentaje de hidrógeno. En la **figura 57** se observa un salto brusco de esta velocidad cuando las mezclas comienzan a presentar un comportamiento de hidrógeno dominante.

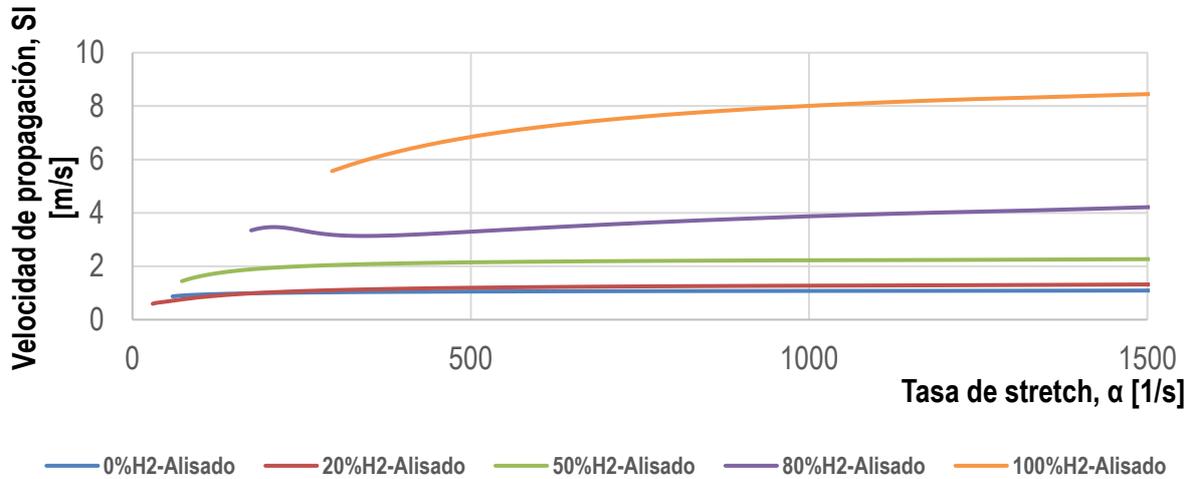


Fig 57. Evolución de la velocidad de propagación del frente de llama frente a la tasa de stretch. 100%H2-80%H2-50%H2-20%H2-100%CH4. $Fr=0.7$, $P=1$ bar, $T=40^\circ\text{C}$.

A partir de estas curvas, se obtiene la velocidad de propagación laminar “unstretched” (S_{I0}), las cuales se representan en la **figura 58**, presentando la misma tendencia comentada anteriormente.

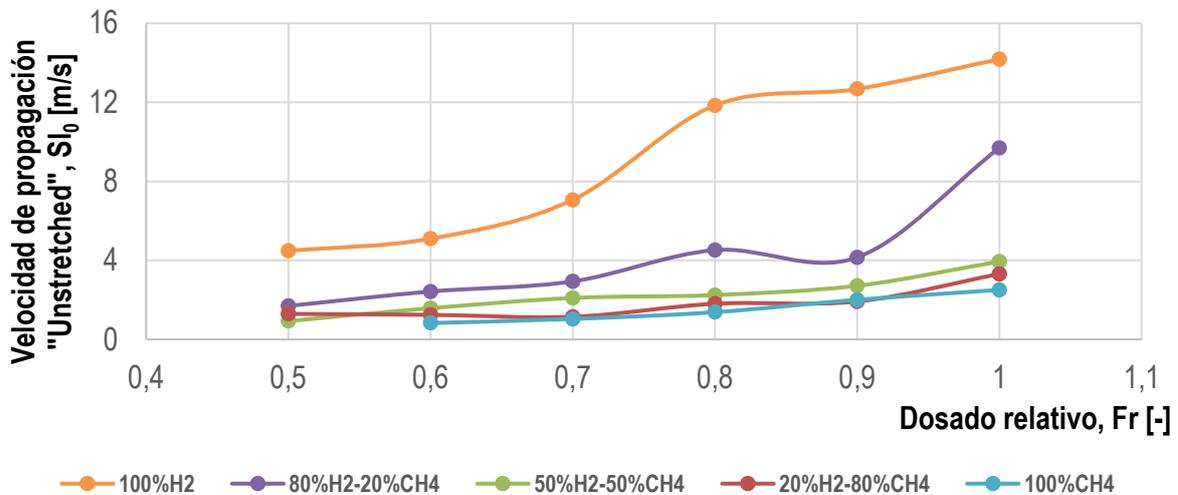


Fig 58. Evolución de la velocidad de combustión laminar “unstretched” en función del dosado relativo de la mezcla. 100%H2-80%H2-50%H2-20%H2-100%CH4. $Fr=0.7$, $P=1$ bar, $T=40^\circ\text{C}$.

Por último, la velocidad de combustión laminar “unstretched” (U_I) se presenta en la **figura 59**, para distintos porcentajes de hidrógeno y los dos rangos de temperatura (40°C y 100°C) comentados anteriormente, manteniendo la misma tendencia de las mezclas.

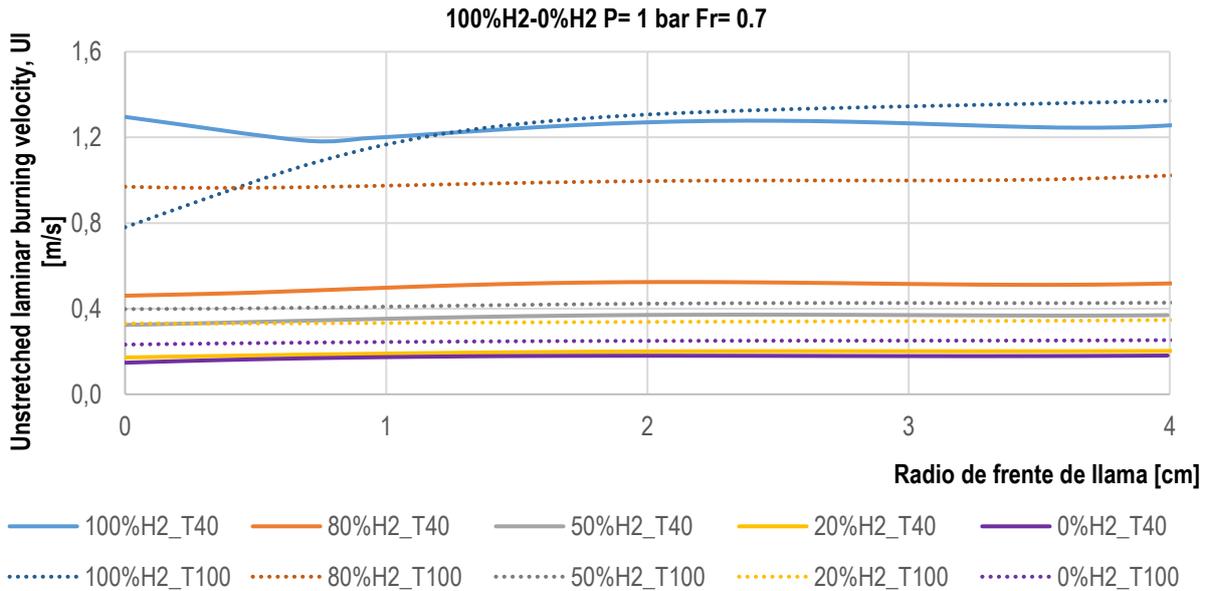


Fig 59. Evolución de la velocidad de combustión laminar “unstretched” (UI) en función del radio del frente de llama. 100%H2-80%H2-50%H2-20%H2-100%CH4. Fr=0.7, P=1bar, T=40°C.

4.5 Longitud de Markstein

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para la longitud de Markstein, la cual expresa la sensibilidad de la velocidad de combustión con la tasa de stretch de la llama. Recordando la **ecuación 2.3 (capítulo 2)**, la longitud de Markstein era el resultado de la pendiente de la línea de interpolación de los resultados de la velocidad de propagación del frente de llama en función de la tasa de stretch.

$$s_L^k = s_L^{k=0} - L \cdot \kappa \quad (\text{Ec.2.3 a})$$

Por lo general, la longitud de Markstein (L_b , L) suele representar valores similares al espesor del frente de llama, negativos o positivos, teniendo un carácter potenciador o retardador de la velocidad de llama frente al valor de velocidad de llama sin stretch. En la **figura 60** puede observarse como, para mezclas de metano dominante, la longitud de Markstein es ligeramente positiva y decreciente a medida que la mezcla varía de dosados pobres a ricos. Por otro lado, para mezclas de hidrógeno dominante se puede apreciar una tendencia contraria: la longitud de Markstein decrece a medida que la mezcla varía de dosados ricos a pobres, pudiendo llegar a ser negativo para mezclas lo suficientemente pobres.

Para la variación de presión y temperatura iniciales, no hay una diferencia significativa en las mezclas ensayadas, a excepción del hidrógeno que tiene un comportamiento radicalmente diferente del resto.

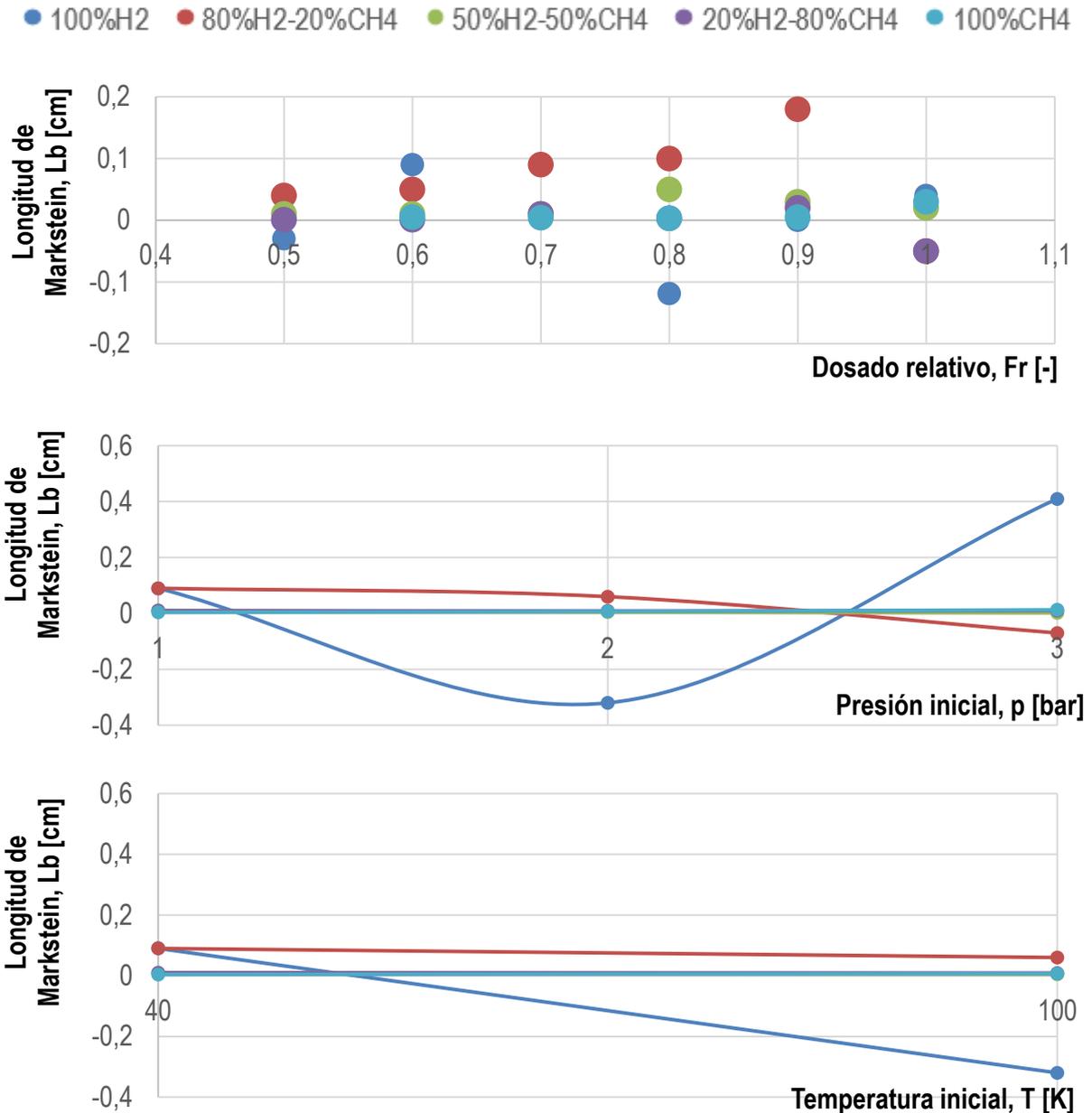


Fig 60. Longitud de Markstein en función del dosado relativo, presión inicial y temperatura inicial para diferentes porcentajes de hidrógeno.

4.6 Comparación de resultados con la bibliografía

Comparando la velocidad de combustión obtenida en este trabajo con las obtenidas por otros grupos (**figura 61** y **figura 62**) se puede ver que queda en la parte inferior del rango de valores. Para dosado relativo 1, Reyes et al. (Reyes et al., 2018) obtienen en una bomba de combustión esférica situada en el mismo laboratorio, un valor bastante más elevado. Esto es debido a la deformación del frente de llama por la geometría de la cámara de combustión, efecto que también se ve reflejado en las curvas de presión y de fracción de masa quemada obtenida. Mediante el método óptico se obtienen valores, por lo general, un poco más elevados que mediante el método de la presión, esto es debido a que no tienen en cuenta el registro de la presión sino solamente la evolución gráfica del radio del frente de llama en el tiempo.

Los resultados del método óptico hacen referencia a U_{l0} , que expresa la relación entre Sl_0 (obtenida a través de la velocidad de propagación del frente de llama) y el cociente de densidades entre la masa fresca y la masa quemada. Por otro lado, los resultados del método de presión hacen referencia a la velocidad de combustión laminar, resultado del punto de corte de la velocidad de combustión para $T=300K$. En la figura 62 puede verse como para dosado estequiométrico, los valores de la velocidad de

combustión son del mismo orden de magnitud que los obtenidos por otros autores. De esta forma, ha sido posible la validación de la metodología para determinar velocidades de combustión con el registro óptico basado en la técnica Schlieren.

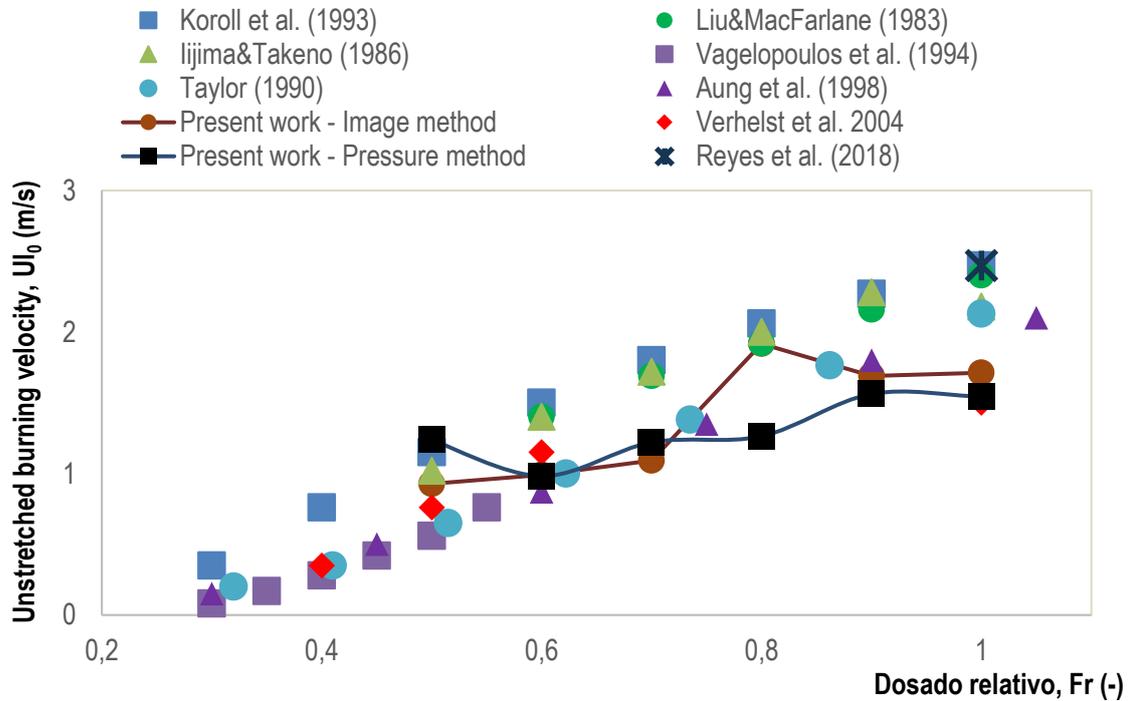


Fig 61. Comparación de la velocidad de combustión laminar para mezclas hidrógeno-aire. (Reyes et al., 2018)

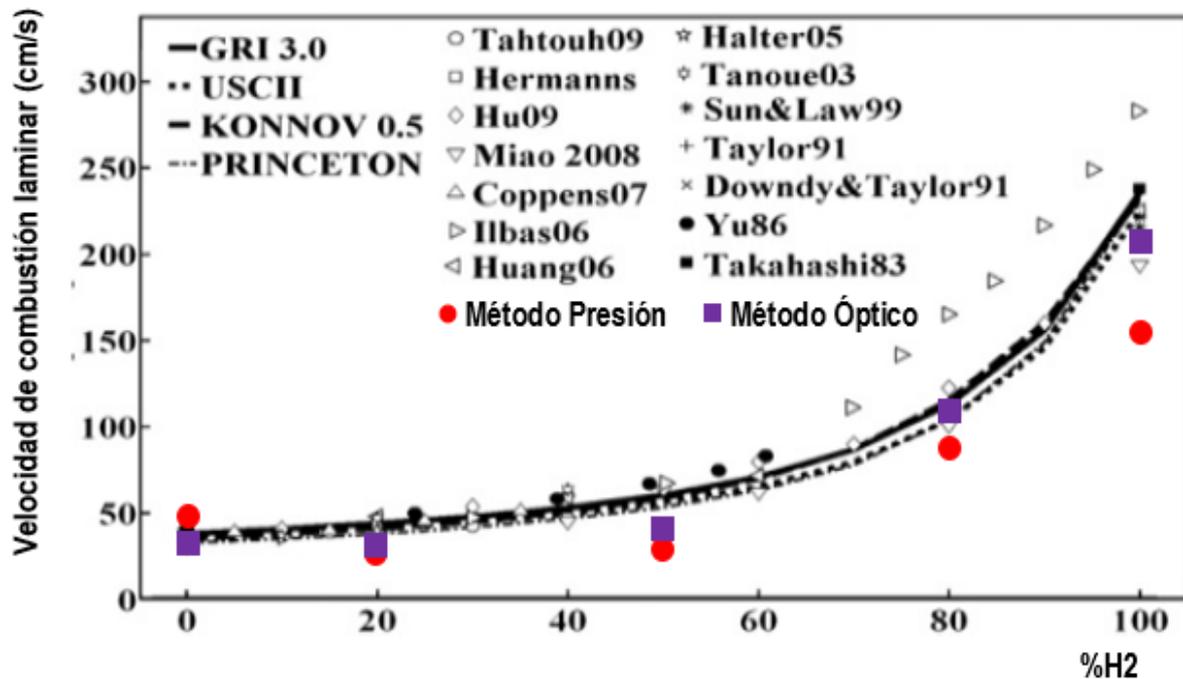


Fig 62. Comparación de la velocidad de combustión laminar para mezclas hidrógeno-metano-aire. $P=1$ bar, $Fr=1$, $T=300K$. Método de presión (Cl). Método óptico (U_{l0}). (Mayo Monge, 2015)

Por otro lado, también se han comparado con los principales autores las velocidades de combustión laminar de mezclas de metano-aire obtenidas con la curva de presión (figura 63), obteniéndose valores

bastante inferiores a los recomendados debido a la deformación del frente de llama por la geometría de la cámara, al igual que se veía para las combustiones de hidrógeno. En este caso, el método de obtención de la velocidad laminar “unstretched” a partir del registro óptico, no ofrece valores tan diferentes a los recomendados por la bibliografía.

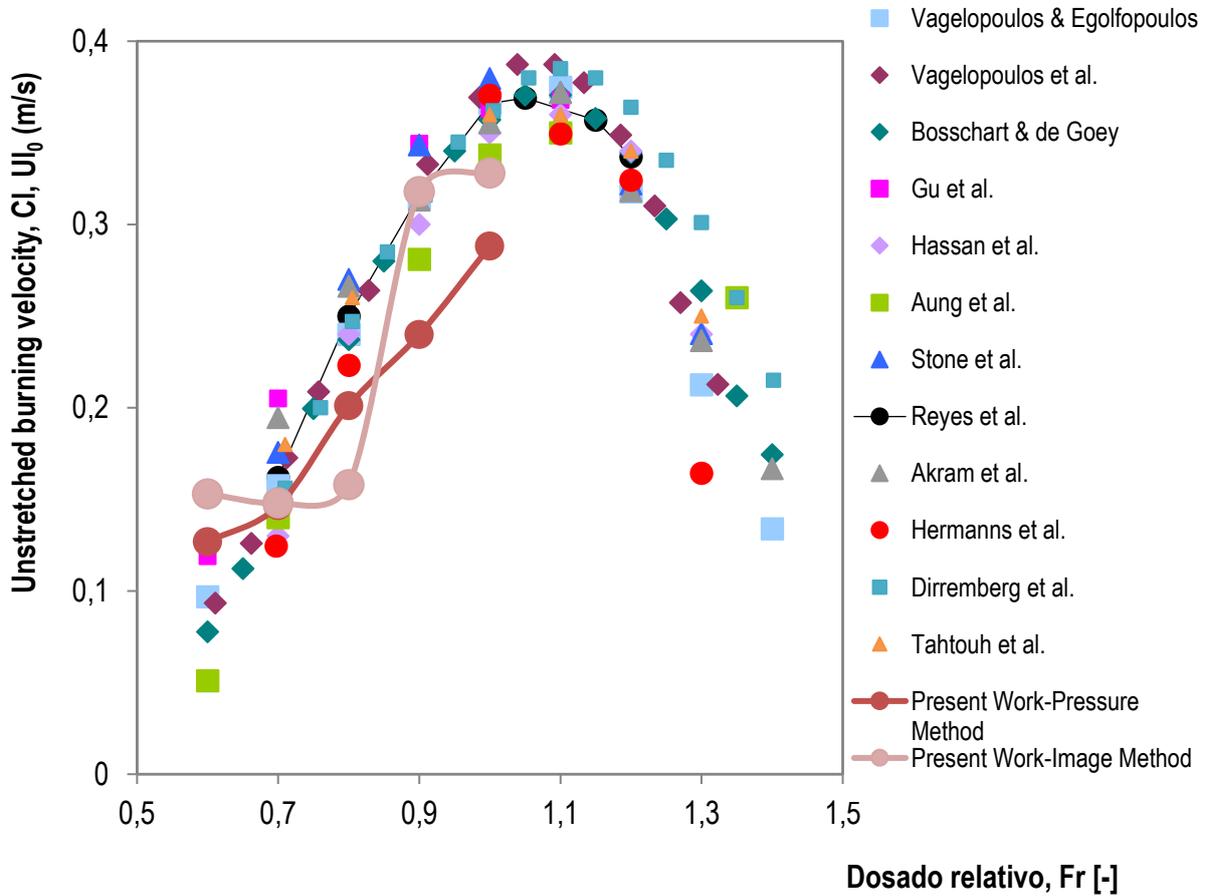


Fig 63. Comparación de la velocidad de combustión laminar para mezclas metano-aire con la bibliografía. (Reyes et al., 2018)

5 CONCLUSIONES

5.1 Conclusiones

Se ha realizado la caracterización del proceso de combustión de hidrógeno, metano y mezclas de metano-hidrógeno en una bomba de combustión cilíndrica a volumen constante con accesos ópticos.

En la caracterización del proceso de combustión se ha estudiado y analizado la presión instantánea registrada en el interior de la bomba de combustión, utilizándose como entrada en un modelo de diagnóstico de dos zonas, y se han obtenido variables como velocidades de combustión, fracciones de masa quemada y evolución de temperaturas en ambas zonas.

El método óptico ha permitido visualizar y registrar el proceso de combustión a través de accesos ópticos, y, con un programa de análisis, obtener la evolución del radio del frente de llama durante el transcurso de la combustión y un estudio de la celularidad producida en el frente de llama.

Gracias a los dos métodos de registro de datos utilizados en el presente TFM (registro óptico y de la presión instantánea dentro de la cámara de combustión) es posible obtener resultados que nos permiten establecer comparaciones y analizar cómo varían los parámetros estudiados en esta investigación en función del porcentaje de hidrógeno en la mezcla, el dosado relativo la presión y la temperatura.

Las velocidades de combustión obtenidas con la curva de presión son menores que las que se obtienen en la bibliografía, y menores que las obtenidas en una bomba de combustión esférica existente en el laboratorio de motores. Esta diferencia es debido a la deformación del frente de llama debido a la geometría de la cámara. Sin embargo, las velocidades obtenidas a través del método óptico son coherentes con el resto de los resultados.

Al aumentar el porcentaje de hidrógeno en metano aumenta la velocidad de combustión (como era de esperar), además de las presiones finales, y un aumento significativo de las inestabilidades del frente de llama, generándose lo que se conoce como celularidad.

Gracias a la comparación de los resultados de experimentos con variaciones del porcentaje de hidrógeno en la mezcla es posible determinar tres zonas principales: una primera región donde el comportamiento del hidrógeno domina durante toda la etapa de combustión independientemente de la cantidad de metano introducida. Otra región comprende aquellos porcentajes de hidrógeno en metano donde ocurre lo contrario y es el metano el elemento dominante. Por último, existe una zona de transición donde se agrupan aquellos experimentos que no tienen un comportamiento dominado por ninguno de los dos componentes y expresan variaciones en cuanto a su postura.

De los experimentos realizados, las mezclas constituidas por un 100% hidrógeno y 80% hidrógeno-20% metano, se agrupan dentro de lo que se conoce como región de hidrógeno dominante. Por el contrario, las mezclas constituidas por un 100% de metano y 80% metano-20% hidrógeno, se clasifican dentro de la región de metano dominante. Por último, las mezclas constituidas por un 50% de hidrógeno y 50% de metano pertenecen a la denominada región de transición.

Los experimentos comprendidos en la primera zona (hidrógeno dominante) presentan un aumento de la presión instantánea, la fracción de masa quemada y la velocidad de combustión con el aumento del dosado relativo de la mezcla. En contra, las arrugas del frente de llama no son tan significativas como cuando se trabaja con dosados relativos menores. El número de Lewis, tal y como indica la bibliografía, es menor que la unidad. El aumento de la presión inicial de llenado genera un aumento significativo de la velocidad de combustión, la presión y la fracción de masa quemada, además de provocar un mayor arrugamiento de la superficie del frente de llama. La variación de temperatura no aporta una diferencia significativa a los parámetros de la combustión analizados.

Los experimentos comprendidos en la denominada zona de transición no presentan un comportamiento claro, siendo en algunas ocasiones similar al del hidrógeno dominante y, en otros casos, al del metano.

dominante. Los números de Lewis, en este caso, estarían en una zona de incertidumbre, pudiendo ser mayores o menores que la unidad en función del comportamiento de la llama.

Aquellos dominados por el metano presentan un aumento de los parámetros de la combustión con el aumento del dosado relativo, pero, por el contrario, presentan un descenso de estos a medida que aumenta la presión inicial de llenado. El número de Lewis para esta región es mayor que la unidad, tal y como explica la bibliografía para mezclas de hidrocarburos de dosados pobres.

Por último, tal y como se ha expresado en el capítulo 2, no es fácil obtener los parámetros adimensionales de la combustión, sobre todo el número de Lewis y el número de Peclet crítico, que hacen referencia a las inestabilidades del frente de llama.

Cabe destacar que ha sido posible la validación de la metodología para determinar velocidades de combustión con el registro óptico basado en la técnica Schlieren.

5.2 Principales aportaciones del autor del TFM

Este trabajo fin de máster surge a partir de una beca de investigación concedida durante el curso 2017-2018 en el departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica en el laboratorio de Motores y Máquinas Térmicas.

La importante labor realizada a permitido avanzar con la investigación que se estaba llevando a cabo en el campo de la combustión con bombas de combustión cilíndricas con acceso ópticos. Además, la comparación entre ambos métodos, así como con resultados de otros investigadores, ha permitido conocer un poco más el comportamiento de la instalación, así como de aportar una pequeña semilla para el análisis de las discrepancias obtenidas.

Uno de los resultados más importantes de este trabajo fin de máster ha sido la realización de un artículo presentado al Congreso Internacional de Combustión, que se realizará en Lisboa de este mismo año (2019) y el cual ha sido aceptado para su presentación.

5.3 Sugerencias para trabajos futuros

Mantener una puesta al día del laboratorio y una continua tarea de investigación es una labor que, aunque parezca difícil, es muy importante para conocer el estado del arte actual y las reseñas que otros investigadores pueden aportar. Es muy importante continuar con esta línea de investigación y experimentar con más porcentajes de hidrógeno y metano para determinar con claridad los límites de las tres regiones comentadas.

En primer lugar, el análisis de la combustión y la *desesferificación* del frente de llama es algo primordial para conocer por qué no se alcanzan las presiones teóricas ni una tasa de masa quemada adecuada durante la combustión. Uno de los trabajos que se están llevando a cabo actualmente en el laboratorio es la realización de ensayos en CFD para poder conocer como es la geometría del frente de llama y determinar las causas de las diferencias obtenidas en los resultados.

Tal y como se ha comentado en el **capítulo 2**, el problema de realizar una combustión de hidrógeno es el aumento de las emisiones NO_x si se emplea en aplicaciones reales. Una de las sugerencias para trabajos futuros que podrían cumplimentar este proyecto es la posibilidad de medición de los gases de escape y establecer las condiciones adecuadas de la combustión para reducir las emisiones todo lo posible.

Uno de los puntos que no se han tratado a lo largo de este trabajo fin de máster (que concierne una investigación que se ha extendido a lo largo de un año) es la capacidad de implementar en la bomba de combustión cilíndrica un sistema de EGR y circulación de Blow-By para simular lo que podrían ser unas condiciones actuales de combustión en el sector de la automoción. Debido a la escasez de tiempo, es algo que no se ha podido plantear.

Por otro lado, el cálculo del número de Lewis es una posible línea para seguir investigando, ya que podría ofrecer información para conocer más a fondo el origen de las perturbaciones que aparecen en el frente

de llama. Además, la realización de este proyecto desemboca en la proposición de continuar desarrollando una forma más precisa de medir el radio del frente de llama para poder determinar con claridad los parámetros de la combustión, sobre todo el número de Peclet crítico que indica el instante en el que la llama pasa de ser laminar a celular (frente de llama arrugado).

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Askari, O., Elia, M., Ferrari, M., & Metghalchi, H. (2017). Cell formation effects on the burning speeds and flame front area of synthetic gas at high pressures and temperatures. *Applied Energy*, 189, 568–577.
- Automoción, G. T. de. (2016). Catalizador de tres vías. En <https://glosariodeautomocion.com/2016/03/04/catalizador-de-tres-vias/> página web consultada en septiembre 2019.
- Ballenilla García de Gamarra, F. (2005). La sostenibilidad desde la perspectiva del agotamiento de los combustibles fósiles, un problema socio-ambiental relevante. *Revista Investigación En La Escuela*, 55, 73–87.
- Boldo, E., & Querol, X. (2014). Nuevas políticas europeas de control de la calidad del aire: ¿un paso adelante para la mejora de la salud pública? *Gaceta Sanitaria*, 28(4), 263–266.
- Bouvet, N., Halter, F., Chauveau, C., & Yoon, Y. (2013). On the effective Lewis number formulations for lean hydrogen/hydrocarbon/air mixtures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38, 5949–5960.
- Bradley, D., Gaskell, P. H., & Gu, X. J. (1996). Burning velocities, markstein lengths, and flame quenching for spherical methane-air flames: A computational study. *Combustion and Flame*, 104(1–2), 176–198.
- Calvete, A. S. (2018). *Caracterización de procesos de combustión de mezclas H2/aire e H2/C0/aire para su uso como combustibles en MCIA*. Universidad de Valladolid.
- Coderch, M. (2004). *El fin del petróleo barato*. *Foreign Policy*.
- Collier k, Hoekstra RL, Muligan N, et al. (1996). Untreated exhaust emissions of a hydrogen-enriched CNG production engine conversion. *SAE Technical Paper*, 960858.
- de las Casas Cámara, G. (2015). Un paso atrás en la contaminación del aire: Novedades en automoción. *Gaceta Sanitaria*, 29(2), 152–157.
- Di Sarli, V., & Benedetto, A. Di. (2007). Laminar burning velocity of hydrogen–methane/air premixed flames. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(5), 637–646.
- Espinoza, H. (2007). Modelo predictivo de combustión de mezclas de gas natural en motores de encendido por chispa (MECH). *Revista Ingeniería E Investigación*, 27(2), 11–17.
- Europea, C. (2018). Una economía baja en carbono para 2050 | Acción por el Clima. En https://ec.europa.eu/clima/policias/strategies/2050_es página web consultada en septiembre 2019.
- Flórez, J. A. Á. (2005). *Motores alternativos de combustión interna (Vol. 168)*. (U. P. de Catalunya., Ed.). Universidad Politécnica de Cataluña. Iniciativa Digital Politécnica.
- Fukuda M, Korematsu K, S. M. (1981). On quenching distance of mixture of methane and hydrogen with air. *Bull JSME*, 24, 1192–1197.
- Genovese, A., Contrisciani, N., Ortenzi, F., & Cazzola, V. (2011). On road experimental tests of hydrogen/natural gas blends on transit buses. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(2), 1775–1783.
- González, M. R. (2018). *Visualización de procesos de combustión con cámara de alta velocidad*. Universidad de Valladolid.
- Herzler, J., & Naumann, C. (2009). Shock-tube study of the ignition of methane/ethane/hydrogen mixtures with hydrogen contents from 0% to 100% at different pressures. *Proceedings of the Combustion Institute*, 32(1), 213–220.

- Hora, T. S., & Agarwal, A. K. (2015). Experimental study of the composition of hydrogen enriched compressed natural gas on engine performance, combustion and emission characteristics. *Fuel*, 160, 470–478.
- Hoyos, D. I. (2015). *Caracterización de mezclas de combustible para motores térmicos en una bomba de combustión a volumen constante*. Universidad de Valladolid.
- Hu, E., Huang, Z., He, J., Jin, C., & Zheng, J. (2009). Experimental and numerical study on laminar burning characteristics of premixed methane-hydrogen-air flames. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34, 4876–4888.
- John Ramiro Agudelo Santamaría, Jaime N Gutiérrez Ibarra, Julio César González Romero, L. A. C. M. (2002). Influencia de la tecnología de conversión sobre el comportamiento de motores de gasolina convertidos a gas natural. *Revista Científica Ingeniería Y Desarrollo*, 11, 28–41.
- Kim, W., Imamura, T., Mogi, T., & Dobashi, R. (2017). Experimental investigation on the onset of cellular instabilities and acceleration of expanding spherical flames. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 14821–14828.
- KS., V. (1981). Combustion characteristics of small spark ignition engines using hydrogen supplemented fuel mixtures. *SAE Technical Paper*, 810921, 1–10.
- Kuby, M., Lines, L., Schultz, R., Xie, Z., Kim, J.-G., & Lim, S. (2009). Optimization of hydrogen stations in Florida using the Flow-Refueling Location Model. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(15), 6045–6064.
- Lafuente, Á. L. (2008). *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*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad de Valladolid.
- Liu, F., Bao, X., Gu, J., & Chen, R. (2012). Onset of cellular instabilities in spherically propagating hydrogen-air premixed laminar flames. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(15), 11458–11465.
- Liu, Y. (1992). Investigation of Flame-Generated Turbulence in Premixed Flames at Low and High Burning Velocities. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 5, 410–415.
- Ma, F., Wang, Y., Liu, H., Li, Y., Wang, J., & Zhao, S. (2007). Experimental study on thermal efficiency and emission characteristics of a lean burn hydrogen enriched natural gas engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(18), 5067–5075.
- Mariani, A., Prati, M. V., Unich, A., & Morrone, B. (2013). Combustion analysis of a spark ignition i. c. engine fuelled alternatively with natural gas and hydrogen-natural gas blends. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(3), 1616–1623.
- Matalon, M. (2007). Intrinsic flame instabilities in premixed and nonpremixed combustion. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 39, 163–191.
- Mathai, R., Malhotra, R. K., Subramanian, K. A., & Das, L. M. (2012). Comparative evaluation of performance, emission, lubricant and deposit characteristics of spark ignition engine fueled with CNG and 18% hydrogen-CNG. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(8), 6893–6900.
- Mayo Monge, L. M. (2015). Análisis de conceptos y expresiones de la velocidad de combustión laminar en aire de hidrógeno y de mezclas hidrógeno - Gas Natural.
- Mehra, R. K., Duan, H., Juknelevičius, R., Ma, F., & Li, J. (2017). Progress in hydrogen enriched compressed natural gas (HCNG) internal combustion engines - A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 1458–1498.
- Miranda, I. (2018). El Gobierno prohibirá la matriculación y venta de coches de combustión a partir de

2040. *ABC Sociedad*.

- Nagalingam, B., Duebel, F., & Schmillen, K. (1983). Performance Study Using Natural Gas, Hydrogen-Supplemented Natural Gas and Hydrogen in Avl Research Engine. *Int. 1. Hydrogen Energy*, 8(9), 715–720.
- Okafor, E. C., Hayakawa, A., Nagano, Y., & Kitagawa, T. (2014). Effects of hydrogen concentration on premixed laminar flames of hydrogen–methane–air. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(5), 2409–2417.
- Reyes, M. (2008). *Caracterización de la combustión y el autoencendido de combustibles líquidos en mezclas homogéneas para su uso en motores térmicos en modo HCCI*. Universidad de Valladolid.
- Reyes, M., Tinaut, F. V., Melgar, A., & Pérez, A. (2016). Characterization of the combustion process and cycle-to-cycle variations in a spark ignition engine fuelled with natural gas/hydrogen mixtures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41, 2064–2074.
- Reyes, M., Tinaut, F. V., Horrillo, A., & Lafuente, A. (2018). Experimental characterization of burning velocities of premixed methane-air and hydrogen-air mixtures in a constant volume combustion bomb at moderate pressure and temperature. *Applied Thermal Engineering*, 130, 684–697.
- Riesco-Ávila, J.M., Gallegos-Muñoz, A., Montefort-Sánchez, J. M. ., & Martínez-Martínez, S. (2005). Procesos alternativos de combustión en motores de combustión interna. *Acta Universitaria*, 15(1), 36–54.
- Rifkin, J. (2010). *La civilización empática. La carrera hacia una conciencia global en un mundo*.
- S., K., L., T., & G.M., F. (1992). Laminar burning velocities and transition to unstable flames in H₂-O₂-N₂ and C₃H₈-O₂-N₂ mixtures. *Combustion and Flame*, 90, 230–246.
- S. Verhelst, C. T'Joen, J. Vancoillie, J. Demuyne. (2011). A correlation for the laminar burning velocity for use in hydrogen spark ignition engine simulation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36, 957–974.
- Sagar, S. M. V., & Agarwal, A. K. (2017). Experimental investigation of varying composition of HCNG on performance and combustion characteristics of a SI engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(18), 13234–13244.
- Tinaut, F. V., Melgar, A., Giménez, B., & Reyes, M. (2010). Characterization of the combustion of biomass producer gas in a constant volume combustion bomb. *Fuel*, 89(3), 724–731.
- Tinaut, F. V., Melgar, A., Giménez, B., & Reyes, M. (2011). Prediction of performance and emissions of an engine fuelled with natural gas/hydrogen blends. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(1), 947–956.
- Tinaut, F. V. (2012). Experimental Determination of the Burning Velocity of Mixtures of n-Heptane and Toluene in Engine-like Conditions. *Flow Turbulent Combust*, 89, 183–213.
- Yan, F., Xu, L., & Wang, Y. (2018). Application of hydrogen enriched natural gas in spark ignition IC engines: from fundamental fuel properties to engine performances and emissions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1457–1488.
- Yang, Z., Zhang, F., Wang, L., Wang, K., & Zhang, D. (2018). Effects of injection mode on the mixture formation and combustion performance of the hydrogen internal combustion engine. *Energy*, 147, 715–728.
- Zareei, J., Rohani, A., & Wan Mahmood, W. M. F. (2018). Simulation of a hydrogen/natural gas engine and modelling of engine operating parameters. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Zohra, K. F., Mounir, A., & Salah, C. (2017). Numerical simulation of CH₄-H₂-AIR non-premixed flame stabilized by a bluff body. *Energy Procedia*, 139, 530–536.

ANEXO 1: Parámetros teóricos de los experimentos

Tabla 12. Experimentos teóricos programados para experimentación.

FECHA	ID	Fr	%H2	P ini [bar]	T ^a ini [°C]
12/06/2018	1	0,5	100	1	40
12/06/2018	2	0,6	100	1	40
12/06/2018	3	0,7	100	1	40
12/06/2018	4	0,8	100	1	40
12/06/2018	5	0,9	100	1	40
12/06/2018	6	1	100	1	40
25/09/2018	7	0,5	80	1	40
25/09/2018	8	0,6	80	1	40
25/09/2018	9	0,7	80	1	40
25/09/2018	10	0,8	80	1	40
27/11/2018	11	0,9	80	1	40
27/11/2018	12	1	80	1	40
26/11/2018	13	0,5	50	1	40
26/09/2018	14	0,6	50	1	40
26/09/2018	15	0,7	50	1	40
26/09/2018	16	0,8	50	1	40
26/09/2018	17	0,9	50	1	40
26/09/2018	18	1	50	1	40
10/10/2018	19	0,5	20	1	40
28/11/2018	20	0,6	20	1	40
26/09/2018	21	0,7	20	1	40
26/09/2018	22	0,8	20	1	40
26/09/2018	23	0,9	20	1	40
28/11/2018	24	1	20	1	40
10/10/2018	25	0,5	0	1	40
26/11/2018	26	0,6	0	1	40
27/09/2018	27	0,7	0	1	40

27/09/2018	28	0,8	0	1	40
27/09/2018	29	0,9	0	1	40
27/09/2018	30	1	0	1	40
05/11/2018	31	0,7	100	2	40
27/11/2018	32	0,7	100	3	40
01/10/2018	33	0,7	80	2	40
26/11/2018	34	0,7	80	3	40
26/11/2018	35	0,7	50	2	40
26/11/2018	36	0,7	50	3	40
02/10/2018	37	0,7	20	2	40
26/11/2018	38	0,7	20	3	40
02/10/2018	39	0,7	0	2	40
02/10/2018	40	0,7	0	3	40
02/10/2018	41	0,7	100	1	100
17/10/2018	42	0,7	100	2	100
17/10/2018	43	0,7	100	3	100
31/10/2018	44	0,7	80	1	100
04/10/2018	45	0,7	80	2	100
29/11/2018	46	0,7	80	3	100
05/10/2018	47	0,7	50	1	100
05/10/2018	48	0,7	50	2	100
03/12/2018	49	0,7	50	3	100
28/11/2018	50	0,7	20	1	100
08/10/2018	51	0,7	20	2	100
29/11/2018	52	0,7	20	3	100
08/10/2018	53	0,7	0	1	100
08/10/2018	54	0,7	0	2	100
08/10/2018	55	0,7	0	3	100

ANEXO 2: Parámetros reales de los experimentos

Tabla 13. Experimentos realizados con parámetros reales.

FECHA	Fr	%H ₂	P [bar]	T ^a REAL [°C]	P _{residual} [bar]	P _{CH₄} REAL [bar]	P _{H₂} REAL [bar]	P _{final} REAL [bar]	%H ₂ REAL	%CH ₄ REAL	Fr REAL
12/06/2018	0,5	100	1	43,0	-	-	-	1,000	100	0	0,50
12/06/2018	0,6	100	1	42,0	-	-	-	1,000	100	0	0,60
12/06/2018	0,7	100	1	43,0	-	-	-	1,000	100	0	0,70
12/06/2018	0,8	100	1	42,0	-	-	-	1,000	100	0	0,80
12/06/2018	0,9	100	1	43,0	-	-	-	1,000	100	0	0,90
12/06/2018	1	100	1	43,0	-	-	-	1,000	100	0	1,00
25/09/2018	0,5	80	1	39,1	0,099	0,122	0,217	1,011	81	19	0,49
25/09/2018	0,6	80	1	40,0	0,095	0,122	0,234	1,018	81	19	0,58
25/09/2018	0,7	80	1	41,0	0,095	0,126	0,249	0,999	80	20	0,69
25/09/2018	0,8	80	1	41,4	0,094	0,129	0,268	1,011	80	20	0,79
25/09/2018	0,9	80	1	41,8	0,098	0,137	0,292	1,004	80	20	0,90
25/09/2018	1	80	1	41,4	0,094	0,136	0,306	1,015	80	20	0,98
25/09/2018	0,5	50	1	41,5	0,099	0,138	0,179	1,027	51	49	0,48
26/09/2018	0,6	50	1	38,9	0,097	0,143	0,190	1,003	51	49	0,60
26/09/2018	0,7	50	1	40,0	0,097	0,150	0,209	0,979	53	47	0,70
26/09/2018	0,8	50	1	39,9	0,096	0,154	0,216	0,999	52	48	0,74
26/09/2018	0,9	50	1	40,0	0,092	0,157	0,223	1,010	50	50	0,89
26/09/2018	1	50	1	41,0	0,091	0,162	0,239	0,998	52	48	0,98
10/10/2018	0,5	20	1	42,0	0,094	0,142	0,157	1,006	24	76	0,48
26/09/2018	0,6	20	1	41,3	0,094	0,150	0,167	0,996	23	77	0,59
31/10/2018	0,6	20	1	45,3	0,087	0,146	0,163	1,000	22	78	0,59
26/09/2018	0,7	20	1	41,9	0,094	0,158	0,177	0,980	23	77	0,70
26/09/2018	0,8	20	1	41,7	0,092	0,163	0,186	0,974	24	76	0,80
26/09/2018	0,9	20	1	41,3	0,098	0,177	0,201	1,010	23	77	0,87

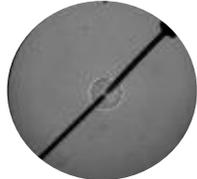
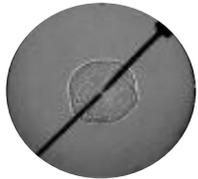
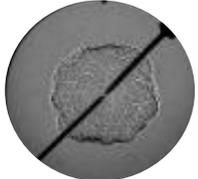
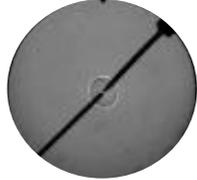
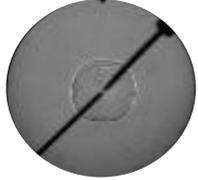
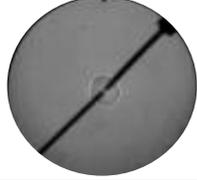
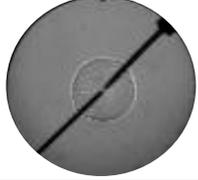
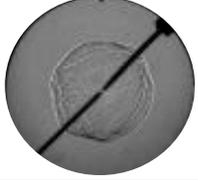
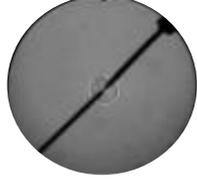
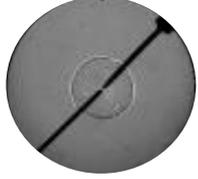
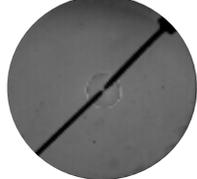
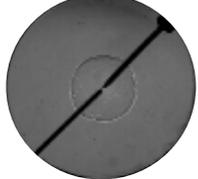
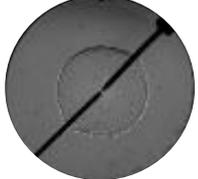
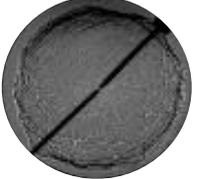
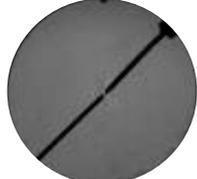
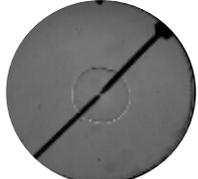
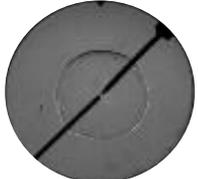
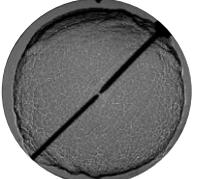
26/09/2018	1	20	1	41,9	0,097	0,185	0,207	1,017	20	80	0,98
10/10/2018	0,5	0	1	40,5	0,092	0,141	0,141	1,004	0	100	0,50
27/09/2018	0,6	0	1	39,6	0,097	0,158	0,158	1,009	0	100	0,60
30/10/2018	0,6	0	1	41,2	0,086	0,147	0,147	1,007	0	100	0,60
27/09/2018	0,7	0	1	40,2	0,096	0,165	0,165	0,998	0	100	0,70
27/09/2018	0,8	0	1	40,6	0,095	0,173	0,173	1,020	0	100	0,78
27/09/2018	0,9	0	1	41,7	0,097	0,184	0,184	1,002	0	100	0,90
27/09/2018	1	0	1	42,0	0,093	0,189	0,189	1,016	0	100	0,98
01/10/2018	0,7	100	2	40,0	0,096	0,096	0,553	2,002	100	0	0,70
01/10/2018	0,7	100	3	42,6	0,094	0,094	0,783	3,002	100	0	0,70
01/10/2018	0,7	80	2	40,5	0,097	0,160	0,411	2,017	80	20	0,70
01/10/2018	0,7	80	3	40,8	0,095	0,187	0,571	3,020	81	19	0,69
01/10/2018	0,7	50	2	42,0	0,097	0,203	0,309	2,012	50	50	0,69
01/10/2018	0,7	50	3	42,0	0,095	0,253	0,410	3,006	50	50	0,70
02/10/2018	0,7	20	2	39,2	0,097	0,225	0,255	2,017	19	81	0,70
02/10/2018	0,7	20	3	38,6	0,097	0,287	0,349	3,002	25	75	0,67
06/11/2018	0,7	20	3	40,0	0,095	0,287	0,334	3,020	20	80	0,70
02/10/2018	0,7	0	2	39,8	0,093	0,232	0,232	2,005	0	100	0,70
02/10/2018	0,7	0	3	41,0	0,093	0,298	0,298	3,000	0	100	0,70
02/10/2018	0,7	100	1	100,7	0,097	0,097	0,324	1,017	100	0	0,69
02/10/2018	0,7	100	2	100,2	0,092	0,092	0,563	2,020	100	0	0,70
17/10/2018	0,7	100	2	107,2	0,086	0,086	0,545	2,005	100	0	0,70
04/10/2018	0,7	100	3	100,2	0,095	0,095	0,781	3,017	100	0	0,70
17/10/2018	0,7	100	3	106,0	0,099	0,099	0,784	2,997	100	0	0,70
04/10/2018	0,7	80	1	104,4	0,093	0,123	0,248	1,008	81	19	0,69
23/10/2018	0,7	80	1	100,0	0,094	0,125	0,249	1,007	80	20	0,69
31/10/2018	0,7	80	1	102,0	0,091	0,123	0,246	1,001	79	21	0,71
04/10/2018	0,7	80	2	105,7	0,094	0,158	0,412	2,009	80	20	0,70

04/10/2018	0,7	80	3	104,2	0,092	0,186	0,561	3,011	80	20	0,70
05/10/2018	0,7	50	1	106,6	0,098	0,151	0,205	1,020	50	50	0,68
05/10/2018	0,7	50	2	105,2	0,088	0,193	0,303	2,001	51	49	0,69
05/10/2018	0,7	50	3	107,5	0,094	0,251	0,410	3,030	50	50	0,69
05/10/2018	0,7	20	1	105,5	0,092	0,156	0,172	1,040	20	80	0,67
23/10/2018	0,7	20	1	97,0	0,095	0,161	0,175	1,012	17,5	82,5	0,71
31/10/2018	0,7	20	1	91,9	0,088	0,153	0,171	1,001	22	78	0,69
08/10/2018	0,7	20	2	98,2	0,094	0,222	0,254	2,028	20	80	0,69
08/10/2018	0,7	20	3	101,4	0,092	0,283	0,336	3,005	22	78	0,69
08/10/2018	0,7	0	1	105,6	0,094	0,162	0,162	1,002	0	100	0,70
08/10/2018	0,7	0	2	100,2	0,092	0,231	0,231	2,006	0	100	0,70
08/10/2018	0,7	0	3	102,9	0,094	0,299	0,299	3,020	0	100	0,70
06/11/2018	0,7	20	3	101,9	0,093	0,284	0,335	3,008	21	79	0,69
06/11/2018	0,7	50	2	39,0	0,089	0,196	0,305	2,018	50	50	0,69
06/11/2018	0,7	50	3	42,0	0,092	0,250	0,413	3,008	51	49	0,69
05/11/2018	0,7	80	3	40,2	0,095	0,188	0,563	3,010	80	20	0,70
06/11/2018	0,7	80	3	98,0	0,098	0,192	0,568	3,014	80	20	0,70
05/11/2018	0,7	100	2	42,0	0,095	0,095	0,560	2,012	100	0	0,70
05/11/2018	0,7	100	3	41,2	0,095	0,095	0,776	3,009	100	0	0,70
06/11/2018	0,7	50	3	100,1	0,094	0,252	0,415	3,000	51	49	0,70
26/11/2018	0,5	50	1	38,6	0,089	0,128	0,166	1,020	49	51	0,49
26/11/2018	0,6	0	1	38,0	0,099	0,158	0,158	1,025	0	100	0,58
28/11/2018	0,7	20	1	100,0	0,090	0,154	0,170	1,022	20	80	0,68
28/11/2018	0,7	50	3	96,0	0,094	0,253	0,427	3,041	52	48	0,68
29/11/2018	0,7	80	3	100,0	0,091	0,185	0,557	3,020	80	20	0,70
29/11/2018	0,7	20	3	100,0	0,090	0,282	0,329	3,020	20	80	0,70
26/11/2018	0,7	20	3	40,9	0,089	0,281	0,328	3,008	20	80	0,70
26/11/2018	0,7	50	3	41,9	0,092	0,252	0,409	3,019	50	50	0,70

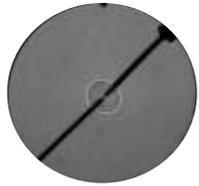
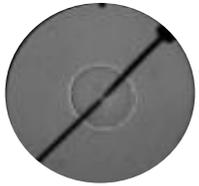
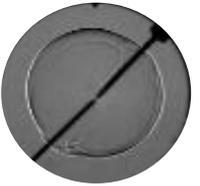
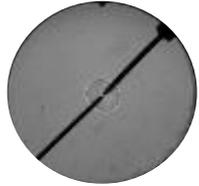
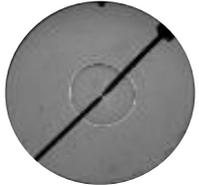
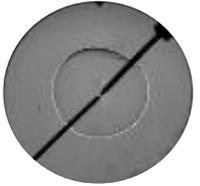
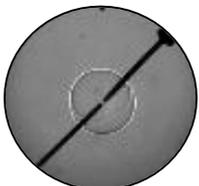
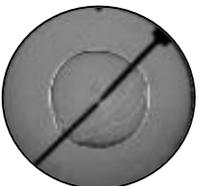
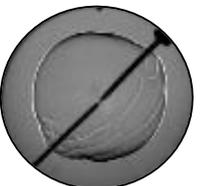
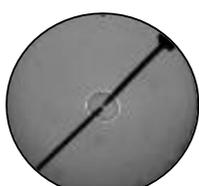
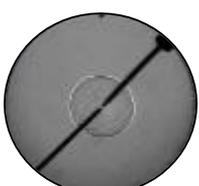
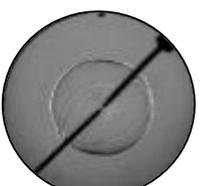
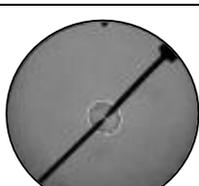
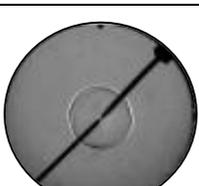
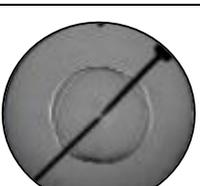
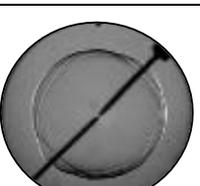
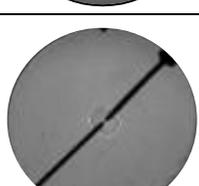
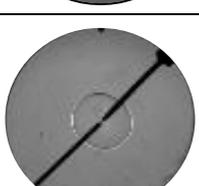
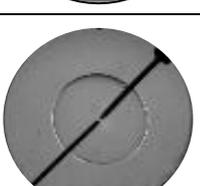
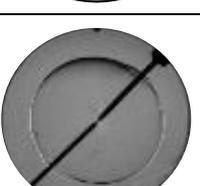
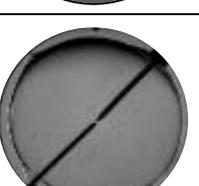
26/11/2018	0,7	50	2	42,1	0,089	0,195	0,303	2,014	50	50	0,69
26/11/2018	0,7	80	3	41,0	0,088	0,182	0,556	3,014	80	20	0,70
27/11/2018	0,7	100	3	37,0	0,091	0,091	0,781	3,022	100	0	0,70
27/11/2018	0,9	80	1	40,0	0,086	0,124	0,280	1,001	80	20	0,90
27/11/2018	1	80	1	40,0	0,086	0,130	0,305	1,001	80	20	1,02
28/11/2018	0,6	20	1	40,1	0,090	0,146	0,167	0,970	27	73	0,58
28/11/2018	1	20	1	41,9	0,088	0,177	0,198	1,019	19	81	0,99
03/12/2018	0,7	50	3	100,0	0,087	0,245	0,407	3,020	51	49	0,69

ANEXO 3: Matrices celulares

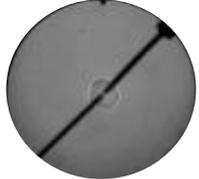
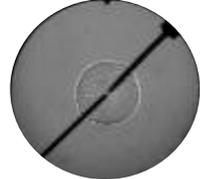
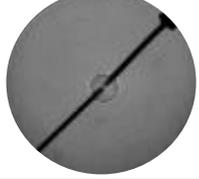
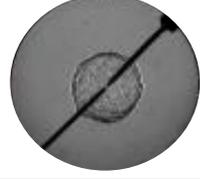
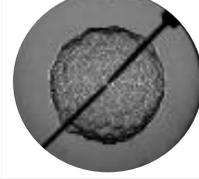
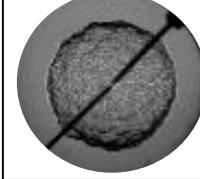
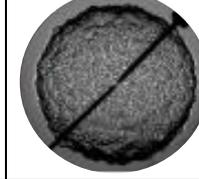
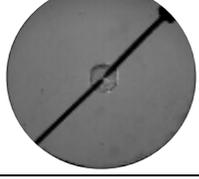
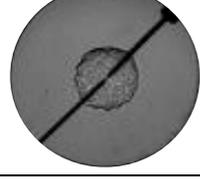
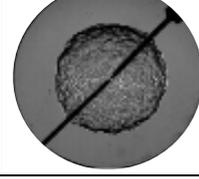
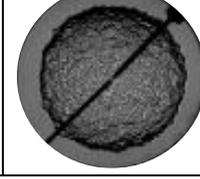
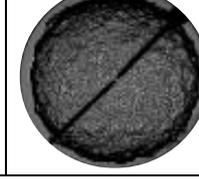
Tabla 14. Morfología del frente de llama para una mezcla 80% hidrógeno-20%metano-aire-
 $P=1\text{bar}-T=40^\circ\text{C}-Fr=0.5-1$.

Fr/R	1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm
0.5					
0.6					
0.7					
0.8					
0.9					
1.0					

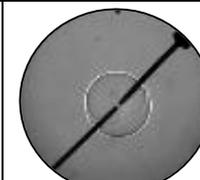
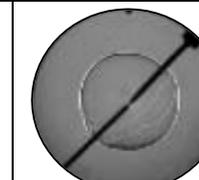
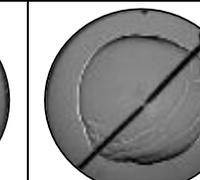
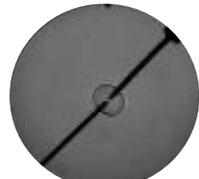
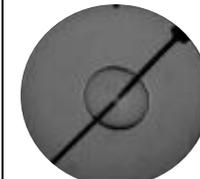
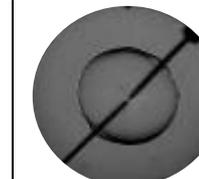
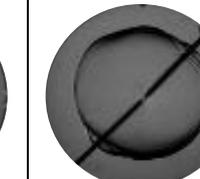
**Tabla 15. Morfología del frente de llama para una mezcla 20% hidrógeno-80%metano-aire-
P=1bar-T=40°C-Fr=0.5-1.**

Fr/R	1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm
0.5					
0.6					
0.7					
0.8					
0.9					
1.0					

**Tabla 16. Morfología del frente de llama para una mezcla 80%hidrógeno-20%metano-aire-
Fr0.7-T=40°C-P=1-3 bar.**

P/R	1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm
1 bar					
2 bar					
3 bar					

**Tabla 17. Morfología del frente de llama para una mezcla 20%hidrógeno-80%metano-aire-
Fr0.7-T=40°C-P=1-3 bar.**

P/R	1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm
1 bar					
2 bar					
3 bar	